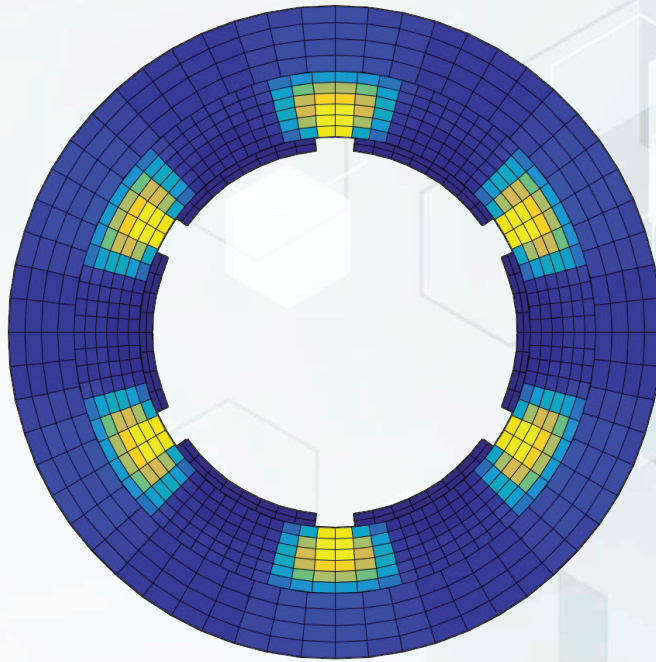


ANA POPA

Mașini electrice



Manualul
Studentului



Editura **POLITEHNICA**

Colecția "MANUALUL STUDENTULUI"

MAȘINI ELECTRICE

Într-o lume „grăbită“ Manualul de față este o lucrare modernă, extrem de practică, ce poate asigura asimilarea rapidă, dar cu evaluări cantitative solide, a cunoștințelor de bază în mașini electrice, ajunse recent o industrie mondială de vârf, grație electronicii de putere cu reglaj digital a poziției, turației, cuplului în motoare electrice și a puterii active și reactive în generatoare electrice cu aplicații în toate industriile de la „energii regenerabile“, la transport, robotică, aplicații rezidențiale și info-gadgets.

Referent științific: Academician Ion BOLDEA

Cartea sintetizează cunoștințele esențiale în domeniul mașinilor electrice pe care orice student în inginerie electrică trebuie să și le însușească. Partea teoretică prezintă descrierea fenomenelor, legile fizice, teoremele și formulele legate de tema abordată. Partea experimentală prezintă clar scopul urmărit, schemele electrice ce urmează a fi realizate, mărimile măsurate, modul de desfășurare a lucrării, modul de calcul a parametrilor. Secțiunea dedicată problemelor prezintă în detaliu modul de rezolvare a acestora. În concluzie, lucrarea este valoroasă și deosebit de utilă studenților care urmează disciplina de „Mașini electrice“.

Referent științific: Prof. dr. ing. Lucian TUTELEA

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României

POPA, ANA-ADELA

Mașini electrice/ Ana-Adela Popa. – Timișoara : Editura Politehnica, 2020

Conține bibliografie

ISBN 978-606-35-0355-9

ANA-ADELA POPA

MAȘINI ELECTRICE

Colecția "MANUALUL STUDENTULUI"



EDITURA POLITEHNICA
TIMIȘOARA - 2020

Copyright © Editura Politehnica, 2020

Nicio parte din această lucrare nu poate fi reprodusă, stocată sau transmisă prin indiferent ce formă, fără acordul prealabil scris al Editurii Politehnica.

EDITURA POLITEHNICA

Bd. Vasile Pârvan nr. 2B
300223 Timișoara, România

Tel./Fax. 0256/404.677

E-mail: editura@upt.ro

Consilier editorial: Prof. dr. ing. Sabin IONEL

Redactor: Claudia MIHALI

Bun de imprimat: 04.05.2020

Coli de tipar: 10

C.Z.U. 621

ISBN 978-606-35-0355-9

Tiparul executat sub comanda nr. 6
la Tipografia Universității Politehnica Timișoara

Prefață

Lucrarea de față se adresează în primul rând studenților de la Facultatea de Electrotehnică și Electroenergetică, dar și studenților de la alte specializări și cuprinde descrierile celor mai importante teme studiate pe parcursul a două semestre, la disciplina „Mașini electrice”.

Manualul este alcătuit din patru capitole:

Capitolul 1: „Transformatorul electric”

Capitolul 2: „Mașina de curent continuu”

Capitolul 3: „Mașina de inducție (Asincronă)”

Capitolul 4: „Mașina sincronă”

Fiecare capitol abordează, pe parcursul a șase secțiuni distincte, noțiunile teoretice de bază, problemele specifice care apar, dar și regimurile de funcționare ce caracterizează atât transformatorul, cât și fiecare mașină electrică, în parte. Regimurile de funcționare ale mașinilor vor fi tratate în cadrul orelor practice de laborator, studenții fiind îndrumați să utilizeze hârtia milimetrică sau programe specializate de achiziție și prelucrare a datelor pentru realizarea graficelor aferente.

Deși manualul este conceput ca material de informare de sine stătător, pentru studenți, aceștia sunt obligați să consulte bibliografia indicată de cadrele didactice. În interiorul secțiunilor ce au ca temă *descrierea în general a transformatorului și a mașinilor electrice*, studenții pot găsi trimitere la mai multe link-uri ce au rolul de a favoriza înțelegerea fenomenelor care stau la baza funcționării mașinilor electrice, precum și însușirea modului de construcție și a componentelor acestora.

Autoarea aduce mulțumiri referenților pentru atenția cu care au studiat materialul și pentru observațiile și sugestiile propuse pentru îmbunătățirea lui. Ea este conștientă că această lucrare poate fi îmbunătățită și adresează cititorilor: studenți și cadre didactice, îndemnul colegial de a le transmite observații critice și propuneri constructive.

Autoarea

1. TRANSFORMATORUL ELECTRIC

1.1 CIRCUITE MAGNETICE

În cadrul secțiunii se urmărește însușirea noțiunilor generale, de bază ale circuitelor magnetice, legile fizice care le caracterizează, precum și caracteristicile materialelor feromagnetice din care sunt obținute practic.

Atât în cazul transformatoarelor, cât și în cazul mașinilor electrice se utilizează materiale magnetice pentru configurarea adecvată a câmpurilor magnetice (mediu de stocare pentru transferul energiei).

Materialele magnetice determină gabaritul motoarelor și introduc limitări din cauza saturației magnetice și a pierderilor.

1.1.1 NOȚIUNI TEORETICE

Bobina cu miez feromagnetic

Pentru a descrie câmpul magnetic prezentăm în continuare *ecuațiile lui Maxwell* [1.1].

Legea circuitului magnetic (Ampere) - leagă curentul electric de câmpul magnetic:

$$\iint_S \mathbf{J} d\mathbf{S} = \oint_{\Gamma} \mathbf{H} d\mathbf{l} \quad (1.1)$$

unde $\mathbf{J}$ [A/m²] - intensitatea curentului de conducție, $\mathbf{H}$ [A/m] - intensitatea câmpului magnetic.

Conform ecuației (1.1) spunem că integrala intensității câmpului magnetic $\mathbf{H}$ de-a lungul unei linii închise Γ , care înconjoară o suprafață deschisă S , prin care trece densitatea curentului de conducție $\mathbf{J}$ este egală cu amperspirele totale închise de Γ (sau suma solenațiilor care înconjoară traseul).

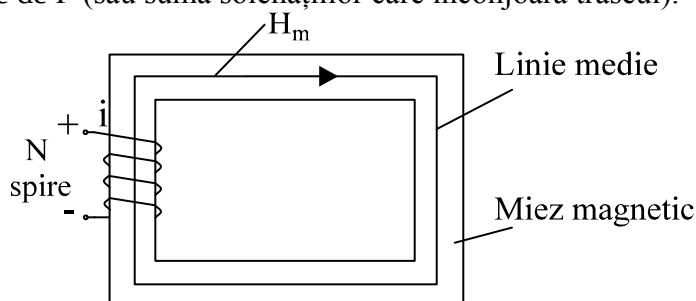


Fig. 1.1 Circuit magnetic simplu [1.2]

În Fig. 1.1 este exemplificat un circuit magnetic simplu care are secțiunea și lungimea liniilor de câmp constante, prin urmare, inducția magnetică B poate fi considerată constantă pe secțiune și în general în orice punct din material.

Ecuția (1.1) poate fi scrisă și sub forma:

$$N \cdot I = H_m \cdot l_m \quad (1.2)$$

În cazul transformatoarelor, în jurul miezurilor magnetice închise, se plasează bobine (Fig. 1.1), pe când mașinile electrice sunt prevăzute cu un spațiu de aer între părțile magnetice, spațiu ce poartă numele de întrefier, δ (Fig. 1.2).

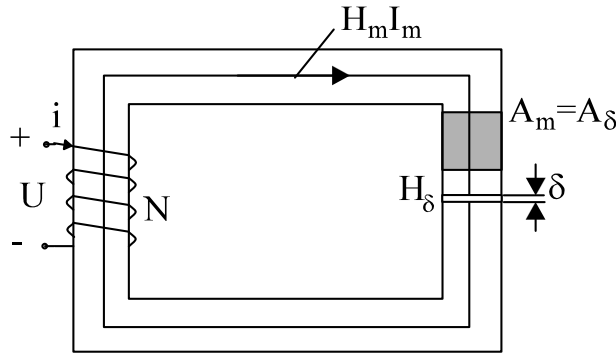


Fig. 1.2 Circuit magnetic cu întrefier [1.2]

La circuitul magnetic prevăzut cu întrefier, pentru ecuația (1.1) se obține:

$$N \cdot i = H_m \cdot l_m + H_\delta \cdot \delta \quad (1.3)$$

Legea inducției electromagnetice – este cea de-a doua lege a lui Maxwell, care constă în apariția tensiunii electromotoare induse de un flux magnetic, variabil în timp (1.4).

$$\oint_{\Gamma} E dl = - \iint_S \frac{\partial B}{\partial t} dS \quad (1.4)$$

Conform ecuației (1.4) putem scrie enunțul legii și anume: *tensiunea electromotoare indusă* pe o curbă închisă Γ , este egală cu *minus viteza de variație în timp a fluxului magnetic* prin orice suprafață deschisă, mărginită de curba închisă Γ .

Aplicând legea pentru bobina cu miez de fier din Fig. 1.2, vom scrie :

$$U_{eE} = -N \frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (1.5)$$

unde U_{eE} – tensiunea electromotoare indusă, ϕ – flux fascicular,

$\Psi = N \cdot \phi$ – fluxul total, N – nr spire.

Legea conservării fluxului magnetic –este a treia lege a lui Maxwell și arată faptul că într-o suprafață închisă, numărul de linii de câmp care intră este egal cu numărul de linii care ies.

Pe baza legii fluxului magnetic rezultă:

$$\Phi = \int \mathbf{B} d\mathbf{A} = B_m \cdot A_m = B_\delta \cdot A_\delta \quad (1.6)$$

Permeabilitățile magnetice ale materialelor feromagnetice sunt descrise prin intermediul curbei B-H:

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad (1.7)$$

unde μ - permeabilitatea magnetică, μ_0 - permeabilitatea magnetică a vidului ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m)

Folosind relațiile (1.6) și (1.7), în ecuația (1.3) obținem:

$$N \cdot i = \Phi \cdot [R_{mFe} + R_{m\delta}]; R_{mFe} = \frac{l_m}{\mu \cdot S_m}; R_{m\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot S_\delta} \quad (1.8)$$

La amperspire date (Ni), ecuațiile (1.7), se pot rezolva numai iterativ deoarece permeabilitatea miezului magnetic μ variază cu inducția magnetică B_m .

Pentru a înțelege mai ușor fenomenele câmpului electromagnetic, precum și mărimile și legile care îl guvernează, propunem vizionarea următorului material Fig. 1.3.

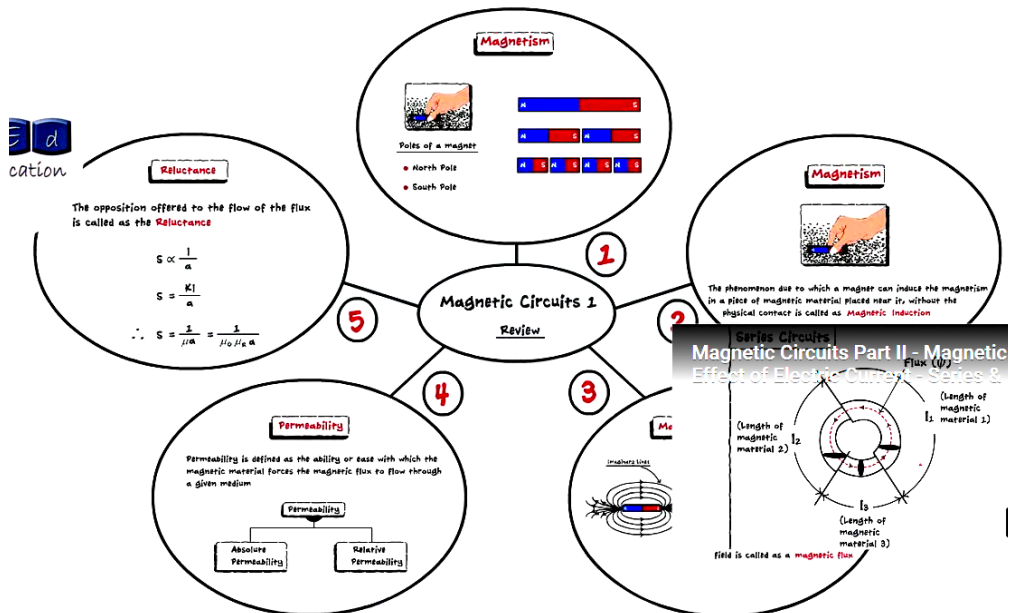


Fig. 1.3 Descrierea circuitelor magnetice (<https://www.youtube.com/watch?v=2ZwQZgyYkIE>)

1.1.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE

Problema 1.1 Circuitul magnetic din Fig. 1.4 are dimensiunile: $\delta = 5 \cdot 10^{-4}$ m; $A_m = A_\delta = 9 \cdot 10^{-4}$ m²; $l_m = 0.3$ m; $N = 500$ spire; $\mu_r = 5000$ H/m pentru fier.

Să se calculeze:

- curentul continuu i_{cc} pentru inducția magnetică $B_m = 1$ T;
- fluxul fascicular ϕ și fluxul total $\Psi = N \cdot \phi$.
- dacă rezistența electrică a bobinei $R_b = 25 \Omega$ se cere tensiunea continuă de alimentare U_{cc} a acesteia la i_{cc} de la a) [1.2].

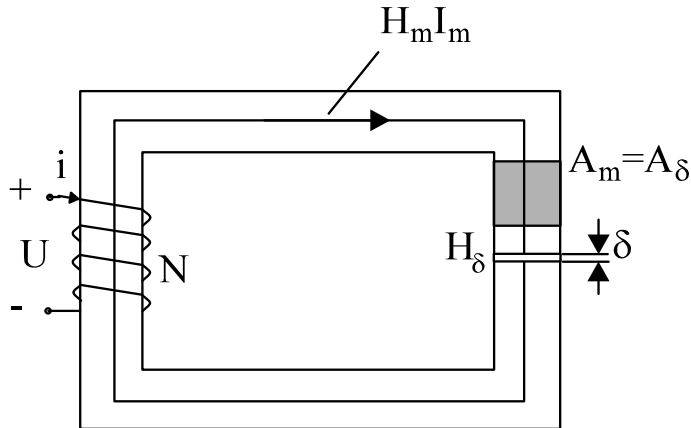


Fig. 1.4 Circuit magnetic cu întrefier

Soluție:

Din ecuația (1.8) se obține curentul i_{cc} :

$$i_{cc} = \frac{B_m}{\mu_0 \cdot N} \left(\frac{l_m}{\mu_r} + \delta \right) = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 500} \left(\frac{0.3}{5000} + 5 \cdot 10^{-4} \right) = 0.89 \text{ A}$$

Fluxul fascicular se obține din ecuația (1.6):

$$\Phi = B_m \cdot A_m = 1 \cdot 9 \cdot 10^{-4} = 9 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$$

Prin urmare, fluxul total Ψ este :

$$\Psi = N \cdot \Phi = 500 \cdot 9 \cdot 10^{-4} = 0.45 \text{ Wb}$$

$$U_{cc} = R_b \cdot i_{cc} = 25 \cdot 0.89 = 22.25 \text{ V}_{cc}$$

Relațiile de calcul mai sus utilizate simplifică mult fenomenele.

Să observăm numai faptul că liniile de câmp evazează în întrefier (Fig. 1.5) și deci $S_\delta > S_m$.

Observație: Circuitele magnetice mai complexe se pot rezolva făcând uz de variabile: $N \cdot i$ pentru tensiune, ϕ în loc de curent și R_m pentru rezistența electrică.

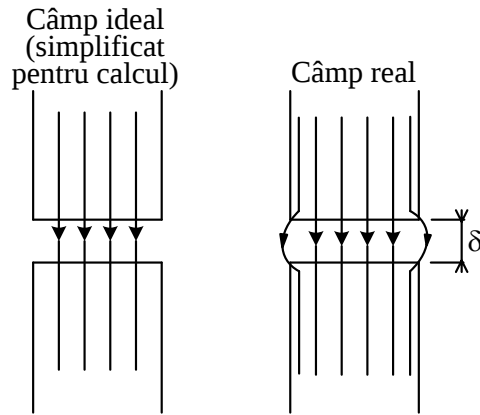


Fig. 1.5 Câmpul în întrefier

În curent continuu i_{cc} bobina cu miez de fier este alimentată la tensiunea U_{cc} dată de legea lui Ohm ($U_{cc} = i_{cc} \cdot R_b$), unde R_b este rezistența electrică a acesteia; spre exemplu circuitul magnetic al unui transformator trifazat, în 3 coloane, în gol (Fig. 1.6).

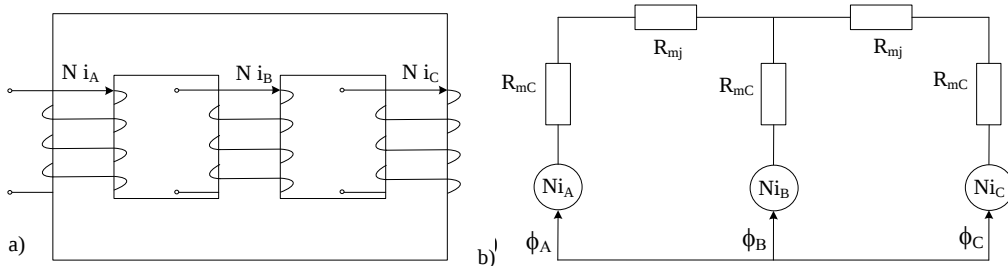


Fig. 1.6 Transformator trifazat cu trei coloane în gol, a); circuitul magnetic, b)

Problema 1.2 Pentru circuitul din Fig. 1.1 se cere să se calculeze:

- tensiunea indusă, U_{eE} în bobină la $B = 1 \cdot \sin(314 \cdot t) \text{ Wb/m}^2$;
- inductanța principală, L ;
- energia magnetică, W_m .
- dacă se neglijează rezistența, care este tensiunea de alimentare în c.a. a bobinei, $U_{ac}(t)$,

Soluție:

Fluxul total Ψ determinat în exemplul anterior, de 0.45 Wb la $B=1\text{T}$ se păstrează ca amplitudinea fluxului: $\Psi(t) = 0.45 \cdot \sin(314 \cdot t)$.

Tensiunea indusă U_{eE} se obține din (1.5):

$$U_{eE} = -\frac{d\psi}{dt} = -0.45 \cdot 314 \cdot \cos(314 \cdot t) = -141.3 \cdot \cos(314 \cdot t)$$

Inductanța bobinei L devine: $L = \frac{\psi_m}{i_m} = \frac{0.45}{0.89} = 0.51 \text{H}$

unde ψ_m – amplitudinea fluxului; i_m – amplitudinea curentului;

Energia magnetică înmagazinată în câmpul magnetic are formula:

$$W_m = \frac{1}{2} \iiint_v H B dV = L * \frac{i^2}{2} = \int_0^\psi i d\Psi, \text{ de unde rezultă valoarea maximă a energiei}$$

magnetice:

$$W_m = L * \frac{i^2}{2} = 0.2 \text{J}$$

$U_{ac}(t)$ este egală cu tensiunea autoindusă:

$-U_{eE} = 141.3 * \cos(314 * t)$, iar valoarea efectivă a $U_{ac} = 141.3 / \sqrt{2}$ (U_{cc} din problema 1.1) [1.2].

Problema 1.3 Pentru un circuit magnetic cu întrefier, se dau dimensiunile:

$\delta = 7 * 10^{-4} \text{ m}$; $A_m = A_\delta = 50 * 10^{-5} \text{ m}^2$; $l_m = 0.8 \text{ m}$; $N = 600$ spire; $\mu_r = 5000 \text{ H/m}$ pentru fier.

Să se calculeze:

- curentul continuu i_{cc} pentru inducția magnetică $B_m = 1 \text{T}$;
- fluxul fascicular ϕ și fluxul total $\Psi = N * \phi$.
- dacă rezistența electrică a bobinei $R_b = 35 \Omega$ se cere tensiunea continuă de alimentare U_{cc} a acesteia la i_{cc} de la a) [1.2].

1.2 CONSTRUCȚIA TRANSFORMATORULUI ELECTRIC ȘI NOȚIUNI INTRODUCTIVE

În cadrul secțiunii se urmărește însușirea noțiunilor de transformator precum și a construcției și a caracteristicilor acestuia.

1.2.1 NOȚIUNI TEORETICE

Transformatorul electric este un aparat electric static, fără părți în mișcare. El funcționează pe baza legii inducției electromagnetice și este utilizat pentru conversia energiei de c.a., cu valoarea U_1, I_1 pentru tensiunea și respectiv curentul de intrare, în energie electrică de c.a., sub o altă tensiune U_2 și alt curent I_2 . Această conversie $U_1, I_1 \rightarrow U_2, I_2$ are loc la o frecvență $f_2 = f_1$.

Transformatoarele electrice sunt necesare pentru a asigura transportul și distribuția energiei produse în centralele electrice la consumatori, atât în condiții sigure cât și avantajoase din punct de vedere tehnic.

Pentru a favoriza acest lucru, este necesar transferul energiei la un curent cât mai redus și o tensiune cât mai mare, având în vedere faptul că tensiunea este limitată superior de rigiditatea dielectrică a materialelor electroizolatoare utilizate, creșterea distanțelor minime de izolație, ionizarea aerului în jurul conductoarelor aflate la foarte mare tensiune (efect Corona). Așadar, în apropierea centralelor electrice se prevăd stații de transformare echipate cu transformatoare urcătoare de tensiune. La capătul liniilor de transport rețelele electrice locale corespunzătoare localităților sunt dimensionate pentru consumatori industriali, casnici, instalații de iluminat, etc. pentru alimentarea cărora e necesară folosirea unor transformatoare coborâtoare de tensiune.

Transformatoarele electrice se folosesc și în structura unor utilaje electrice sau în ateliere industriale ori în laboratoare de acționări, spre exemplu pentru a porni motoare cu tensiune mai mică decât cea a rețelei sau pentru a varia tensiunea de alimentare.

Având în vedere exemplele expuse mai sus, putem afirma faptul că transformatoarele sunt elemente primordiale, cu o răspândire deosebit de mare, iar gama de puteri pentru care se construiesc este deosebit de mare și în corespondență cu puterile vehiculate în cadrul sistemului electroenergetic, al instalațiilor electrice de distribuție, etc. [1.3]. Prin urmare, ținând cont atât de numărul de faze, cât și de domeniul de puteri, transformatoarele se împart în transformatoare monofazate și trifazate.

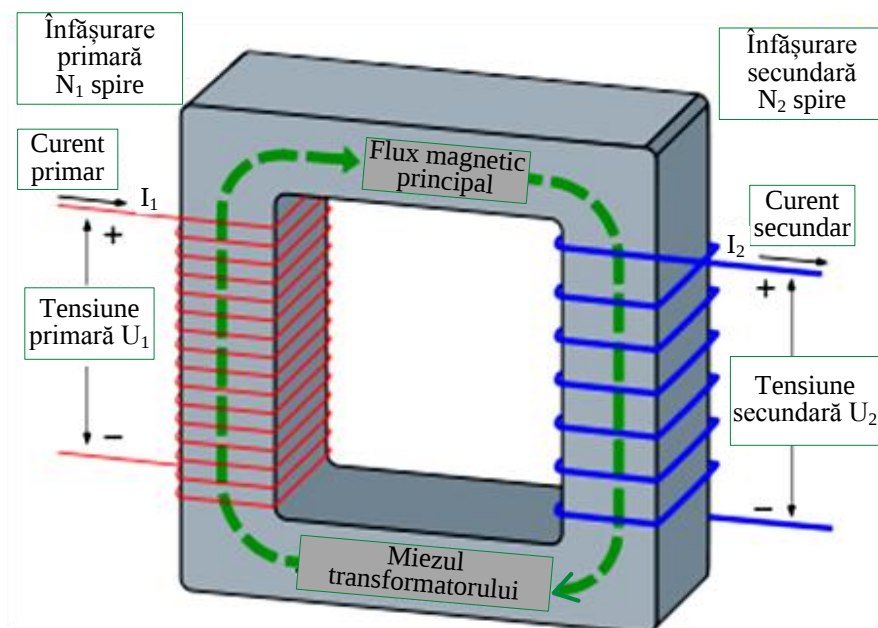


Fig. 1.7 Transformator monofazat [2.2]



Fig. 1.8 Transformator trifazat cu schema de conexiuni Yy a fazelor, cu miez în 3 coloane, nesimetric

Înfășurarea primară este înfășurarea pe care o alimentăm și care creează câmpul magnetic inductor, iar în literatura de specialitate, mărimile care o definesc sunt notate cu indicele „1” (U_{1n} , U_{e1} , I_{1n} , N_1 , etc.).

Înfășurarea secundară este înfășurarea indusă a transformatorului, care furnizează energie electrică la valori diferite pentru tensiune și curent, valori notate cu indicele „2” (U_{2n} , U_{e2} , I_{2n} , N_2 , etc.).

Transferul de energie între cele două înfășurări are loc pe baza inducției electromagnetice astfel: curentul care străbate înfășurarea primară creează câmp în miezul magnetic al transformatorului, iar în înfășurarea secundară se induce astfel tensiune alternativă.

Dacă U_{2n} este mai mică decât tensiunea din primarul transformatorului, acesta din urmă este coborâtor de tensiune, iar dacă U_{2n} este mai mare decât tensiunea U_{1n} , transformatorul este ridicător de tensiune.

Înfășurarea care lucrează sub tensiunea mai mare are un număr mai ridicat de spire pe fază și reprezintă înfășurarea de înaltă tensiune a transformatorului, pe când, înfășurarea care lucrează sub tensiune mai mică are un număr mai mic de spire pe fază și reprezintă înfășurarea de joasă tensiune.

Mărimea ce caracterizează transformatoarele este raportul de transformare, k (1.9), definit ca raportul dintre tensiunile electromotoare pe fază:

$$k = \frac{U_{e_f.t.}}{U_{e_j.t.}} \quad (1.9)$$

1.2.2 CONSTRUCȚIA TRANSFORMATORULUI ELECTRIC

Principalele elemente constructive ale transformatorului sunt *miezul feromagnetic* și cele *două înfășurări*: de înaltă și de joasă tensiune.

Miezul în coloană la transformatoarele monofazate se realizează sub forma unui cadru dreptunghiular, pe care, pe două dintre laturile opuse (*coloanele transformatorului*) se înfășoară spirele celor două înfășurări (Fig. 1.7).

La *transformatoarele trifazate*, miezul are trei coloane, pe fiecare coloană fiind înfășurate spirele celor două înfășurări (Fig. 1.8). Fazele corespunzătoare aceleiași înfășurări se pot lega în conexiune stea, stea-triunghi sau zig-zag.

Miezul în manta, la transformatorul monofazat este alcătuit din trei coloane, ambele înfășurări fiind plasate pe coloana din mijloc a transformatorului, în timp ce coloanele exterioare ale miezului sunt lăsate libere și servesc doar la închiderea liniilor de câmp magnetic (Fig. 1.9). Dacă transformatorul este trifazat, atunci miezul are cinci coloane, dintre care, cele exterioare nu sunt prevăzute cu înfășurări.

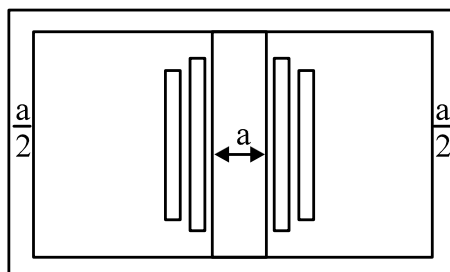


Fig. 1.9 Miez în manta (Shell) [1.2]

Avantajul miezurilor în coloană este reducerea consumului de material magnetic, pe când fluxul magnetic se închide mai simetric dacă miezul este realizat în manta.

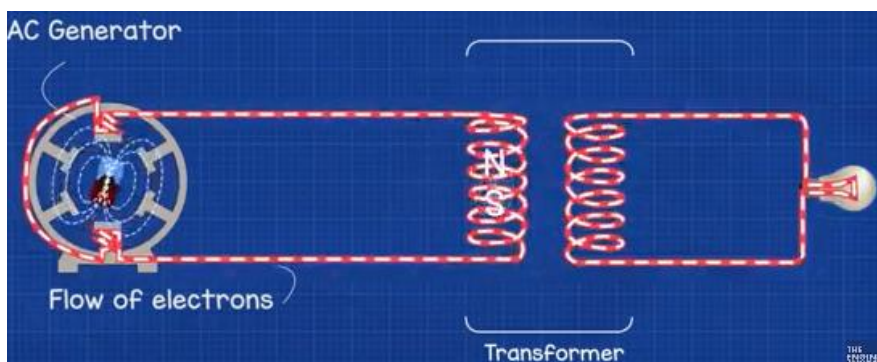


Fig. 1.10 Noțiuni generale despre transformator (<https://www.youtube.com/watch?v=UchitHGF4n8>)

Cu toate acestea, transformatoarele trifazate de putere se execută cu miez în coloană, reducerea materialului magnetic utilizat pentru construcția miezului fiind mai importantă decât nesimetria repartiției fluxurilor. În vederea reducerii pierderilor din miezul feromagnetic, miezurile se execută sub formă de pachete de tole electrotehnice de grosime mică, izolate între ele cu o peliculă foarte fină de material electroizolant.

Principalele noțiuni ce stau la baza funcționării transformatorului electric sunt expuse într-un video ce poate fi urmărit în Fig. 1.10

1.2.3 RĂCIREA TRANSFORMATOARELOR

După modul de răcire se deosebesc următoarele tipuri de transformatoare:

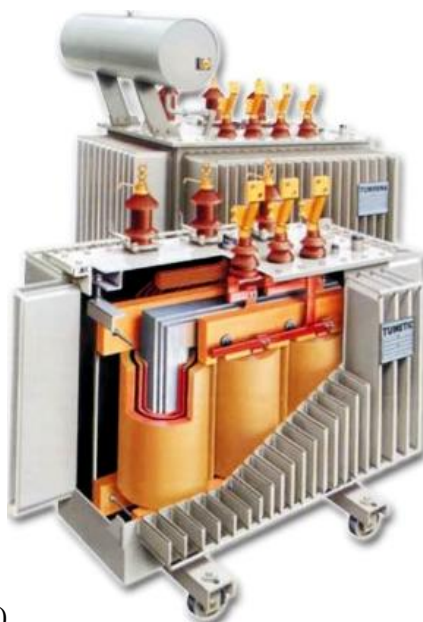
1.2.3.1 *Transformatoare uscate (Fig. 1.11a):*

- *transformatoare uscate cu răcire naturală*, care are loc datorită diferențelor de temperatură din diferite zone ale transformatorului.

- *transformatoare uscate cu răcire artificială* când aerul e pus în mișcare cu ajutorul unor ventilatoare.



a)



b)

Fig. 1.11 Transformator uscat <http://www.e-energetice.ro/transformator-de-putere-uscat-tmcrs-r-400-12.html>, a); transformator în ulei http://electro-sistem.com/en_US/transformatoare-emetice-in-ulei/, b)

1.2.3.2 *Transformatoare în ulei (Fig. 1.11b):*

- *transformatoare în ulei* cu răcire naturală (înfășurările sunt scufundate într-o cuvă umplută cu ulei)

- *transformatoare în ulei* cu răcire artificială în exterior cu aer sau cu circulație artificială și răcire a uleiului (pentru puteri foarte mari, pentru care, cuva este prevăzută cu țevi prin care circulă agentul de răcire, sau cu radiatoare).

1.3 FUNCȚIONAREA ÎN GOL A TRANSFORMATORULUI ELECTRIC

Pentru caracterizarea și modelarea transformatorului sunt importante următoarele mărimi și parametri: curentul de funcționare în gol, pierderile în gol, reactanța de magnetizare, rezistența echivalentă a pierderilor în fier, raportul de transformare.

1.3.1 NOȚIUNI TEORETICE

Se prezintă în continuare, punctual, noțiunile ce caracterizează funcționarea în gol a transformatorului:

- Schema echivalentă la funcționarea în gol (Fig. 1.12) se reduce la circuitul primar și cel de magnetizare;
- Înfășurarea primară este conectată la rețea, deci trafo este alimentat cu tensiunea nominală;
- Curentul din primarul trafo, absorbit de la rețea, se numește curent de mers în gol (I_{10}) și se consideră egal cu cel de magnetizare ($I_{10}=I_{01}$);
- Curentul din secundar este nul ($I_2=0$), nu există consumatori în secundar, prin urmare, nu există cădere de tensiune: $U_2'=U_{e2}$; transformatorul nu furnizează putere utilă, iar puterea de la rețea este folosită pentru acoperirea pierderilor din înfășurări (pierderi în Cu) și din miezul feromagnetic (pierderi în Fe);
- În cadrul probei de funcționare în gol, valoarea curentului din primarul transformatorului este aproximativ (1-2)% din valoarea curentului nominal, ceea ce înseamnă un curent raportat ($I_{p.u.} = \frac{I}{I_n}$) subunitar.

În acest caz, pierderile în cupru (p_{Cu}) se neglijează, deoarece, așa cum se observă mai jos, ele depind de pătratul curentului (spre exemplu, pentru un curent de funcționare în gol, cu valoarea de 0.01 A, obținem pierderi de ordinul 10^{-4} : $0.01^2=0.0001$).

$$\left. \begin{array}{l} P_{10} = p_{Fe} + p_{Cu} \\ p_{Cu} = R_1 * I_{10}^2 \approx 0 \end{array} \right\} \Rightarrow P_{10} = p_{Fe} = R_{1m} * I_{10}^2 \quad (1.10)$$

unde P_{10} - puterea absorbită la mersul în gol

În concluzie, la funcționarea în gol, puterea de mers în gol este egală cu pierderile în Fe (p_{Fe}), care depind doar de tensiunea de alimentare, ceea ce înseamnă că sunt egale cu pierderile ce apar și la funcționarea în sarcină, la tensiune dată:

$$\left. \begin{aligned} p_{Fe0} &= R_{1m} * I_{10}^2 \\ p_{FeS} &= R_{1m} * I_{01}^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow p_{Fe0} = p_{FeS} \quad (1.11)$$

În plus, puterea la funcționarea în gol a trafo poate fi exprimată și în funcție de factorul de putere la mersul în gol ($\cos\varphi_0$):

$$P_{10} = U_{10} * I_{10} * \cos\varphi_0 \quad (1.12)$$

Având în vedere faptul că valoarea curentului I_{10} este redusă și căderea de tensiune pe impedanța de dispersie a primarului este 2% din tensiunea nominală, putem considera tensiunea din înfășurarea primară egală cu tensiunea electromotoare ($U_1 = U_{e1}$);

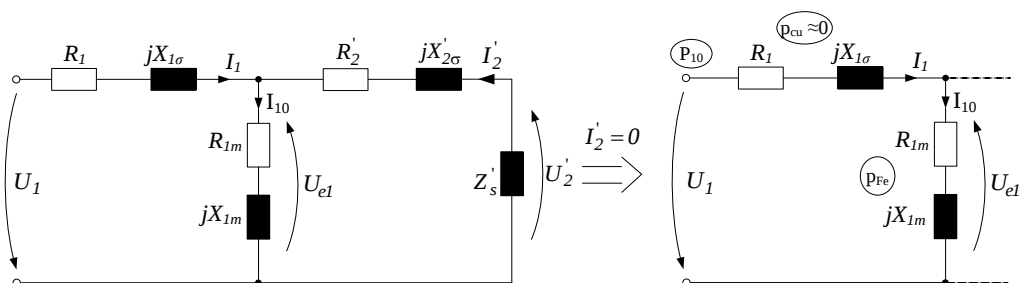


Fig. 1.12 Schema echivalentă la funcționarea în gol [1.2]

Analizând schema de funcționare în gol și scriind ecuațiile echivalente, obținem expresia curentului:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= I_{10} * Z_1 - U_{e1} \\ U_{e1} &= -Z_{1m} * I_{10} \end{aligned} \right\} \Rightarrow U_1 = I_{10} * Z_1 + Z_{1m} * I_{10} \Rightarrow I_{10} = \frac{U_1}{Z_1 + Z_{1m}} \quad (1.13)$$

unde I_{10} - curentul de funcționare în gol

Observații:

- Pierderile în fier apar datorită fenomenului de histereză și a curentilor turbionari, putând fi drastic reduse prin construcția din tole a miezului feromagnetic;
- Pierderile în înfășurări apar datorită efectului Joule, care este foarte redus datorită valorii mici a curentului prin înfășurarea secundară; prin urmare și pierderile sunt practic neglijabile.

1.3.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE

Problema 1.4 La un transformator monofazat cu puterea aparentă nominală $S_n = 10\text{MVA}$ tensiunile nominale $U_{1n}/U_{2n} = 35/6\text{ kV}$, rezistența primarului $R_1 = 0.612\ \Omega$; $X_{1\sigma} = 25\ \Omega$ în regimul de gol la tensiunea nominală, s-au măsurat puterea $P_{10} = 22\text{ kW}$ și curentul $I_{10} = 0.02 \cdot I_{1n}$ (I_{1n} —curentul nominal). Se cer parametrii circuitului de magnetizare R_{1m} și X_{1m} și factorul de putere la gol.

Soluție:

Puterea P_{10} este utilizată pentru acoperirea pierderilor în înfășurarea primară și în fier: $P_{10} = I_{10}^2 \cdot (R_1 + R_{1m})$;

$$I_{1n} = S_n / U_{1n} = 10 \cdot 10^6 / 35 \cdot 10^3 = 285.7\text{ A}$$

$$\text{Curentul de gol } I_{10} = 0.02 \cdot I_{1n} = 0.02 \cdot 285.7 = 5.7\text{ A.}$$

$$\text{Prin urmare, } R_1 + R_{1m} = P_{10} / I_{10}^2 = 22 \cdot 10^3 / 5.7^2 = 677.13\ \Omega,$$

$$R_{1m} = 677.13 - 0.612 = 676.5\ \Omega$$

Se observă că $R_1 \ll R_{1m}$

Se calculează $X_{1\sigma} + X_{1m}$:

$$X_{1m} + X_{1\sigma} = \sqrt{\left(\frac{U_{1n}}{I_{10}}\right)^2 - (R_1 + R_{1m})^2} = \sqrt{\left(\frac{35 \cdot 10^3}{5.7}\right)^2 - 677.13^2} = 6103.5\ \Omega$$

$$X_{1m} = 6103.5 - 2.5 = 6101\ \Omega; \text{ de remarcat că } X_{1m} \gg X_{1\sigma}.$$

$$\text{Factorul de putere } \cos\phi_{10} \text{ este: } \cos\phi_{10} = \frac{(R_1 + R_{1m}) \cdot I_{10}}{U_{1n}} = \frac{677.13 \cdot 5.7}{35000} = 0.1102$$

Problema 1.5 Un transformator monofazat cu miezul în coloană are lungimea coloanei $L_c = 0,3\text{m}$, iar cea a jugului $L_j = 0,4\text{m}$; secțiunea coloanei $A_c = 10^{-3}\text{m}^2$. Secțiunea jugului $A_j = 1,1 \cdot 10^{-3}\text{m}^2$; numărul de spire $N_1 = 100$; $N_2 = 10$.

Permeabilitatea magnetică relativă în coloană este $\mu_{rc} = 3000 \frac{\text{H}}{\text{m}}$; inducția magnetică în coloană este $B_c = 1,2\text{T}$.

Se cere:

- inducția magnetică în jug B_j ;
- reluctanța magnetică principală R_m , dacă permeabilitatea magnetică se consideră invers proporțională cu inducția magnetică;
- inductanțele principale L_{11h} , L_{22h} și L_{12h} .

Soluție

- a. Inducția magnetică în jug se calculează pe baza legii fluxului magnetic:

$$B_c A_c = B_j A_j; \quad B_j = \frac{1.2 \cdot 10^{-3}}{1.1 \cdot 10^{-3}} = 1.09 \text{ T}$$

- b. Reluctanța magnetică R_m (2.6) se compune din cea a coloanelor și jugurilor, zone în care câmpul magnetic este constant:

$$R_m = \frac{2 \cdot L_c}{\mu_{rc} \cdot \mu_0 \cdot A_c} + \frac{2 \cdot L_j}{\mu_{rj} \cdot \mu_0 \cdot A_j}$$

Permeabilitatea magnetică relativă în jug μ_{rj} este, în acord cu ipoteza admisă:

$$\mu_{rj} = \mu_{rc} \cdot \frac{B_c}{B_j} = 3000 \cdot \frac{1.2}{1.09} = 3302.8$$

Prin urmare:

$$R_m = \frac{2 \cdot 0.3}{3000 \cdot 1.256 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3}} + \frac{2 \cdot 0.4}{3302.8 \cdot 1.256 \cdot 10^{-6} \cdot 1.1 \cdot 10^{-3}} = 0.3345 \cdot 10^6 \text{ H}^{-1}$$

- c. Inductanțele se calculează cu (2.47):

$$L_{11h} = \frac{N_1^2}{R_m} = \frac{10^4}{0.3345 \cdot 10^6} = 2.98 \cdot 10^{-2} \text{ H}$$

$$L_{22h} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 L_{11h} = \left(\frac{10}{100} \right)^2 \cdot 3.1242 \cdot 10^{-2} = 3.1242 \cdot 10^{-5} \text{ H}$$

$$L_{12h} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \cdot L_{11h} = \left(\frac{10}{100} \right) \cdot 3.1242 \cdot 10^{-2} = 3.1242 \cdot 10^{-4} \text{ H}$$

Pe măsură ce nivelul inducției magnetice crește, permeabilitatea magnetică scade și, în consecință, se reduce valoarea inductanțelor principale. Creșterea inducției magnetice în coloană până la valori de 1.5 – 1.6 T la transformatoare mari la 50(60) Hz este acceptată, deși pierderile în fier sunt mai mari și inductanțele principale mai mici, deoarece pe această cale se reduce secțiunea miezului și deci gabaritul și costul miezului și al înfășurărilor.

Problema 1.6 La un transformator monofazat cu puterea aparentă nominală $S_n = 30 \text{ MVA}$ tensiunile nominale $U_{1n}/U_{2n} = 30/5 \text{ kV}$, rezistența primarului $R_1 = 0.5 \Omega$; $X_{1\sigma} = 20 \Omega$ în regimul de gol la tensiunea nominală, s-au măsurat puterea $P_{10} = 25 \text{ kW}$ și curentul $I_{10} = 0.025 \cdot I_{1n}$.

Se cer parametrii circuitului de magnetizare R_{1m} și X_{1m} și factorul de putere la gol, $\cos\varphi_0$.

Problema 1.7 La un transformator monofazat cu puterea aparentă nominală $S_n = 30 \text{ MVA}$ tensiunile nominale $U_{1n}/U_{2n} = 20/4 \text{ kV}$, rezistența primarului $R_1 = 0.3 \Omega$; $X_{1\sigma} = 10 \Omega$ în regimul de gol la tensiunea nominală, s-au măsurat puterea $P_{10} = 22 \text{ kW}$ și curentul $I_{10} = 0.022 \cdot I_{1n}$.

Se cer parametrii circuitului de magnetizare R_{1m} și X_{1m} și factorul de putere la gol, $\cos\varphi_0$.

1.3.3 PROBA DE GOL – LUCRARE PRACTICĂ

Prin caracteristici de gol înțelegem:

- variația curentului la funcționarea în gol cu tensiunea de alimentare;
- variația puterii active cu tensiunea de alimentare;
- variația factorului de putere cu tensiunea de alimentare;

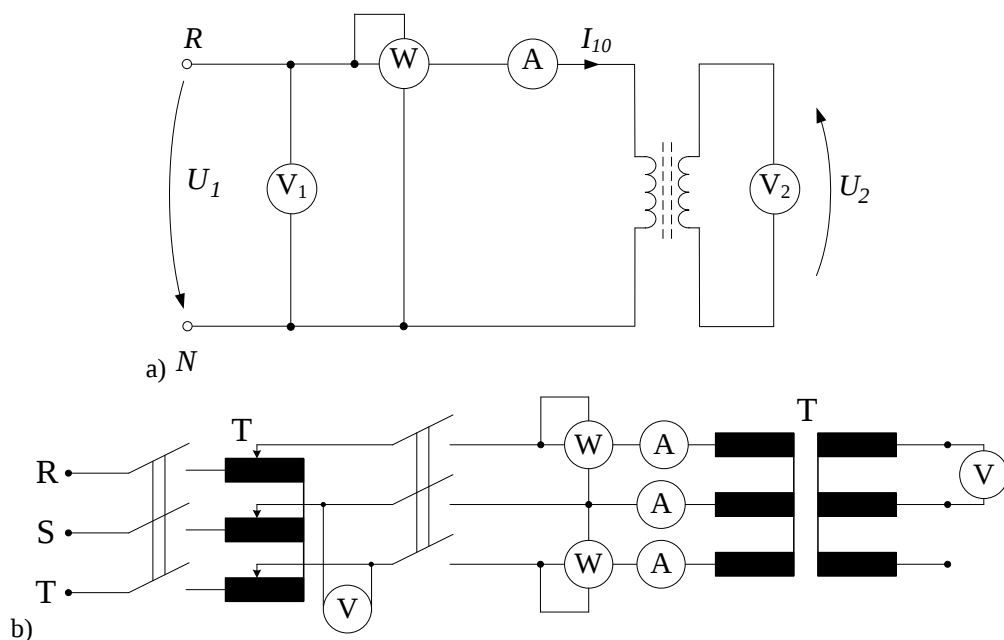


Fig. 1.13 Schema de montaj: a) monofazată; b) trifazată [1.4]

Pentru ridicarea caracteristicilor și calculul parametrilor la funcționarea în gol, se realizează montajul din Fig. 1.13 și se alimentează transformatorul cu tensiunea U_1 , variabilă, astfel încât curentul măsurat să fie cuprins între $(0 \div 1.2) \cdot I_{1N0}$, unde I_{1N0} este curentul absorbit la funcționarea în gol, în primar, la alimentarea cu tensiunea nominală.

[illegible]

3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

Pe baza măsurătorilor efectuate se trasează caracteristicile de mers în gol (Fig. 1.14):

- $I_{10}=f(U_1)$
- $P_0=f(U_1)$
- $\cos\varphi_0=f(U_1)$

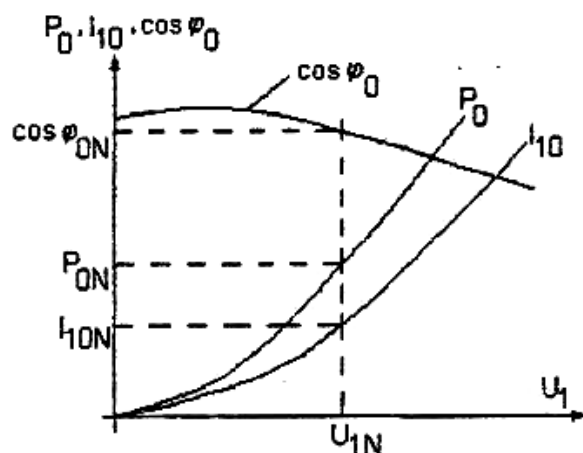


Fig. 1.14 Caracteristicile probei de funcționare în gol [1.5]

Observație:

Pentru realizarea graficelor, se utilizează hârtie milimetrică, având grijă să alegem corect unitatea de măsură pentru cele două axe și să stabilim punctele, care, conform măsurătorilor din tabel, aparțin graficului. Trasarea caracteristicilor se face întotdeauna *printre puncte*, cu specificația că anumite puncte pot să rămână în afara graficului deoarece uneori intervin erori de măsurare, ale aparatelor sau de citire a datelor.

În vederea însușirii noțiunilor și a fenomenelor ce caracterizează funcționarea în gol a transformatorului, poate fi vizionat clipul următor.

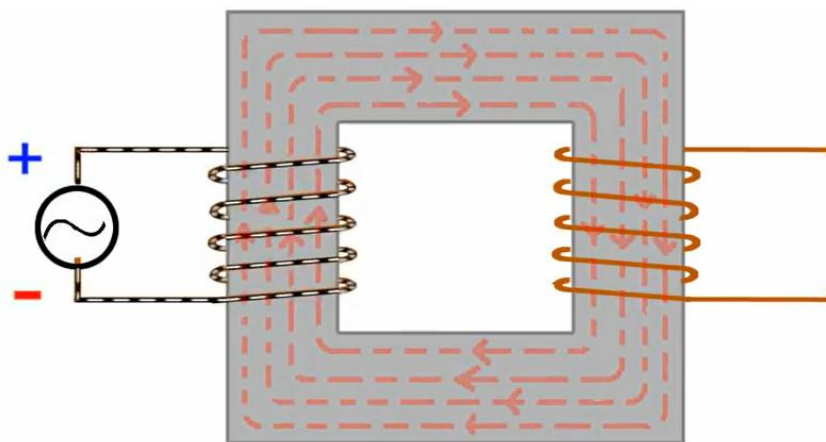


Fig. 1.15 Funcționarea în gol a transformatorului
(<https://www.youtube.com/watch?v=uj-HDHEXzx8>)

Întrebări:

1. Ce se înțelege prin caracteristicile de gol?
2. Cât de mult poate varia tensiunea de alimentare?
3. Cum se explică neglijarea pierderilor în înfășurări?
4. Care sunt mărimile din schema echivalentă a transformatorului care pot fi calculate în urma probei de gol?
5. De ce se poate afirma faptul că pierderile în fier la funcționarea în gol sunt egale cu pierderile la funcționarea în sarcină?
6. Care dintre pierderile în fier depind de grosimea tolelor și care nu?

1.4 FUNCȚIONAREA ÎN SCURTCIRCUIT A TRANSFORMATORULUI ELECTRIC

În cele ce urmează se determină parametri de scurtcircuit ai transformatorului, și anume: tensiunea nominală de scurtcircuit, factorul de putere la scurtcircuit, pierderile la scurtcircuit, reactanțele de dispersie și rezistența înfășurărilor de c.a.

1.4.1 NOȚIUNI TEORETICE

Se prezintă în continuare, noțiunile ce caracterizează funcționarea în scurtcircuit a transformatorului:

- * Regimul de scurtcircuit de avarie are loc când transformatorul este alimentat de la rețea, iar impedanța de sarcină din secundar este nulă, ceea ce înseamnă tensiune nulă ($U_2 = 0$) și curent cu valori de 10 până la 25 de ori mai mare decât cel nominal;

- * La scurtcircuitul de probă transformatorul se alimentează cu o tensiune egală cu (4-12)% din cea nominală, numită tensiune nominală de scurtcircuit (U_{nsc});
- * Tensiunea nominală de scurtcircuit este tensiunea pentru care curentul din secundar este egal cu valoarea curentului nominal.
- * Deoarece nu există un consumator conectat la bornele transformatorului, puterea activă absorbită de la rețea se folosește doar pentru acoperirea pierderilor.
- * Încercarea la scurtcircuit se face la tensiune scăzută, inducția magnetică fiind deasemenea redusă, ceea ce determină pierderi neglijabile în fier (acestea din urmă fiind direct proporționale cu pătratul inducției magnetice), în timp ce pierderile în înfășurări sunt aceleași ca pierderile în sarcină.

$$\left. \begin{array}{l} P_{sc} = p_{Fe} + p_{Cu} \\ p_{Fe} = \tau * f * B^2 \approx 0 \end{array} \right\} \Rightarrow P_{sc} = p_{Cu} = m * R_{sc} * I_{1sc}^2 \Rightarrow P_{sc} = m * (R_1 + R_2') * I_{1sc}^2 \quad (1.21)$$

- * Se poate considera că puterea activă absorbită de la rețea în regim de scurtcircuit este egală cu pierderile în înfășurări, care sunt chiar pierderile nominale dacă alimentarea are loc la tensiunea nominală.

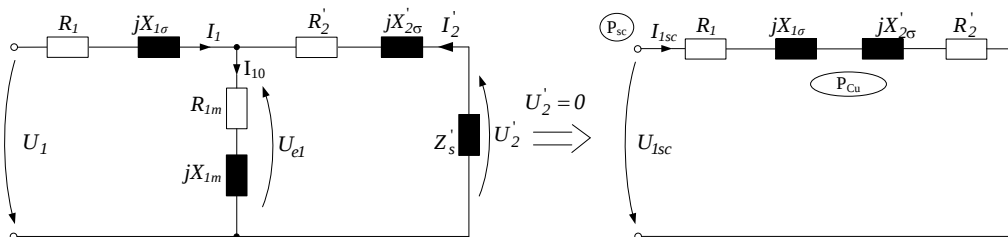


Fig. 1.16 Schema echivalentă la funcționarea în scurtcircuit [1.2]

Rezistența de scurtcircuit: $R_{sc} = R_1 + R_2'; \quad (1.22)$

Reactanța de scurtcircuit: $X_{sc} = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'; \quad (1.23)$

Impedanța echivalentă la scurt:

$$Z_{sc} = R_{sc} + jX_{sc} = (R_1 + R_2') + j(X_{\sigma 1} + X_{2\sigma}') \quad (1.24)$$

Modulul impedanței de scurtcircuit: $|Z_{sc}| = \sqrt{R_{sc}^2 + X_{sc}^2}; \quad (1.25)$

Tensiunea de scurtcircuit: $U_{1sc} = I_{1sc} * Z_{sc}; \quad (1.26)$

1.4.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE

Problema 1.8 În urma efectuării unei încercări de mers în gol și a unei încercări de mers în scurtcircuit la un transformator electric monofazat, cu $U_{1N} = 220 \text{ V}$, au fost obținute următoarele valori: $P_0 = 1 \text{ kW}$, $I_{10} = 15 \text{ A}$; $P_{sc} = 1.5 \text{ kW}$, $U_{1scN} = 50 \text{ V}$, $I_{1sc} = 120 \text{ A}$.

Pentru $R_2 = 0.8 \cdot R_1$ și $X_2 = 0.85 \cdot X_1$, să se calculeze parametrii schemei echivalente a transformatorului.

Soluție:

În primul rând vom arăta cum se modifică schema echivalentă în T a transformatorului (Fig. 1.17), în funcție de regimul de funcționare.

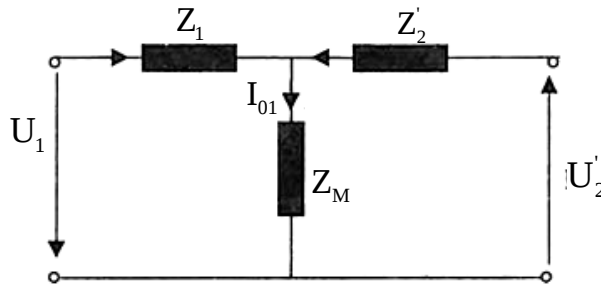


Fig. 1.17 Schema echivalentă în T a transformatorului

La funcționarea în gol, curentul $I'_2 = 0$, I_{10} este curentul absorbit, iar I_{01} este curentul de magnetizare al transformatorului ($I_{10} = I_{01}$), astfel că schema echivalentă în T devine cea din Fig. 1.18.

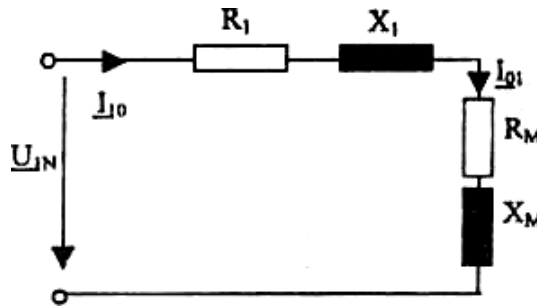


Fig. 1.18 Schema la funcționarea în gol a transformatorului

Conform Fig. 1.18, putem scrie: $U_{1N} = Z_0 \cdot I_{10}$, de unde rezultă faptul că impedanța de mers în gol va fi: $Z_0 = \frac{U_{1N}}{I_{10}} = \frac{220}{15} = 14.66 \Omega$.

Utilizând formula pentru puterea activă la mersul în gol: $P_0 = R_0 \cdot I_{10}^2$, obținem rezistența și reactanța la funcționarea în gol:

$$R_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2} = \frac{1000}{15^2} = 4.44 \Omega;$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{14.66^2 - 4.44^2} = 13.97 \Omega$$

La funcționarea în scurtcircuit, curentul de magnetizare al transformatorului se neglijează ($I_{10}=0$), iar schema echivalentă în T devine cea din Fig. 1.16.

Tensiunea nominală de scurtcircuit are următoarea expresie: $U_{1scN} = Z_{sc} \cdot I_{1scN}$ de

unde rezultă impedanța de scurtcircuit: $Z_{sc} = \frac{U_{1scN}}{I_{1scN}} = \frac{50}{120} = 0.416 \Omega$.

Puterea activă pentru funcționarea în scurtcircuit fiind: $P_{sc} = R_{sc} \cdot I_{1scN}^2$.

Se obține în continuare rezistența și reactanța de scurtcircuit:

$$R_{sc} = \frac{P_{sc}}{I_{1scN}^2} = \frac{1500}{14400} = 0.104 \Omega$$

$$X_{sc} = \sqrt{Z_{sc}^2 - R_{sc}^2} = \sqrt{0.416^2 - 0.104^2} = 0.402 \Omega$$

Cum $R_{sc} = R_1 + R'_2 = 1.8 \cdot R_1$, obținem:

$$R_1 = \frac{R_{sc}}{1.8} = \frac{0.104}{1.8} = 0.058 \Omega$$

$$R'_2 = R_{sc} - R_1 = 0.104 - 0.058 = 0.046 \Omega$$

Similar cu rezistența de scurtcircuit se scrie reactanța de scurtcircuit:

$X_{sc} = X_1 + X'_2 = 1.85 \cdot X_1$, de unde $X_1 = \frac{X_{sc}}{1.85} = \frac{0.402}{1.85} = 0.217 \Omega$, rezultă:

$$X'_2 = X_{sc} - X_1 = 0.402 - 0.217 = 0.184 \Omega.$$

Având valorile pentru R_1 și X_1 , se determină în continuare valorile rezistenței și reactanței de magnetizare corespunzătoare funcționării în gol a transformatorului:

$$R_M = R_0 - R_1 = 4.44 - 0.058 = 4.382 \Omega$$

$$X_M = X_0 - X_1 = 13.97 - 0.217 = 13.753 \Omega$$

Problema 1.9 Un transformator trifazat în conexiune Yz-3 are următoarele date nominale: $S_N = 160$ kVA, $U_N = 20$ kV, $U_{20} = 0.4$ kV, $f = 50$ Hz, $P_0 = 400$ W, $P_{scN} = 2500$ W, $u_{scN} = 4.5\%$, $I_{10} = 0$. Se consideră $R_1/R'_2 = 1.05$, $X_1/X'_2 = 1$.

Să se determine:

- parametrii schemei echivalente simplificate;
- tensiunea secundară dacă transformatorul este folosit pentru

- iluminat public ($\cos\varphi_2=1$);
 c) factorul de sarcină la care randamentul devine maxim și randamentul corespunzător [1.6].

Soluție:

a) Neglijând curentul de magnetizare, se prezintă mai jos schema electrică simplificată a transformatorului (Fig. 1.19), în regim de scurtcircuit .

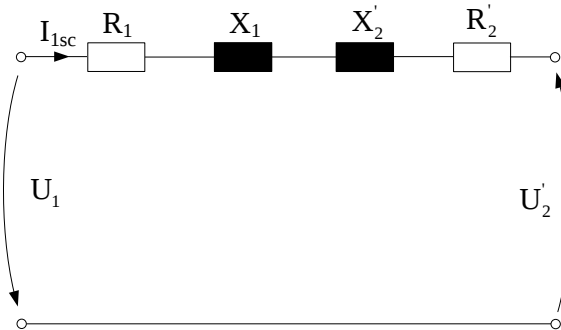


Fig. 1.19 Schema electrică simplificată a transformatorului

Puterea aparentă a transformatorului este dată de expresia: $S_N = m \cdot U_{1Nf} \cdot I_{1Nf}$, de unde rezultă:

$$I_{1Nf} = \frac{S_N}{3 \cdot U_{1Nf}};$$

$$U_{1Nf} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{20000}{\sqrt{3}} = 11547.34 \text{ V} \Rightarrow I_{1Nf} = \frac{160000}{3 \cdot 11547.34} = 4.6 \text{ A}$$

$$R_{sc} = R_1 + R_2'; \quad X_{sc} = X_1 + X_2'$$

$$Z_{sc} = \frac{U_{1scNf}}{I_{1Nf}} = \frac{4.5 \cdot U_{1Nf}}{I_{1Nf}} = \frac{0.045 \cdot 11547.34}{4.6} = 112.7 \Omega$$

$$P_{scN} = 3 \cdot R_{sc} \cdot I_{1Nf}^2 \Rightarrow R_{sc} = \frac{P_{scN}}{3 \cdot I_{1Nf}^2} = \frac{2500}{3 \cdot 4.6^2} = 39.2$$

$$X_{sc} = \sqrt{Z_{sc}^2 - R_{sc}^2} = \sqrt{112.7^2 - 39.2^2} = 105.66 \Omega$$

$$1.05 \cdot R_2' + R_2' = R_{sc} \Rightarrow R_2' = \frac{R_{sc}}{2.05} = \frac{39.2}{2.05} = 19.12 \Omega$$

$$R_1 = R_{sc} - R_2' = 39.2 - 19.12 \approx 20 \Omega$$

$$X_1 = X_2' = \frac{X_{sc}}{2} = \frac{105.6}{2} = 52.8 \Omega$$

$$\begin{aligned}
 U'_{1Nf} &= U_{1Nf} - R_{sc} \cdot I_1 = 11547.34 - 39.2 \cdot 4.61 = 11366.24 \text{ V} \\
 \text{b) } k &= \frac{U_{1N}}{U_{20}} = \frac{20000}{400} = 50 \\
 &\Rightarrow U_{2Nf} = \frac{11366.24}{50} = 227.3 \text{ V} \\
 \text{c) } k_{sopt} &= \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{scN}}} \approx \sqrt{\frac{P_0}{P_{scN}}} = \sqrt{\frac{400}{2500}} = 0.4 \\
 \Rightarrow \eta_{max} &= \frac{S_N \cdot k_{sopt} \cdot \cos \varphi_2}{S_N \cdot k_{sopt} \cdot \cos \varphi_2 + P_{scN}} = \frac{160000 \cdot 0.4 \cdot 1}{160000 \cdot 0.4 \cdot 1 + 2500} = 0.987
 \end{aligned}$$

Problema 1.10. În secundarul unui transformator electric monofazat cu puterea nominală $S_N = 150 \text{ kVA}$, tensiunea nominală de alimentare $U_{1N} = 400 \text{ V}$, frecvența nominală $f = 50 \text{ Hz}$ și $I_{2N} = 1500 \text{ A}$, este conectat un rezistor de valoare $R_s = 0.092 \Omega$.

Se cunosc parametrii transformatorului: $R_1 = 0.0086 \Omega$, $R_2 = 0.00035 \Omega$, $X_1 = 0.02 \Omega$, $X_2 = 0.0011 \Omega$, $R_M = 10 \Omega$, $X_M = 99.4 \Omega$.

Să se calculeze:

- tensiunea nominală în secundar și raportul de transformare;
- curentul nominal în înfășurarea primară;
- curentul absorbit în primar cu sarcina rezistivă menționată;
- curentul absorbit la mersul în gol;
- factorul de putere la mersul în gol;
- curentul absorbit dacă se scurtcircuitează secundarul;
- factorul de putere la scurtcircuit.

Problema 1.11 În urma efectuării unei încercări de mers în gol și a unei încercări de mers în scurtcircuit la un transformator electric monofazat, cu $U_{1N} = 220 \text{ V}$, au fost obținute următoarele valori: $P_0 = 3 \text{ kW}$, $I_{10} = 25 \text{ A}$; $P_{sc} = 1.7 \text{ kW}$, $U_{1scN} = 80 \text{ V}$, $I_{1sc} = 135 \text{ A}$.

Pentru $R_2 = 0.7 \cdot R_1$ și $X_2 = 0.75 \cdot X_1$, să se calculeze parametrii schemei echivalente a transformatorului.

Problema 1.12 Un transformator trifazat în conexiune Yz-5 are următoarele date nominale: $S_N = 150 \text{ kVA}$, $U_N = 20 \text{ kV}$, $U_{20} = 0.5 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $P_0 = 300 \text{ W}$, $P_{scN} = 2000 \text{ W}$, $u_{scN} = 4.5\%$, $I_{10} = 0$. Se consideră $R_1/R_2 = 1.05$, $X_1/X_2 = 1$.

Să se determine: a) parametrii schemei echivalente simplificate; b) tensiunea secundară dacă transformatorul este folosit pentru iluminat public ($\cos \varphi_2 = 1$);

1.4.3 PROBA DE SCURTCIRCUIT – LUCRARE PRACTICĂ

Prin caracteristici de scurtcircuit înțelegem:

- tensiunea în funcție de curentul de scurtcircuit;
- puterea în funcție de curentul de scurtcircuit;
- factorul de putere în funcție de curentul de scurtcircuit

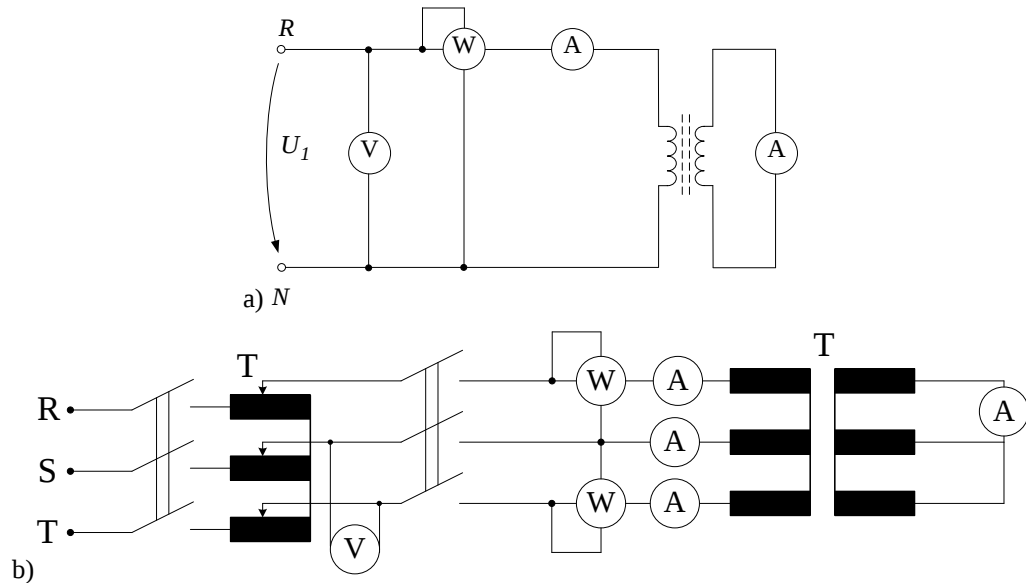


Fig. 1.20 Schema de montaj la scurtcircuit: a) monofază b) trifază [1.4]

În vederea ridicării caracteristicilor și calculul parametrilor la funcționarea în scurtcircuit, se realizează montajul din Fig. 1.20, se alimentează transformatorul cu tensiune variabilă, având în vedere că se va lucra la valori reduse ale tensiunii ($4 \div 10\%$ din valoarea nominală) și la valori cuprinse între $(0 \div 1.2) \cdot I_N$ pentru curent, iar apoi, se măsoară:

- tensiunea de alimentare (U_1);
- curentul din primar la scurtcircuit (I_{sc});
- puterea absorbită la scurtcircuit (P_{sc});

Se calculează parametri la scurtcircuit:

$$\text{Impedanța de scurtcircuit:} \quad Z_{sc} = \frac{U_{scn}}{I_{1sc}} \quad (1.27)$$

$$\text{Rezistența de scurtcircuit:} \quad R_{sc} = \frac{P_{sc}}{I_{1sc}^2} \quad (1.28)$$

$$\text{Reactanța de scurtcircuit:} \quad X_{sc} = \sqrt{Z_{sc}^2 - R_{sc}^2} \quad (1.29)$$

Factorul de putere la scurtcircuit: $\cos\phi_{sc} = \frac{R_{sc}}{Z_{sc}}$ (1.30)

Raportul de transformare: $k = \frac{U_{e\grave{a}t}}{U_{e\grave{j}t}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$ (1.31)

Valorile măsurătorilor și rezultatele calculelor se trec în următorul tabel:

Tabel 1.2 Mărimile probei de scurtcircuit

Nr.crt	Mărimi măsurate				Mărimi calculate			
	$U_{10}[\text{V}]$	$I_{1sc}[\text{A}]$	$I_{2sc}[\text{A}]$	$P_{sc}[\text{W}]$	$Z_{sc}[\Omega]$	$R_{sc}[\Omega]$	$X_{sc}[\Omega]$	$\cos\phi_{sc}$
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

Cu ajutorul mărimilor din tabelul de mai sus se vor ridica curbele (Fig. 1.21) corespunzătoare următoarelor dependențe:

$U_{sc}=f(I_{2sc})$, $P_{sc}=f(I_{2sc})$, $\cos\phi_{sc}=f(I_{2sc})$ [1.5].

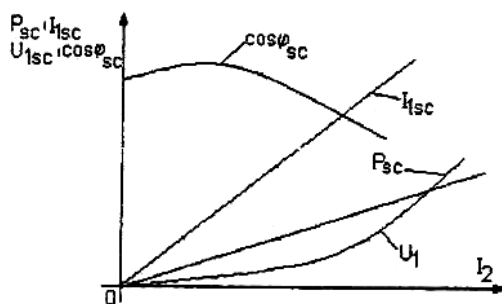


Fig. 1.21 Caracteristicile probei de scurtcircuit [1.5]

Întrebări:

1. Ce se înțelege prin caracteristicile de scurtcircuit?
2. Ce se înțelege prin scurtcircuit de avarie? Cum sunt curenții? Dar tensiunea de alimentare?

3. Ce se înțelege prin scurtcircuit de probă? Cum sunt curenții? Dar tensiunea de alimentare?
4. Care sunt mărimile din schema echivalentă a transformatorului care pot fi calculate în urma probei de scurtcircuit?
5. Definiți tensiunea nominală de scurtcircuit.

Descrierea regimului de scurtcircuit poate fi urmărită pas cu pas în Fig. 1.22.

Transformer Short Circuit Test

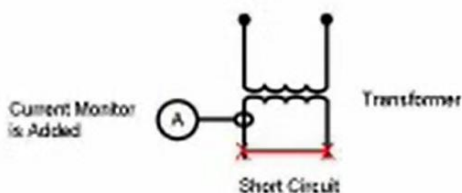


Fig. 1.22 Regimul de scurtcircuit al trafo (<https://www.youtube.com/watch?v=u8-Jsg7mbly>)

1.5 FUNCȚIONAREA ÎN SARCINĂ A TRANSFORMATORULUI ELECTRIC

La funcționarea în sarcină (rezistivă, inductivă, capacitivă) simetrică, transformatorul transferă energie electrică din primar în secundar. Transferul de energie are loc cu pierderi în fier și în înfășurări. Se urmărește influența pe care o are tipul sarcinii asupra tensiunii de ieșire și asupra randamentului.

1.5.1 NOȚIUNI TEORETICE

Funcționarea în sarcină simetrică a transformatorului prezintă următoarele *caracteristici*:

- Desfășurarea proceselor electromagnetice are loc în mod identic pe fiecare fază, iar dacă încărcarea este simetrică, analiza comportării transformatorului se poate face pentru o singură fază, ca și cum transformatorul ar fi trifazat;
- Pierderile în fier în sarcină sunt aproximativ egale cu pierderile la funcționarea în gol;
- Pierderile în înfășurări sunt proporționale cu pierderile la funcționarea în scurtcircuit;

- Așa cum se poate observa din Fig. 1.23, regimul de sarcină este caracterizat de suprapunerea regimului de gol (câmpul magnetic principal) și a celui de scurtcircuit (câmpul magnetic de dispersie) la valori nominale pentru curenți și tensiunea de alimentare.

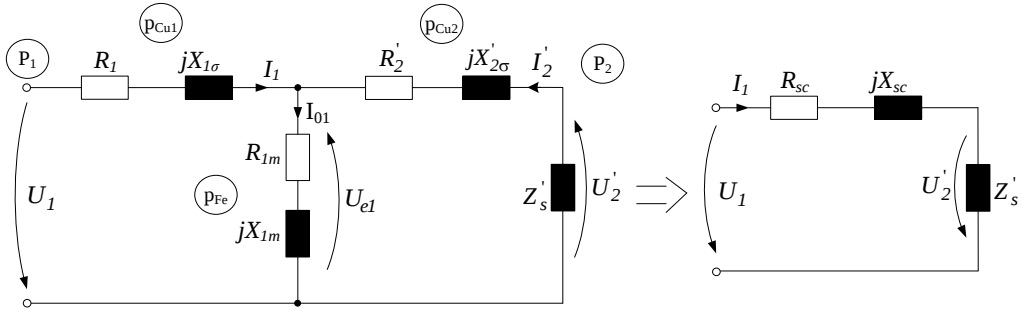


Fig. 1.23 Schema echivalentă la funcționarea în sarcină

I. Randamentul funcție de factorul de sarcină:

$$P_1 = p_{Cu1} + p_{Cu2} + p_{Fe} + P_2 ;$$

$$p_{Cu1} + p_{Cu2} \approx (R_1 + R'_2) \cdot I_1^2 = R_{sc} \cdot \left(\frac{I_1}{I_n} \right)^2 \cdot I_n^2 = R_{sc} \cdot k_s^2 \cdot I_n^2 = k_s^2 \cdot P_{nsc} ;$$

$$k_s = \frac{I}{I_n} \text{ - factor de sarcină (de încărcare)}$$

Diferența dintre puterea activă din primar și puterea din secundar o reprezintă pierderile în înfășurări și cele în fier:

$$P_1 - P_2 = p_{Cu1} + p_{Cu2} + p_{Fe}$$

Ecuatiile ce descriu regimul permanent se obțin din legile lui Kirchhoff, aplicate în Fig. 1.23.

$$I_{01} = I_1 + I'_2 ;$$

$$I_1 \cdot Z_1 - U_1 = U_{e1} ; Z_1 = R_1 + jX_{1\sigma} ;$$

$$I'_2 \cdot Z'_2 + U'_2 = U_{e1} ; Z'_2 = R'_2 + jX'_{2\sigma} ;$$

$$U_{e1} = -I_{01} \cdot Z_{1m} ; Z_{1m} = R_{1m} + jX_{1m}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{p_{Cu1} + p_{Cu2} + p_{Fe} + P_2} = \frac{U'_2 \cdot I'_2 \cdot \cos \varphi_2}{R_1 \cdot I_1^2 + R'_2 \cdot I'^2_2 + R_{1m} \cdot I_{01}^2 + U'_2 \cdot I'_2 \cdot \cos \varphi_2}$$

$$\eta = \frac{S_2 \cdot k_s \cdot \cos \varphi_2}{k_s^2 \cdot P_{nsc} + p_{Fe} + S_2 \cdot k_s \cdot \cos \varphi_2}$$

Randamentul prezintă un maxim pentru $k_s = k_{smax} = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{scn}}}$, rezultă astfel:

$$\eta_{\max} = \frac{S_2 * k_{\max} * \cos \varphi_2}{S_2 * k_{\max} * \cos \varphi_2 + \frac{P_{Fe}}{P_{Cu}} * p_{nsc} + p_{Fe}} = \frac{S_2 * k_{\max} * \cos \varphi_2}{S_2 * k_{\max} * \cos \varphi_2 + \frac{P_{Fe}}{P_{Cu}} * p_{nsc} + p_{Fe}}$$

$$\Rightarrow \eta_{\max} = \frac{S_2 * k_{\max} * \cos \varphi_2}{S_2 * k_{\max} * \cos \varphi_2 + 2 * p_{Fe}}$$

Randamentul maxim se obține pentru $k_s = 0.45 \div 0.5$

II. Variația tensiunii din secundar cu sarcina

Aplicând legile lui Kirchhoff în Fig. 1.23, putem scrie: $U'_2 = U_1 - I_1 * Z_{sc}$, unde $Z_{sc} = R_{sc} + jX_{sc}$.

U'_2 variază față de U_1 prin căderea de tensiune de pe impedanța de scurtcircuit: $\Delta U = U_1 - U'_2 \approx I_1 * R_{sc} * \cos \varphi_2 + I_1 * X_{sc} * \sin \varphi_2$, unde φ_2 – este unghiul de defazaj în circuitul sarcinii.

1.5.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE

Problema 1.13 Un transformator electric având puterea nominală $S_N = 100$ kVA are randamentul maxim $\eta_{\max} = 0.96$ la un factor de putere $\cos \varphi_2 = 0.8$ și puterea $S_{opt} = 62$ kVA. Să se calculeze:

- randamentul la sarcină nominală cu factorul de putere $\cos \varphi_2 = 0.8$;
- să se calculeze randamentul nominal al transformatorului în ipotezele: $\cos \varphi_2 = 1$; $\cos \varphi_2 = 0.9$. Concluzii comparative privind $\eta_N = f(\cos \varphi_2)$.
Dacă $\cos \varphi_2 = 1$, care este valoarea randamentului maxim?

Soluție:

- Randamentul la sarcină nominală se determină pe baza relației:

$$\eta_N = \frac{P_{2N}}{P_{1N}} = \frac{S_N * \cos \varphi_2}{S_N * \cos \varphi_2 + p_{FeN} + p_{CuN}}$$

$$k_{sopt} = \sqrt{\frac{p_{FeN}}{p_{CuN}}} = \frac{S_{opt}}{S_N}$$

$$\eta_{\max} = \frac{S_N * k_{sopt} * \cos \varphi_2}{S_N * k_{sopt} * \cos \varphi_2 + p_{FeN} + k_{sopt}^2 * p_{CuN}} = \frac{S_N * k_{sopt} * \cos \varphi_2}{S_N * k_{sopt} * \cos \varphi_2 + 2p_{FeN}}$$

$$p_{FeN} = \frac{S_{opt} * \cos \varphi_2 * (1 - \eta_{\max})}{2 * \eta_{\max}} = \frac{62000 * 0.8 * (1 - 0.96)}{2 * 0.96} = 1033.3 \text{ W}$$

$$P_{CuN} = \frac{P_{FeN}}{k_{sopt}^2} = \left(\frac{S_N}{S_{opt}} \right)^2 * P_{FeN} = \left(\frac{100000}{62000} \right)^2 * 1033.33 = 2688.17 \text{ W}$$

$$\text{Pentru } \cos\varphi_2=0.8 \text{ obținem: } \eta_N = \frac{10^5 * 0.8}{10^5 * 0.8 + 1033.33 + 2688.16} = 0.955$$

b) Pentru $\cos\varphi_2=1$ randamentul nominal are valoarea:

$$\eta_N = \frac{S_N * \cos\varphi_2}{S_N * \cos\varphi_2 + P_{FeN} + P_{CuN}} = \frac{100000}{100000 + 1033.33 + 2688.17} = 0.964$$

$$\text{Pentru } \cos\varphi_2=0.9 \text{ obținem: } \eta_N = \frac{100000 * 0.9}{100000 * 0.9 + 1033.33 + 2688.17} = 0.96$$

În concluzie randamentul la încărcarea nominală crește (neliniar) cu $\cos\varphi_2$, având valoarea maximă pentru $\cos\varphi_2=1$.

$$\eta_{max} = \frac{S_N * k_{sopt} * 1}{S_N * k_{sopt} * 1 + 2P_{FeN}} = \frac{62000}{62000 + 2 * 1033.3} = 0.9677$$

Se observă că: $\eta_{max}(\cos\varphi_2=1) > \eta_{max}(\cos\varphi_2=0.8)$

De asemenea: $\eta_{max}(\cos\varphi_2=1) > \eta_N(\cos\varphi_2=1)$

Din cele prezentate se pot evidenția următoarele aspecte:

- randamentul nominal crește odată cu creșterea lui $\cos\varphi_2$, fiind maxim pentru $\cos\varphi_2=1$;
- indiferent ce valoare are $\cos\varphi_2$, la încărcarea optimă a transformatorului rezultă un randament maxim $\eta_{max} > \eta_N$, calculat la același factor de putere.

Problema 1.14 Trei transformatoare trifazate funcționează în paralel și au tensiunile nominale egale, iar $\frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{110\text{kV}}{20\text{kV}}$, grupa de conexiune „Yd” și

următoarele date nominale:

$$S_{N1} = 10 \text{ MVA}, u_{sc1N} = 7.5\%,$$

$$S_{N2} = 10 \text{ MVA}, u_{sc2N} = 8\%,$$

$$S_{N3} = 16 \text{ MVA}, u_{sc3N} = 8.5\%,$$

Să se determine:

- a) puterea totală maximă pe care o pot debita transformatoarele,
- b) valorile curenților de fază și de linie din primarul și secundarul celui de-al doilea transformator (I_{N21f} , I_{N21l} , I_{N22f} , I_{N22l}),

- c) pierderile în fier și în cupru, știind că $R_m=20\Omega$, $Z_m=130\Omega$, $\cos\varphi_{sc}=0.15$,
- d) randamentul nominal și randamentul maxim al transformatorului pentru o sarcină rezistivă (R) și respectiv pentru o sarcină rezistiv-inductivă (RL), pentru care, $\cos\varphi=0.8$,
- e) variația tensiunii în secundar pentru sarcină pur rezistivă, pur inductivă și pur capacitivă.

Observație: cerințele b)-e) se referă la cel de-al doilea transformator.

Soluție:

a) $U_{scN}=\min(U_{scN1}, U_{scN2}, U_{scN3})$ rezultă că $U_{scN}=U_{scN1}=7.5\% \cdot U_{Nf1}$

$$U_{scN} = \frac{7.5}{100} \cdot \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 4763.14V$$

Se calculează factorul de încărcare: $k = \frac{U_{scN}}{U_{scN}(i)}$, rezultă astfel:

$$k_1 = \frac{U_{scN}}{U_{scN1}} = \frac{U_{scN1}}{U_{scN1}} = 1$$

$$k_2 = \frac{U_{scN}}{U_{scN2}} = \frac{7.5}{8} = 0.93$$

$$k_3 = \frac{U_{scN}}{U_{scN3}} = \frac{7.5}{8.5} = 0.88$$

$$S_{N_max} = k_1 \cdot S_{N1} + k_2 \cdot S_{N2} + k_3 \cdot S_{N3} = 1 \cdot 10 \cdot 10^6 + 0.93 \cdot 10 \cdot 10^6 + 0.88 \cdot 16 \cdot 10^6$$

Prin urmare, $S_{N_max} = 33.417 \cdot 10^6 = 33.417MVA$

b) $S_{N2} = 3 \cdot I_{N21f} \cdot U_{N21f}$

În primarul transformatorului conexiunea înfășurărilor este de tip stea, astfel că putem scrie:

$$I_{N21f} = I_{N21l}, \text{ rezultă că } I_{N21f} = \frac{S_{N2}}{3 \cdot U_{N21f}}$$

$$U_{N21f} = \frac{U_{N21l}}{\sqrt{3}} = \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 63.5 \cdot 10^3 = 63.5kV$$

Astfel că, în continuare, putem determina curentul nominal de fază din primarul transformatorului:

$$I_{N21f} = \frac{S_{N2}}{3 \cdot U_{N21f}} = \frac{10 \cdot 10^6}{3 \cdot 63.5 \cdot 10^3} = 52.5 \text{ A}$$

În secundarul transformatorului conexiunea înfășurărilor este de tip triunghi și deci vom scrie $U_{N22f} = U_{N22l}$:

$$S_{N2} = 3 \cdot I_{N22f} \cdot U_{N22f}$$

$$I_{N22f} = \frac{S_{N2}}{3 \cdot U_{N22f}} = \frac{10 \cdot 10^6}{3 \cdot 20 \cdot 10^3} = 166.67 \text{ A}$$

$$I_{N22l} = \sqrt{3} \cdot I_{N22f} = \sqrt{3} \cdot 166.67 = 288.33 \text{ A}$$

c) Formula pierderilor în fier pentru cel de-al doilea transformator se scrie:

$$p_{FE2} = 3 \cdot U_{1Nf} \cdot I_{10} \cdot \cos \varphi_0$$

În vederea determinării lor, calculăm:

$$\cos \varphi_0 = \frac{R_m}{Z_m} = \frac{20}{130} = 0.153$$

$$I_{10} = \frac{U_{1nf}}{Z_m} = \frac{63.5 \cdot 10^3}{130 \cdot 10^3} = 0.488 \text{ A}$$

$$\text{Rezultă că: } p_{FE2} = 3 \cdot 63.5 \cdot 10^3 \cdot 0.488 \cdot 0.153 = 14.3 \cdot 10^3 \text{ W}$$

$$\text{Astfel, } p_{FE2} = 14.3 \text{ kW}$$

Pierderile în cupru corespunzătoare celui de-al doilea transformator se calculează cu formula:

$$p_{CuN2} = 3 \cdot U_{2Nsc} \cdot I_{21Nf} \cdot \cos \varphi_{sc}$$

$$\text{Unde, } U_{2Nsc} = 8\% \cdot U_{1Nf} = 0.08 \cdot 63.5 \cdot 10^3 = 5080 \text{ V}$$

$$\text{Deci, } p_{CuN2} = 3 \cdot 5080 \cdot 52.5 \cdot 0.15$$

$$p_{CuN2} \approx 120 \text{ kW}$$

d) Calculăm în continuare randamentul nominal știind că pentru sarcină rezistivă factorul de putere este egal cu 1 ($\cos \varphi = 1$)

$$\eta_{N(\cos \varphi=1)} = \frac{S_{n2} \cdot \cos \varphi}{S_{n2} \cdot \cos \varphi + p_{FE2} + p_{CuN2}} = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 1}{10 \cdot 10^6 \cdot 1 + 14.3 \cdot 10^3 + 120 \cdot 10^3}$$

$$\Rightarrow \eta_{N(\cos \varphi=1)} = \frac{10000}{10134.3} = 0.986 = 98.6\%$$

$$\eta_{N(\cos\varphi=0.8)} = \frac{S_{n2} \cdot \cos\varphi}{S_{n2} \cdot \cos\varphi + p_{FeN2} + p_{CuN2}} = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 0.8}{10 \cdot 10^6 \cdot 0.8 + 14.3 \cdot 10^3 + 120 \cdot 10^3}$$

$$= \frac{8000}{8134.3} = 0.983 = 98.3\%$$

$$k_{S_opt} = \sqrt{\frac{p_{FeN2}}{p_{CuN2}}} = \sqrt{\frac{14.3}{120}} = \sqrt{0.1191} = 0.345$$

$$\eta_{\max(\cos\varphi=1)} = \frac{S_{n2} \cdot k_{S_opt} \cdot \cos\varphi}{S_{n2} \cdot k_{S_opt} \cdot \cos\varphi + p_{FeN2} + k_{S_opt}^2 \cdot p_{CuN2}} =$$

$$= \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 0.345 \cdot 1}{10 \cdot 10^6 \cdot 0.345 \cdot 1 + 14.3 \cdot 10^3 + 0.345^2 \cdot 120 \cdot 10^3} = \frac{3450}{3450 + 14.3 + 0.119 \cdot 120} =$$

$$\Rightarrow \eta_{\max(\cos\varphi=1)} = \frac{3450}{3478.58} = 0.991 = 99.1\%$$

$$\eta_{\max(\cos\varphi=0.8)} = \frac{S_{n2} \cdot k_{S_opt} \cdot \cos\varphi}{S_{n2} \cdot k_{S_opt} \cdot \cos\varphi + p_{FeN2} + k_{S_opt}^2 \cdot p_{CuN2}} =$$

$$= \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 0.345 \cdot 0.8}{10 \cdot 10^6 \cdot 0.345 \cdot 0.8 + 14.3 \cdot 10^3 + 0.345^2 \cdot 120 \cdot 10^3} = \frac{3450 \cdot 0.8}{3450 \cdot 0.8 + 14.3 + 0.119 \cdot 120} =$$

$$\Rightarrow \eta_{\max(\cos\varphi=0.8)} = \frac{2760}{2788.58} = 0.989 = 98.9\%$$

e) $\Delta U = k_S \cdot U_{sc2N} \cdot \cos(\varphi_{sc} - \varphi_2)$, $k_S = 1$,

1. Pentru sarcină pur rezistivă $\varphi_2 = 0^\circ$

$$\Delta U = k_S \cdot U_{sc2N} \cdot \cos(\varphi_{sc} - \varphi_2) = k_S \cdot U_{sc2N} \cdot \cos\varphi_{sc} = 1 \cdot 5080 \cdot 0.15 = 762V$$

2. Pentru sarcină pur inductivă $\varphi_2 = 90^\circ \Rightarrow \sin\varphi_2 = 1$, $\cos\varphi_2 = 0$

$$\Delta U = k_S \cdot U_{sc2N} \cdot \cos(\varphi_{sc} - \varphi_2) = k_S \cdot U_{sc2N} \cdot (\cos\varphi_{sc} \cdot \cos\varphi_2 + \sin\varphi_{sc} \cdot \sin\varphi_2)$$

$$\Rightarrow \Delta U = k_S \cdot U_{sc2N} \cdot \sin\varphi_{sc}$$

$$\sin\varphi_{sc} = \sqrt{1 - \cos^2\varphi_{sc}} = \sqrt{1 - 0.0225} = \sqrt{0.9775} \approx 0.988$$

$$\Rightarrow \Delta U = 1 \cdot 5080 \cdot 0.988 = 5023.05 \text{ V}$$

3. Pentru sarcină pur capacitivă $\varphi_2 = -90^\circ \Rightarrow \sin \varphi_2 = -1$; $\cos \varphi_2 = 0$

$$\Delta U = k_S \cdot U_{sc2N} \cdot \cos(\varphi_{sc} - \varphi_2) = k_S \cdot U_{sc2N} \cdot (\cos \varphi_{sc} \cdot \cos \varphi_2 + \sin \varphi_{sc} \cdot \sin \varphi_2)$$

$$\Rightarrow \Delta U = -k_S \cdot U_{sc2N} \cdot \sin \varphi_{sc}$$

$$\Rightarrow \Delta U = 1 \cdot 5080 \cdot 0.988 = -5023.05 \text{ V}$$

Problema 1.15 Trei transformatoare trifazate funcționează în paralel și au tensiunile nominale egale, iar $\frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{6000 \text{ V}}{300 \text{ V}}$, grupa de conexiune Yy0 și următoarele date nominale:

$$S_{N1} = 250 \text{ kVA}, u_{sc1} = 6 \%,$$

$$S_{N2} = 300 \text{ kVA}, u_{sc2} = 6 \%,$$

$$S_{N3} = 200 \text{ kVA}, u_{sc3} = 6 \%,$$

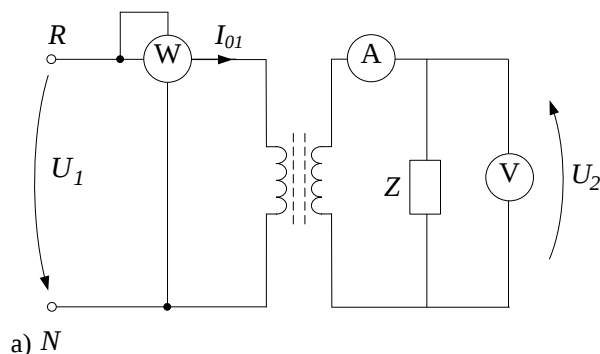
Să se determine puterea totală pe care o pot debita transformatoarele, precum și curenții absorbiți de la rețea de fiecare transformator.

1.5.3 PROBA DE SCURTCIRCUIT-LUCRARE PRACTICĂ

Pentru ridicarea caracteristicilor la funcționarea în sarcină, se realizează montajul din Fig. 1.24 și se alimentează transformatorul cu tensiunea de la rețea, în regim de mers în gol (sarcina deconectată).

Observație: La conectarea sarcinii, aceasta trebuie să aibă impedanța maximă, astfel ca în momentul pornirii încărcarea să fie minimă.

Caracteristicile la funcționarea în sarcină sunt: dependența $\eta = f(I_2)$ ce reprezintă caracteristica randamentului și dependența $U_2 = f(I_2)$ pentru $U_1 = \text{const}$, ce reprezintă caracteristica externă a transformatorului, unde, U_2 - tensiunea la bornele sarcinii, I_2 - curentul prin sarcină, iar U_1 - tensiunea din primar.



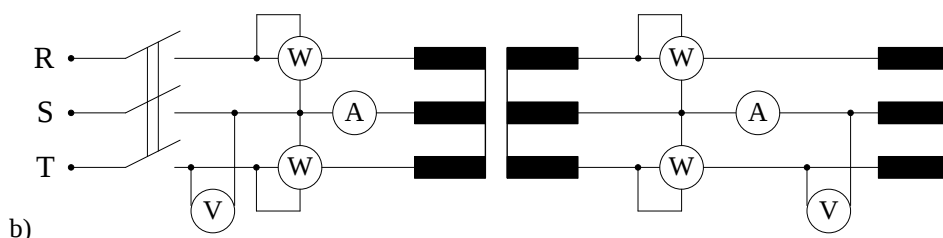
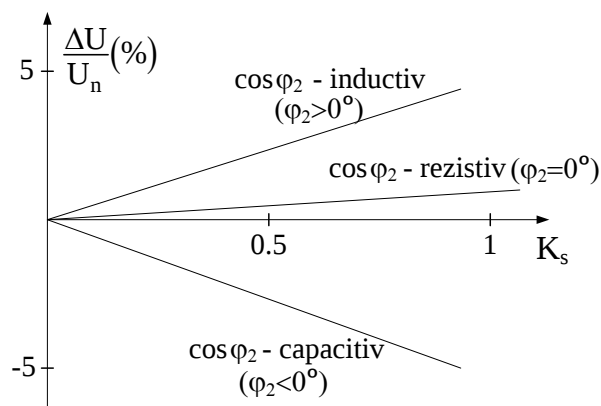


Fig. 1.24 Schema de montaj la sarcină: a) monofazată; b) trifazată

Caracteristica randamentului arată comportarea transformatorului din punct de vedere energetic, la diverse încărcări, pe când caracteristica externă evidențiază măsura în care transformatorul este capabil să furnizeze energie consumatorilor, sub tensiunea U_2 , pentru care au fost dimensionați consumatorii.

Din Fig. 1.25 se poate observa faptul că variația tensiunii la bornele secundarului este liniară, având o valoare pozitivă (cădere de tensiune) dacă sarcina este inductivă, sau are o valoare negativă când sarcina are caracter capacitiv. Factorul de încărcare se calculează pentru toate cele trei tipuri de sarcină: rezistivă, capacitivă și inductivă.

Fig. 1.25 Variația tensiunii cu sarcina (K_s)

Valorile măsurătorilor și rezultatele calculelor se trec în tabelul de mai jos:

Tabel 1.3 Mărimile probei de sarcină

Nr crt	Mărimi măsurate					Mărimi calculate		
	U_1 [V]	U_2 [V]	I_2 [A]	P_1 [W]	P_2 [W]	k_s	η	ΔU
1								
2								
3								

4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

Întrebări:

1. Ce se înțelege prin factor de sarcină?
2. Care este formula factorului de sarcină utilizată la calculul randamentului maxim?
3. Cum variază unghiul de defazaj φ_2 în funcție de caracterul sarcinii?
4. Pentru ce tip de sarcină căderea de tensiune este cea mai mare?
5. Se poate întâmpla ca tensiunea din secundar să crească cu sarcina? Pentru ce tip de sarcină?
6. Pentru ce valori a factorului de putere randamentul este maxim?
7. Cât este randamentul pentru o sarcină pur inductivă?
8. Cât este randamentul pentru o sarcină pur capacitivă?

1.6 TRANSFORMATORUL ELECTRIC TRIFAZAT. SCHEME DE CONEXIUNI ȘI GRUPE DE CONEXIUNI.

În cadrul secțiunii se urmărește însușirea noțiunilor legate de transformatorul trifazat, a grupei de conexiuni, schema de conexiuni, precum și realizarea diferitelor scheme de conexiuni între înfășurările primare, respectiv cele secundare ale transformatoarelor trifazate.

1.6.1 NOȚIUNI TEORETICE

Se poate considera cazul unui transformator trifazat format din trei transformatoare monofazate (câte unul pentru fiecare fază) sau un transformator trifazat. Utilizarea a trei transformatoare monofazate identice, alimentate de la o sursă trifazată simetrică, pentru a forma un transformator trifazat este întâlnită la puteri foarte mari, iar avantajul acestei soluții constă în faptul că unitatea de rezervă este de doar 1/3 din puterea transformatoarelor.

Transformatorul trifazat este o soluție economică, pentru care unitatea de rezervă este de 1/1 din puterea transformatorului în funcțiune.

Cele mai întâlnite sunt transformatoarele cu coloanele dispuse în linie, pe care sunt așezate concentric înfășurările primară și secundară și care au același sens de înfășurare.

Modul de cuplare galvanică a fazelor înfășurărilor se numește *conexiune*.

Schema de conexiuni se referă la cuplarea electrică a înfășurărilor unui transformator trifazat: stea, triunghi sau zig-zag (Fig. 1.26).

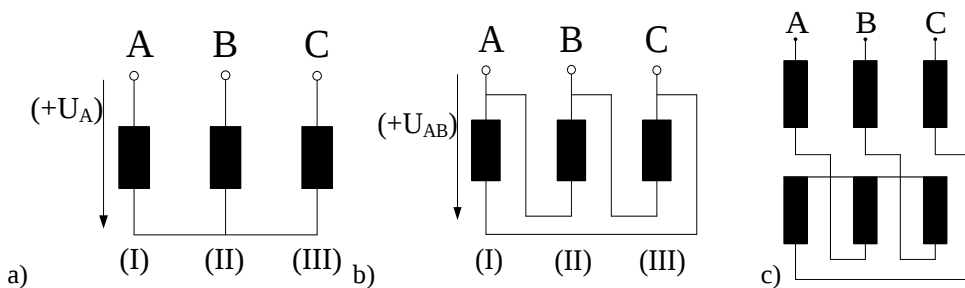


Fig. 1.26 Conexiunile transformatorului: a) stea, b) triunghi, c) zig-zag

Se prezintă în continuare principalele noțiuni ce caracterizează schemele de conexiuni ale înfășurărilor:

- *Capetele înfășurărilor* se notează cu litere mari pe partea de înaltă tensiune și cu litere mici pe partea de joasă tensiune.

- Principala convenție care trebuie respectată în vederea realizării corecte a unei scheme de conexiuni este *asocierea corectă a sensurilor pozitive* de parcurgere a înfășurărilor.

- *Schema de conexiuni* este caracterizată de unghiul dintre tensiunea de linie de pe partea de înaltă tensiune și tensiunea de linie de pe partea de joasă tensiune, corespunzătoare (cea din urmă fiind considerată defazată în urma primei tensiuni).

- *Unghiul de defazaj* dintre tensiunile de linie se notează cu β și se calculează $\beta = n \cdot 30^\circ$, unde „ n ”-ordinul conexiunii.

- *Ordinul conexiunii* este număr par dacă atât în primar cât și în secundar este aceeași conexiune (Ex. Yy6, Dd2, ...), deoarece tensiunile de linie din primarul și secundarul transformatorului se compun la fel; pe când dacă în primar și în secundar conexiunile sunt diferite, ordinul este număr impar (Ex. Dy7, Yd5, ...).

- *Ordinul conexiunii* trebuie verificat pentru două grupuri de tensiuni omoloage, de exemplu (U_{AB} , U_{ab}) și (U_{BC} , U_{bc}).

Grupa de conexiuni reprezintă totalitatea schemelor de conexiuni care au același ordin.

Conexiunea stea (Y, y) se identifică prin faptul că *are legate împreună* capetele de început sau cele de sfârșit ale înfășurărilor celor trei faze, formând astfel *nulul conexiunii* sau *punctul neutru* (Fig. 1.27).

Prin conectarea de tip stea a înfășurărilor celor trei faze se obțin tensiunile de linie (U_l): U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , precum și tensiunile de fază (U_f): U_A , U_B , U_C , pentru care putem scrie relația: $U_l = \sqrt{3} \cdot U_f$. În acest caz, valorile curenților de linie ce parcurg cele trei înfășurări sunt egale cu valorile curenților de fază: $I_l = I_f$.

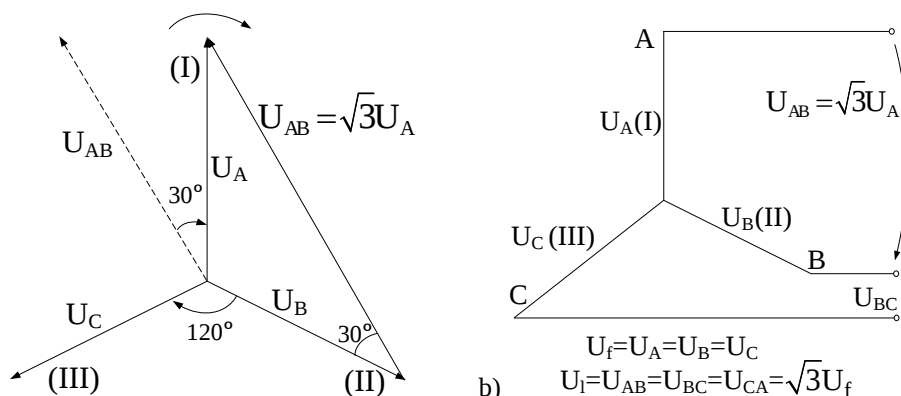


Fig. 1.27 Conexiunea stea: a) fazorii tensiunilor, b) schema de alimentare

Conexiunea triunghi (D, d) are conectate începuturile înfășurărilor de pe fiecare coloană cu sfârșiturile înfășurărilor de pe coloana următoare, iar capetele libere ale înfășurărilor se leagă la bornele transformatorului.

Pentru conexiunea de tip triunghi, valorile tensiunilor de linie ce parcurg cele trei înfășurări sunt egale cu valorile tensiunilor de fază: $U_l = U_f$, iar între curenții de linie și cei de fază se scrie relația: $I_l = \sqrt{3} \cdot I_f$.

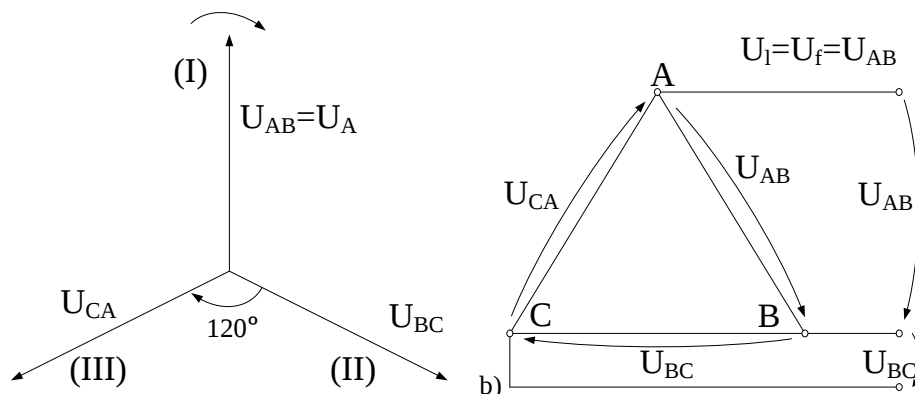


Fig. 1.28 Conexiunea triunghi: a) fazorii tensiunilor, b) schema de alimentare

La *conexiunea zig-zag* (z) se conectează între ele bobine de pe două coloane diferite, parcurse în sensuri opuse, formandu-se astfel un punct neutru ce poate fi scos la placa de borne.

1.6.2 CONSTRUCȚIA SCHEMEI DE CONEXIUNI

Pentru ca modul de realizare a schemelor de conexiuni să fie mai bine înțeles, iar noțiunile definite anterior să fie mai clare, vom prezenta în continuare câteva exemple de scheme de conexiuni atât pentru ordin par cât și pentru ordin impar.

Problema 1.16 Să se construiască schema de conexiuni Yy2 (conexiune stea atât în primar, cât și în secundar, de ordin 2).

Soluție:

$$n=2, \beta=2 \cdot 30^\circ=60^\circ$$

Pentru realizarea schemei de conexiuni, este necesar să se reprezinte tensiunile corespunzătoare fiecărei coloane a transformatorului, tensiuni defazate la $2\pi/3=120^\circ$, astfel încât, pe prima coloană avem tensiunea U_A , pe cea de-a doua coloană U_B , iar U_C este tensiunea pe coloana a treia a transformatorului.

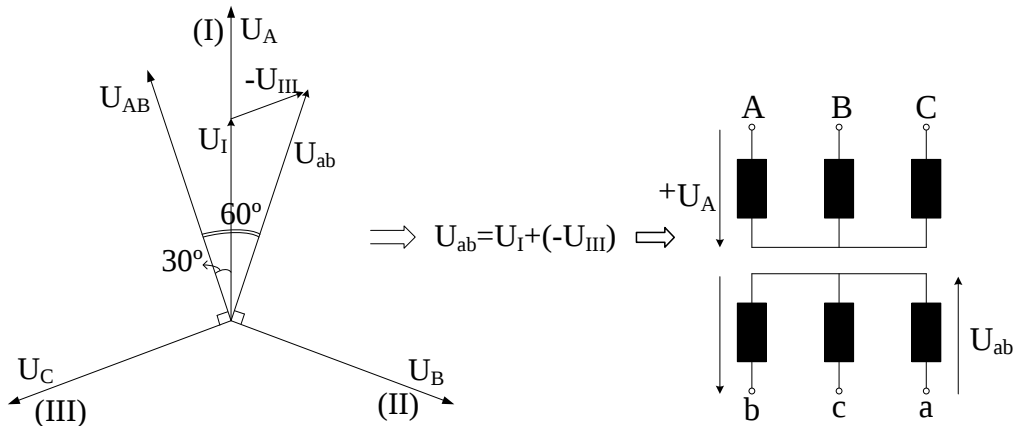


Fig. 1.29 Schema de conexiuni Yy2

Urmărind figura de mai sus, se poate observa faptul că tensiunea de linie din primarul transformatorului (U_{AB}) este defazată cu 60° în fața tensiunii de linie din secundar (U_{ab}), precum și faptul că cea din urmă tensiune poate fi descompusă în funcție de tensiunile din coloanele I și III: $U_{ab}=U_I+(-U_{III})$. Prin urmare, fazele din secundar sunt parcurse în ordinea b,c,a.

Problema 1.17 Să se construiască schema de conexiuni Dd8 (conexiunea este de tip triunghi atât în primar cât și în secundar, de ordin 8).

Soluție:

$$n=8, \beta=8 \cdot 30^\circ=240^\circ$$

Se reprezintă (Fig. 1.30) tensiunile de fază corespunzătoare fiecărei coloane a transformatorului, tensiuni care pentru conexiunea triunghi sunt egale cu cele de linie.

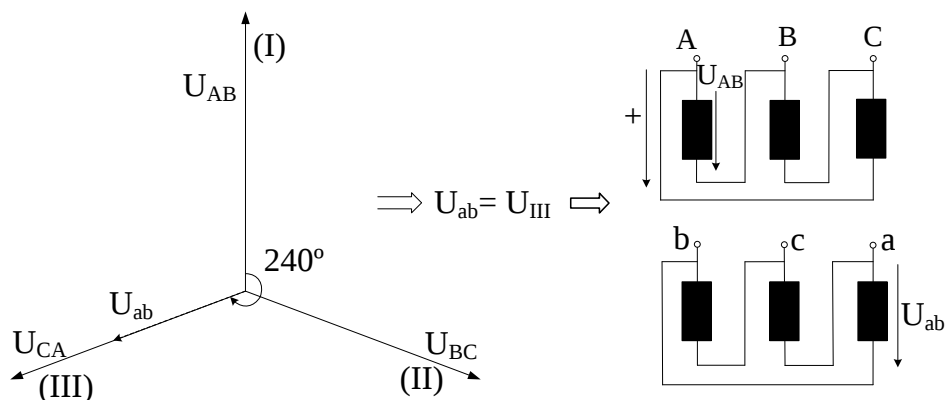


Fig. 1.30 Schema de conexiuni Yd7

Din Fig. 1.30 se poate observa faptul că tensiunea de linie din primarul transformatorului (U_{AB}) este defazată cu 240° în fața tensiunii de linie din secundar (U_{ab}), precum și faptul că $U_{ab}=U_{III}$, rezultă astfel ordinea b,c,a pentru fazele din secundar.

Problema 1.18 Să se construiască schema de conexiuni Yd7 (conexiunea este de tip stea în primar, triunghi în secundar, de ordin 7).

Soluție: $n=7$, $\beta=7 \cdot 30^\circ=210^\circ$

Reprezentăm întâi (Fig. 1.31) tensiunile de fază corespunzătoare fiecărei coloane a transformatorului, precum și cele de linie din primar și secundar.

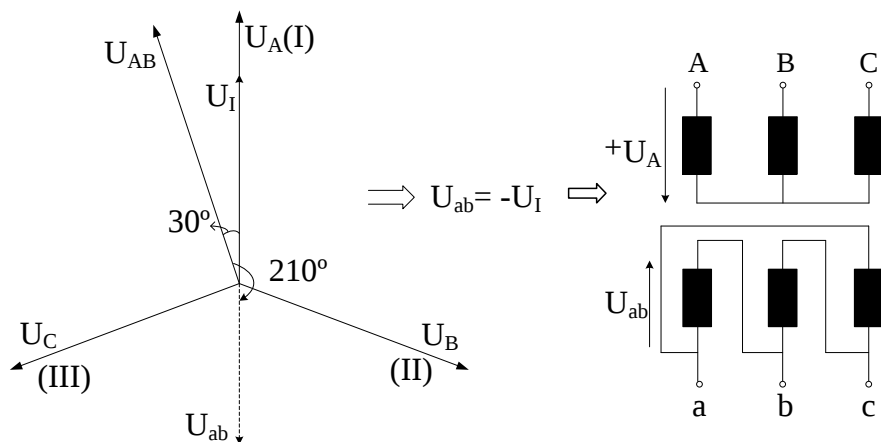


Fig. 1.31 Schema de conexiuni Yd7

În Fig. 1.31 tensiunea de linie din primarul transformatorului (U_{AB}) este defazată cu 210° în fața tensiunii de linie din secundar (U_{ab}), rezultă astfel că U_{ab} se opune tensiunii U_A , corespunzătoare coloanei I din primarul transformatorului: $U_{ab} = -U_I$. Odată stabilit sensul tensiunii de pe prima coloană a secundarului, obținem pentru acesta din urmă ordinea a,b,c a fazelor.

Problema 1.19: Să se construiască schema de conexiuni Dy11 (conexiunea este de tip triunghi în primar și stea în secundar, de ordin 11).

Soluție: $n=11$, $\beta=11 \cdot 30^\circ = 330^\circ$

În vederea realizării schemei de conexiuni reprezentăm (Fig. 1.32) tensiunile de fază corespunzătoare fiecărei coloane a transformatorului, (egale cu tensiunile de linie), prin urmare, $U_{AB} = U_I$, $U_{BC} = U_{II}$, $U_{CA} = U_{III}$.

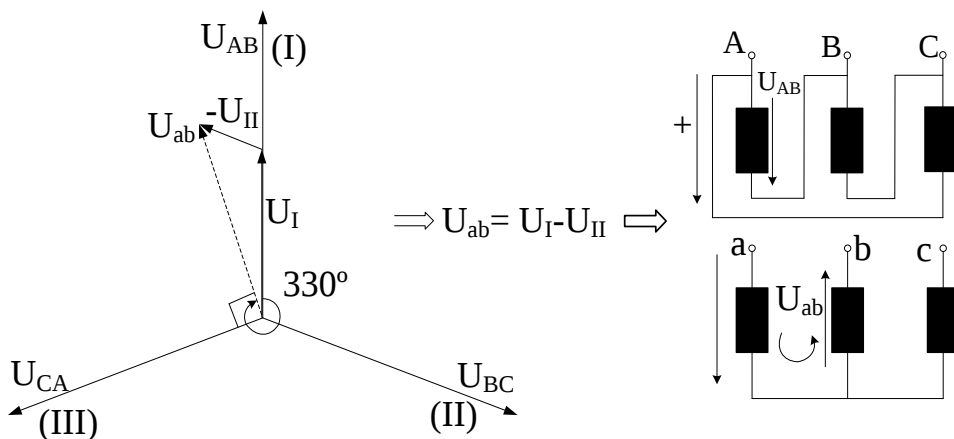


Fig. 1.32 Schema de conexiuni Dy11

Cum $\beta = 330^\circ$, tensiunea de linie din primarul transformatorului (U_{AB}) este defazată cu 330° în fața tensiunii de linie din secundar (U_{ab}), rezultă astfel că U_{ab} se descompune în funcție de tensiunile corespunzătoare coloanelor I și respectiv, II: $U_{ab} = U_I - U_{II}$.

Reprezentând înfășurările din secundar, obținem ordinea a,b,c de parcurgere a fazelor din secundarul transformatorului.

Observații:

1. Au fost realizate mai sus, din punct de vedere teoretic, patru exemple de scheme de conexiuni, fiecare cu un ordin „n“, considerat aleator.
2. Nu toate schemele de conexiuni se utilizează practic, prin urmare, se prezintă în continuare, în tabelul 1.4 [1.7], acele scheme de conexiuni ale înfășurărilor care se pretează la fabricarea transformatoarelor.

Tabel 1.4 Scheme de conexiuni utilizate la fabricarea transformatoarelor

Simbol	Diagrama vectorială	Schema de conexiuni	Domeniul de utilizare
	Tensiunea Înaltă Joasă	Tensiunea Înaltă Joasă	
Yy-12			Transformatoare coboritoare pentru distribuție de forță. Transformatoare ridicătoare.
Dy-11			Transformatoare coboritoare pentru distribuție de lumină. Firul neutru se poate încărcă 100 %.
Yd-11			Transformatoare ridicătoare pentru centrale și stații.
Yz-11			Același ca la conexiunea Dy-11 numai pînă la 100 kVA
Dy-5			Același ca la conexiunea Dy-11
Yd-5			Același ca la conexiunea Yd-11
Yz-5			Același ca la conexiunea Yz-11

1.6.3 SCHEME DE CONEXIUNI-LUCRARE PRACTICĂ

Determinarea grupei din care face parte o conexiune gata realizată se poate face prin *calcul grafic* prin realizarea schemei de conexiuni și determinând din construcția grafică defazajul dintre tensiunile de linie omoloage din primar și secundar sau prin *metode experimentale*, dintre care amintim:

- metoda directă*, prin care se folosește un fazmetru monofazat (Fig. 1.33) a cărui *înfășurare serie* se conectează printr-un reostat la bornele unei faze a unei înfășurări, iar *înfășurarea paralel* se conectează la bornele celeilalte înfășurări. Una dintre înfășurări se alimentează astfel încât să se asigure funcționarea normală a fazmetrului.

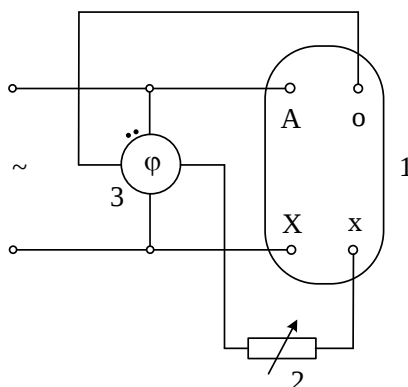


Fig. 1.33 Schema de montaj cu fazmetru monofazat

b) *metoda celor două voltmetre* (Fig. 1.34) prin care se măsoară o serie de tensiuni ale transformatorului și se compară cu valorile calculate conform tabelului 1.5.

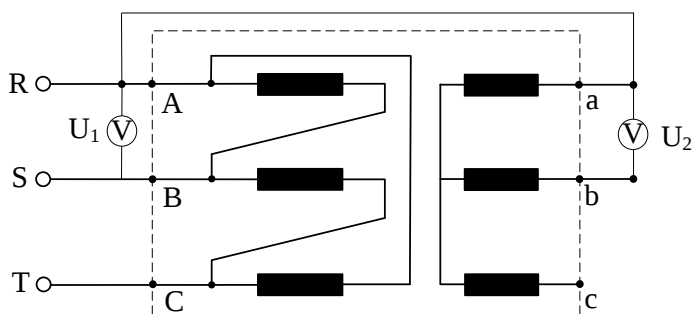


Fig. 1.34 Schema de montaj cu două voltmetre

Tabel 1.5 Tensiunile corespunzătoare conexiunilor posibile ale înfășurărilor transformatorului

Grupa de conexiuni	Defazajul în grade	Conexiuni posibile ale înfășurărilor	Formule de calcul pentru		
			U_{b-B}	U_{b-C}	U_{C-b}
0(12)	0(360)°	Yy, Dd, Dz	$U_e(k_e-1)$	$U_e\sqrt{1-k_e+k_e^2}$	$U_e\sqrt{1-k_e+k_e^2}$
1	30	Yd, Dy, Yz	$U_e\sqrt{1-\sqrt{3}\cdot k_e+k_e^2}$	$U_e\sqrt{1-\sqrt{3}\cdot k_e+k_e^2}$	$U_e\sqrt{1+k_e^2}$
2	60	Yy, Dd, Dz	$U_e\sqrt{1-k_e+k_e^2}$	$U_e(k_e-1)$	$U_e\sqrt{1+k_e+k_e^2}$
3	90	Yd, Dy, Yz	$U_e\sqrt{1+k_e^2}$	$U_e\sqrt{1-\sqrt{3}\cdot k_e+k_e^2}$	$U_e\sqrt{1+\sqrt{3}\cdot k_e+k_e^2}$
4	120	Yy, Dd, Dz	$U_e\sqrt{1+k_e+k_e^2}$	$U_e\sqrt{1-k_e+k_e^2}$	$U_e(1+k_e)$

5	150	Yd, Dy, Yz	$U_e \sqrt{1 + \sqrt{3} \cdot k_e + k_e^2}$	$U_e \sqrt{1 + k_e^2}$	$U_e \sqrt{1 + \sqrt{3} \cdot k_e + k_e^2}$
6	180	Yy, Dd, Dz	$U_e(1 + k_e)$	$U_e \sqrt{1 + k_e + k_e^2}$	$U_e \sqrt{1 + k_e + k_e^2}$
7	210	Yd, Dy, Yz	$U_e \sqrt{1 + \sqrt{3} \cdot k_e + k_e^2}$	$U_e \sqrt{1 + \sqrt{3} \cdot k_e + k_e^2}$	$U_e \sqrt{1 + k_e^2}$
8	240	Yy, Dd, Dz	$U_e \sqrt{1 + k_e + k_e^2}$	$U_e(1 + k_e)$	$U_e \sqrt{1 - k_e + k_e^2}$
9	270	Yd, Dy, Yz	$U_e \sqrt{1 + k_e^2}$	$U_e \sqrt{1 + \sqrt{3} \cdot k_e + k_e^2}$	$U_e \sqrt{1 - \sqrt{3} \cdot k_e + k_e^2}$
10	300	Yy, Dd, Dz	$U_e \sqrt{1 - k_e + k_e^2}$	$U_e \sqrt{1 + k_e + k_e^2}$	$U_e(k_e - 1)$
11	330	Yd, Dy, Yz	$U_e \sqrt{1 - \sqrt{3} \cdot k_e + k_e^2}$	$U_e \sqrt{1 + k_e^2}$	$U_e \sqrt{1 - \sqrt{3} \cdot k_e + k_e^2}$

Întrebări:

1. De ce este necesară legătura dintre A și a?
2. De ce metoda celor două voltmetre este limitată la transformatoare cu raport de transformare mai mic de 10 (15)?
3. Care este legătura dintre raportul de transformare și precizia măsurătorilor?

Referințe bibliografice:

- [1.1]. I. Vetreș, „Bazele electrotehnicii. Teorie și aplicații (Cap.4)“, Editura Politehnica, Timisoara, 2008.
- [1.2]. I. Boldea, „Transformatoare și mașini electrice“, Editura Politehnica, Timișoara, 2009.
- [1.3]. I. Novac, „Mașini electrice – partea I“, 1996.
- [1.4]. Gh. Atanasiu, M. Babescu, Gh. Bogoevici, I. Boldea, D. Irhașiu, M. Tănase, „Încercările mașinilor electrice – manual de laborator–“, Timișoara, 1979.
- [1.5]. S. Deaconu, „Mașini electrice – Lucrări de laborator“, Universitatea „Politehnica” Timișoara, Facultatea de inginerie Hunedoara, 1996.
- [1.6]. S. Deaconu, A. Iagăr, L. Tutelea, „Mașini electrice – Aplicații“, Editura Destin, Deva, 2000.
- [1.7]. T. Dordea, „Mașini electrice“, Editura didactică și pedagogică, 1977.

2. MAȘINA DE CURENT CONTINUU

2.1 MAȘINA DE CURENT CONTINUU (MCC): GENERALITĂȚI ȘI CONSTRUCȚIE

Secțiunea aceasta are ca scop înțelegerea și însușirea părților componente ale mașinii de curent continuu, studiul tipurilor sale constructive și a caracteristicilor care fac posibilă identificarea acestor mașini.

2.1.1 NOȚIUNI TEORETICE

Mașina de curent continuu este alcătuită din *sator (inductor)* și *rotor (indus)*, între care se găsește *întrefierul* (Fig. 2.1).

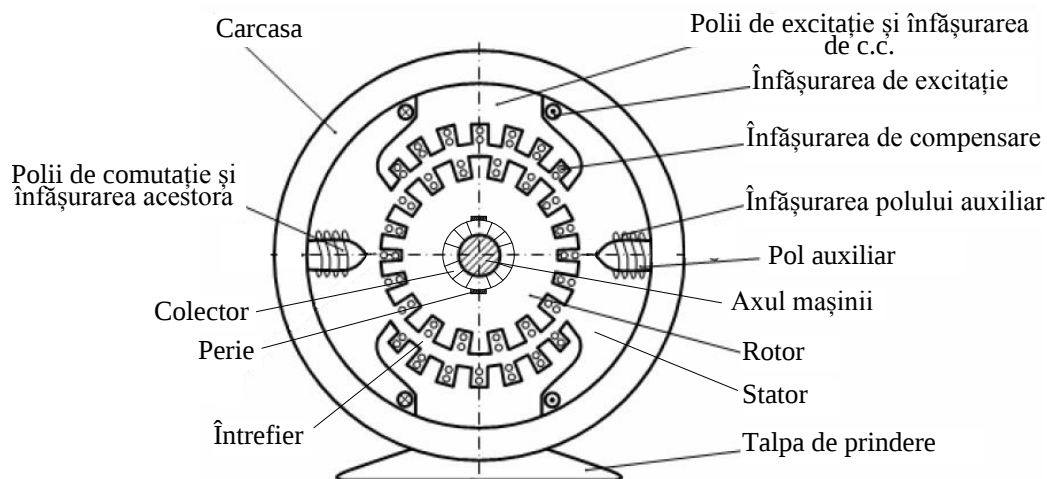


Fig. 2.1 Alcătuirea MCC - secțiune transversală

Caracteristic acestei mașini este funcționarea în curent continuu, atât excitația cât și rotorul (indusul) fiind alimentate în curent continuu.

Mașina de curent continuu poate să funcționeze în regim de motor sau în regim de generator.

Satorul (inductorul) este alcătuit din:

- *carcasă* în formă cilindrică realizată din materiale feromagnetice (fontă sau oțel) prevăzută cu cutie de borne, tălpi de prindere, cârlig de ridicare. *Carcasa (jugul statoric)* reprezintă partea imobilă pe care se fixează polii de excitație și cei de comutație, iar la mașinile de putere mai mare decât câteva sute de wați, carcasa și jugul statoric reprezintă aceeași piesă, utilă ca drum de închidere a fluxului magnetic inductor.

- *scuturile* realizate tot din materiale feromagnetice, precum carcasa, au rolul de a închide la capete carcasa și sunt prevăzute cu lagăre (rulmenți) în care se rotește axul rotorului;
- *polii principali* realizați din oțel (în număr de $2p$ - unde p este numărul de perechi de poli ai mașinii) și *polii auxiliari* (tot în număr de $2p$) precum și înfășurările acestora;
- *portperii* în care sunt dispuse periile colectoare (în număr de $2p$) realizate din cărbune, cupru, bronz grafitat sau materiale speciale conținând cupru și cărbune, realizate prin sinterizare.

Pentru unele mașini, de puteri mici, polii inductori pot fi realizați cu magneți permanenți, deci nu mai au înfășurări inductoare alcătuite din bobine.

Descoperirea în ultimele două decenii a materialelor magnetice cu pământuri rare a condus la realizarea magneților permanenți performanți, ceea ce a determinat creșterea puterii mașinilor fără înfășurări de excitație.

Rotorul (indusul) este format din:

- *axul* sau arborele mașinii pe care este dispus un ventilator necesar pentru răcirea mașinii;
- *circuitul magnetic* de formă cilindrică solidar cu axul, format din tole de oțel electrotehnic,
- cu creștături periferice longitudinale în care sunt introduse laturile active ale bobinelor înfășurării rotorice;
- *colectorul* realizat din lamele de cupru, izolate între ele cu plăcuțe de mică, fixate într-un butuc din material izolant.

Înfășurările mașinii de curent continuu

Înfășurarea de excitație este plasată pe polii proeminenți din stator; acești poli se mai numesc și poli principali, care alternează cu polii de comutație, prin urmare, pentru aceste mașini, câmpul magnetic se produce cu ajutorul curentului de excitație.

În tălpile polare ale polilor principali (partea polilor dinspre rotor) sunt practicate creștături în care se plasează ***înfășurarea de compensație***, care se conectează în serie cu înfășurarea indusului și are rolul de a compensa fluxul magnetic de reacție al indusului care tinde să micșoreze fluxul magnetic inductor deoarece, sub talpa polară cele două fluxuri au sensuri opuse. Deoarece înfășurarea de compensație reprezintă un cost suplimentar se utilizează numai la mașini mari cu regimuri grele de funcționare.

Înfășurarea indusului este plasată în creștăturile repartizate uniform pe rotor. Ea este alcătuită din bobine ce au laturile situate în creștături. În fiecare creștătură sunt două laturi de la două bobine diferite, una în partea de jos a creștăturii și alta în partea de sus.

Deschiderea unei bobine se notează cu y_b și este distanța dintre laturile bobinei; y_b se măsoară în general în număr de creștături sau în centimetri, se mai numește și pasul bobinei și poate fi egal sau mai mic (pas scurtat) cu *pasul polar* τ .

Pasul polar este distanța în număr de creștături sau centimetri la periferia rotorului între doi poli.

Înfășurările indusului pot fi de două tipuri: buclate și ondulate. Capetele unei bobine la bobinajul buclat sunt legate la două lamele de colector vecine, în timp ce la bobinajul ondulat sunt conectate la lamele de colector aflate la o distanță egală cu aproape dublul unui pas polar.

Numărul de perii este egal cu numărul de poli (2p).

Periile sunt legate între ele din două în două, astfel încât jumătate din numărul lor se conectează la borna „+” a indusului și jumătate la borna „-”. Din punct de vedere electric, fiecare perie este plasată pe lamela de colector la care este conectată latura bobinei aflată într-o axă neutră a mașinii (ca și polii de comutație), în care câmpul magnetic este nul (datorită fluxului de reacție al indusului), însă fizic, bobinele din axa neutră sunt legate la lamelele aflate aproximativ la mijlocul polului principal.

În latura bobinei scurtcircuitată de perie nu se induc tensiuni electromotoare, și deci, nu apar curenți care la întrerupere să conducă la apariția scânteilor la colector. Prin urmare, se poate spune că periile sunt plasate în axele neutre ale mașinii.

Între periile de polarități diferite se vor înseria un număr de bobine care vor forma o cale de curent, toate bobinele formând un număr par de căi de curent în paralel. Rotorul mașinii are un număr de „2a” căi de curent care, în funcție de tipul înfășurării, este egal sau mai mare ca numărul de perechi de poli (2p).

Comutația mașinii de curent continuu

În timpul funcționării mașinii de curent continuu bobinele înfășurării indusului sunt scurtcircuitate pe rând și apoi trec în cealaltă cale de curent prin trecerea periilor de pe o lamelă de colector pe alta. Dacă în bobinele scurtcircuitate apar tensiuni electromotoare induse, atunci vor apărea curenți care prin întrerupere conduc la amorsarea arcurilor electrice între perii și lamelele de colector, fenomen numit *comutația mașinii de curent continuu*. Aceste „scânteii” la colector determină deteriorarea rapidă a periilor și lamelelor. Îmbunătățirea comutației se realizează prin plasarea periilor astfel încât bobinele scurtcircuitate să aibă laturile active în axele neutre ale mașinii, axe în care câmpul magnetic este nul.

La mașinile de foarte mică putere, mai puțin pretențioase, se plasează periile în axele neutre fizice corespunzătoare funcționării în sarcină nominală și se

echipează mașina cu perii de rezistență mare din grafit, micșorându-se astfel intensitatea curentului în bobina scurtcircuitată, pentru a reduce scânteierile la colector, cu principalul dezavantaj că această soluție conduce la micșorarea randamentului mașinii.

La mașinile de medie și mare putere soluția adoptată constă în plasarea în axele neutre geometrice ale mașinii a unor *poli auxiliari*, cu înfășurări ce sunt parcurse de curentul rotoric, care produc un câmp magnetic opus celui de reacție al indusului, deci care compensează câmpul de reacție al indusului. La mașini mai pretențioase se face o compensare a câmpului magnetic de reacție al indusului și în dreptul axelor polare, prin plasarea în creștăturile tălpilor polare ale *polilor principali* a unor înfășurări parcurse de curentul rotoric.

Înfășurările de pe poli auxiliari împreună cu înfășurările de compensare de pe polii principali constituie excitația serie a mașinii, care are rolul de a compensa câmpul magnetic de reacție a indusului, de a fixa axele neutre fizice și de a îmbunătăți comutația mașinii de curent continuu.

Schema echivalentă a mașinii de curent continuu. Tipuri de excitație.

Schema echivalentă a mașinii de curent continuu se realizează ținând cont de faptul că înfășurarea de excitație produce câmp magnetic după axa polilor principali, în timp ce înfășurarea de compensație (C), respectiv cea de comutație (K) sunt legate în serie și produc câmp după axa neutră (a polilor de comutație).

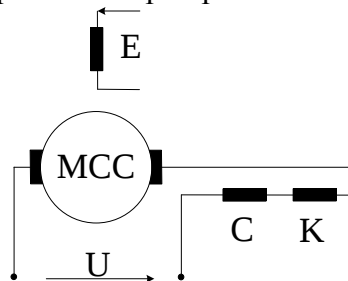


Fig. 2.2 Schema echivalentă a mașinii cu colector [2.1]

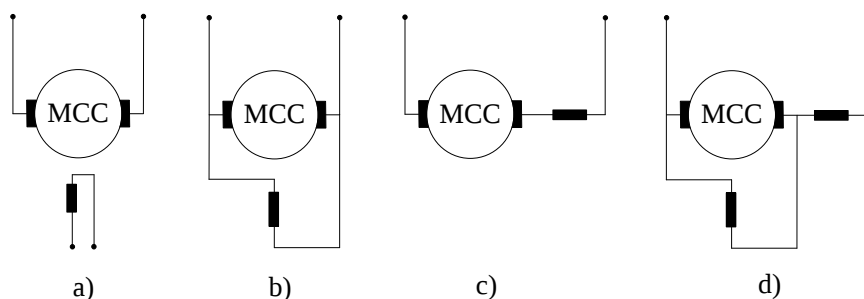


Fig. 2.3 Conexiunile mașinii de curent continuu: a) excitație separată, b) excitație în paralel, c) excitație serie, d) excitație mixtă [2.1]

Mașinile de curent continuu se deosebesc în funcție de sursa de curent continuu pentru înfășurarea de excitație, astfel:

- a) Sursă de curent exterioră: MCC cu excitație separată (Fig. 2.3a);
- b) Curent de excitație produs de mașină: MCC cu excitație paralel (Fig. 2.3b), serie (Fig. 2.3c), mixtă (Fig. 2.3d).

În prezent predomină regimul de motor cu excitație separată sau cu magneți permanenți, regimul de generator fiind realizat în vederea reducerii rapide a turației sau pentru frânarea recuperativă.

Regimuri de funcționare ale M.c.c.

Regimul de generator

Mașina convertește puterea mecanică primită pe la ax de la un motor primar, în putere electrică P_{em} , pe care o cedează în mare parte unui consumator, cu excepția unei părți transformate în căldură în circuitul rotoric.

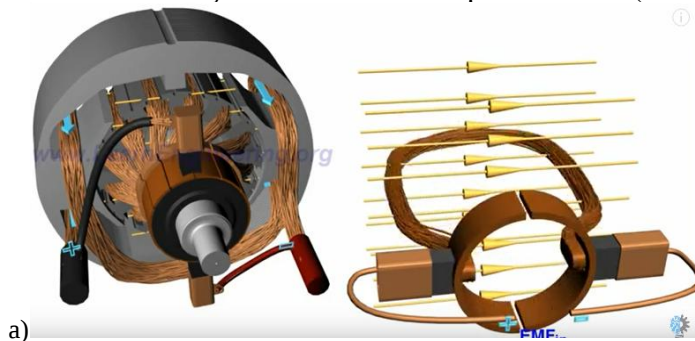
Curentul prin rotor este în sensul tensiunii electromotoare induse iar cuplul electromagnetic este de sens opus sensului de rotație, fiind astfel denumit *cuplu rezistent*.

Regimul de motor

Mașina convertește puterea electromagnetică P_{em} în putere mecanică la ax, pe care o cedează unei mașini de lucru. Curentul prin rotor este în sens opus tensiunii electromotoare induse, iar cuplul electromagnetic este în același sens cu sensul de rotație, fiind denumit *cuplu motor*.

Regimul de frână

Mașina primește *putere electrică* de la o sursă de curent continuu, dar și putere mecanică pe la ax de la mașina de lucru cu care aceasta este cuplată (pe care o convertește în putere electrică) și transformă toată puterea rezultată în căldură. Deoarece în acest caz curentul rotoric ar fi foarte mare și căldura produsă ar supraîncălzi mașina, circuitul rotorului se înseriază obligatoriu cu un reostat de frânare R_f cu o rezistență mare, reglabilă. Curentul prin rotor este în același sens cu tensiunea electromotoare indusă iar cuplul electromagnetic este de sens opus sensului de rotație fiind astfel un cuplu rezistent (de frânare).



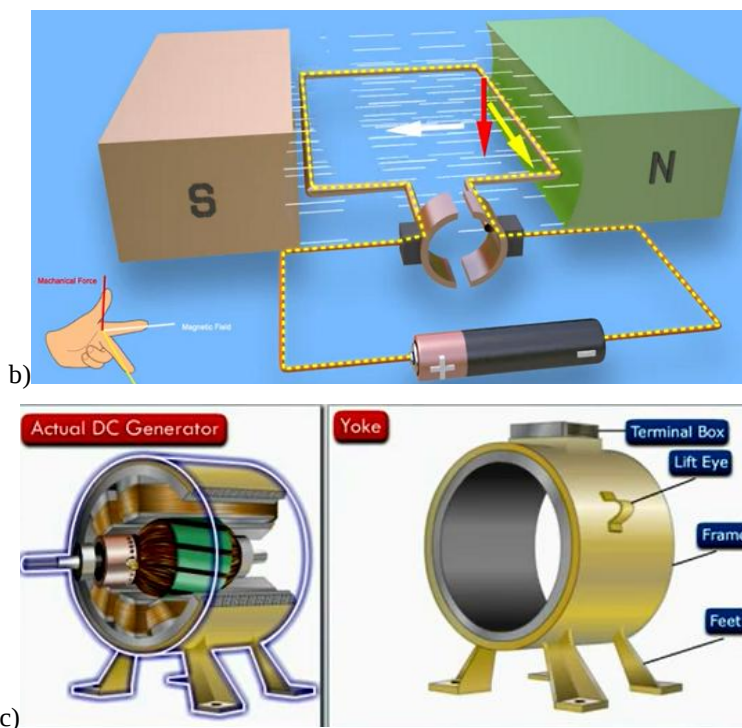


Fig. 2.4 Construcția Mcc, a) [https://www.youtube.com/watch?v=LAtPHANefQo](https://www.youtube.com/watch?v=LAtPHANefQo;);
Principiul de funcționare Mcc, b) https://www.youtube.com/watch?v=j_F4limaHYI;
Construcția Gcc, c) https://www.youtube.com/watch?v=d_LOXUEFA-

Mai sus, în Fig. 2.4 sunt prezentate în detaliu, atât componentele (Fig. 2.4a) cât și modul de funcționare (Fig. 2.4b) pentru o mașină de curent continuu, dar și construcția unui generator de curent continuu (Fig. 2.4c).

2.1.2 EXEMPLE NUMERICE PENTRU ÎNFĂȘURĂRILE MCC

Problema 2.1 O înfășurare de curent continuu are următoarele date: $N_c=16$, $p=2$, $k=16$. Dacă tipul de înfășurare este buclată simplă, să se reprezinte steaua tensiunilor electromotoare (t.e.m.), schema de înfășurare și poligonul t.e.m. induse.

Soluție:

Dacă înfășurarea este simplă, rezultă că $m=1$.

Deschiderea bobinelor (în creștături elementare) este: $y_b = \tau = \frac{N_c}{2p_1} = \frac{16}{4} = 4$,

Se calculează t , numărul de creștături în care tensiunile induse sunt în fază:

$t = \text{c.m.m.d.c.}(N_c, p) = \text{c.m.m.d.c.}(16, 2) = 2$, rezultă deci că în fiecare creștătură sunt câte două tensiuni în fază.

Pentru a putea reprezenta steaua tensiunilor induse trebuie calculat unghiul de defazaj dintre două tensiuni induse consecutive, $\alpha_{ec} : \alpha_{ec} = \frac{2\pi}{N_c} * p = \frac{2\pi}{16} * 2 = \frac{\pi}{4} = 45^\circ$

Cum $k=16$, rezultă că numărul lamelelor la colector este egal cu numărul de creștături, N_c .

Pasul de întors, y al înfășurării este: $y = y_b - y_c$, unde $y_c = m = 1$ este pasul la colector.

Prin urmare, $y = 4 - 1 = 3$ și astfel, cu latura de întors a bobinei ne întoarcem pe lamela de colector de lângă cea de la care am plecat cu latura de dus.

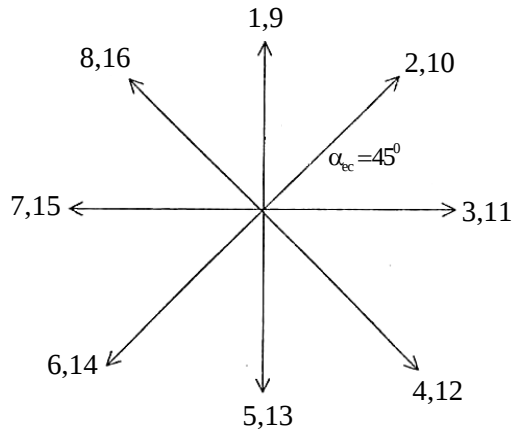


Fig. 2.5 Steaua tensiunilor electromotoare induse pentru înfășurarea buclată cu $N_c=16$

Tensiunile induse în număr de $\frac{N_c}{t} = \frac{16}{2} = 8$ se pot așeza cap la cap pentru a forma poligonul regulat cu 8 laturi, în care unghiul dintre două laturi α_{et} se calculează: $\alpha_{et} = \frac{2\pi}{N_c} * t = \frac{2\pi}{16} * 2 = \frac{4\pi}{16} = \frac{\pi}{4} = \alpha_{ec}$

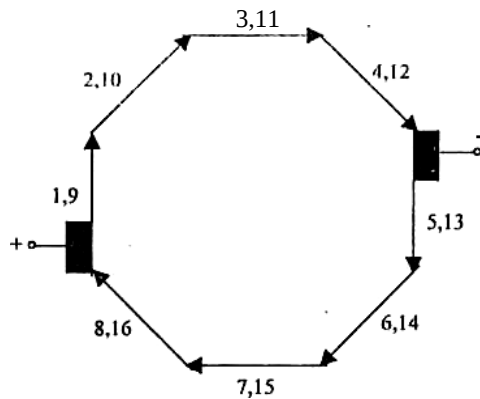


Fig. 2.6. Poligonul t.e.m. induse

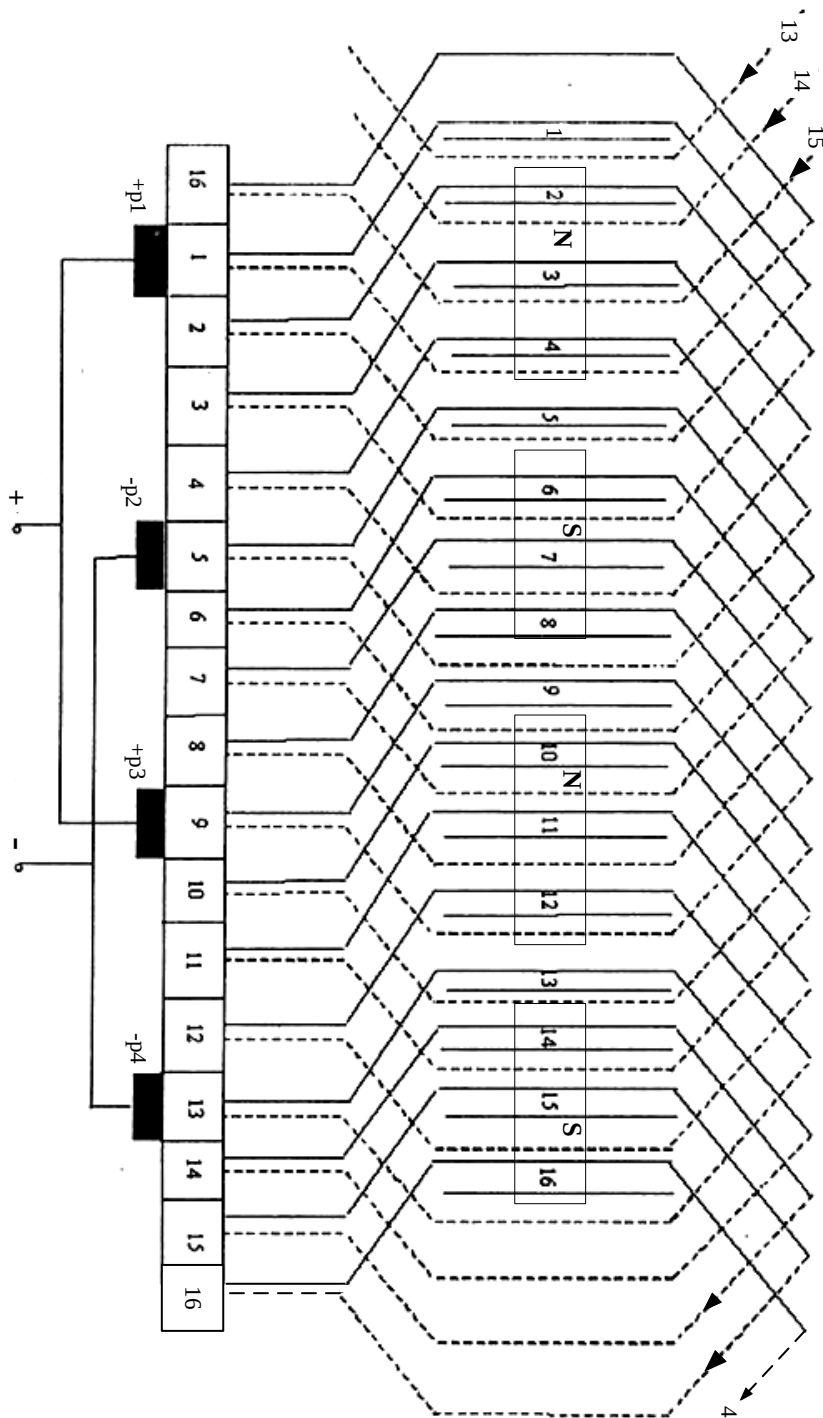


Fig. 2.7 Înfășurarea buclată, simplă cu $N_c=16$, $2p = 4$ [2.2]

Problema 2.2 Să se reprezinte steaua t.e.m., schema de înfășurare și poligonul t.e.m., pentru înfășurarea ondulată simplă cu datele: $N_c = K = 17$ și $2p = 4$.

Deschiderea bobinei y_b se alege mai mic decât pasul polar $\tau = \frac{N_c}{2p_1} = \frac{17}{4} = 4.25$.

Rezultă astfel: $y_b = 4$.

De această dată $t = \text{c.m.m.d.c.}(17, 2) = 1$; deci, toate cele 17 tensiuni induse în crestături au fază diferită (Fig. 2.8).

Pasul y_c al bobinei la colector se calculează cu relația: $y_c = \frac{K - m}{p_1} = \frac{17 - 1}{2} = 8$,

ceea ce înseamnă că ne ducem înapoi la colector, cu latura de întors a bobinei la o distanță de 8 lamele față de lamela de la care am plecat cu latura de dus a bobinei (Fig. 2.9).

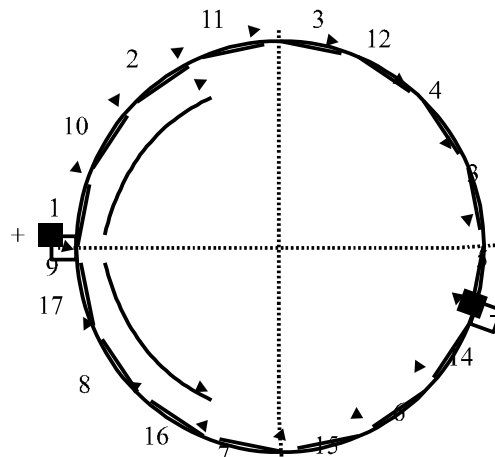


Fig. 2.8. Poligonul t.e.m. pentru înfășurarea ondulată simplă cu $N_c = 17$, $2p_1 = 4$

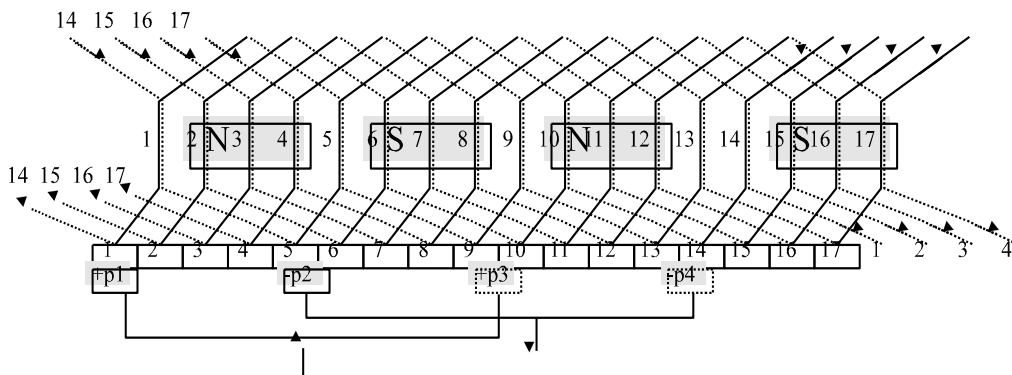


Fig. 2.9 Înfășurare ondulată simplă cu $N_c = 17$ și $2p_1 = 4$ [2.1]

Problema 2.3 Să se reprezinte steaua t.e.m., schema de înfășurare și poligonul t.e.m. pentru înfășurarea buclată simplă, având datele: $N_c = k = 12$, $p = 2$.

Problema 2.4 Să se reprezinte steaua t.e.m., schema de înfășurare și poligonul t.e.m., pentru înfășurarea ondulată simplă cu datele: $N_c = k = 13$ și $2p = 4$.

2.2 REGIMUL DE GOL ȘI DE SCURTCIRCUIT LA GENERATORUL DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE SEPARATĂ

Pentru analiza posibilităților de exploatare a generatoarelor este necesar să fie cunoscute caracteristicile de funcționare ale acestora. Prin urmare, scopul acestei secțiuni este înțelegerea principiului de funcționare a generatorului de curent continuu, cu excitație separată, precum și determinarea și interpretarea caracteristicilor sale de gol și scurtcircuit.

2.2.1 NOȚIUNI TEORETICE

Mașina electrică cu colector este reversibilă astfel că procesul de trecere din regim de generator în regim de motor se realizează natural. Având în vedere caracteristicile particulare la generator, se tratează separat acest subiect.

Principiul de funcționare al generatorului de curent continuu are la bază legea inducției electromagnetice. Pentru generatorul de c.c. cu excitație separată, curentul de excitație necesar magnetizării este asigurat de o sursă exterioară de alimentare, iar puterea electrică absorbită este $(1-3)\% \cdot P_n$.

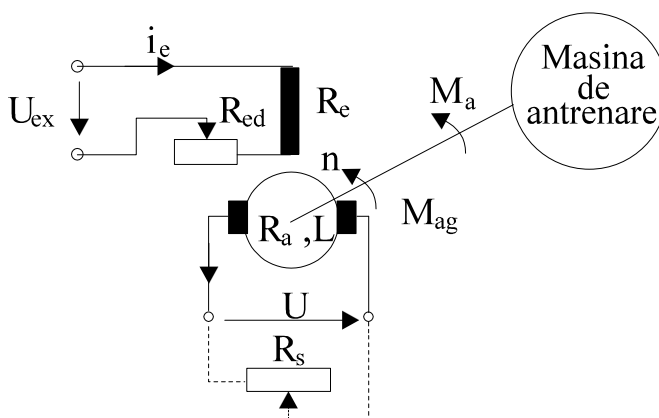


Fig. 2.10 Generatorul de curent continuu cu excitație separată [2.1]

Pentru a roti generatorul se folosește un motor de antrenare și se alimentează excitația separată la curentul I_e (Fig. 2.10), obținându-se astfel tensiunea indusă prin mișcare:

$$U_{ea} = k_e \cdot \Phi_p \cdot n \quad (2.1)$$

unde U_{ea} este proporțională cu turația n și fluxul polar al excitației Φ (flux inductor), iar k_e este un factor de proporționalitate ce depinde de construcția mașinii.

Dacă la borne conectăm sarcina R_s , în ea va apărea curentul i . Diferența dintre tensiunea indusă U_{ea} și tensiunea la borne U reprezintă căderea de tensiune pe rezistența R_a a tuturor înfășurărilor legate în serie la perii (indus, de compensație și de comutație) și cea la perii ΔU_p :

$$U = U_{ea} - R_a i - \Delta U_p \quad (2.2)$$

$$U = R_s i \quad (2.3)$$

Urmărind balanța de puteri (Fig. 2.11), dacă scădem pierderile în fier și cele mecanice din puterea mecanică de la intrare, a mașinii de antrenare, balanța de puteri pornește de la puterea electromagnetică și este descrisă de ecuația (2.5). În plus, puterea electrică de la intrare este egală cu suma pierderilor, la care se adaugă puterea de la ieșire (2.4):

$$P_{1e} = \Sigma p + P_{2m} \quad (2.4)$$

$$\text{unde, } \Sigma p = p_p + p_{Cu} + p_{Fe} + p_{mec} + p_s$$

Tot din Fig. 2.11, putem identifica și „balanța dintre tensiuni“, (2.2), pornind de la tensiunea electromotoare indusă, ținând cont de căderile de tensiune de pe parcursul funcționării și în final de tensiunea de ieșire.

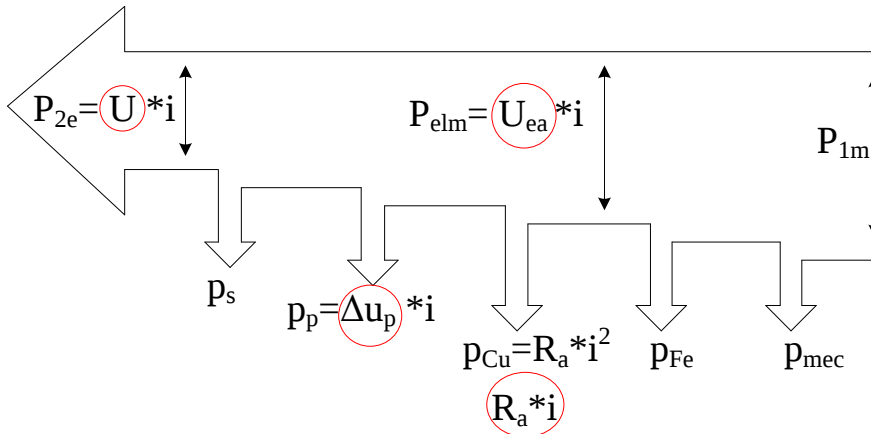


Fig. 2.11 Balanța de puteri la generatorul de curent continuu (Gcc)

$$U \cdot i = U_{ea} \cdot i - R_a \cdot i^2 - \Delta U_p \cdot i \quad (2.5)$$

unde $U \cdot i$ - puterea electrică la sarcină

$U_{ea} \cdot i$ - puterea electromagnetică (P_{elm})

$R_a \cdot i^2$ - pierderile în înfășurarea indusului

$\Delta U_p \cdot i$ - pierderile Joule la perii (p_p)

Cuplul electromagnetic dezvoltat de generator, în sens contrar rotației, se poate obține din balanța de puteri electrice (Fig. 2.11), ca raportul dintre puterea electromagnetică și viteza unghiulară $\omega = 2\pi \cdot n$:

$$M_e = \frac{P_{elm}}{2\pi \cdot n} \quad (2.6)$$

Randamentul generatorului se calculează pe baza balanței de puteri :

$$\eta_g = \frac{P_{2e}}{P_{lm}} = \frac{P_{2e}}{P_{2e} + p_p + p_{Cu} + p_{Fe} + p_{mec} + p_s} \quad (2.7)$$

Formula randamentului consideră inclusiv pierderile suplimentare (p_s) produse în rotor de către câmpul de dispersie rotor, în tălpile polare statorice. Aceste pierderi se separă greu experimental, însă e necesar să fie luate în considerare la studiul încălzirii mașinii, prin urmare, se consideră egale cu $(0.5 \div 1)\%$ din puterea utilă.

2.2.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE

Problema 2.5 Un generator de curent continuu cu excitație separată prevăzut cu o înfășurare buclată simplă cu 4 poli și $N=90$ conductoare pe periferie debitează puterea electrică nominală $P_{2en} = 100$ kW la $U_n = 440$ V cu un randament $\eta_n = 92\%$ la turația $n_n = 1200$ rpm. Pierderile date sunt: $p_{Fen} = p_{mecn} = 1.3\% \cdot P_{2en}$; $p_p = 0.4\% \cdot P_{2en}$, $p_s = 1.0\% \cdot P_{2en}$ [2.1].

Se cere: a) curentul nominal I_n , pierderile în înfășurarea indusului p_{Cun} și rezistența indusului R_a ; b) căderea de tensiune la perii, ΔU_p , tensiunea indusă U_{ea} și fluxul polar Φ_p .

Soluție:

Pe baza definiției puterii electrice P_{2e} se obține curentul nominal I_n :

$$I_n = \frac{P_{2en}}{U_n} = \frac{100 \cdot 10^3}{440} = 227.27 \text{ A}$$

Pierderile în cupru se calculează din balanța de puteri (Fig. 2.11):

$$p_{Cun} = \frac{P_{2en}}{\eta_n} - P_{2en} - p_{Fen} - p_{mecn} - p_p - p_s = P_{2en} \left(\frac{1}{\eta} - 1 - 0.04 \right)$$

$$=100 \cdot 10^3 \left(\frac{1}{0.92} - 1.04 \right) = 4695 \text{ W}$$

$$\text{Rezistența indusului : } R_a = \frac{P_{\text{Cun}}}{I_n^2} = \frac{4695}{227.27^2} = 0.0909 \Omega$$

b) Căderea de tensiune la perii ΔU_p este:

$$\Delta U_p = \frac{P_p}{I_n} = \frac{0.4 \cdot 10^{-2} \cdot 100 \cdot 10^3}{227.27} = 1.76 \text{ V}$$

Din (2.5) se calculează tensiunea indusă U_{ea} :

$$U_{ea} = U_n + R_a \cdot I_n + \Delta U_p = 440 + 0.0909 \cdot 227.27 + 1.76 = 462.418 \text{ V}$$

Fluxul polar ϕ_p se determină din (2.1):

$$\phi_p = \frac{U_{ea}}{K_e \cdot n} = \frac{U_{ea}}{N \cdot \frac{p}{a} \cdot n} = \frac{462.418}{90 \cdot \frac{2}{2} \cdot 20} = 0.2569 \text{ Wb}$$

Problema 2.6 Un generator de c.c. cu excitație separată are pe plăcuța indicatoare următoarele date: $U_N=220\text{V}$, $I_N=30\text{A}$, $I_{EN}=2\text{A}$, $U_{en}=110\text{V}$, $n_N=1000$ rot/min, randamentul global în regim nominal $\eta_N = 0.85$ [2.2].

Să se determine:

- cuplul de antrenare nominal al generatorului;
- rezistența înfășurării de excitație;
- rezistența înfășurării indusului, dacă la funcționarea în gol tensiunea la borne este $U_0 = 230 \text{ V}$.
- puterea consumată de înfășurarea de excitație raportată la puterea nominală a generatorului.

2.2.3 PROBA DE GOL ȘI SCURTCIRCUIT LA GCC – LUCRARE PRACTICĂ

2.2.3.1 Caracteristica de gol ($U_0 = f(I_e)$), pentru $n=\text{const.}$, și $I=0$,

se caracterizează prin variația tensiunii induse (U_{ea}) cu curentul de excitație I_e la turație dată (n) și curent prin indus, $I = 0$.

Tensiunea U_{ea} la gol este defapt tensiunea la borne, U_0 , astfel că pentru obținerea caracteristicii se mărește monoton curentul de excitație de la zero la $+I_{em}$ (Fig. 2.12) parcurgându-se curba AC. La reducerea monotonă a curentului până la zero rezultă curba CB situată în general deasupra curbei OA. Reversarea curentului de excitație conduce la obținerea porțiunii BD, iar apoi la creșterea

curentului de excitație de la valoarea $-I_{em}$ la $+I_{em}$, rezultă porțiunea urcătoare D B'C. Reversarea curentului de excitație conduce la obținerea porțiunii BD, iar apoi la creșterea curentului de excitație de la valoarea $-I_{em}$ la $+I_{em}$, rezultă porțiunea urcătoare D B'C. Curba medie este considerată a fi caracteristica de gol de calcul. Punctul nominal de funcționare, N se plasează în colul caracteristicii pentru a utiliza optim materialele magnetice și electrice din mașină.

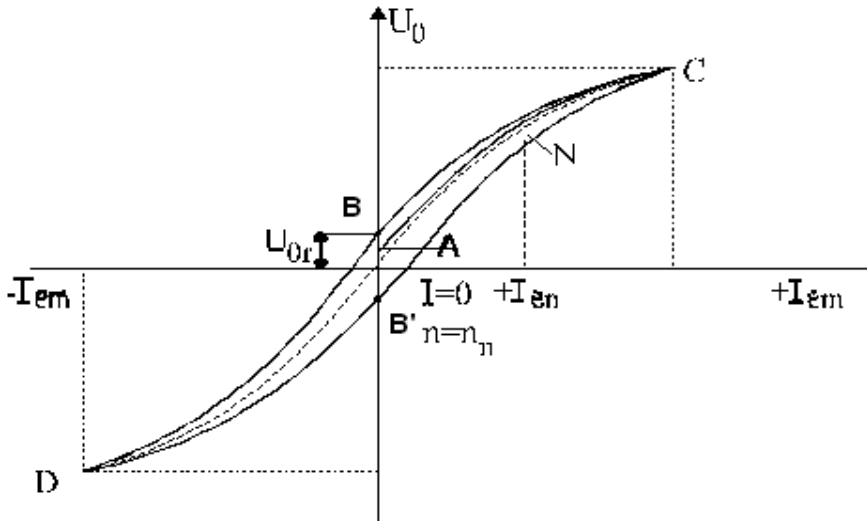


Fig. 2.12 Caracteristica de gol pentru Gcc [2.1]

Urmărind Fig.2.12, este evident că ciclul de curbe obținut se datorează fenomenului de histeresis.

În cazul în care curentul de excitație este nul, se obține tensiunea redusă U_{0r} , produsă de către fluxul remanent.

2.2.3.2 Caracteristica de scurtcircuit ($I_{sc}=f(I_e)$)

Reprezintă dependența dintre curentul de scurtcircuit I_{sc} și curentul de excitație I_e , la turația $n=\text{const}$, $U=0$.

$$\text{Din } U=U_{ea}-R_a \cdot i-\Delta U_p \text{ rezultă: } I_{sc}=\frac{U_{ea}-\Delta U_p}{R_a} \quad (2.8)$$

Având în vedere faptul că în regim nominal valoarea căderii de tensiune pe rezistența indusului R_a este redusă și pentru a nu depăși $(2\div 2.5) \cdot I_n$ la scurtcircuit, tensiunea indusă U_{ea} și curentul de excitație I_e vor avea valori foarte mici.

Prin urmare mașina este nesaturată și caracteristica de scurtcircuit este o dreaptă. În prezența fluxului remanent această dreaptă nu trece prin origine.

Paralela prin origine la dreapta obținută constituie caracteristica de scurtcircuit (Fig. 2.13). Dacă se neglijează căderea de tensiune la perii ($\Delta U_p = 0$) atunci $I_{sc} = U_{ea} / R_a$.

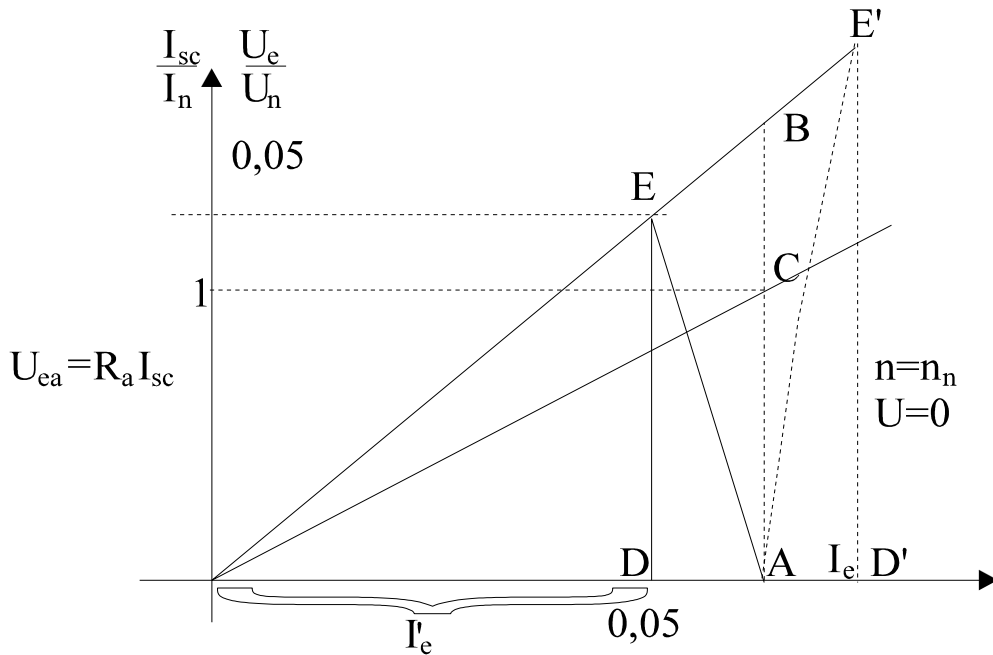


Fig. 2.13 Caracteristica de scurtcircuit la Gcc [2.1]

Cu periile în axa neutră și în absența saturației, U_{ea} este tocmai tensiunea de gol AB la curentul de scurtcircuit AC. Dacă însă periile nu sunt plasate exact în axa neutră, tensiunea $U_{ea} = R_a I_{sc}$ poate fi mai mică (DE) sau mai mare (D'E') decât U_{ea} . Efectul de scădere sau creștere al fluxului magnetic datorat câmpului magnetic al indusului cu periile deplasate din axa neutră este echivalent cu un curent de excitație suplimentar DA sau AD' proporțional cu curentul de scurtcircuit. Triunghiul dreptunghic ADE (AD'E') cu laturile proporționale cu curentul de scurtcircuit se numește triunghi de scurtcircuit. Cu periile în axa neutră el se reduce la dreapta AB ($AD = AD' = 0$). Astfel, caracteristica de scurtcircuit poate servi la ajustarea poziției periilor în axa neutră la mașinile cu poli de comutație.

În vederea ridicării experimentale a celor două caracteristici ale Gcc, se realizează schema de montaj descrisă în Fig. 2.14.

Măsurătorile realizate se vor centraliza într-un tabel separat pentru fiecare dintre probele efectuate, Tabelul 2.1 și Tabelul 2.2.

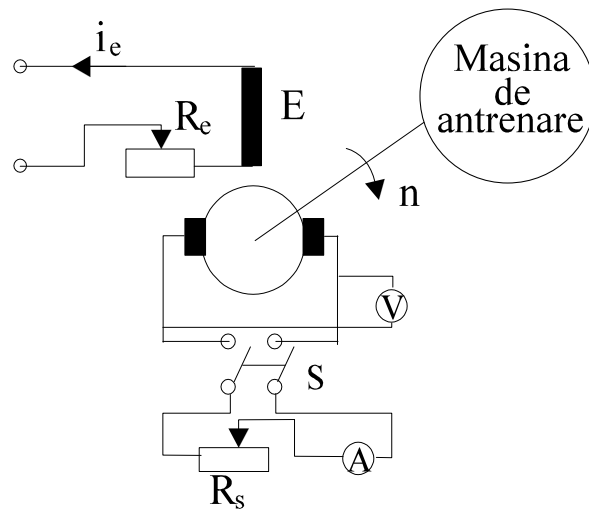


Fig. 2.14 Schema pentru determinarea experimentală a caracteristicilor generatorului cu excitație separată

Tabel 2.1 Măsurători proba de gol

Nr.crt	U_0 [V]	I_E [A]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Tabel 2.2 Măsurători proba de scurtcircuit

Nr.crt	I_{sc} [A]	I_E [A]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Întrebări:

1. Care sunt caracteristicile influențate de ciclul de histereză?

2.3 REGIMUL DE SARCINĂ LA GCC CU EXCITAȚIE SEPARATĂ

Se dorește în continuare înțelegerea principiului de funcționare a generatorului de curent continuu, cu excitație separată, reprezentând astfel continuarea și completarea lucrării anterioare. Se determină și se interpretează caracteristicile: externă, de sarcină și a reglării.

2.3.1 NOȚIUNI TEORETICE

În vederea ridicării celor trei caracteristici enumerate mai sus, este necesar să realizăm schema de montaj din Fig. 2.15.

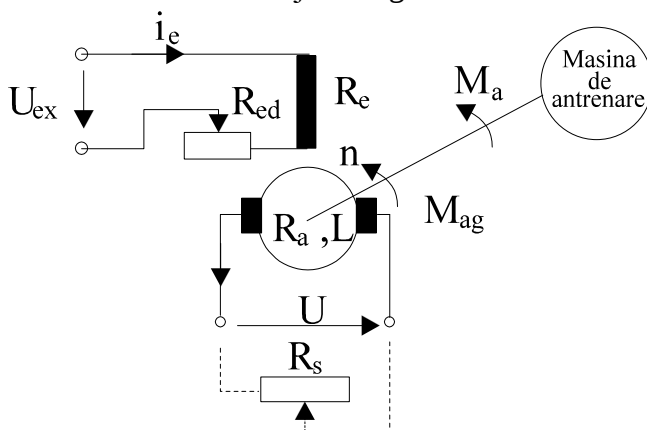


Fig. 2.15 Generatorul de curent continuu cu excitație separată

Caracteristica externă $U=f(I)$, $n=\text{const}$, $I_E=\text{const}$, reprezintă variația tensiunii la borne U în funcție de curentul de sarcină I , pentru curent de excitație I_E și turație n constante (Fig. 2.16).

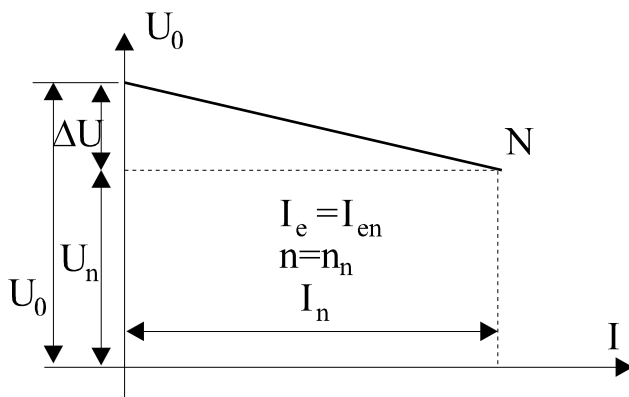


Fig. 2.16 Caracteristica externă la Gcc cu excitație separată

La curentul nominal I_n se obține tensiunea nominală U_n , prin urmare, în regim de gol tensiunea U_0 trebuie să fie mai mare decât cea nominală:

$$U_n = U_{ea} - R_a I_n - \Delta U_p \quad (2.9)$$

La mașina cu periile în axa neutră, cu înfășurare de compensație, U_{ea} este de fapt tensiunea indusă exclusiv de excitație, adică cea din caracteristica de gol ($U_0(I_e)$). Experimental se poate verifica dacă această condiție este îndeplinită. Înlocuind în (2.9) pe R_a și ΔU_p date, U , I măsurate, se calculează $\Delta U = U_{ea} - U_n$ măsurat direct.

În general, căderea de tensiune ΔU este de (5÷15)% din tensiunea nominală, valorile mai mari corespunzând puterilor mici.

Caracteristica reglării $I_e = f(I)$, $n = \text{const.}$, $U = \text{const.}$ reprezintă dependența curentului de excitație I_e de curentul de sarcină I la tensiunea la borne U și turație n constante (Fig. 2.17).

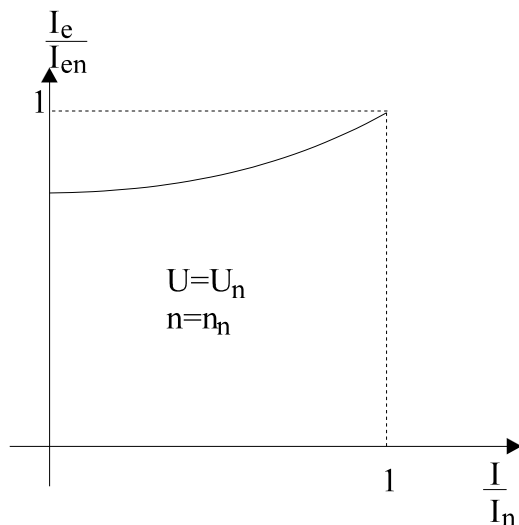


Fig. 2.17 Caracteristica reglării

Scăderea tensiunii cu sarcina I în caracteristica externă conduce la creșterea tensiunii induse, și astfel la creșterea curentului de excitație I_e cu I , pentru ca tensiunea să se mențină constantă.

Dimensionarea excitației se face în general la curentul de excitație I_{en} care asigură în sarcină nominală tensiunea nominală. Caracteristicile generatorului de curent continuu sunt utile deci în verificarea performanțelor în regim staționar calculate la proiectare.

Cu ajutorul caracteristicilor de gol și de scurtcircuit pot fi calculate cea externă, a reglării și **caracteristica de sarcină $U = f(I_e)$, $n = \text{const.}$, $I = \text{const.}$** , evitându-se încărcarea în sarcină.

Pe măsură ce I_E crește și tensiunea U crește pe seama tensiunii electromotoare indusă de curentul de excitație.

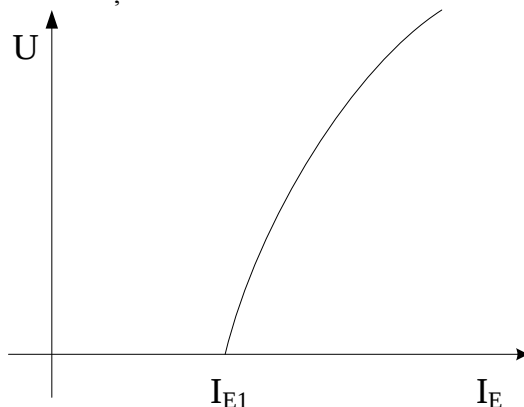


Fig. 2.18 Caracteristica de sarcină

2.3.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE

Problema 2.7. Un generator de c.c. cu excitație separată are pe plăcuța indicatoare următoarele date: $U_N = 220$ V, $I_N = 47$ A, $I_{EN} = 2$ A, $U = 110$ V, $n_N = 1200$ rot/min, randamentul global în regim nominal $\eta_N = 0.82$.

Să se determine:

- cuplul de antrenare nominal al generatorului;
- rezistența înfășurării de excitație;
- rezistența înfășurării indusului, dacă la funcționarea în gol tensiunea la borne este $U_0 = 230$ V.
- puterea consumată de înfășurarea de excitație raportată la puterea nominală a generatorului.

Soluție:

a). Scriind expresia randamentului nominal sub forma:

$$\eta_N = \frac{P_{\text{utilă}}}{P_{\text{absorbită}}} = \frac{U_N \cdot I_N}{U_N \cdot I_N + \sum P_N}$$

și ținând cont de suma pierderilor:

$$\sum P_N = P_{1N} - P_N = P_{1N} \cdot (1 - \eta_N),$$

obținem:

$$\eta_N = \frac{U_N \cdot I_N}{M_N \cdot \Omega_N + U_N \cdot I_N \cdot (1 - \eta_N)} \Rightarrow M_N = \frac{\frac{U_N \cdot I_N}{\eta_N} - U_N \cdot I_N \cdot (1 - \eta_N)}{\Omega_N}$$

$$\Omega_N = 2 \cdot \pi \cdot n_N$$

$$n_N = 1200 \text{ rpm} = \frac{1200}{60} \text{ rps} = 20 \text{ rps}$$

$$\Rightarrow M_N = \frac{\frac{220 \cdot 47}{0.82} - 220 \cdot 47 \cdot (1 - 0.82)}{2 \cdot \pi \cdot 20} = 85.53 \text{ Nm}$$

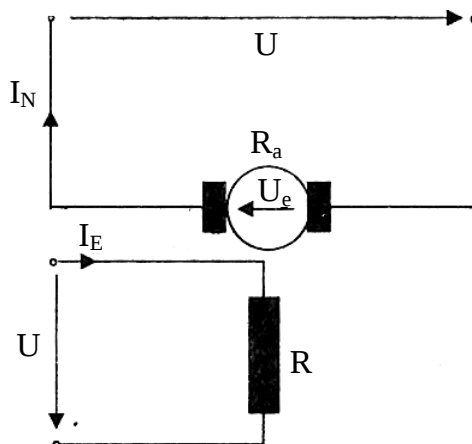


Fig. 2.19 Mașina de curent continuu cu excitație separată

b) Pentru circuitul de excitație din Fig. 2.19 se poate scrie:

$$U_{EN} = R_{EN} \cdot I_{EN}, \text{ de unde rezultă } R_{EN} = \frac{U_{EN}}{I_{EN}} = \frac{110}{2} = 55 \Omega$$

c) La funcționarea în sarcină nominală a generatorului de c.c. cu excitație separată avem:

$$U_N = U_{EN} - R_a \cdot I_N, \quad U_0 \approx U_{EN} \Rightarrow R_a = \frac{U_0 - U_N}{I_N} = \frac{230 - 220}{47} = 0.212 \Omega$$

$$d) \left. \begin{array}{l} P_E = U_{EN} \cdot I_{EN} \\ P_N = U_N \cdot I_N \end{array} \right\} \frac{P_E}{P_N} = \frac{U_{EN} \cdot I_{EN}}{U_N \cdot I_N} = \frac{110 \cdot 2}{220 \cdot 47} = 0.021 \Rightarrow \frac{P_E}{P_N} = 2.1\%$$

Problema 2.8 Un generator de c.c. cu excitație separată cu $2p=6$ și o înfășurare buclată simplă, are $N_c=112$ conductoare, puterea nominală $P_N=96$ kW, tensiunea nominală: $U_N=500$ V, turația nominală $n_N=1000$ rot/min, și randamentul nominal $\eta_N=0.88$. Se cunosc pierderile: $p_{FeN}=p_{mv}=0.01 \cdot P_N$, pierderile la perii, $p_{pN}=0.005 \cdot P_N$ și pierderile suplimentare, $p_s=0.0075 \cdot P_N$.

Să se calculeze:

a) curentul nominal prin indus;

- b) pierderile în înfășurarea indusului;
- c) rezistența înfășurării indusului;
- d) căderea de tensiune la perii;
- e) tensiunea indusă în înfășurarea rotorică;
- f) fluxul polar al mașinii.

2.3.3 CARACTERISTICILE GENERATORULUI DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE SEPARATĂ – LUCRARE PRACTICĂ

În vederea centralizării măsurătorilor efectuate, s-au întocmit cele trei tabele de valori de mai jos. Cu ajutorul datelor centralizate se ridică caracteristicile corespunzătoare.

Tabel 2.3 Măsurători pentru
caracteristica externă

Nr.crt	U [V]	I [A]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Tabel 2.4 Măsurători pentru
caracteristica reglării

Nr.crt	I_E [A]	I [A]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Tabel 2.5 Măsurători pentru
caracteristica de sarcină

Nr.crt	U [V]	I_E [A]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Întrebări:

1. Explicați de ce sunt utile caracteristicile G_{cc} la generatorul compensat.
2. Explicați de ce caracteristica externă cade liniar cu sarcina.
3. Cum se modifică caracteristica externă la generatorul necompensat?
4. De ce caracteristica reglării nu trece prin origine?

2.4. CARACTERISTICILE MOTORULUI DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE SERIE

Scopul acestei secțiuni este înțelegerea principiului de funcționare a motorului de curent continuu (Mcc), cu excitație derivație și serie, dar și a posibilităților de modificare a turației acestora, prin intermediul caracteristicilor de funcționare. Se vor ridica astfel următoarele caracteristici: caracteristica $n=f(I)$ – a curentului și $n=f(M_e)$ – mecanică.

2.4.1 NOȚIUNI TEORETICE

O mașină de curent continuu funcționează ca motor când primește la borne putere electrică și cedează la arbore putere mecanică.

Conectarea în serie cu indusul a înfășurării de excitație conduce la eliminarea sursei de alimentare a înfășurării de excitație, dar și la o caracteristică mecanică diferită..

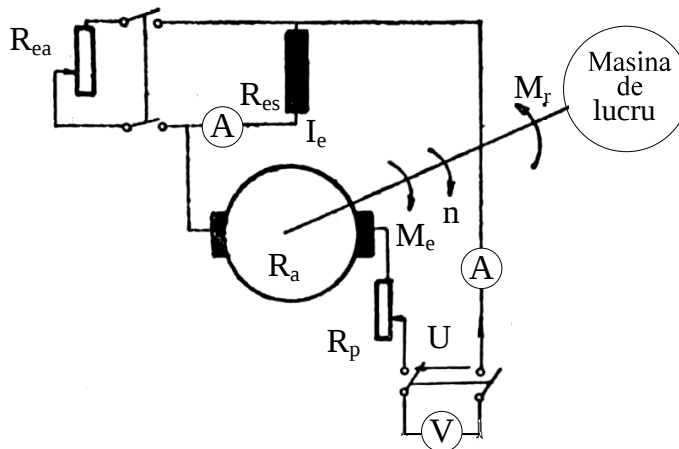


Fig. 2.20 Motorul de c.c. cu excitație serie [2.1]

În regim permanent de funcționare, ecuațiile circuitelor electrice se scriu:

$$U = K_e \cdot \phi_p \cdot n + R \cdot I \quad (2.10)$$

$$U_{ea} = K_e \cdot \Phi_p \cdot n$$

Cuplul electromagnetic este proporțional cu curentul rotoric și fluxul util :

$$M_e = K_m \cdot \phi_p \cdot I \quad (2.11)$$

Unde K_m este o constantă ce depinde de construcția mașinii.

Din ecuația (2.10) rezultă:

$$n = \frac{U - \sum R \cdot I}{K_e \cdot \phi_p} = \frac{U}{K_e \cdot \phi_p} - \frac{\sum R \cdot I}{K_e \cdot \phi_p} \quad (2.12)$$

Sau în funcție de cuplul electromagnetic se scrie dependența $n=f(M)$ [2.3]:

$$n = \frac{U}{K_e \cdot \phi_p} - \frac{\sum R}{K_e \cdot K_m \cdot \phi_p^2} \cdot M \quad (2.13)$$

Din (2.12) se pot deduce metodele de reglare a turației motorului, și anume, prin varierea tensiunii de alimentare, prin modificarea rezistenței circuitului rotoric sau prin modificarea fluxului de excitație.

2.4.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE

Problema 2.9 Un motor de curent continuu serie are datele: $P_n=50$ kW, $U_n=375$ V, turația nominală $n_n=1800$ rpm și $\eta_n=0.93$. Pierderile în înfășurările înseriate (R_a+R_{es}) reprezintă $4\% \cdot P_n$ cu $R_{es}=R_a/3$, $p_{Fe}=p_{mec}=2 \cdot p_p$ [2.1].

Se cere:

- curentul nominal, rezistențele R_a și R_{es} ;
- căderea de tensiune la perii ΔU_p , tensiunea indusă nominală U_{ean} și cuplul electromagnetic nominal;
- curentul, cuplul și puterea electromagnetică la $n = \frac{n_n}{2} = 900$ rpm în cazul neglijării saturației.

Soluție:

- curentul nominal rezultă pe baza randamentului:

$$\eta_n = \frac{P_n}{U_n \cdot I_n} \Rightarrow I_n = \frac{50000}{0.93 \cdot 375} = 143.37 \text{ A}$$

$$p_{Cu} = (R_a + R_{es}) \cdot I_n^2 = 0.04 \cdot P_n;$$

$$R_a + R_{es} = \frac{0.04 \cdot 50000}{143.37^2} = 0.0973 \Omega$$

$$R_{es} = 0.024325 \Omega \text{ și } R_a = 0.072976 \Omega$$

- Se calculează pierderile la perii:

$$p_{pn} = \Delta U_p \cdot I_n = \frac{P_n}{\eta} - P_n - p_{Cu} - p_{Fe} - p_{mec} - p_s;$$

$$p_p = \frac{50000 \cdot \left(\frac{1}{0.92} - 1 - 0.04 \right)}{6} = 293.9 \text{ W};$$

$$\Delta U_p = 293.9 / 143.37 = 2.05 \text{ V}$$

Din ecuația tensiunii (2.9) cu $R_p=0$ și $R_{ea}=\infty$ rezultă:

$$U_n = U_{ean} + (R_{es} + R_a) \cdot I_n + \Delta U_p$$

Deci tensiunea indusă nominală:

$$U_{ean} = 375 - 0.0973 \cdot 143.37 - 2.05 = 359 \text{ V}$$

dar $U_{ean} = K_e \cdot K_\phi \cdot I \cdot n$ (în absența saturației).

$$\text{Rezultă: } K_e \cdot K_\phi = \frac{359}{143.37 \cdot 30} = 0.08346 \text{ Wb/A}$$

$$\text{Cuplul electromagnetic: } M_{en} = \frac{U_{ea} \cdot I}{2\pi \cdot n} = \frac{359 \cdot 143.37}{2\pi \cdot 30} = 273.05 \text{ Nm}$$

c) La turația n se aplică din nou ecuația tensiunii:

$$U_n = (R_a + R_e) \cdot I + K_e \cdot K_\phi \cdot n \cdot I$$

Cu $K_e K_\phi$ cunoscute se obține curentul I :

$$I = \frac{U_n}{R_a + R_e + K_e \cdot K_\phi \cdot n} = \frac{359}{0.0973 + 0.08346 \cdot 15} = 266 \text{ A}$$

$$\text{Cuplul electromagnetic: } M_e = \frac{K_e \cdot K_\phi}{2\pi} \cdot I^2 = \frac{0.08346 \cdot 266^2}{2 \cdot 3.14} = 940 \text{ Nm}$$

Puterea electromagnetică devine:

$$P_{elm} = M_e \cdot 2\pi \cdot n = 0.940 \cdot 2\pi \cdot 15 = 88.592 \text{ kW}$$

$$\text{Puterea absorbită: } P_l = U_n \cdot I = 375 \cdot 266 = 99750 \text{ W}$$

Concluzie: Se observă că la jumătate din turația nominală (de bază) motorul dezvoltă un cuplu de aproape 4 ori mai mare la un curent aproape dublu și o putere absorbită aproape dublă (la randament rezonabil).

O caracteristică moale este deosebit de favorabilă în tracțiune.

Problema 2.10 Un motor de c.c. cu excitație în serie are următoarele date: $P_N = 55 \text{ kW}$, $U_N = 220 \text{ V}$, $I_N = 280 \text{ A}$, $R_a = 0.035 \Omega$, $R_e = 0.02 \Omega$, $n_N = 630 \text{ rot/min}$. Se consideră că mașina este nesaturată până la curentul nominal. Să se calculeze:

a) rezistența necesară a reostatului care se introduce în serie cu mașina astfel încât să limiteze curentul de pornire la valoarea $I_p = 2 \cdot I_N$;

b) ce valoare trebuie să aibă rezistența reostatului introdus în paralel cu indusul mașinii astfel încât turația ideală de mers în gol să aibă valoarea $n_0 = 3 \cdot n_N$. (Reostatul este poziționat pe valoarea zero în serie cu indusul) [2.2].

2.4.3 CARACTERISTICILE MCC–LUCRARE PRACTICĂ

Funcționarea motorului de c.c se poate urmări prin intermediul caracteristicilor de funcționare: caracteristica curentului $n=f(I)$ și caracteristica mecanică $n=f(M_e)$.

2.4.3.1 Caracteristica $n(I)$ a curentului se poate obține experimental, la tensiune $U=U_N$ și curent de excitație I_e dat și se numește *caracteristica naturală*.

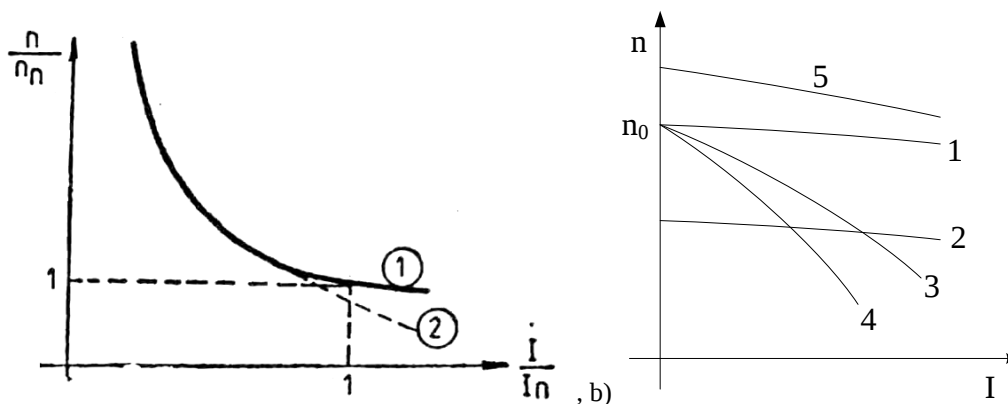


Fig. 2.21 Caracteristica $n(I)$: a) pt Mcc cu excitație serie: 1. cu saturație, 2. fără saturație [2.1]

b) pt Mcc cu excitație derivație: 1. Naturală, 2. $U < U_n$, 3. $R_{p1} > 0$, 4. $R_{p2} > R_{p1}$, $i_e < i_{en}$ [2.4].

Turația crește odată cu scăderea curentului, astfel că turația în regim de funcționare în gol are valoare infinită. Prin urmare, foarte important pentru a evita ambalarea motorului este faptul că motorul de cc nu se pornește și nu se lasă să funcționeze fără sarcină la arbore.

În cazul *Mcc cu excitație derivație* (Fig. 2.21b) se observă că $n=f(I)$ este o dreaptă cu ordonata la origine: $n_0 = \frac{U}{k_e \cdot \phi}$ și pantă negativă. Panta este ușor curbată datorită reacției rotorului care modifică fluxul.

Caracteristicile artificiale se obțin prin variația tensiunii și se caracterizează prin aceeași pantă, însă se modifică valoarea ordonatei la origine (curba 2).

Dacă se modifică rezistența circuitului rotoric, valoarea ordonatei la origine rămâne aceeași, însă se modifică înclinarea pantei, pe măsură ce $\sum R$ crește (curbele 3 și 4).

Curba care rezultă în urma slăbirii câmpului, adică scăderea curentului de excitație se găsește deasupra caracteristicii naturale (curba 5). Mașina devine instabilă sdață scăderea curentului de excitație se face peste o anumită limită.

Prin urmare, caracteristica turației motorului derivație este o curbă rigidă (dură), adică turația scade cu sarcina.

2.4.3.2 Caracteristica de reglaj, $I_E = f(I)$, pt $U = ct$, $n = ct$.

În acest caz, la funcționarea în gol, $I = 0$, iar I_E trebuie să aibă o valoare mare pentru ca turația să rămână constantă.

Așa cum se poate observa din Fig. 2.22, pe măsură ce sarcina crește, crește și căderea de tensiune, iar turația are tendința să scadă. Menținerea constantă a vitezei se face micșorând fluxul (deci I_E), în timp ce curentul rotorului crește cu sarcina.

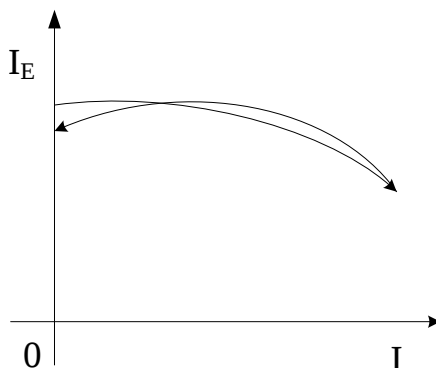


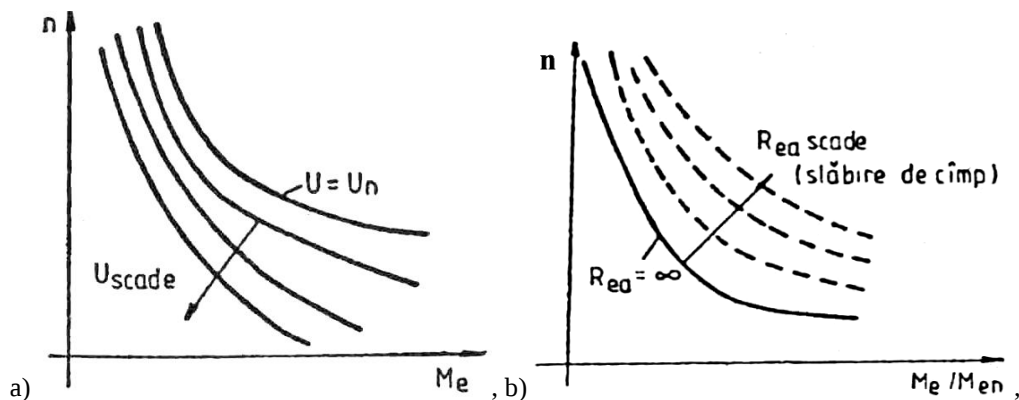
Fig. 2.22 Caracteristica de reglaj pentru Mcc cu excitație derivație

Pentru *motorul cu excitație serie*, caracteristica $n = f(I)$ este reprezentată în Fig. 2.21a și se observă că este o caracteristică moale.

La Mcc cu excitație serie, prin *variație nominală a turației motorului* se înțelege creșterea turației de la sarcină nominală la un sfert din valoarea ei.

În cazul Mcc cu excitație serie, *caracteristicile artificiale* (Fig. 2.23) se obțin prin varierea rezistenței circuitului rotorului, prin modificarea tensiunii de alimentare sau prin slăbire de câmp.

Din Fig. 2.23c, la cuplu dat, se observă faptul că prezența rezistenței R_p are ca efect reducerea turației. Rezultatele măsurătorilor se trec în tabelul 2.6:



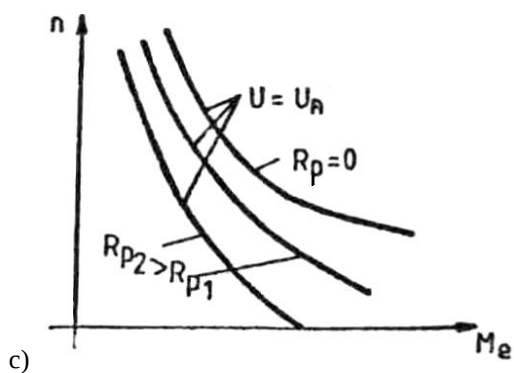


Fig. 2.23 Modificarea turației la Mcc serie: a) prin tensiune, b) slăbire de câmp, c) R_p în serie [2.1]

Tabel 2.6 Valorile mărimilor măsurate la Mcc serie.

Nr.crt.	U[V]	I[A]	I_E [A]	n [rpm]	F [N]	M [Nm]
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Întrebări:

1. Ce se înțelege prin caracteristica naturală?
2. Ce se înțelege prin caracteristici artificiale și cum au fost obținute?
3. Ce alură are caracteristica $n=f(I)$ la Mcc cu excitație serie?

2.5 CARACTERISTICILE MOTORULUI DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE DERIVAȚIE

Se urmărește în cele ce urmează determinarea și interpretarea caracteristicilor motorului de curent continuu cu excitație derivație (Fig. 2.24). Se vor ridica astfel următoarele caracteristici: caracteristica cuplului, caracteristica randamentului, caracteristica turației, precum și cea mecanică.

2.5.1 NOȚIUNI TEORETICE

O mașină de curent continuu funcționează ca motor când primește la borne putere electrică și cedează la arbore putere mecanică.

Schema echivalentă se realizează ținând cont de faptul că înfășurările de excitație produc câmp magnetic cu maximum după axa polilor principali, în timp ce înfășurarea indusului, de compensație și de comutație produc câmp magnetic cu maximum după axa neutră și sunt legate în serie, cu sensul de a compensa efectul solenaiției indusului.

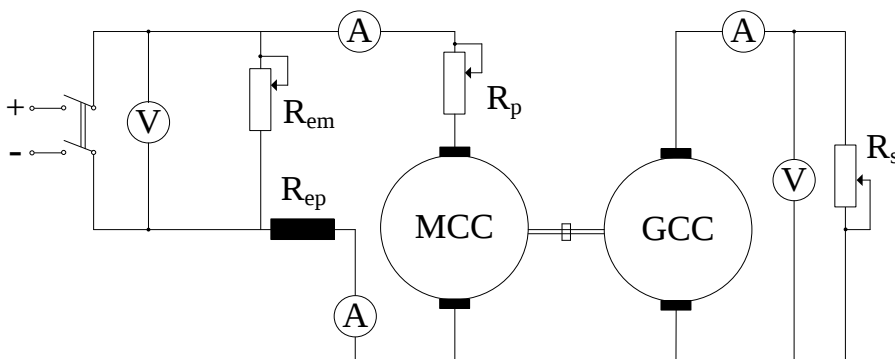


Fig. 2.24 Motorul de c.c. cu excitație derivație [2.3]

În regim permanent de funcționare, ecuațiile circuitelor electrice se scriu [2.1]:

$$U = U_{ea} + (R_p + R_a) \cdot I \quad (2.14)$$

$$U_{ea} = k_e \cdot \phi_p \cdot n \quad (2.15)$$

Cuplul electromagnetic este proporțional cu curentul rotoric și fluxul util :

$$M_e = k \cdot \phi_p \cdot I \quad (2.16)$$

Unde K_m este o constantă ce depinde de construcția mașinii.

Din (2.16) rezultă:

$$I = \frac{M_e}{k \cdot \phi_p} \quad (2.17)$$

2.5.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE

Problema 2.11. Un motor de c.c. cu excitație în derivație (paralel) are pe plăcuța indicatoare următoarele date: $P_N=18.5 \text{ kW}$, $U_N=220 \text{ V}$, $I_{aN}=95 \text{ A}$, $R_a=0.2\Omega$, $n_N=1400 \text{ rot/min}$, $\eta_N = 0.85$. Se cere să se calculeze:

- constanta de proporționalitate a t.e.m. induse, $k \cdot \phi$;
- cuplul nominal la arborele motorului;
- cuplul electromagnetic nominal;
- rezistența circuitului de excitație [2.2].

Soluție:

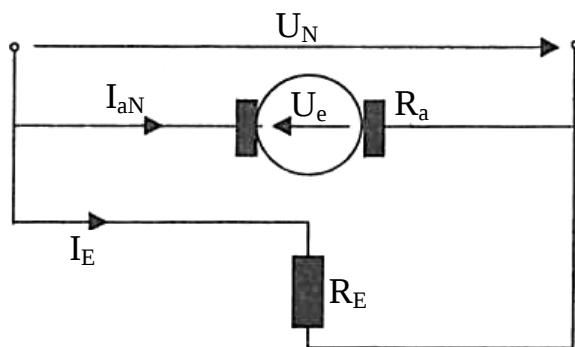


Fig. 2.25 Motor de c.c. cu excitație în derivație (paralel)

a) Ecuația tensiunilor motorului de c.c. cu excitație în derivație (paralel) este:

$$U_N = U_{eN} + R_a \cdot I_{aN}$$

sau: $U_N = k \cdot \phi \cdot \Omega_N + R_a \cdot I_{aN}$

Rezultă, deci, pentru constanta $k\phi$, expresia:

$$k \cdot \phi = \frac{U_N - R_a \cdot I_{aN}}{\Omega_N} = \frac{220 - 0.2 \cdot 95}{\frac{2\pi \cdot 1400}{60}} = 1.37 \text{ V} \cdot \text{s}$$

b) Puterea nominală a motorului fiind: $P_N = M_{2N} \cdot \Omega_N$, se obține cuplul nominal la arborele motorului:

$$M_{2N} = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{18500}{\frac{2\pi \cdot 1400}{60}} = 126.18 \text{ Nm}$$

c) Cuplul electromagnetic nominal este dat de relația:

$$M_N = k \cdot \phi \cdot I_{aN} = 1.37 \cdot 95 = 130.15 \text{ Nm.}$$

Se observă că $M_N > M_{2N}$, datorită cuplului pierderilor la mers în gol, M_0 .

d) Din expresia randamentului nominal global:

$$\eta_N = \frac{P_u}{P_{abs}} = \frac{P_N}{U_N \cdot I_{aN} + U_N \cdot I_E} = \frac{P_N}{U_N \cdot I_{aN} + U_N \cdot \frac{U_N}{R_E}}$$

$$\Rightarrow \frac{P_N}{\eta_N} = U_N \cdot I_{aN} + \frac{U_N^2}{R_E} \Rightarrow \frac{U_N^2}{R_E} = \frac{P_N}{\eta_N} - U_N \cdot I_{aN} \Rightarrow R_E = \frac{U_N^2}{\frac{P_N}{\eta_N} - U_N \cdot I_{aN}}$$

$$\Rightarrow R_E = \frac{220^2}{\frac{18500}{0.85} - 220 \cdot 95} \approx 55.97 \Omega$$

Problema 2.12. Un motor de c.c. cu excitație în derivație (paralel) are pe plăcuța indicatoare următoarele date nominale: $P_N = 15 \text{ kW}$, $U_N = 440 \text{ V}$. Care este valoarea rezistența reostatului de pornire înseriat cu indusul pentru a avea $I_p = 1.5 \cdot I_N$? Rezistența indusului este $R_a = 0.05 \Omega$, iar randamentul nominal este $\eta_N = 0.8$ [2.2].

2.5.3 MCC CU EXCITAȚIE DERIVAȚIE–LUCRARE PRACTICĂ

Aceste caracteristici au formele prezentate în Fig. 2.26 și sunt date de dependențele următoare:

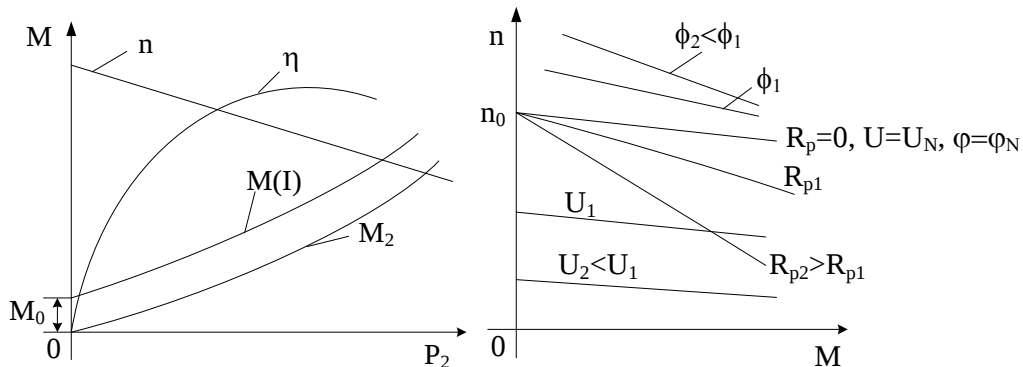


Fig. 2.26 Caracteristicile motorului de c.c. cu excitație derivație [2.3]

- $\eta=f(P_2)$, $U=U_N$, $I_E=\text{const}$ – caracteristica randamentului; P_2 – puterea la arbore
 - $M=f(P_2)$, $U=U_N$, $I_E=\text{const}$ – caracteristica cuplului; M_0 – cuplul pierderilor mecanice
 - $n=f(P_2)$, $U=U_N$, $I_E=\text{const}$ – caracteristica turației
 - $n=f(M)$, $U=U_N$, $I_E=\text{const}$ – caracteristica mecanică naturală
 - pentru $U \neq U_N$, $I_E \neq I_{EN}$, $R_p \neq 0$ – caracteristicile mecanice artificiale
- Puterea absorbită de motor este $P_1=U \cdot (I+I_E)$.

Pentru determinarea produsului „ $k \cdot \Phi$ ” la $I_E=\text{const}$, ținem cont de datele nominale ale motorului:

$$k \cdot \Phi_p = \frac{U_N - R_a \cdot I_N}{\Omega_N} = \frac{U_N - R_a \cdot I_N}{\frac{2\pi \cdot n_N}{60}} = 30 \cdot \frac{U_N - R_a \cdot I_N}{\pi \cdot n_N}; \Omega_N = \frac{2\pi \cdot n_N}{60} \quad (2.18)$$

$$P_2 = M_2 \cdot \Omega$$

Cum $U = U_{ea} + (R_p + R_a) \cdot I$ din (2.14) rezultă:

$$U = k \cdot \Phi_p \cdot \Omega + (R_p + R_a) \cdot I \Rightarrow \Omega = \frac{U - (R_p + R_a) \cdot I}{k \cdot \Phi_p} \quad (2.19)$$

$$\text{Din (2.18) obținem: } n_N = \frac{60 \cdot \Omega_N}{2\pi} = \frac{30 \cdot \Omega_N}{\pi}; k_e = \frac{k\pi}{30} \quad (2.20)$$

Dacă substituim factorul „ k ” în (2.19) avem:

$$n = \frac{U}{K_e \Phi_p} - \frac{(R_p + R_a)}{K_e \Phi_p} \cdot I \quad (2.21)$$

$$\text{Mai mult, știind că } I = \frac{M_e}{k \cdot \Phi_p} \Rightarrow n = \frac{U}{k_e \cdot \Phi_p} - \frac{(R_p + R_a)}{k_e \cdot k \cdot \Phi_p^2} \cdot M \quad (2.22)$$

Pornirea motorului se face cu reostatul de pornire fixat la valoare maximă, iar R_{Em} la valoare minimă. În continuare, R_p se reduce treptat până la 0, iar tensiunea de alimentare se duce la valoarea nominală.

Caracteristica naturală se ridică variind sarcina generatorului. Se ridică o *caracteristică artificială* dacă scădem tensiunea de alimentare la o valoare mai mică decât cea nominală, iar curentul de excitație îl ținem constant modificând R_{Em} .

O altă caracteristică artificială se poate ridica dacă tensiunea o setăm la valoarea nominală și creștem R_{Em} astfel încât curentul de excitație să fie mai mic decât cel nominal (prin slăbirea câmpului de excitație) [2.4].

Dacă reducem R_{Em} la valoarea minimă, iar în circuitul indusului creștem rezistența R_p , putem ridica o caracteristică artificială cu rezistența.

Rezultatele măsurătorile se trec în următorul tabel de valori [2.3]:

Tabel 2.7 Mărimi obținute experimental. Mărimi de calculat.

Nr. crt	Mărimi măsurate					Mărimi calculate							
	U_1 [V]	R_p [Ω]	I_2 [A]	I_1 [A]	N [rpm]	$k\phi$	Ω [rps]	R_e [Ω]	P_1 [W]	P_2 [W]	M [Nm]	M_2 [Nm]	η [%]
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													

Întrebări:

1. Care sunt metodele de modificare a turației unui motor de curent continuu cu excitație derivație?
2. Enumerați condițiile ce trebuie să fie îndeplinite pentru ca să obținem caracteristica mecanică naturală.
3. Care este cea mai economică variantă de modificare a turației?

2.6. DETERMINAREA RANDAMENTULUI MCC ȘI PRINCIPIUL SEPARĂRII PIERDERILOR

Ne propunem în cele ce urmează înțelegerea unei metode pentru determinarea randamentului, precum și determinarea pierderilor care au loc într-o mașină de curent continuu.

2.6.1 NOȚIUNI TEORETICE

Prin randamentul unei mașini se înțelege raportul dintre puterea cedată de mașină (P_2) și puterea absorbită, primită la arbore (P_1).

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.23)$$

În conformitate cu STAS 7814-73, măsurarea randamentului se face prin următoarele metode:

- Metoda directă
- Metoda indirectă, a pierderilor separate
- Metoda prin agregat motor-generator
- Metoda opoziției sau de recuperare

În această lucrare, pentru a determina randamentul vom folosi metoda pierderilor separate, cunoscută și sub numele de metoda mersului în gol [2.4].

Determinarea pierderilor

1. Pierderile în fier (p_{Fe}) și pierderile mecanice (p_m) se determină la încercarea de mers în gol a motorului derivație.

Pierderile în fier depind atât de turație cât și de tensiunea electromotoare, pe când *pierderile mecanice* depind doar de turație.

Motorul se alimentează la U_N și se menține constantă turația, la valoarea nominală (n_N), astfel, motorul absoarbe curentul de mers în gol. Dacă variem tensiunea de alimentare, odată cu ea se modifică și valoarea curentului de gol, menținând însă turația constantă (la valoarea nominală) pe tot parcursul măsurărilor. Turația se menține constantă cu ajutorul unui reostat [2.4].

La mersul în gol puterea absorbită se scrie:

$$\begin{aligned} P_0 &= U \cdot I_0 \\ U \cdot I_0 &= p_{Fe} + I_0^2 \cdot R_a + p_m \Rightarrow U \cdot I_0 - I_0^2 \cdot R_a = p_{Fe} + p_m \end{aligned} \quad (2.24)$$

R_a – rezistența înfășurării indusului

U_e se calculează din expresia: $U_e = U - I_0 \cdot R_a$

Se trasează curbele: $I_0 = f(U_e)$, $P_0 = f(U_e)$ la turație, $n = \text{const}$

Dacă scădem din curba $P_0 = f(U_e)$ valorile $I_0^2 \cdot R$ corespunzătoare fiecărui punct al curbei, se obține curba reprezentată cu linie întreruptă, care reprezintă $p_{Fe} + p_m = f(U_e)$. Se prelungește această curbă până la axa ordonatelor, când $U_e = 0$ și obținem astfel punctul M pentru care $p_{Fe} = 0$. Segmentul OM reprezintă pierderile mecanice ($OM = p_m$).

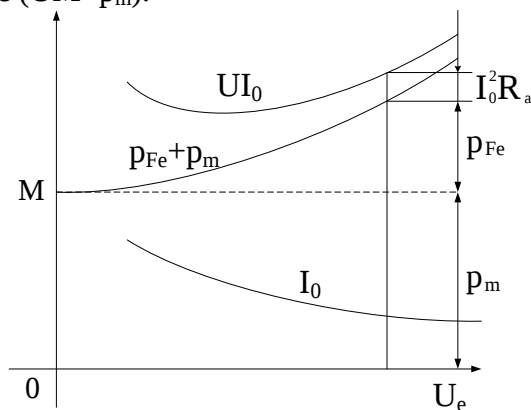


Fig. 2.27 Diagrama de determinare a pierderilor în fier și mecanice [2.4]

2. Pierderile în cupru, în înfășurarea indusului se scriu: $p_{Cu2} = R_a \cdot I^2$
3. Pierderile din înfășurarea de excitație sunt:
 $p_{Cu2} = R_E \cdot I_E$, U_E – tensiunea de alimentare a înfășurării de excitație
 I_E – curentul de excitație pentru care turația este nominală (n_N),
4. Pierderile la perii (la colector): $p_p = \Delta U_p \cdot I$
5. Pierderile suplimentare nu se determină separat, ele se consideră:
 - $p_s = 0.5\% \cdot P_n$ – pt mașini cu circuite compensate
 - $p_s = 1\% \cdot P_n$ – pt mașini fără circuite compensate

Determinarea randamentului prin metoda pierderilor separate.

a) La funcționarea în regim de motor:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U \cdot I - (R_a I^2 + U_E I_E + p_{Fe} + p_m + p_s + p_p)}{U \cdot I} \quad (2.25)$$

$$U_{ea} = k_e \cdot n \cdot \phi = U - R_a \cdot I \quad (2.26)$$

Iar dacă motorul este cu excitație serie: $k_e \cdot n \cdot \phi = U - (R_a + R_e) \cdot I$, unde R_e este rezistența înfășurării de excitație serie.

b) La funcționarea în regim de generator:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U \cdot I}{U \cdot I + R_a \cdot I^2 + U_E \cdot I_E + p_{Fe} + p_m + p_s + p_p} \quad (2.27)$$

$$U_{ea} = k_e \cdot n \cdot \phi = U + R_a \cdot I \quad (2.28)$$

2.6.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE

Problema 2.13 Un generator de c.c. cu magneti permanenți are următoarele date: $U_N = 220 \text{ V}$, $I_N = 20 \text{ A}$, $R_a = 0.8 \Omega$, $p_{FeN} = p_{mv} = p_{CuN}/2$, $n_N = 1200 \text{ rot/min}$. Se cere:

- să se calculeze pierderile în înfășurarea indusului, pierderile în fier și pierderile mecanice și prin ventilație;
- randamentul nominal;
- cuplul electromagnetic și cuplul la arbore în regim nominal [2.2].

Soluție:

- a) Din balanța de puteri (Fig. 2.28) se determină pierderile rotorice:

$$p_{rotN} = p_{CuN} + p_{FeN} + p_{mv}.$$

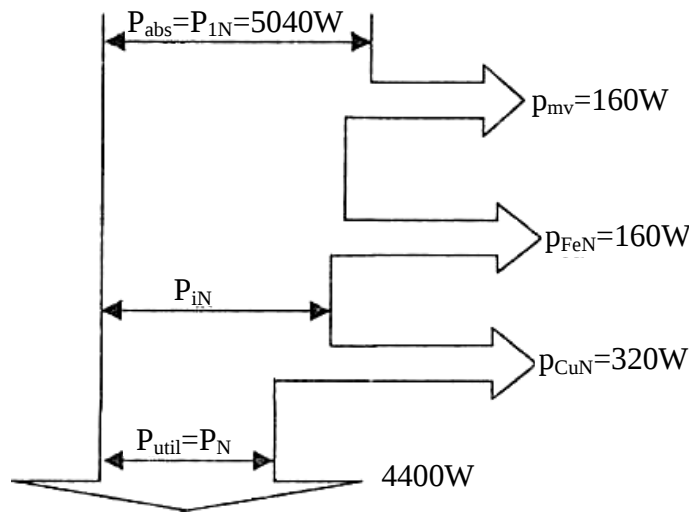


Fig. 2.28 Balanța de puteri

$$p_{CuN} = R_a \cdot I_N^2 = 0.8 \cdot 20^2 = 320 \text{ W}$$

$$p_{FeN} = p_{mv} = \frac{p_{CuN}}{2} = \frac{320}{2} = 160 \text{ W}$$

$$\text{Rezultă că: } p_{rotN} = 320 + 160 + 160 = 640 \text{ W}$$

- a) Randamentul în regim nominal are expresia:

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_{absN}} = \frac{U_N \cdot I_N}{U_N \cdot I_N + \sum p_N} = \frac{U_N \cdot I_N}{U_N \cdot I_N + p_{mv} + p_{FeN} + p_{CuN}}$$

$$\eta_N = \frac{220 \cdot 20}{220 \cdot 20 + 640} = 0.873$$

b) Cuplul electromagnetic nominal are expresia: $M_N = \frac{P_{iN}}{\Omega_N} = \frac{U_{eN} \cdot I_N}{\Omega_N}$

Din ecuația tensiunilor pentru generator se obține:

$$U_{eN} = U_N + R_a \cdot I_N = 220 + 0.8 \cdot 20 = 236 \text{ V}$$

$$\Rightarrow M_N = \frac{U_{eN} \cdot I_N}{\frac{2\pi \cdot n_N}{60}} = \frac{60 \cdot 236 \cdot 20}{2\pi \cdot 1200} = 37.56 \text{ Nm}$$

Se calculează în continuare cuplul la arbore nominal:

$$M_a = \frac{P_{abs}}{\Omega_N} = \frac{U_N \cdot I_N + p_{mv} + p_{FeN} + p_{CuN}}{\frac{2\pi \cdot n_N}{60}} = \frac{220 \cdot 20 + 160 + 60 + 320}{\frac{2\pi \cdot 1200}{60}} \approx 40.1 \text{ Nm}$$

Problema 2.14 Un generator de c.c. cu magneți permanenți are următoarele date: $U_N = 220 \text{ V}$, $I_N = 10 \text{ A}$, $R_a = 0.4 \Omega$, $p_{FeN} = p_{mv} = p_{CuN}/4$, $n_N = 1100 \text{ rot/min}$.

Se cere:

- să se calculeze pierderile în înfășurarea indusului, pierderile în fier și pierderile mecanice și prin ventilație;
- randamentul nominal;
- cuplul electromagnetic și cuplul la arbore în regim nominal.

2.6.3 PRINCIPIUL SEPARĂRII PIERDERILOR – LUCRARE PRACTICĂ

Se execută montajul din Fig. 2.29, considerând valoarea pentru rezistența de pornire, R_p suficient de mare astfel încât să se poată reduce mult tensiunea de la bornele rotorului, iar R_c se ia de 10 ori mai mare decât cea a înfășurării de excitație pentru a putea fi restabilită turația la tensiune redusă.

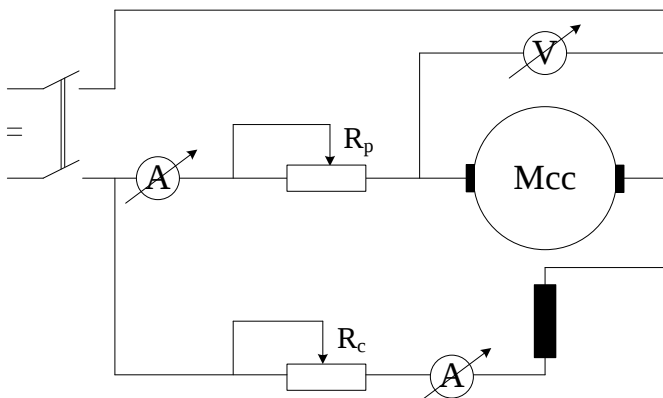


Fig. 2.29 Schema de montaj pentru separarea pierderilor [2.4]

[illegible]

În urma măsurătorilor, se trasează graficele:

- $I_0=f(U_e)$
- $U_0 \cdot I_0=f(U_e)$
- $U_0 \cdot I_0 - I_0^2 \cdot R_a=f(U_e)$
- $p_{Fe}+p_m= f(U_e^2)$
- $\eta=f(I)$

Întrebări:

1. Care este bilanțul pierderilor într-o mașină cu excitație mixtă?
2. Determinați valoarea procentuală a pierderilor din mașina încercată.
3. Determinați valorile pentru cuplul nominal și cel maxim pentru mașina la care s-a ridicat curba cuplului.

Referințe bibliografice:

- [2.1]. I. Boldea, „Transformatoare și mașini electrice“, Editura Politehnica, Timișoara, 2009.
- [2.2]. S. Deaconu, A. Iagăr, L. Tutela, „Mașini electrice–Aplicații“, Editura Destin, Deva, 2000.
- [2.3]. S. Deaconu, „Mașini electrice – Lucrări de laborator“, Universitatea „Politehnica” Timișoara, Facultatea de inginerie Hunedoara, 1996.
- [2.4]. Gh. Atanasiu, M. Babescu, Gh. Bogoevici, I. Boldea, D. Irhașiu, M. Tănase, „Încercările mașinilor electrice –manual de laborator–“, Timișoara, 1979.

3. MAȘINA DE INDUCȚIE

3.1 NOȚIUNI INTRODUCTIVE, CONSTRUCȚIA ȘI PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE A MI

În cadrul acestei secțiuni se urmărește înțelegerea principiului de funcționare al mașinii de inducție (MI), însușirea principalelor caracteristici ale acestui tip de mașină, studiul tipurilor sale constructive, precum și abilitatea de a recunoaște și a identifica elementele sale componente.

3.1.1 NOȚIUNI TEORETICE

Mașina de inducție este o mașină electrică de curent alternativ alcătuită din *stator* și *rotor* între care se găsește *întrefierul* (aer), astfel încât schimbul de energie se face prin inducție electromagnetică.

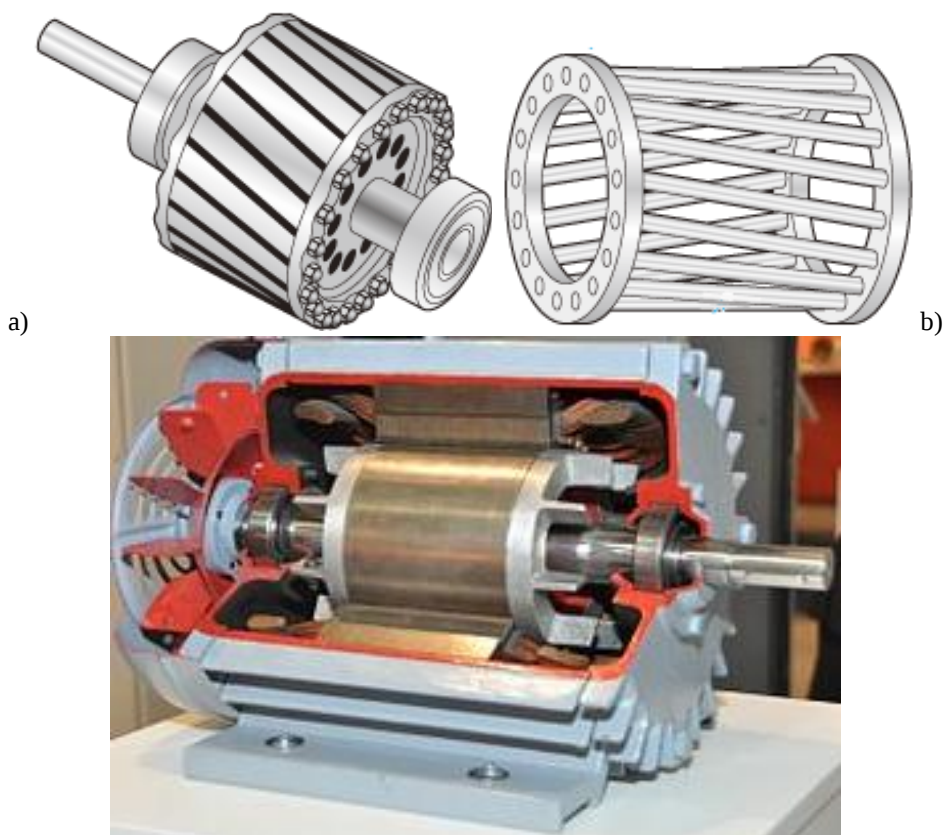


Fig. 3.1 Rotorul MI-varianțe constructive: a) în „colivie de veveriță”, b) bobinat (https://ro.wikipedia.org/wiki/Motor_asincron)

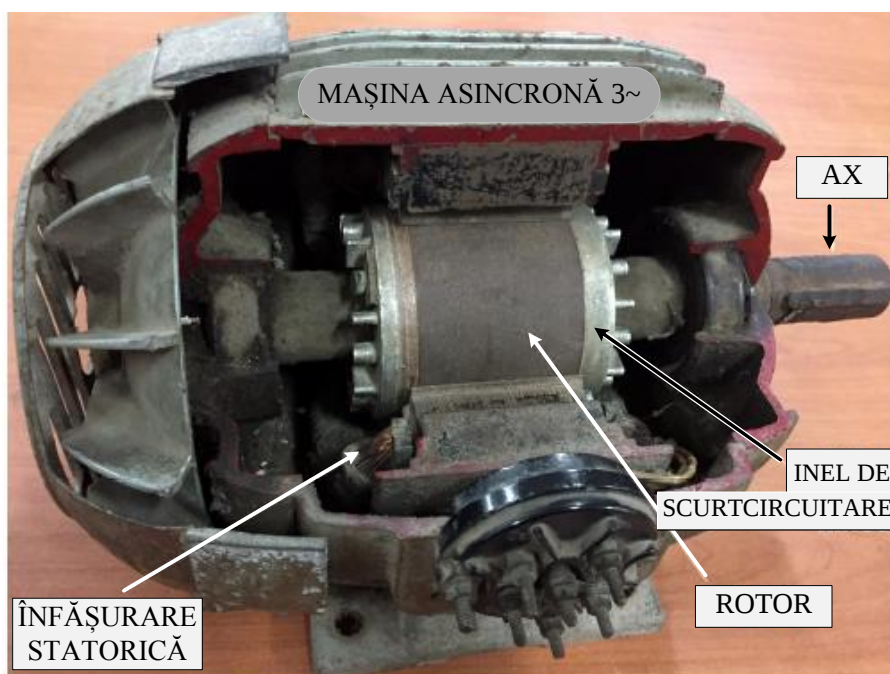


Fig. 3.2 Secțiune prin MI (<https://www.ee.iitb.ac.in/course/~emlab/assets/tnimcorrected-.pdf>)

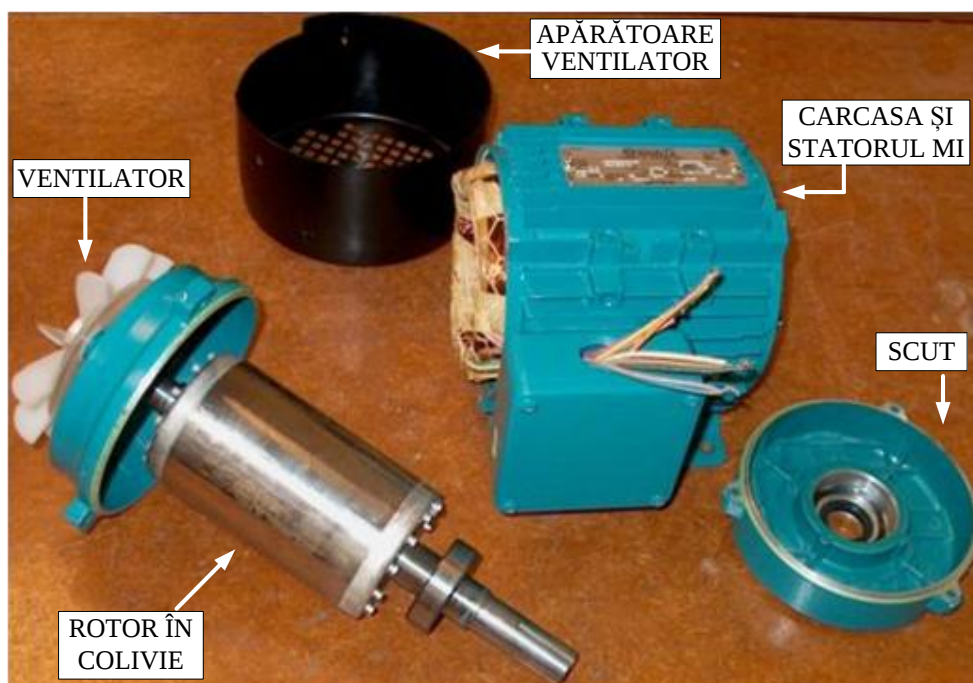


Fig. 3.3 Elemente componente ale MI

Statorul mașinii asincrone

Este partea fixă a mașinii, fiind alcătuit dintr-un miez cilindric de fier, ce se compune din tole de oțel electrotehnic, izolate între ele. Miezul cilindric gol, este prevăzut cu creștături longitudinale pe interior, în care se execută o înfășurare trifazată (Fig. 3.3).

Începuturile celor 6 capete ale înfășurării se notează cu A, B, C, iar sfârșiturile cu x, y, z, și se scot la placa de borne. Miezul de oțel al statorului se montează într-o carcasă de fontă, oțel sau aluminiu, prevăzută lateral cu capace sau scuturi.

Statorul găzduiește polii magnetici pe care sunt înfășurate conductoarele, alcătuind astfel, înfășurarea statorică.



Fig. 3.4 Statorul MI (<https://www.ee.iitb.ac.in/course/~emlab/assets/tnimcorrected-.pdf>)

Rotorul mașinii asincrone

Este partea rotativă a mașinii asincrone, astfel plasat încât să fie capabil să se invârtă în mod liber și se compune din miezul feromagnetic montat pe axul mașinii prevăzut cu inele de contact.

Rotorul se confecționează bobinat sau din bare de metal (în colivie simplă sau dublă, din aluminiu, alamă, bronz sau cupru) (Fig. 3.4), dar există și rotoare speciale.

Miezul de fier al rotorului se realizează din tole de oțel electrotehnic izolate între ele, prevăzute cu creștături pe exterior.

Pe indus se plasează *înfășurarea secundară* trifazată, corespunzătoare creștăturilor miezului rotoric, se poate compune dintr-o serie de bare de Cu neizolate, introduse în creștături și scurtcircuitate la capete prin inele (înfășurare în colivie de veveriță) sau poate fi alcătuită din conductoare (rotor bobinat), și în acest caz, începuturile sale sunt scoase la trei inele de contact, fixate pe ax,

izolate între ele, iar sfârșiturile celor trei faze sunt legate împreună. Pe inele freacă perii colectoare prin care înfășurarea poate fi închisă pe un reostat trifazat, ce servește atât la pornirea mașinii cât și la reglajul acesteia. Înfășurarea secundară are același număr de poli ca și înfășurarea statorică.

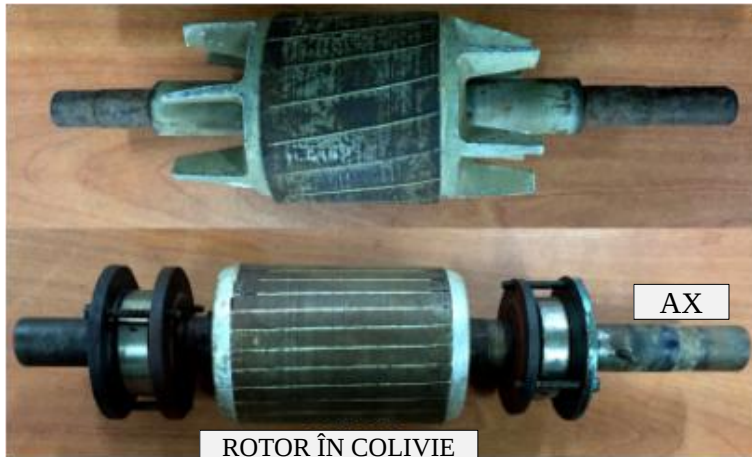


Fig. 3.5 Rotorul MI (<https://www.ee.iitb.ac.in/course/~emlab/assets/tnimcorrected-.pdf>)

Întrefierul este distanța dintre stator și rotor și are valori cuprinse în intervalul (0.15-1) mm. Valorile mici ale întrefierului corespund mașinilor de puteri mici, pe când motoarele ce lucrează în condiții grele de funcționare sunt realizate cu întrefier de valori mari.

Carcasa se realizează prin turnare, din oțel sau fontă sau la puteri mici din aluminiu și are rol de consolidare și protecție. Este prevăzută cu tălpi de fixare, inel de ridicare, cutia de borne, plăcuța indicatoare și scuturile frontale. Susține miezul statorului și asigură posibilitatea de centrare a rotorului față de stator.

3.1.2 PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE AL MAȘINII DE INDUCȚIE

Așa cum îi sugerează și numele („de inducție“), mașina funcționează conform celui de-al doilea principiu al lui Maxwell (https://ro.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell), „Legea inducției electromagnetice“.

Într-un fel, datorită similarității în funcționare, mașina asincronă poate fi considerată un transformator care se rotește.

Înfășurarea statorică are 3 faze simetrice, decalate cu $2\pi/3$ radiani. Alimentând înfășurarea cu un sistem trifazat de tensiuni, cu frecvența f_1 , în mașină va lua naștere un câmp magnetic învârtitor de viteză „ n_1 “ față de stator. Acest câmp induce în rotorul aflat în repaus, tensiuni electromotoare induse care dau naștere unor curenți induși (Fig. 3.5), cu ajutorul cărora vor apărea forțe electromagnetice, forțe ce se vor exercita asupra conductoarelor rotorice.

Acești forți, le corespunde un cuplu electromagnetic ce determină punerea în mișcare a rotorului, cu turația „n”, în sensul câmpului învârtitor statoric.

n_1 – turația de sincronism a motorului

n – turația rotorului

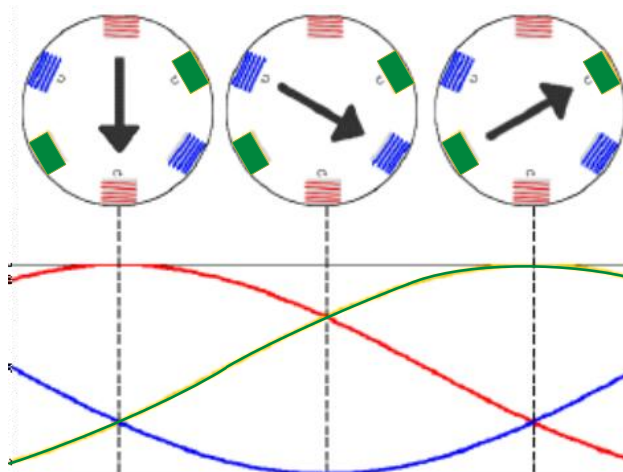


Fig. 3.6 Sistemul trifazat de curenți induși în conductoarele rotorice
(http://www.academia.edu/24970536/Electrical_Machines_Lab_Manual)

Cele două turații amintite mai sus (n_1 și n) trebuie să fie diferite pentru ca sistemul trifazat de curenți induși în înfășurarea rotorică (Fig. 3.5) să ia naștere.

Să presupunem ca $n_1 = n$, adică, câmpul magnetic statoric se învârtă cu o viteză egală cu cea a rotorului, în acest caz, viteza dintre rotor și câmpul magnetic învârtitor este nulă, în conductoare nu se mai induce nici o t.e.m., rezultă că nu mai apar curenți induși, nu mai iau naștere forțe electromagnetice și, prin urmare, nu se mai dezvoltă cuplu. În acest caz, viteza rotorului este în continuă scădere, ajungând în final la oprirea funcționării mașinii.

Diferența relativă dintre vitezele de rotație sincronă și rotorică, poartă numele de alunecare („s”).

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (3.1)$$

unde, turația de sincronism se determină cu următoarea formulă:

$$n_1 = \frac{f_1}{p_1} * 60 \quad (3.2)$$

unde p_1 – numărul de perechi de poli.

În funcție de numărul de perechi de poli și frecvență putem afla valorile standard pentru turația de sincronism, valori trecute în următorul tabel.

Observând tabelul 3.1, putem concluziona faptul că turația mașinii este tot mai mică, pe măsură ce numărul de perechi de poli crește.

Tabel 3.1 Valorile turației și nr de poli la 50 și respectiv 60 Hz

$f_1=50$ [Hz]		$f_1=60$ [Hz]	
n_1 [rpm]	p	n_1 [rpm]	p
3000	1	3600	1
1500	2	1800	2
1000	3	1200	3
750	4	900	4
600	5	720	5

Fenomenul inducției electromagnetice, dar și principiul de funcționare al mașinii de inducție, pot fi urmărite online într-o scurtă prezentare a departamentului tehnic YASKAWA (Fig. 3.7), pe când elementele constructive sunt descrise în prezentarea din Fig. 3.8:



Fig. 3.7 MI–principiul de funcționare (<https://www.youtube.com/watch?v=w5ugeGOOjso>)

Mașina de inducție este prevăzută cu înfășurări plasate în creștături distribuite uniform pe periferia statorului și a rotorului de formă cilindrică realizate din tole feromagnetice. Înfășurările sunt parcurse de curenți alternativi de frecvențe diferite în stator și în rotor, f_1 și f_2 .

Fiind reversibilă, mașina de inducție poate funcționa în *regim de motor și de generator* (regimul de frânare este un caz particular de motor (în sens contrar) sau de generator). Ea se utilizează preponderent ca motor la tensiuni până la 10 KV, puteri până la 25 MW și turații până la peste 100 000 rpm în aplicații speciale la puteri mici.



Fig. 3.8 Construcția MI (https://www.youtube.com/watch?v=AQqyGNOP_3o&t=3s)

Regimul de generator, conectat prin convertor static la rețea sau independent, se utilizează frecvent la frânarea motoarelor de inducție în acționări cu turație variabilă sau în microcentrale hidroelectrice sau electrice de vânt.

Mașina de inducție este „calul de putere” datorită robusteții, fiabilității și a costului redus.

Dintre aplicațiile speciale la puteri mari menționăm acționarea pompelor centrifuge, a turbocompresoarelor, a ventilatoarelor în centrale electrice, în industria chimică, petrolieră, metalurgie și minerit.

La *turații mari* (frecvențe de alimentare de până la 9600 Hz), motorul de inducție se aplică la șlefuirile interioare, prelucrarea lemnului, a materialelor dure, la sisteme centrifugale etc.

În acționări electrice cu turație variabilă, mașina de inducție se alimentează prin convertoare statice, în stator, la domenii largi de variație a turației, și respectiv, în rotor, la domenii restrânse de variație a turației mașinii cu rotor cu inele (bobinat). S-au realizat pe această cale accelerații de peste 25 000 rad/s și domenii de variație a turației (la puteri sub 1 KW) de peste 1 : 20 000.

Astfel, mașina de inducție în acționări cu convertoare statice conduse digital a devenit și „calul de curse” al industriilor moderne [3.2].

Concluzii:

Principalele avantaje ale motoarelor asincrone față de alte tipuri de motoare electrice sunt:

- * simplitate constructivă;
- * preț de cost redus;

- * siguranță mare în exploatare;
- * performanțe tehnice ridicate (cuplu mare de pornire, randament ridicat);
- * stabilitate în funcționare, exploatare, manevrare și întreținere simplă;
- * alimentare direct de la rețeaua trifazată de c.a.;

Dintre *principalele dezavantaje* putem enumera:

- * șoc mare de curent la pornire;
- * factor de putere relativ scăzut;
- * caracteristică mecanică dură;

Întrebări:

1. Ce înțelegeți prin termenul de „alunecare“?
2. De ce nu poate o mașină de inducție să funcționeze la turația de sincronism?
3. Care sunt diferențele dintre un rotor bobinat și unul în colivie?
4. Care este cel mai des întâlnit mod de legare a înfășurării rotorice la rotorul bobinat?

3.2. FUNCȚIONAREA ÎN GOL A MAȘINII DE INDUCȚIE

În cadrul acestei secțiuni se urmărește determinarea pierderilor în fier, a valorilor pentru parametri (rezistența, reactanța) de magnetizare ai mașinii de inducție, precum și ridicarea caracteristicilor de funcționare în gol, $I_0=f(U)$, $P_0=f(U)$, $L_m=f(I_0)$.

3.2.1 NOȚIUNI TEORETICE

La funcționarea în gol, MI este conectată la rețea și nu cedează putere pe la arbore, astfel că mașina absoarbe din rețea doar puterea (P_{10} (3.3)) necesară acoperirii pierderilor în fier (P_{Fe}) și a pierderilor în înfășurările statorice (P_{cu1N}) (Fig. 3.9b).

$$P_{10}=m \cdot U_{10} \cdot I_{10} \cdot \cos \varphi_0; \quad m=3 \quad (3.3)$$

În cadrul acestei funcționări, alunecarea are valoarea apropiată de 0 și deci, viteza mașinii este apropiată de sincronism, ceea ce duce la relația:

$$n=n_1=\frac{\omega_1}{2\pi p_1} \quad (3.4)$$

unde n_1 – turație ideală de gol (turație de sincronism)

La gol ideal, schema echivalentă a mașinii de inducție (Fig. 3.10a) se reduce la o singură ramură, precum la transformator (Fig. 3.10b).

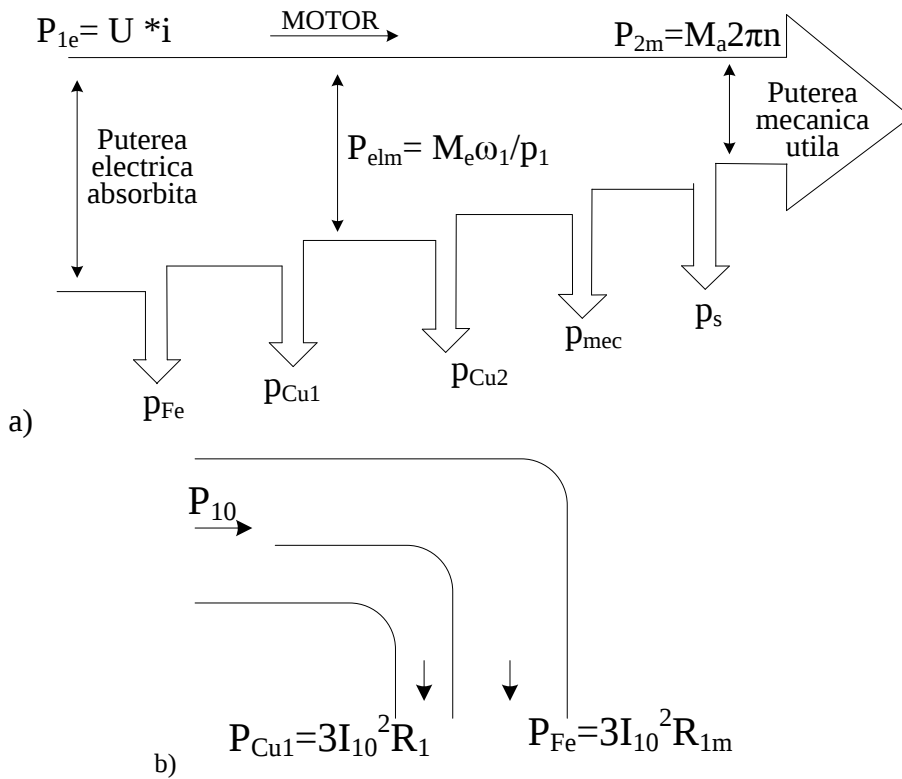


Fig. 3.9 Balanța puterilor pentru mașina de inducție: a) în regim de motor, b) în regim de funcționare în gol [3.2]

În plus, se observă că schema generală a mașinii de inducție se aseamănă foarte mult cu cea a transformatorului, notațiile având aceleași semnificații: mărimile notate cu „1” se referă la stator, iar cele notate cu „2” se referă la mărimile rotorice raportate la stator. Deosebirea constă în faptul că circuitul secundar se închide peste rezistența $\frac{R'_2}{s}$.

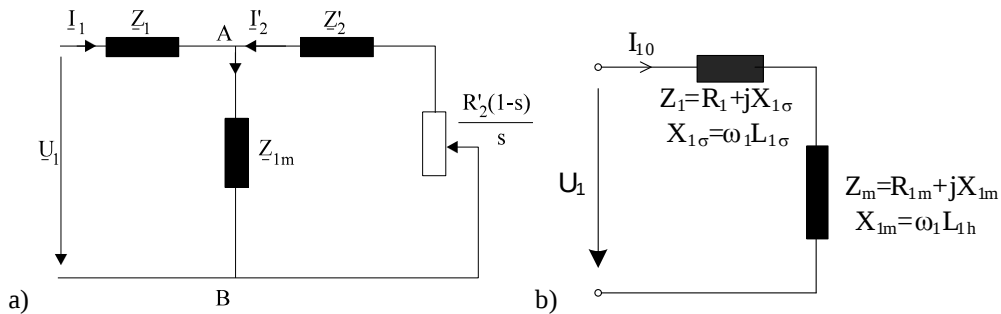


Fig. 3.10 Mașina de inducție cu rotor în colivie: a) schema echivalentă, b) schema la gol [3.2]

Căderea de tensiune pe $Z_{10}=U_1/I_{10}$ este mai mică decât $(2\div 4)\% \cdot U_N$ și prin urmare, tensiunea U_{AB} la gol este aproximativ egală cu U_{AB} la funcționarea în sarcină.

$$Z_{10} = \sqrt{(R_1 + R_m)^2 + (X_{1\sigma} + X_{1m})^2} \quad (3.5)$$

unde $X_{1\sigma} + X_{1m} = X_{10}$ - reactanța de mers în gol

$$Z_{10} = \frac{U_1}{I_{10}} \Rightarrow X_{10} = \sqrt{Z_{10}^2 - (R_1 + R_m)^2} \quad (3.6)$$

La frecvența de 50 Hz, știind valoarea reactanței X_{10} , se poate determina ușor inductanța la funcționarea în gol:

$$L_{10} = L_m + L_{1\sigma} = \frac{X_{10}}{\omega} = \frac{X_{10}}{2\pi f} \quad (3.7)$$

Pierderile în cupru la mersul în gol se scriu:

$$P_{Cu10} = 3 \cdot R_1 \cdot I_{10}^2 \quad (3.8)$$

Curentul absorbit I_{10} , este aproximativ egal cu cel de magnetizare de la mersul în sarcină, și deci, și pierderile în fier sunt aproape egale în cele două cazuri de funcționare (de gol și de sarcină).

Pierderile în fier sunt:

$$P_{Fe} = P_{10} - 3 \cdot R_1 \cdot I_{10}^2 = 3 \cdot R_m \cdot I_{10}^2 \quad (3.9)$$

3.2.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE

Problema 3.1. O mașină de inducție cu tensiunea nominală de fază $U_{1nf}=220$ V (conexiune stea) și curentul nominal $I_{1n}=12$ A, absoarbe în regim ideal de gol, la tensiunea nominală, curentul $I_{10}=0.3 \cdot I_{1n}$ și puterea $P_{10}=100$ W. Rezistența fazei statorice măsurată în curent continuu este $R_1=0.5 \Omega$.

Se cer: a) Valoarea pierderilor în fier, R_1 , R_m , $X_{1\sigma}+X_{1m}$ în valori relative.

b) La ce turație trebuie rotită mașina în acest regim la $f_1=50$ Hz, dacă $p_1=3$ perechi de poli?

Soluție:

a) Pierderile în fier sunt: $p_{Fe} = P_{10} - P_{Cu10}$, unde $P_{Cu10} = 3 \cdot R_1 \cdot I_{10}^2$

$$I_{10} = 0.3 \cdot I_{1n} = 0.3 \cdot 12 = 3.6 \text{ A}$$

$$\left. \begin{aligned} p_{Fe} &= P_{10} - 3 \cdot R_1 \cdot I_{10}^2 \\ p_{Fe} &= 3 \cdot R_{1m} \cdot I_{10}^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow R_{1m} = \frac{p_{Fe}}{3 \cdot I_{10}^2} = \frac{100 - 3 \cdot 0.5 \cdot 3.6^2}{3 \cdot 3.6^2} = \frac{100 - 19.44}{3 \cdot 12.96} =$$

$$= \frac{80.56}{38.88} = 2.072 \Omega \Rightarrow R_{1m} = 2.072 \Omega$$

În continuare,

$$X_{10} = X_{1\sigma} + X_{1m} = \sqrt{Z_{10}^2 - R_{10}^2}, \text{ unde } Z_{10} = \frac{U_{1nf}}{I_{10}} \text{ și } R_{10} = R_1 + R_{1m}$$

$$\Rightarrow X_{10} = \sqrt{\left(\frac{U_{1nf}}{I_{10}}\right)^2 - (R_1 + R_{1m})^2} = \sqrt{\left(\frac{220}{3.6}\right)^2 - (0.5 + 2.072)^2} = \sqrt{61.11^2 - 2.572^2}$$

$$= \sqrt{3734.56 - 6.65} = \sqrt{3727.91} = 61.05 \Omega \Rightarrow X_{10} = 61.05 \Omega$$

Se determină în continuare impedanța nominală:

$$Z_n = \frac{U_{1n}}{I_{1n}} = \frac{220}{12} = 18.33 \Omega$$

În unități relative, parametrii determinați se raportează la valoarea nominală a impedanței și astfel, se exprimă sub forma:

$$r_1 = \frac{R_1}{Z_n} = \frac{0.5}{18.33} = 0.02727;$$

$$r_{1m} = \frac{R_{1m}}{Z_n} = \frac{2.072}{18.33} = 0.113;$$

$$X_{1\sigma} + X_{1m} = \frac{X_{10}}{Z_n} = \frac{61.05}{18.33} = 3.33;$$

$$\text{b) Turația ideală de gol } n_1 = \frac{f_1}{p} = \frac{50}{3} \cdot 60 = 1000 \text{ rpm} = 16.66 \text{ rps}.$$

Problema 3.2. Un motor asincron trifazat cu rotorul în scurtcircuit are următoarele date: $U_{1nl} = 380 \text{ V}$, conexiune statorică stea, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $2p = 10$, $s_N = 0.05$, $R_1 = 0.05 \Omega$, $R_2' = 0.1 \Omega$, $X_1 \approx X_2' = 0.2 \Omega$, curentul de mers în gol $I_{10} = 15 \text{ A}$, $p_{Fe1} = 1200 \text{ W}$, pierderile mecanice și prin ventilație $p_{mv} = 875 \text{ W}$ [2.4].

Să se determine, pentru regimul nominal de funcționare:

- factorul de putere;
- puterea absorbită;
- puterea cedată la arbore de către motor;
- cuplul la arborele mașinii;
- randamentul.

3.2.3 FUNCȚIONAREA ÎN GOL A MI-LUCRARE PRACTICĂ

Deoarece la funcționarea în gol a mașinii asincrone, cuplul electromagnetic este zero, pentru a menține turația rotorului egală cu cea de sincronism, e necesar un motor de antrenare, în general sincron, care să se rotească la aceeași turație, cu același număr de poli, $2p_1$.

Schema experimentală la gol ideal

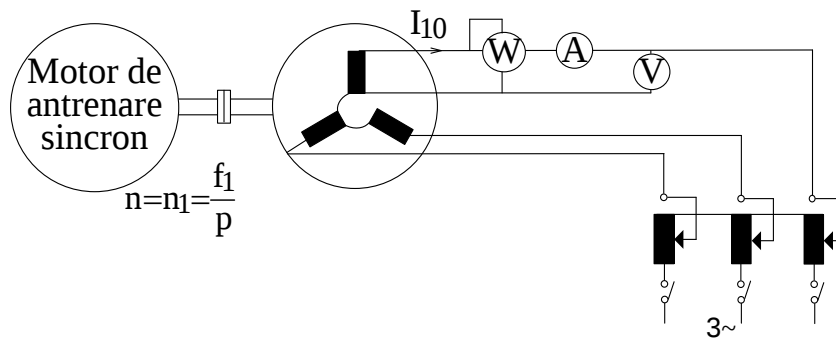


Fig. 3.11 Schema de montaj la funcționarea în gol a MI [3.2]

Se notează datele mașinii de încercat:

P_N [kW]=.....; U_{1N} [V] =.....; I_{1N} [A]=; n_N [rpm]=.....

Se realizează montajul (Fig. 2.3), se variază tensiunea $U_{10}=(0\div 1.2)*U_{1N}$ de la un autotransformator, se măsoară: puterea primară, P_{10} , curentul de funcționare în gol, pe fază, I_{10} , iar valorile se trec în tabel.

Se calculează parametrii la funcționarea în gol și se ridică următoarele caracteristici:

- $I_0=f(U_0)$
- $P_0=f(U_0)$
- $\cos\varphi_0=f(U_0)$

Din (3.3) putem să calculăm factorul de putere la mers în gol:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_{10}}{m * U_{10} * I_{10}}; \quad m=3 \quad (2.8)$$

Observație:

Rezistența R_1 se măsoară alimentând o fază a MI în curent continuu (c.c.), după efectuarea probei de gol.

Forma teoretică a caracteristicilor de gol este prezentată în Fig. 3.12.

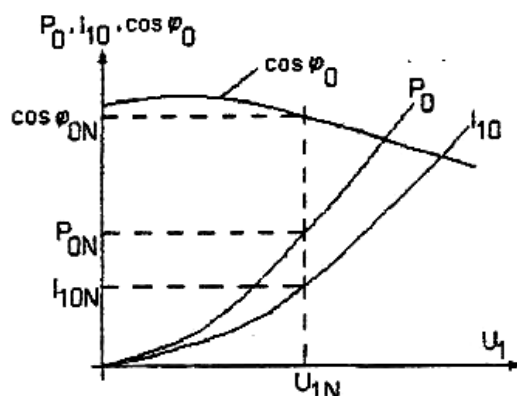


Fig. 3.12 Caracteristicile MI la gol [3.3]

Se completează în continuare tabelul de mărimi: atât valorile măsurate cât și cele determinate din calcule, la proba de gol.

Tabel 3.2 Valori determinate pentru proba de gol, la MI.

Nr. crt.	Mărimi măsurate				Mărimi calculate						
	P_{10} [W]	I_{10} [A]	U_{10} [V]	R_1 [Ω]	$\cos\varphi_0$	Z_{10} [Ω]	P_{Fe} [W]	R_{1m} [Ω]	R_{10} [Ω]	X_{10} [Ω]	$L_m + L_{1\sigma}$ [H]
1											
2											
3											
4											
5											
6											

Măsurarea rezistenței înfășurării, în curent continuu, prin metoda volt-ampmetrică

Dacă înfășurările au accesibile începuturile și sfârșiturile atunci rezistența de fază poate fi determinată direct, prin măsurare. Cele trei rezistențe ale înfășurărilor: r_a , r_b , r_c nu trebuie să fie mult diferite între ele, dacă mașina este construită simetric.

Pentru realizarea schemei de montaj (Fig. 3.13) este necesară o sursă de curent continuu, un ampermetru și un voltmetru.

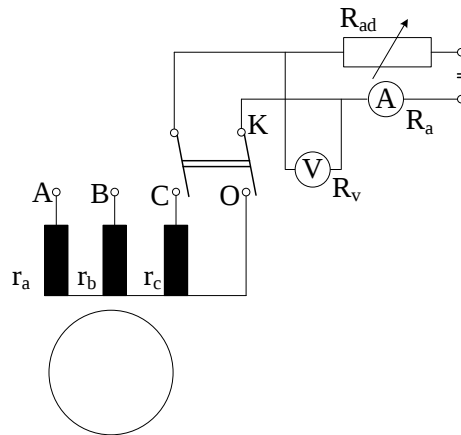


Fig. 3.13 Schema de montaj pentru determinarea rezistenței înfășurărilor în c.c [3.4]

R_{ad} – rezistență adițională;

R_a – rezistența ampermetrului;

R_b – rezistența voltmetrului;

$r_c = \frac{U}{I - I_v}$; I_v – curentul prin voltmetru

Întrebări:

1. Definiți pierderile acoperite de puterea absorbită de la rețea la mersul în gol al MI.
2. Ce puteți spune despre curentul absorbit la mersul în gol a MI? Dar despre tensiunea U_{AB} ?
3. Care este parametrul determinat experimental în cadrul funcționării în gol a MI și cum a fost el determinat?
4. Specificați parametri calculați în cadrul probei de mers în gol a mașinii de inducție.

3.3. FUNCȚIONAREA ÎN SCURTCIRCUIT A MAȘINII DE INDUCȚIE

În această secțiune se urmărește ridicarea caracteristicilor de scurtcircuit și determinarea parametrilor (R_{sc} , X_{sc} , L_{sc}) corespunzători acestui regim de funcționare.

3.3.1 NOȚIUNI TEORETICE

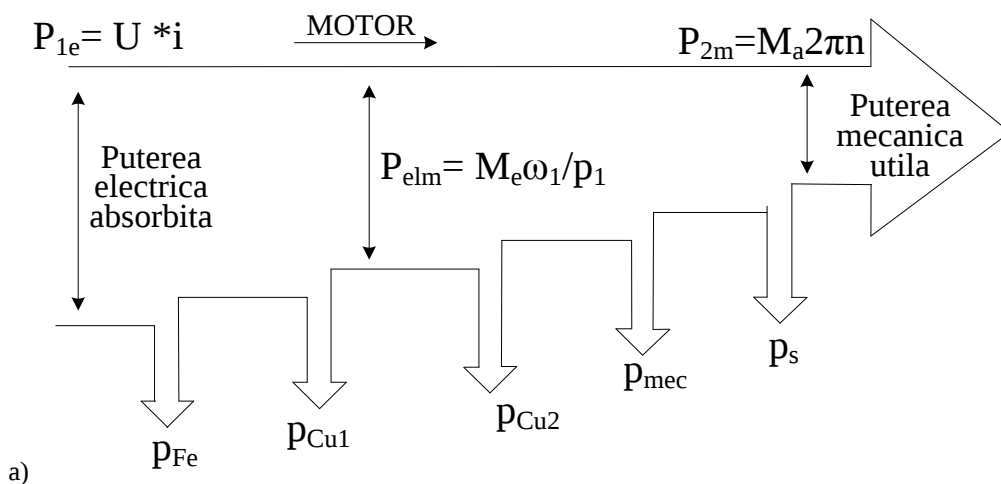
Funcționarea mașinii de inducție în scurtcircuit este regimul limită, în care se aplică un sistem simetric de tensiuni înfășurării statorice în timp ce rotorul este blocat, adică turația rotorică este 0 ($n=0$), iar alunecarea are valoarea 1 ($s = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1$). Pentru a evita încălzirea excesivă a mașinii timpul de aplicare a tensiunii trebuie să fie scurt.

Dacă la bornele mașinii tensiunea are valoarea nominală, scurtcircuitul se numește de avarie și curentul $I_{1sc} = (3 \div 7) \cdot I_{1N}$, iar dacă MI este alimentată la o tensiune redusă $(0.2 \div 0.3) \cdot U_{1N}$ și curentul absorbit din rețea este aproximativ egal cu cel nominal, scurtcircuitul se numește de probă.

Proba cu rotor cald se realizează la tensiuni mici pentru a nu depăși $(1 \div 1.2) \cdot I_n$, evitându-se astfel, încălzirea mașinii. Puterea activă absorbită la $n=0$ acoperă pierderile din înfășurările statorice (P_{cu1N}) și pierderile din înfășurările rotorice (P_{cu2N}) (Fig. 3.14b).

$$P_{1sc} = P_{Cu1N} + P_{Cu2N} = 3 \cdot R_1 \cdot I_{1p}^2 + 3 \cdot R_2' \cdot I_{1p}^2 = 3 \cdot R_{sc} \cdot I_{1p}^2; \quad (3.11)$$

$$I_{1p} \approx I_{2p}$$



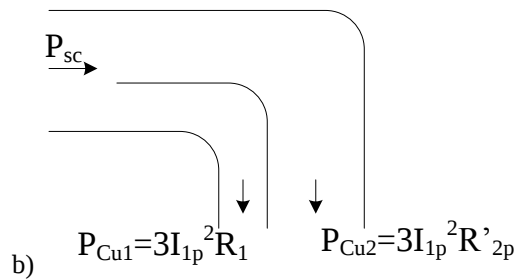


Fig. 3.14 Balanța puterilor pentru MI: a) în regim de motor,
b) în regim de funcționare în gol [3.2]

La funcționarea în scurtcircuit, schema echivalentă a mașinii de inducție (Fig. 3.15a) se reduce la o singură ramură (Fig. 3.15b), iar impedanța echivalentă corespunzătoare schemei este:

$$Z_{sc} = \frac{U}{I_{1p}} \quad (3.12)$$

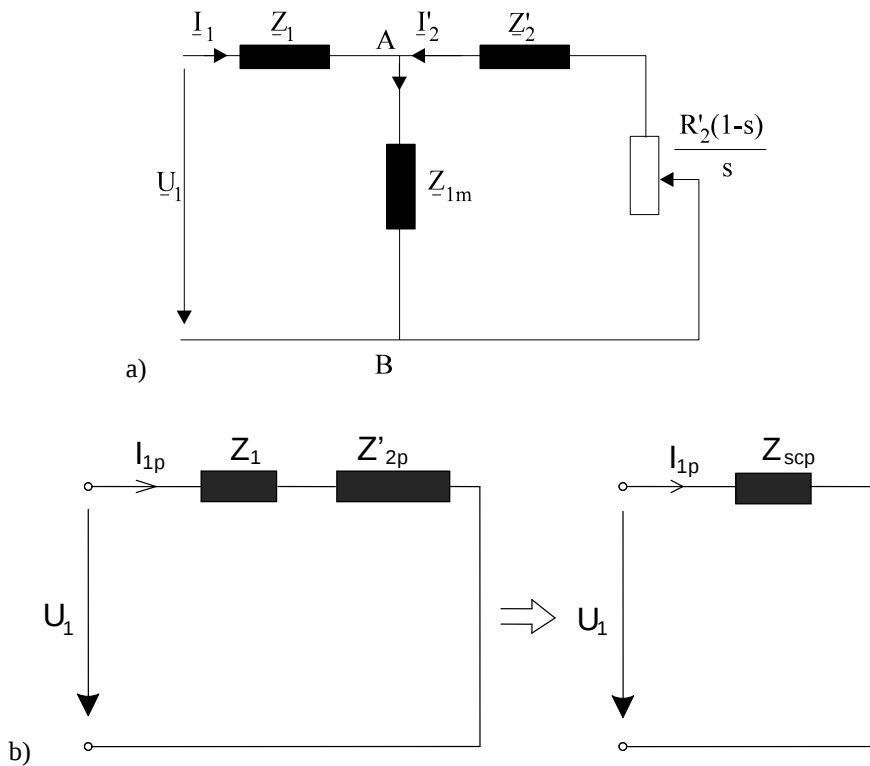


Fig. 3.15 Mașina de inducție cu rotor în colivie: a) schema echivalentă;
b) schema la funcționarea în scurtcircuit

Parametrii probei de scurtcircuit

Cele două reactanțe de dispersie $X_{1\sigma}$ și $X'_{2\sigma p}$ nu se pot separa și deci, la măsurări se consideră că sunt aproximativ egale: $X_{1\sigma} \approx X'_{2\sigma p}$. Curentul de magnetizare se neglijează și deci, pierderile în fier se consideră nule.

Urmărind Fig. 3.15a,b putem să definim rezistența și reactanța la scurtcircuit:

$$R_{scp} = R_1 + R'_{2p} \quad (3.13)$$

$$X_{scp} = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma p} = \sqrt{Z_{sc}^2 - R_{scp}^2} = \sqrt{\left(\frac{U}{I_{1p}}\right)^2 - R_{scp}^2} \quad (3.14)$$

Astfel că impedanța poate fi scrisă:

$$Z_{sc} = \sqrt{R_{sc}^2 + X_{sc}^2} = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2} \quad (3.15)$$

La frecvența de 50 Hz se determină inductanța de scurtcircuit:

$$L_{sc} = L_{1\sigma} + L'_{2\sigma} = \frac{X_{sc}}{\omega} = \frac{X_{sc}}{2\pi f} \quad (3.16)$$

Factorul de putere la scurtcircuit se calculează:

$$\cos\varphi_{sc} = \frac{P_{sc}}{m \cdot U_{1sc} \cdot I_{1sc}} \quad (3.17)$$

3.3.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE**Problema 3.3**

Fie o mașină de inducție cu tensiunea nominală de fază $U_{1nf}=220$ V (conexiune stea), curentul nominal $I_{1n}=10$ A, absoarbe în regim ideal de gol, la tensiunea nominală, curentul $I_{10}=0.3 \cdot I_{1n}$ și puterea $P_{10}=120$ W, iar rezistența fazei statorice, măsurată în curent continuu, este de $R_1=0.6 \Omega$; cu rotorul în două variante: a) bobinat și b) cu rotorul în colivie.

La proba cu rotorul calat cazul a), curentul nominal este absorbit la tensiunea $U_1=0.1 \cdot U_n$ și $p_{1sc}=300$ W, iar în cazul b) la $U'=0.15 \cdot U_n$; $p_{1sc}=750$ W. Se cer curenții, rezistențele și reactanțele de pornire (scurtcircuit) pentru cele două cazuri și cuplul de pornire la tensiunea nominală.

Soluție:

În ambele cazuri se utilizează relațiile:

$$P_{isc} = 3 \cdot W_{sc} = 3 \cdot R_{scp} \cdot I_{1p}^2; \quad I_{1p} \approx I'_{2p}; \quad X_{scp} = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma p} = \sqrt{\left(\frac{U}{I_{1p}}\right)^2 - R_{scp}^2}$$

$$R_1 = 0.6 \, \Omega, \quad X_{1\sigma} + X_{1m} = 73.197 \, \Omega, \quad U_n = 220 \, V, \quad I_n = 10 \, A, \quad p = 3, \quad f_1 = 50 \, Hz.$$

Cazul a. Efectul pelicular nu se manifestă notabil la rotorul bobinat:

$$R_1 + R'_2 = \frac{P_{isc}}{3 \cdot I_n^2} = \frac{300}{3 \cdot 10^2} = 1 \, \Omega$$

$$R'_2 = 1 - 0.6 = 0.4 \, \Omega$$

$$X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} = \sqrt{\left(\frac{U}{I_n}\right)^2 - (R_1 + R'_2)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.1 \cdot 220}{10}\right)^2 - 1^2} = 1.96 \, \Omega$$

Se admite $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = 1.96/2 = 0.98 \, \Omega$

Cazul b

$$R_1 + R'_{2p} = \frac{P'_{scp}}{3 \cdot I_n^2} = \frac{750}{3 \cdot 10^2} = 2.5 \, \Omega;$$

$$R_{2p} = 2.5 - 0.6 = 1.9 \, \Omega$$

$$X_{1\sigma} + X'_{2\sigma p} = \sqrt{\left(\frac{U}{I_n}\right)^2 - (R_1 + R'_{2p})^2} = \sqrt{\left(\frac{0.15 \cdot 220}{10}\right)^2 - 2.5^2} = 2.154 \, \Omega$$

$$X'_{2\sigma p} = 2.154 - 0.98 = 1.174 \, \Omega$$

Curentul de pornire la tensiunea nominală diferă notabil în cele două cazuri ($I_{1p} = 10 \cdot I_n$ și $I'_{1p} = 6.66 \cdot I_n$), dar rezistența rotorică crește în cazul coliviei.

Trebuie observat că $X_{1m} = 73.193 - 0.96 = 72.233 \, \Omega$, este într-adevăr mult mai mare decât $X_{1\sigma}$.

Cuplul electromagnetic se calculează:

$$M_{ep} = \frac{3 \cdot R'_2 \cdot I_{1p}^2 \cdot p_1}{\omega_1} = \frac{3 \cdot 0.4 \cdot 100^2 \cdot 3}{2\pi \cdot 50} = 114.65 \, Nm;$$

$$M'_{ep} = \frac{3 \cdot R'_{2p} \cdot I_{1p}^2 \cdot p_1}{\omega_1} = \frac{3 \cdot 1.9 \cdot 66.66^2 \cdot 3}{2\pi \cdot 50} = 242 \, Nm;$$

Cuplul de pornire crește simțitor din cauză că circuitul rotoric dobândește caracter mai pronunțat rezistiv ca urmare a efectului pelicular în rotorul cu colivie.

Problema 3.4

Un motor asincron trifazat cu conexiune statorică Y, având $p = 3$ și rotorul bobinat, este alimentat la tensiunea nominală de linie $U_{1N}=380$ V. Dacă rotorul este blocat, iar tensiunea de linie se reduce la valoarea $U_{1SCN}=90$ V, curentul absorbit este $I_{1SCN} = 50$ A, la un factor de putere $\cos \varphi_{sc} = 0.45$. Rotorul și statorul au înfășurările conectate în stea, având următoarele caracteristici: $N_{c1}=36$, $N_{c2}=54$, $n_{c1} = 8$ (numărul de conductoare în creștătură), $n_{c2} = 4$.

Dacă pasul înfășurărilor se consideră diametral, iar înfășurarea statorică are rezistența $R_1 = 0.1 \Omega$ și reactanța de dispersie $X_1 = 0.35 \Omega$, să se calculeze: a) parametrii de scurtcircuit ai mașinii din schema echivalentă; b) parametrii înfășurării rotorului (R_2 , X_2); c) pierderile globale în înfășurărilor mașinii la curentul $I_{1N} = 50$ A.

3.3.3 FUNCȚIONAREA ÎN SCURT-CIRCUIT A MI-LUCRARE PRACTICĂ

Proba de scurtcircuit se realizează la tensiuni mici $U_{sc} = (0.2 \div 0.3) \cdot U_{1N}$, pentru a se evita supraîncălzirea mașinii, motiv pentru care, încercarea de funcționare la scurtcircuit trebuie realizată într-un interval de timp cât mai scurt.

Se notează datele mașinii de încercat:

P_N [kW]=.....; U_{1N} [V] =.....; I_{1N} [A]=; n_N [rpm]=.....

Schema experimentală la scurtcircuit

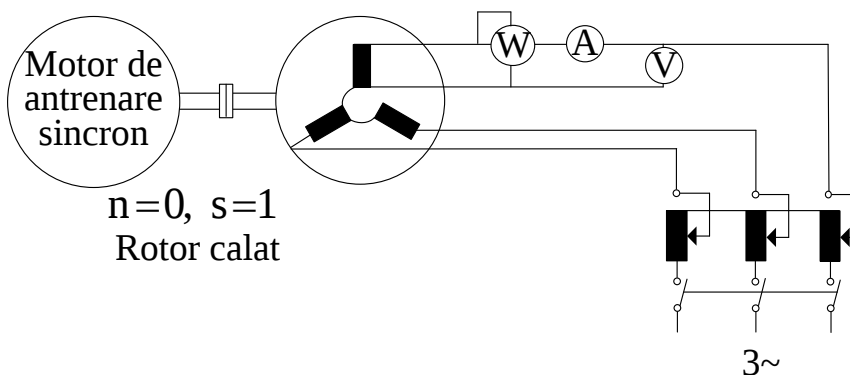


Fig. 3.16 Schema de montaj pentru funcționarea în scurtcircuit

Se execută montajul din Fig. 3.16, se variază tensiunea prin intermediul unui autotransformator de la 0 la valoarea tensiunii pentru care $I=1.2 \cdot I_N$.

8												
9												
10												

Întrebări:

1. Definiți pierderile acoperite de puterea activă absorbită la scurtcircuitul MI.
2. Cum se justifică neglijarea pierderilor în fier la funcționarea în scurtcircuit a MI?
3. Enumerați parametrii și scrieți formulele corespunzătoare acestora folosind mărimile citite pentru cazul în care rotorul a fost blocat.
4. Cum rezultă din calcul curentul absorbit la pornire, la $U=U_N$?

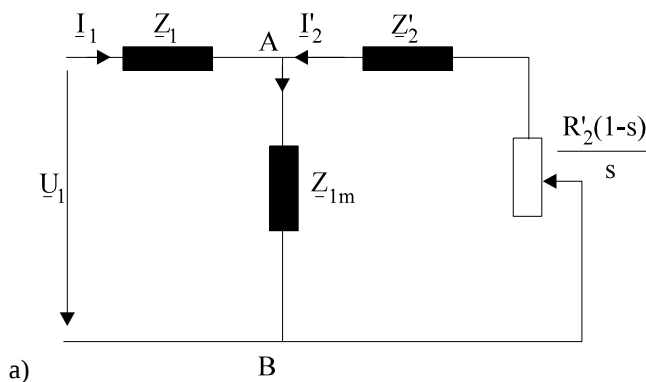
3.4 FUNCȚIONAREA ÎN SARCINĂ ȘI CURBA CUPLULUI PENTRU MAȘINA DE INDUCȚIE

Secțiunea de față are în vedere studierea experimentală a comportării mașinii asincrone trifazată ($m=3$) la funcționarea în regim de motor. Se urmărește astfel, încărcarea mașinii la diferite trepte de sarcină, achiziționarea rezultatelor, iar apoi ridicarea caracteristicilor de funcționare și determinarea astfel a performanțelor mașinii.

În plus, se dorește măsurarea vitezei de rotație („ n “) a mașinii, în funcție de care se vor calcula valorile pentru alunecare („ s “) și cuplu („ M “) pentru fiecare treaptă de încărcare, calcul urmat de ridicarea curbei cuplului (cuplul în funcție de alunecare).

3.4.1 NOȚIUNI TEORETICE

Funcționarea mașinii de inducție în regim de motor are loc la alunecări cuprinse între 0 și 1, însă zona stabilă de funcționare se încadrează între 0 și valoarea critică a alunecării („ s_k “), corespunzătoare cuplului critic.



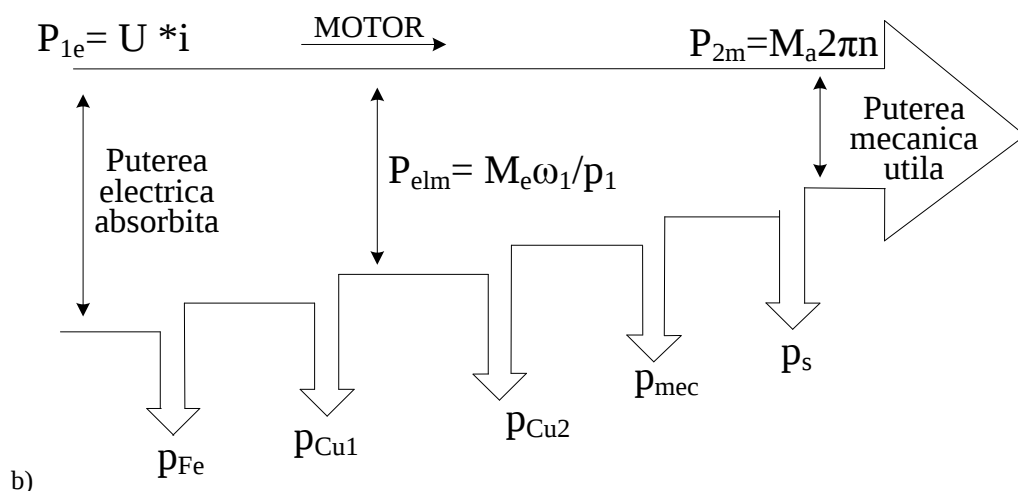


Fig. 3.18 Schema electrică pe fază și balanța de puteri pentru mașina de inducție [3.2]

Din schema electrică (Fig. 3.18a) și făcând bilanțul energetic (Fig. 3.18b) se poate scrie în continuare formula generală a cuplului electromagnetic. Cuplul ia naștere ca rezultat al acțiunii și reacțiunii dintre fluxul magnetic al câmpului magnetic învârtitor și curentul din rotor, astfel că, puterea dezvoltată este cea electromagnetică.

Prin urmare:

$$\left. \begin{aligned} M_e &= \frac{P_{elm}}{\Omega_1} = \frac{P_{elm}}{\omega_1} \cdot p_1 \\ \Omega_1 &= \frac{\omega_1}{p_1} \\ s_n &= \frac{P_{Cu2}}{P_{elm}} \Rightarrow P_{elm} = \frac{P_{Cu2}}{s_n} = \frac{m_1 \cdot R_2' \cdot I_2'^2}{s_n} \end{aligned} \right\} \Rightarrow M_e = \frac{3 \cdot R_2' \cdot I_2'^2 \cdot p_1}{s_n \cdot \omega_1} \quad (3.18)$$

$$I_2'^2 = \left(\frac{U_1}{Z} \right)^2 = \frac{U_1^2}{\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R_2'}{s_n} \right)^2 + \left(X_1 + c_1 \cdot X_2' \right)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow M_e = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot \frac{R_2'}{s_n}}{\Omega_1 \cdot \left[\left(R_1 + c_1 \cdot \frac{R_2'}{s_n} \right)^2 + \left(X_1 + c_1 \cdot X_2' \right)^2 \right]} \quad (3.19)$$

Din ecuația (3.19), se observă influența ramurii de magnetizare a mașinii prin introducerea coeficientului c_1 în formula cuplului. $\underline{C}_1$ este mărimea complexă care reprezintă raportul dintre tensiunea aplicată motorului și tensiunea la bornele circuitului de magnetizare. Astfel, coeficientul c_1 poate fi aproximat cu formula următoare (4.3).

$$\underline{C}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_{e1}} = \frac{(Z_1 + Z_m) \underline{I}_0}{Z_m \underline{I}_0} = 1 + \frac{Z_1}{Z_m} \approx 1 + \frac{X_1}{X_m} = c_1, \quad c_1 \in (1.02 \div 1.08) \quad (3.20)$$

unde, Ω_1 – viteza unghiulară sincronă ($\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p_1} = \frac{2\pi f_1}{p_1} = 2\pi n_1$);

n_1 – turația de sincronism

p_1 – numărul de perechi de poli;

P_{cu2} – pierderile în înfășurarea secundară;

P_{elm} – puterea electromagnetică;

R_1, X_1 , - rezistența și reactanța fazei primare;

R'_2, X'_2 - rezistența și reactanța fazei secundare reduse la primar;

Cuplul de pornire (3.21) se obține înlocuind $s=1$ în ecuația (3.19), pe când valoarea critică a cuplului (3.23) se obține la o valoare critică a alunecării (3.22), după egalarea cu 0 a derivatei cuplului în funcție de s .

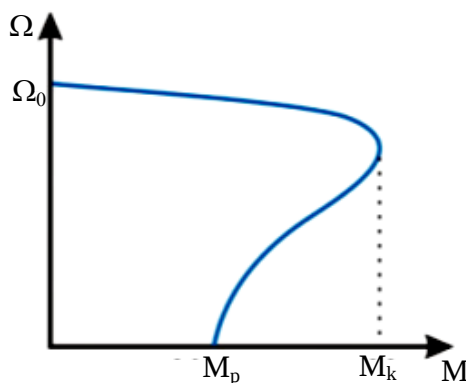


Fig. 3.19 Curba cuplului în funcție de turație

$$M_e = \frac{3 \cdot R'_2}{\Omega_1} \cdot \frac{U_1^2}{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial M_e}{\partial s} = 0 \quad \Rightarrow \quad s_k \approx \frac{\pm R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (3.22)$$

$$M_{ek} \approx \frac{3p_1}{\omega_1} \cdot \frac{U_1^2}{2 \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right)} \quad (3.23)$$

În ecuațiile (3.20), (3.21) semnul (+) corespunde regimului de motor, iar semnul (–) regimului de generator.

3.4.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE

Problema 3.5

Un motor de inducție cu rotor în colivie cu bare înalte are datele: $P_n=20$ kW, $U_1=380$ V (conexiune stea), randamentul nominal $\eta_n=0.92$, $p_{mec}=p_{Fe}=p_s=1\% \cdot P_n$, $p_{Cu1}=2\% \cdot P_n$, $\cos\phi_n=0.9$, $p_1=2$, $f_1=50$ Hz. Curentul de pornire $I_{1p}=4 \cdot I_n$ și factorul de putere la pornire $\cos\phi_1=0.6$.

Se cere: a) pierderile în colivie nominale p_{Cu2n} , puterea electromagnetică, alunecarea și turația nominală, curentul nominal și R'_2 ;

b) rezistența statorică, R_1 , și cea rotorică la pornire, R'_{2p} ;

c) cuplul nominal și cuplul de pornire.

Soluție:

a) Pe baza definiției randamentului rezultă pierderile în înfășurarea rotorului în regim nominal:

$$\sum p = p_{Fe1} + p_{Cu1} + p_s + p_{mec} + p_{Cu2} = \frac{P_n}{\eta_n} - P_n = 20 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{1}{0.92} - 1 \right) = 1739.13 \text{ W}$$

$$p_{Cu2n} = \sum p - p_{Fe1} - p_{Cu1} - p_s - p_{mec} = 1739.13 - 20000 \cdot 0.05 = 739 \text{ W}$$

$$P_m = P_1 - p_{Fe} - p_{Cu1} = \frac{P_n}{\eta_n} - P_n \cdot (0.01 + 0.02) = 21139 \text{ W}$$

Alunecarea nominală este:

$$s_n = \frac{p_{Cu2n}}{P_{elm}} = \frac{739}{21139} = 0.0350$$

$$\text{Curentul nominal } I_n = \frac{P_n}{3 \cdot U_{nf} \cdot \cos\phi_n \cdot \eta_n} = \frac{20 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.9 \cdot 0.92} = 36.597 \text{ A}$$

Cu aproximație, la calculul rezistenței R'_2 se poate considera $I'_{2n} \approx I_n$ și deci:

$$R_2' \approx \frac{p_{Cu2n}}{3 \cdot I_{ln}^2} = \frac{1739}{3 \cdot 36.591^2} = 0.1839 \Omega$$

b) Rezistența statorică, R_1 , rezultă din pierderile p_{Cu1} și curentul nominal, I_{ln} :

$$R_1 = \frac{p_{Cu1n}}{3 \cdot I_{ln}^2} = \frac{0.02 \cdot P_n}{3 \cdot I_{ln}^2} = \frac{0.02 \cdot 20000}{3 \cdot 36.591^2} = 0.0995 \Omega$$

Pentru calculul rezistenței rotorice, R_{2p}' , se folosește relația:

$$R_{psc}' = R_1 + R_{2p}' = \frac{U_{ln}}{I_{lp}} \cdot \cos \phi_{lp} = \frac{220 \cdot 0.6}{4 \cdot 36.59} = 0.9016 \Omega$$

Se observă așadar o creștere de $\frac{R_{2p}'}{R_p'} = \frac{0.802}{0.1839} = 4.36$ ori a rezistenței la pornire datorită efectului pelicular.

Valoarea ridicată a factorului de putere la pornire se datorează tocmai creșterii rezistenței rotorice.

b) Cuplul nominal:

$$M_n = \frac{P_n}{2 \cdot \pi \cdot n_n} = \frac{P_n}{2 \pi \cdot \frac{f_1}{p} \cdot (1 - s_n)} = \frac{20 \cdot 10^3}{2 \pi \cdot \frac{50}{2} \cdot (1 - 0.035)} = 132 \text{ Nm}$$

Cuplul de pornire:

$$M_p = 3 \cdot p_1 \cdot \frac{R_{2p}' \cdot I_{lp}^2}{\omega_1} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 0.802 \cdot (4 \cdot 36.6)^2}{2 \pi \cdot 50} = 328.4 \text{ Nm} = 2.48 \cdot M_n$$

Adesea, în vederea reducerii curentului de pornire sub $6 \cdot I_n$ și mărirea cuplului de pornire $M_{ep}/M_{en} > 1.1$ se utilizează rotoare cu colivie simplă cu bare înalte (efect pelicular) sau colivie dublă.

Prin ambele procedee se mărește rezistența rotorică la pornire și la turații de până la (60 - 70)% din cea nominală.

Problema 3.6 Un motor asincron trifazat are turația nominală $n_N = 2870$ rot/min și factorul de supraîncărcare $\lambda = M_k/M_N = 2$. Se cunoaște numărul perechilor de poli, $p=1$ și frecvența tensiunii de alimentare, $f_1 = 50$ Hz. Să se determine: a) alunecarea critică; b) cuplul de pornire funcție de cuplul nominal.

Problema 3.7

Un motor de inducție cu rotor în colivie cu bare înalte are datele: $P_n=20$ kW, $U_l=380V$ (conexiune stea), randamentul nominal $\eta_n=0.92$, $p_{mec}=p_{Fe}=p_s=1\% \cdot P_n$, $p_{Cu1}=2\% \cdot P_n$, $\cos\varphi_n=0.9$, $p_1=2$, $f_1=50$ Hz. Curentul de pornire $I_{1p}=4 \cdot I_n$ și factorul de putere la pornire $\cos\varphi_1=0.6$. Se cere: a) pierderile în colivie nominale p_{Cu2n} , puterea electromagnetică, alunecarea și turația nominală, curentul nominal și R_2' ;

b) rezistența statorică, R_1 , și cea rotorică la pornire, R_{2p}' ;

c) cuplul nominal și cuplul de pornire.

3.4.3 CURBA CUPLULUI–LUCRARE PRACTICĂ

În primul rând se notează datele nominale corespunzătoare MI:
 $P_n = \dots$ kW, $U_{1n} = \dots$ V, $I_{1n} = \dots$ A, $n_N = \dots$ rpm, ținând seama de tipul de conexiune a fazelor („stea“ sau „triunghi“).

Se notează de asemenea valorile mărimilor nominale ale generatorului de c.c. (Gcc) cu care este cuplat motorul asincron.

$P_n(Gcc) = \dots$ kW, $U_n(Gcc) = \dots$ V, $I_{1n}(Gcc) = \dots$ A, $n_N(Gcc) = \dots$ rpm

Pentru determinările experimentale, MI se încarcă prin Gcc, care debitează peste un reostat trifazat reglabil, așa cum se poate urmări în Fig. 3.20.

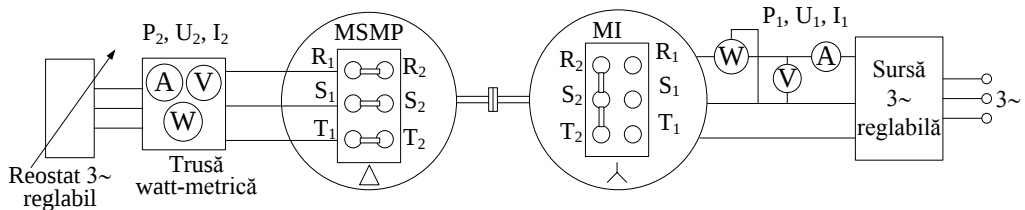


Fig. 3.20 Schema de montaj la funcționarea în sarcină a MI

Se execută montajul din Fig. 3.20, iar cu ajutorul reostatului trifazat, reglabil, se crește treptat valoarea rezistenței, ceea ce determină creșterea puterii și prin urmare creșterea valorii cuplului la arborele MI, concomitent cu scăderea turației rotorului.

Modificarea treptelor de rezistență se face urmărind de fiecare dată valoarea curentului din primarul MI, astfel încât acesta să nu depășească $1.2 \cdot I_N$.

În timpul încercărilor tensiunea de alimentare și frecvența sunt menținute constante, motorul absoarbe puterea P_1 din rețea:

$$P_1 = 3 \cdot U_{1nf} \cdot I_{1nf} \cdot \cos\varphi_n \quad (3.24)$$

iar puterea utilă P_2 se calculează:

$$P_2 = P_2(\text{măsurat}) + 3 \cdot I_2^2 \cdot R_f \quad (3.25)$$

unde, R_f este rezistența pe fază a mașinii sincrone cu magneți permanenți.

Se realizează două seturi de măsurători: un set pentru care alimentarea MI se face la tensiune nominală, și un set de măsurători la tensiune redusă de alimentare. Indicațiile instrumentelor se trec în tabelul următor.

Tabel 3.4 Mărimi măsurate și mărimi de calculat la MI în sarcină

Nr. Crt.	Mărimi măsurate									Mărimi de calculat					
	P_2 (măs) [W]	U_2 [V]	I_{2a} [div]	I_{2b} [div]	I_{2c} [div]	n [rpm]	U_1 [V]	I_1 [A]	P_1 [W]	$\cos\phi$	s	η	M [Nm]	P_2 [W]	I_2 [A]
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															

Observații:

1. Dacă măsurătorile se realizează folosind trusa wattmetrică în serie cu reostatul trifazat, valorile mărimilor citite vor fi trecute în tabel ca număr de diviziuni, urmând ca ulterior să fie transformate în unitățile de măsură corespunzătoare, ținând cont de domeniul de valori pentru care s-au făcut citirile.

2. Cuplul la tensiunea nominală se obține: $M = M' \cdot \left(\frac{U_n}{U_2} \right)^2$, unde, M – reprezintă valoarea cuplului la tensiune redusă; U_2 –tensiunea măsurată: $(0.1 \div 0.4) \cdot U_n$.

Se ridică apoi următoarele caracteristici:

1. $n = f(M)$ – turația în funcție de cuplu
2. $M = f(s)$ – cuplul în funcție de alunecare
3. $I_1 = f(s)$ – curentul în funcție de alunecare; la tensiune și frecvență constante.
4. $\cos\varphi = f(P_2)$
5. $s = f(P_2)$
6. $I_1 = f(P_2)$
7. $P_1 = f(P_2)$
8. $\eta = f(P_2)$

unde, I_1 – curentul statoric prin fazele mașinii;

P_1 – puterea activă absorbită;

$\cos\varphi$ – factorul de putere;

s – alunecarea;

η – randamentul mașinii;

P_2 – puterea utilă (la arbore).

Forma teoretică a curbei cuplului este prezentată în Fig. 3.21, în care se pot observa cu ușurință cele două valori extreme ale cuplului (3.21), obținute la valori simetrice ale alunecării: $\pm s_k$ (4.20).

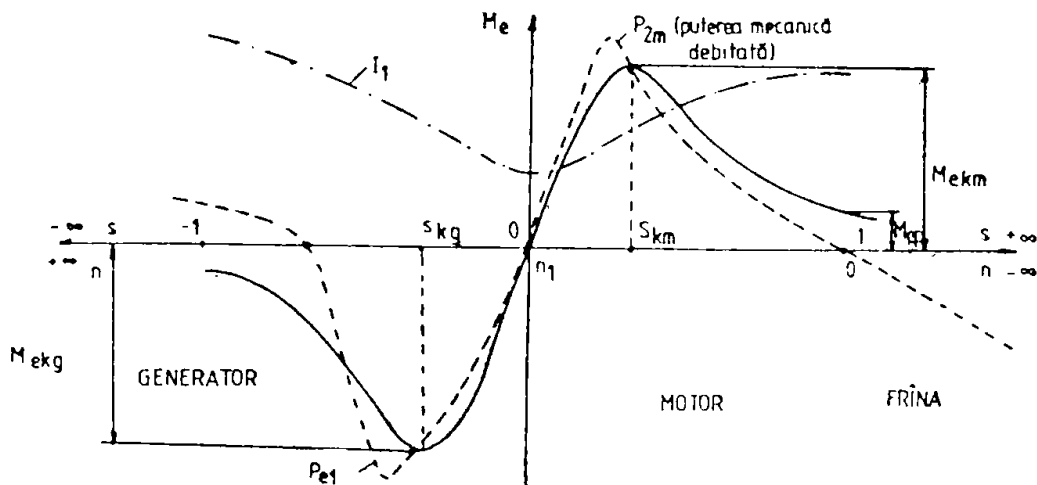


Fig. 3.21 Curba cuplului în cele trei regimuri de funcționare ale MI: motor, frână, generator [3.2]

Urmărind în continuare curba cuplului, se observă faptul că la valori mici ale alunecării $s < s_k$, cuplul variază proporțional cu alunecarea, pe când la valori mari ale alunecării $s > s_k$, variația cuplului este hiperbolică.

Pe caracteristica cuplului, se disting de asemenea trei regimuri de funcționare după semnul cuplului (și deci al puterii electromagnetice):

M.I. funcționează în regim de:

-  *generator*, la alunecări negative respectiv la turații subsincrone ($s < 0$, $n > n_1$), n-turația la arbore, n_1 -turația sincronă
-  *motor*, la alunecări pozitive, subunitare, respectiv la turații suprasincrone ($0 < s < 1$, $n < n_1$),
-  *frână*, în sens invers câmpului magnetic învârtitor, la turații negative ($s > 1$, $n < 0$).

Observație: La funcționarea în regim de frână a MI, atât puterea electrică activă pe care mașina o primește pe la borne, cât și cea mecanică primită de mașină pe la ax, se transformă în căldură.

Întrebări:

1. Cum se deduce (folosind schema echivalentă a mașinii de inducție) formula cuplului electromagnetic din bilanțul puterilor?
2. Cum se calculează cuplul la pornire?
3. Care este diferența dintre mărimile I_{1n} , $\cos\varphi$, n_n , obținute pe cale experimental și cele de pe plăcuța motorului?

3.5 METODE DE PORNIRE. PORNIREA PRIN CONECTAREA DIRECTĂ LA REȚEA A MI.

Unul dintre regimurile tranzitorii cele mai importante ale mașinii asincrone este conectarea la rețea, proces însoțit de curenți și cupluri tranzitorii mari, ce solicită mașina. În cadrul acestei secțiuni se urmărește conectarea directă la rețea a mașinii asincrone, dar și studiul pornirii stea-triunghi a acesteia.

3.5.1 NOȚIUNI TEORETICE

Principalele metode de pornire pentru mașina cu rotor în colivie sunt *pornirea directă* și *pornirea stea-triunghi (cu autotransformator)*.

1. Pornirea directă

Pornirea mașinii de inducție (Fig. 3.22) poate fi făcută atât în gol, cât și în sarcină, caz în care este necesar un cuplu mare la pornire. Pentru simplificarea pornirii, să considerăm mașina având inerție mare la arbore și deci un regim permanent electromagnetic și tranzitoriu mecanic. Interesează în mod deosebit timpul de pornire și energia disipată în înfășurări la pornire prin conectare directă.

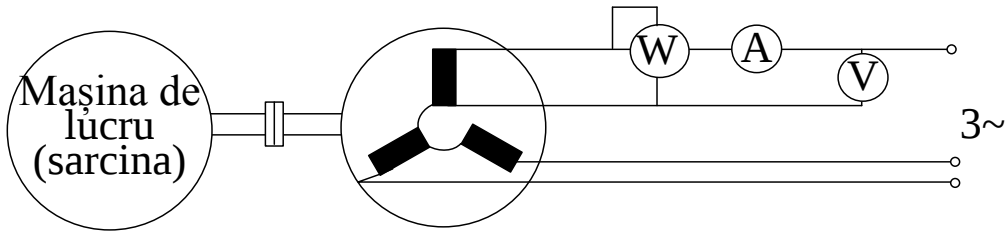


Fig. 3.22 Pornirea directă de la rețea a MI

Timpul de pornire depinde de curba cuplului (Fig. 3.23) și de cuplul rezistent. La cuplul rezistent $M_r(\omega_r)$ dat:

$$\frac{J}{p_1} * \frac{d\omega_r}{dt} = M_e - M_r \quad (3.26)$$

$$\omega_r = \omega_1 * (1-s)$$

Constanta electromecanică a mașinii (T_{em}) se definește [3.2]:

$$T_{em} = \frac{2 * \omega_1}{M_{ek}} * \frac{J}{p} \quad (3.27)$$

unde, M_{ek} este cuplul critic.

T_{em} are valori de ordinul zecimilor de secundă la mașini mici, până la ordinul secundelor la mașini mari.

Căldura dezvoltată la pornire în gol ($M_r=0$) în înfășurarea rotorică W_{Cu2} este:

$$W_{Cu2} = \int_0^{tp} s * P_{elm} dt = \int_0^{tp} \frac{J}{p_1} * \frac{d\omega_r}{dt} * \frac{\omega_1}{p_1} * s dt = -\frac{J}{p_1^2} \int_1^0 \omega_1^2 \frac{s ds}{dt} = \frac{J}{2} \left(\frac{\omega_1}{p_1} \right)^2 \quad (3.28)$$

$$s_{initial}=1; s_{final}=0$$

Pierderile în înfășurarea statorică se pot aproxima cu expresia:

$$p_{Cu1} = p_{Cu2} * \frac{R_1}{R'_2} \quad (3.29)$$

Pierderile totale în înfășurări W_{Cu} la pornirea în gol sunt:

$$W_{Cu2} = W_{Cu1} + W_{Cu2} = \frac{J}{2} * \left(\frac{\omega_1}{p_1} \right)^2 * \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (3.30)$$

Se observă că pierderile totale în înfășurări la pornirea în gol scad cu creșterea rezistenței rotorice, iar aceleași pierderi cresc proporțional cu momentul de inerție J redus la arborele mașinii.

Observație:

Pornirea motorului asincron cu colivie în rotor se poate realiza prin cuplare direct la rețea în cazul în care curentul de pornire poate fi suportat de rețeaua de alimentare, iar șocurile de cuplu nu provoacă solicitări periculoase în sistemul acționat.

Cu ajutorul osciloscopului se vizualizează și se achiziționează formele de undă ale tensiunii și curentului pe tot parcursul regimului tranzitoriu de pornire, iar valorile mărimilor se trec în tabelul următor.

Tabel 3.5 Valorile mărimilor măsurate la pornirea directă

Nr crt	U[V]	I[A]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

2. Pornirea stea-triunghi (cu autotransformator)

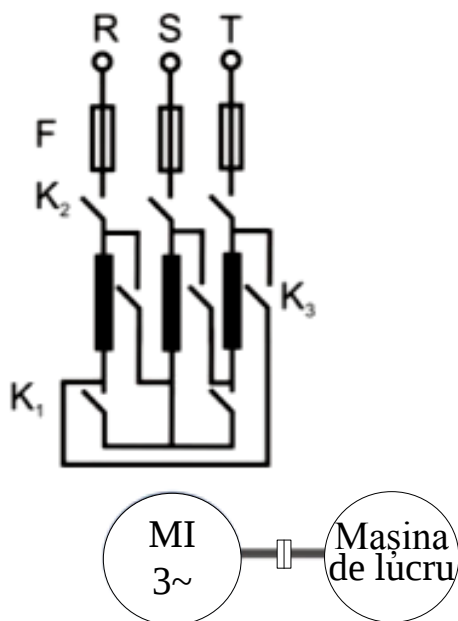


Fig. 3.23 Pornirea stea-triunghi a MI

În vederea reducerii curentului la pornire la cuplu scăzut, se practică reducerea tensiunii, până la atingerea a 70-80% din turația nominală, printr-un comutator stea-triunghi, autotransformator sau variator static.

Reducerea curentului este însoțită de reducerea mai accentuată a cuplului la pornire și de aceea procedeul se utilizează la aplicații cu pornire în gol.

La conexiunea stea (la pornire) și triunghi (în funcționare), tensiunea pe fază se reduce de $\sqrt{3}$ ori și cuplul de 3 ori [3.2]:

$$\begin{aligned} U_{1fY} &= \frac{U_{1fs\Delta}}{\sqrt{3}} \\ I_{1fY} &= \frac{I_{1f\Delta}}{\sqrt{3}} \\ M_{eY} &= \frac{M_{e\Delta}}{3} \end{aligned} \quad (3.31)$$

Curentul de linie, însă, la conexiunea triunghi este de $\sqrt{3}$ ori mai mare decât cel de fază la aceeași conexiune și deci, $I_{l\Delta} = \sqrt{3} \cdot I_{1f\Delta} = \sqrt{3} \cdot (\sqrt{3} \cdot I_{fY}) = 3 \cdot I_{fY}$, rezultă că $I_{fY} = \frac{I_{l\Delta}}{3}$. Astfel, contactorul de alimentare al motorului se poate dimensiona la un curent de trei ori mai mic.

3.5.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE

Problema 3.8 Un motor de inducție cu rotor în colivie cu bare înalte are datele: $P_n = 20$ kW, $U_l = 380$ V. (conexiune stea), randamentul nominal $\eta_n = 0.92$; $p_{mec} = p_{Fe} = p_s = 1\% P_n$; $p_{Cu1} = 2\% P_n$; $\cos\varphi_n = 0.9$; $p_1 = 2$; $f_1 = 50$ Hz. Curentul de pornire $I_{1p} = 4 \cdot I_n$ și factorul de putere la pornire $\cos\varphi_1 = 0.6$ [3.2].

Se cere:

- pierderile în colivie nominale p_{Cu2n} , puterea electromagnetică, alunecarea și turația nominală, curentul nominal și R'_2 ;
- rezistența statorică, R_1 , și cea rotorică la pornire, R'_{2p} ;
- cuplul nominal și cuplul de pornire.

Soluție:

a) Pe baza definiției randamentului (3.32) rezultă pierderile în înfășurarea rotorului în regim nominal:

$$\eta = \frac{\text{Putere mecanică la arbore}}{\text{Putere electrică activă absorbită}} = \frac{P_{2m}}{P_{1e}} \quad (3.32)$$

$$= \frac{P_{2m}}{P_{2m} + P_{Cu1} + P_{Fe} + P_{Cu2} + P_s + P_{mec}}$$

$$\sum p = P_{Fe1} + P_{Cu1} + P_s + P_{mec} + P_{Cu2} = \frac{P_n}{\eta_n} - P_n = 20 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{1}{0.92} - 1 \right) = 1739.13 \text{ W}$$

$$P_{Cu2n} = \sum p - P_{Fe1} - P_{Cu1} - P_s - P_{mec} = 1739.13 - 20000 \cdot 0.05 = 739 \text{ W}$$

$$P_m = P_1 - P_{Fe} - P_{Cu1} = \frac{P_n}{\eta_n} - P_n \cdot (0.01 + 0.02) = 21139 \text{ W}$$

Alunecarea nominală este:

$$s_n = \frac{P_{Cu2n}}{P_{elm}} = \frac{739}{21139} = 0.0350 \quad (3.33)$$

Dacă $p_1=2$ înseamnă că $2p_1=4$ și deci, turația $n_1=1500$ rpm, astfel, din formula alunecării putem determina turația nominală:

$$s_n = \frac{n_1 - n_N}{n_1} \Rightarrow s_n \cdot n_1 = n_1 - n_N \Rightarrow n_N = n_1 - s_n \cdot n_1 \Rightarrow n_N = 1500 - 0.035 \cdot 1500$$

$$\Rightarrow n_N = 1500 - 52.5 \Rightarrow n_N = 1447.5 \text{ rpm}$$

Curentul nominal se determină din formula puterii nominale (3.34):

$$P_n = 3 \cdot I_{ln} \cdot U_{nf} \cdot \eta_n \cdot \cos \phi_n \quad (3.34)$$

$$\Rightarrow I_{ln} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{nf} \cdot \cos \phi_n \cdot \eta_n} = \frac{20 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.9 \cdot 0.92} = 36.597 \text{ A}$$

Rezistența R'_2 se determină din formula pierderilor în cupru din înfășurarea rotorică:

$$P_{Cu2n} = 3 \cdot R'_2 \cdot I_{ln}^2 \quad (3.35)$$

Cu aproximație, la calculul rezistenței R'_2 se poate considera $I'_{2n} \approx I_{ln}$ și deci:

$$R'_2 \approx \frac{P_{Cu2n}}{3 \cdot I_{ln}^2} = \frac{739}{3 \cdot 36.591^2} = 0.1839 \Omega$$

b) Rezistența statorică, R_1 , rezultă din pierderile p_{Cu1} și curentul nominal, I_{ln} :

$$P_{CuIn} = 3 \cdot R_1 \cdot I_{In}^2 \quad (3.36)$$

$$\Rightarrow R_1 = \frac{P_{CuIn}}{3 \cdot I_{In}^2} = \frac{0.02 \cdot P_n}{3 \cdot I_{In}^2} = \frac{0.02 \cdot 20000}{3 \cdot 36.591^2} = 0.0995 \Omega$$

Pentru calculul rezistenței rotorice, R'_{2p} , se folosesc schema simplificată echivalentă la pornire și relațiile corespunzătoare regimului de scurtcircuit al MI (3.1-3.4):

$$R'_{psc} = R_1 + R'_{2p} = \frac{U_{In} \cdot \cos \phi_{1p}}{I_{1p}} = \frac{220 \cdot 0.6}{4 \cdot 36.59} = 0.9016 \Omega$$

Se observă așadar o creștere de $\frac{R'_{2p}}{R'_p} = \frac{0.802}{0.1839} = 4.36$ ori a rezistenței la pornire datorită efectului pelicular.

Valoarea relativ ridicată a factorului de putere la pornire se datorează creșterii rezistenței rotorice.

d) Cuplul nominal

$$M_n = \frac{P_n}{2 \cdot \pi \cdot n_n} = \frac{P_n}{2 \pi \cdot \frac{f_1}{p} \cdot (1 - s_n)} = \frac{20 \cdot 10^3}{2 \pi \cdot \frac{50}{2} \cdot (1 - 0.035)} = 132 \text{ Nm}$$

Cuplul de pornire:

$$M_p = 3 \cdot p_1 \cdot \frac{R'_{2p} \cdot I_{1p}^2}{\omega_1} = 3 \cdot p_1 \cdot \frac{R'_{2p} \cdot I_{1p}^2}{2 \pi f_1} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 0.802 \cdot (4 \cdot 36.6)^2}{2 \pi \cdot 50}$$

$$M_p = 328.456 \text{ Nm} = 2.488 \cdot M_n$$

Observații:

Adesea, în vederea reducerii curentului de pornire sub $6I_n$ și mărirea cuplului de pornire $M_{ep}/M_{en} > 1.1$ se utilizează rotoare cu colivie simplă cu bare înalte (efect pelicular) sau colivie dublă.

Prin ambele procedee se mărește rezistența rotorică la pornire și la turații de până la (60 - 70)% din cea nominală [3.2].

Problema 3.9. Un motor asincron trifazat cu conexiunea statorică în triunghi are factorul de supraîncărcare $\lambda = M_k/M_n = 2$, alunecarea $s_N = 0.03$. Dacă el funcționează cu un cuplu rezistent redus la arbore, $M_r = 0.5 \cdot M_n$, să se determine alunecarea care intervine în cazul comutării bruște a înfășurării statorice

(neglijând pierderile) din triunghi în stea (pentru rezolvare se folosește formula lui Kloos pentru $M=M_N$: $M_n = \frac{2M_k}{\frac{s_n}{s_k} + \frac{s_k}{s_n}}$ [3.5]).

Problema 3.10 Un motor de inducție cu rotor în colivie cu bare înalte are datele: $P_n=10$ kW, $U_l=380$ V (conexiune triunghi), randamentul nominal $\eta_n=0.89$; $p_{mec}=p_{Fe}=p_s=1.1\% \cdot P_n$; $p_{Cu1}=1.2\% \cdot P_n$; $\cos\varphi_n=0.85$; $p_1=2$; $f_1=50$ Hz. Curentul de pornire $I_{1p}=3 \cdot I_n$ și factorul de putere la pornire $\cos\varphi_1=0.63$.

Se cere:

- a) pierderile în colivie nominale p_{Cu2n} , puterea electromagnetică, alunecarea și turația nominală, curentul nominal și R'_2 ;
- b) rezistența statorică, R_1 , și cea rotorică la pornire, R'_{2p} ;
- c) cuplul nominal și cuplul de pornire.

Întrebări:

1. Ce tip de mașină asincronă se pretează pornirii directe de la rețea?
2. Care sunt condițiile în care se poate realiza pornirea directă?
3. Ce valori poate să ia constanta electromecanică a mașinii?
4. De ce nu se poate folosi schema stea-triunghi de pornire a motoarelor pentru pomparea apei în blocurile turn?

3.6. MOTORUL DE INDUCȚIE MONOFAZAT CU FAZĂ AUXILIARĂ

Se urmărește în continuare studiul alimentării monofazate, cu ajutorul condensatoarelor, a mașinii de inducție trifazată.

Pentru a înlătura inconvenientele mașinii de inducție monofazate, precum: puterea redusă (50-60)% din puterea unei mașini polifazate, factor de putere redus, pornirea cu ajutorul unei conexiuni auxiliare externe, ș.a.m.d. se dorește alimentarea monofazată a unei mașini de inducție trifazate. Cum există numeroase aplicații în care rețeaua de alimentare este monofazată, cu o singură fază alimentată, motorul nu are cuplu de pornire, prin urmare se plasează o fază auxiliară pe stator, sau dacă motorul este trifazat, a treia fază poate servi ca fază auxiliară.

3.6.1 NOȚIUNI TEORETICE

Pentru pornirea mașinii de inducție, se alimentează două dintre fazele mașinii direct la rețeaua trifazată, iar cea de-a treia se conectează prin intermediul unui condensator împreună cu una dintre celelalte două faze legate

direct la rețea. Condensatorul poate fi scos din circuit, după pornirea mașinii de inducție (Fig. 3.24).

Capacitatea condensatorului se alege convenabil, în funcție de valoarea puterii, a tensiunii și a curentului prin mașina de inducție, și are rolul de a crea un defazaj între fluxurile produse de cele două faze legate împreună și faza a treia, luând naștere astfel un câmp învârtitor eliptic (care poate fi considerat circular dacă se neglijează armonicile).

Mașina bifazată cu condensator, realizată în numeroase variante constructive în stator (cu fazele la 90° , 110° , cu turație reversibilă, cu 2 (3) turații), reprezintă un segment apreciabil din producția mondială de mașini de inducție și ocupă un loc important în aplicațiile de putere mică: compresoare pentru refrigeratoare, pompe pentru centralele termice casnice.

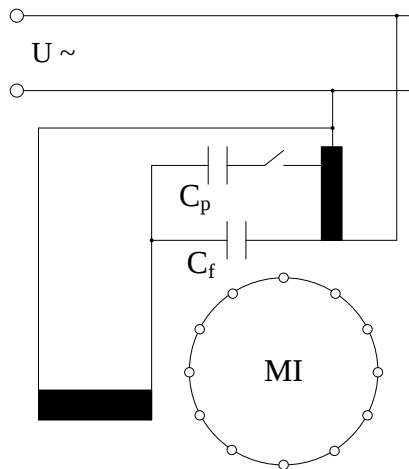


Fig. 3.24 Alimentarea monofazată cu condensator, a mașinii de inducție

Capacitatea condensatorului se alege astfel încât puterea aparentă a condensatorului să rezulte:

$$S_C = \frac{S}{2 \cdot \sin \varphi}, \quad (3.37)$$

unde $S = 3 \cdot U_1 \cdot I_1$ – puterea aparentă a motorului.

$$U_C = - \frac{j I_T}{\omega \cdot C} \quad (3.38)$$

U_C – căderea de tensiune pe condensatorul de capacitate C .

La funcționarea în gol, curentul de fază este defazat cu $\pi/2$ înaintea tensiunii pe fază, iar capacitatea condensatorului va fi:

$$Z = \frac{U}{I} \Rightarrow \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{U}{I} \Rightarrow C = \frac{I}{\omega \cdot U}, \quad \omega = 2\pi f \quad (3.39)$$

2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															

Se ridică apoi următoarele caracteristici:

1. $n = f(M)$ – turația în funcție de cuplu
2. $M = f(s)$ – cuplul în funcție de alunecare
3. $I_1 = f(s)$ – curentul în funcție de alunecare; la tensiune și frecvență constante.
4. $\cos\varphi = f(P_2)$
5. $s = f(P_2)$
6. $I_1 = f(P_2)$
7. $P_1 = f(P_2)$
8. $\eta = f(P_2)$

unde, I_1 – curentul statoric prin fazele mașinii;

P_1 – puterea activă absorbită;

$\cos\varphi$ – factorul de putere;

s – alunecarea;

η – randamentul mașinii;

P_2 – puterea utilă (la arbore).

Referințe bibliografice:

- [3.1]. Mașini și acționări electrice (Partea I), I. Novac, Institutul Politehnic "Traian Vuia", Timișoara, 1978.
- [3.2]. Boldea I., „Transformatoare și mașini electrice“, Editura Politehnica, Timișoara, 2009.
- [3.3]. S. Deaconu, „Mașini electrice–Lucrări de laborator“, Universitatea „Politehnica” Timișoara, Facultatea de inginerie Hunedoara, 1996.
- [3.4]. Gh. Atanasiu, M. Babescu, Gh. Bogoevici, I. Boldea, D. Irhașiu, M. Tănase, „Încercările mașinilor electrice –manual de laborator–“, Timișoara, 1979.
- [3.5]. S. Deaconu, A. Iagăr, L. Tutelea, „Mașini electrice–Aplicații“, Editura Destin, Deva, 2000.

4. MAȘINA SINCRONĂ

4.1 NOȚIUNI INTRODUCTIVE, PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE ȘI CONSTRUCȚIA MS

Prin intermediul acestei secțiuni se urmărește înțelegerea principiului de funcționare al mașinii sincrone (MS), însușirea principalelor caracteristici ale acestui tip de mașină, studiul tipurilor sale constructive, abilitatea de a recunoaște și a identifica elementele sale componente, precum și domeniile de putere, turații și aplicațiile pentru care se utilizează.

4.1.1 NOȚIUNI TEORETICE

Mașina sincronă este prevăzută

- în *stator* cu un miez magnetic cilindric din tole cu creștături în care se plasează o înfășurare polifazăată (de c.a.), iar
 - în *rotor* cu poli proeminenți sau plini și un bobinaj concentrat de excitație în curent continuu sau magneti permanenți,
- ambele componente cu același număr de poli $2p_1$.

Rotorul este inductor – produce câmpul magnetic de excitație – iar statorul este indusul.

Excitația sau magnetii permanenți produc un câmp magnetic fix față de rotor cu $2p_1$ poli (semiperioade spațiale), care devine învârtitor datorită rotației rotorului.

Principiul de funcționare al mașinii sincrone este explicat în detaliu în Fig. 4.1.

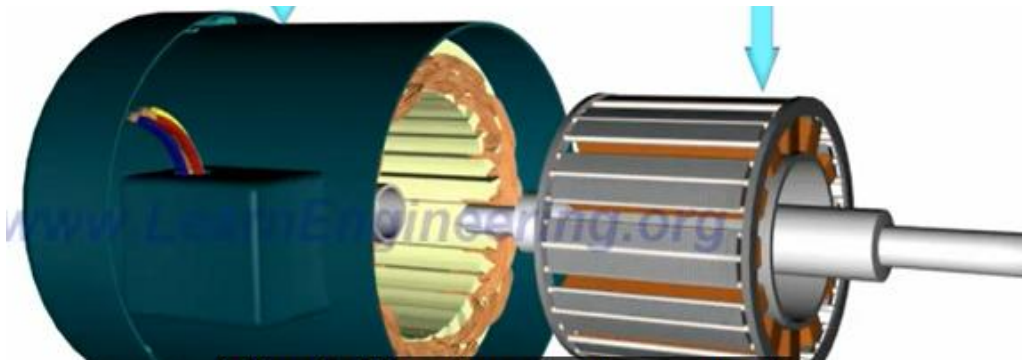


Fig. 4.1 Principiul de funcționare al mașinii sincrone cu magneti permanenți
(<https://www.youtube.com/watch?v=Vk2jDXxZlIhs>)

Turația este $n = f_1/p_1$ la mașina sincronă, și anume, la frecvență dată, turația e dată și nu se modifică odată cu sarcina.

Mașina sincronă (M.S.) pornește ca motor sincron doar dacă frecvența crește odată cu turația, de la zero. Din această particularitate decurg și aplicațiile mașinii sincrone.

Mașina sincronă se construiește la puteri de la fracțiuni de watt (în configurații speciale) până la 1500 MW pe unitate, astfel se construiesc hidrocentrale cu acumulate și pompaj în care se produce energie electrică la orele de vârf cu mașina electrică în regim de generator și se acumulează o energie prin pompaj la orele de consum redus, cu mașina electrică în regim de motor. Turbina – pompă, impune schimbarea sensului de rotație la trecerea de la un regim la altul, astfel că s-au realizat mașini la puteri de până la 400 MVA.

Pentru regimul de motor de putere s-au construit mașini sincrone până la 50 MW la turație fixă și variabilă.

Pentru puteri mici, îndeosebi kW, la turație variabilă cu alimentare prin convertoare statice de putere, se construiesc servomotoare cu rotorul cu magneți permanenți cu care s-au atins accelerații în gol de peste 20 000 rad/s² și raport maxim de turație de peste 1 : 10 000.

Pentru tracțiunea navală s-au propus și realizat motoare sincrone de putere mare (1MW la 230 rot/min) cu magneți permanenți din SmCo₅, alimentate prin convertoare statice.

Pentru turații mari, s-au realizat mașini sincrone cu magneți permanenți la turații de până la 250 000 rpm și respectiv 500 000 rpm cu aplicații în aviație.

Micromotorul sincron de puteri foarte mici alimentat la frecvență riguros controlată, este utilizat preponderent la echipamentele mobile precum calculatoare, audio, video, ceasuri.

Părțile de bază ale mașinii sincrone sunt: *statorul*, *rotorul*, *carcasa* și *sistemul de excitație* (Fig. 4.2).

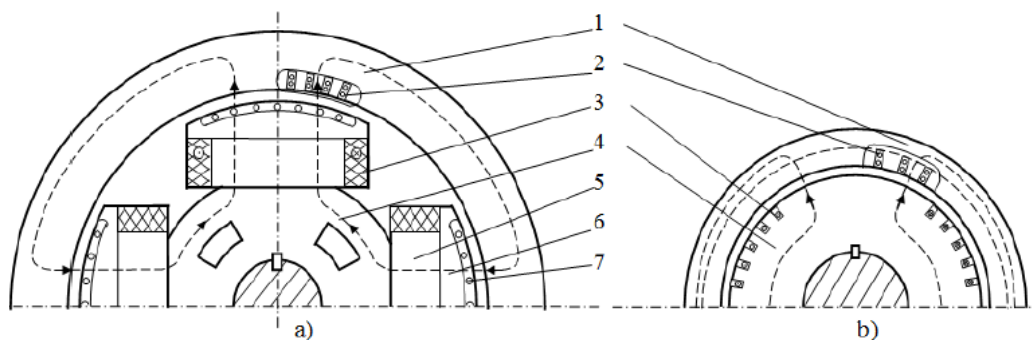


Fig. 4.2 Elemente constructive de bază ale mașinilor sincrone: a) cu poli aparenti, b) cu poli înecați, în rotor; 1. Jug statoric; 2. Înfășurare indusă (statorică); 3. Înfășurare inductoare (rotorică); 4. Jug rotoric; 5. Pol rotoric; 6. Piesă polară; 7. Înfășurare de amortizare (<http://www.eth.ieceia.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2017/02/Laboratorul-numarul-9-Masina-de-sincrona-Consideratii-Generale.pdf>)

Statorul are un miez magnetic din tole silicioase cu cristale neorientate, cu grosime de 0.5 mm (pentru frecvențe până la 300 Hz) prevăzut pe întreaga periferie cu creștături în care se află plasată o înfășurare trifazată întreagă la puteri mici și fracționară (în general) la puteri mari. Prin urmare, statorul este asemănător celui de la mașina de inducție.

Rotorul se găsește în două variante constructive de bază: cu excitație electromagnetică și cu magneți permanenți. În ambele cazuri, rotorul se realizează cu poli aparenti și, respectiv, poli plini.

Miezul cu poli aparenti (Fig. 4.3) este format dintr-o serie de poli (piese polare) fixați la periferia unei roți polare solidare cu arborele mașinii.

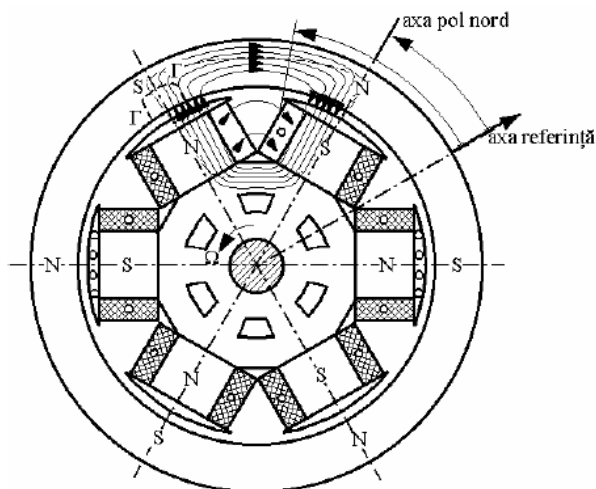


Fig. 4.3 Miezul cu poli aparenti [4.1]

Polii posedă înfășurări de excitație în curent continuu. Bobinele de excitație ale polilor se leagă în serie sau paralel, în așa fel încât polaritatea polilor să alterneze la periferia rotorului. Alimentarea bobinelor se face prin intermediul inelelor de contact solidare cu arborele și a două perii fixe care freacă pe inelele de contact.

La periferia interioară a statorului, în această variantă, întrefierul este neuniform, de grosime relativ mică sub piesele polare și foarte mare în zonele dintre poli.

Miezul cu poli înecați (Fig. 4.4) este un cilindru masiv din oțel de mare rezistență.

La periferia rotorului sunt prevăzute o serie de creștături în care se plasează spirele bobinelor de excitație în c.c. a polilor. Înfășurarea unui pol acoperă, de obicei, două treimi din deschiderea unui pol, în mijlocul polului rămânând o zonă de aproximativ o treime din deschiderea polului în care nu sunt practicate creștături.

Această zonă se mai numește *dinte mare*, spre deosebire de ceilalți dinti cu deschidere mult mai mică care separă creștăturile.

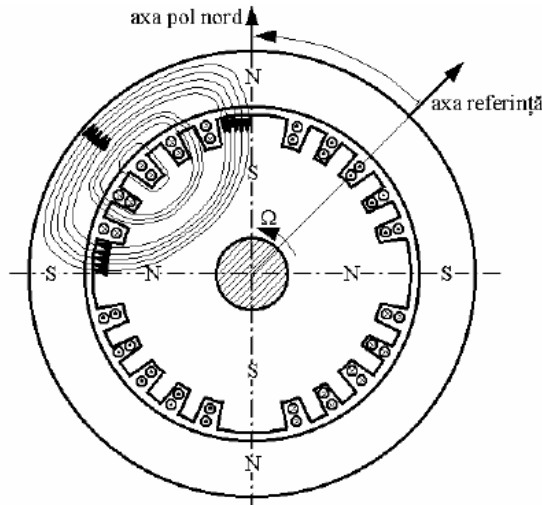


Fig. 4.4 Miezul cu poli înecați [4.1]

Capetele frontale ale bobinelor sunt puternic strânse prin bandaje masive pentru a face față solicitărilor centrifuge. Această variantă constructivă conduce la un întrefier constant la periferia interioară a statorului.

Având în vedere faptul că putem împărți tipurile de mașini electrice în două mari categorii: asincrone și sincrone, poate fi urmărit videoclipul următor (Fig. 4.5) în special pentru a puncta diferențele majore ce le deosebesc.

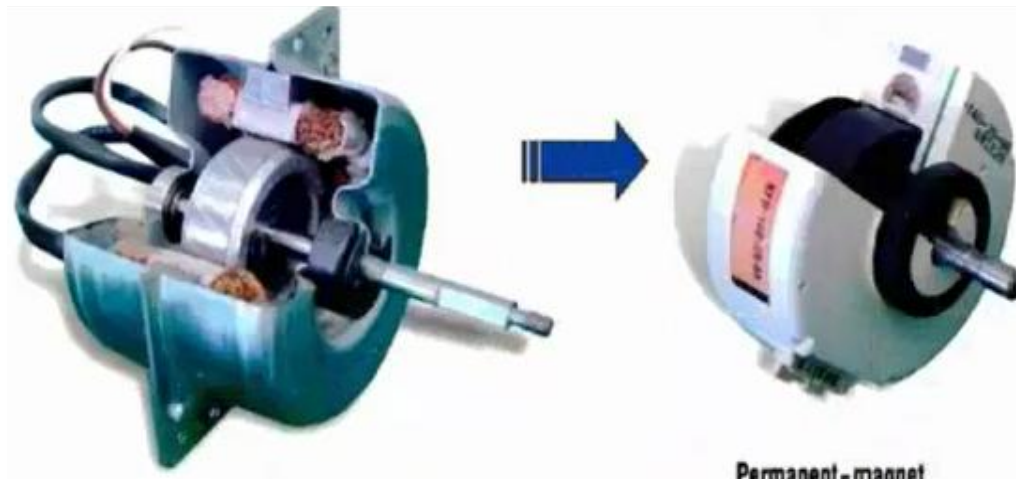


Fig. 4.5 Diferențele dintre mașina asincronă și mașina sincronă
(https://www.youtube.com/watch?v=QctagHJ8-_w)

4.2 CARACTERISTICILE DE GOL ȘI SCURTCIRCUIT LA GENERATORUL SINCRON AUTONOM

În lucrarea de față se va studia funcționarea (comportarea) generatorului sincron la gol și scurtcircuit, iar apoi, în urma probelor efectuate, se vor ridica curbele caracteristice pentru fiecare regim în parte.

4.2.1 NOȚIUNI TEORETICE

Mașina sincronă are domeniul cel mai larg de aplicație în regim de generator sincron trifazat, fiind mașină energetică de bază în centrale electrice. Această mașină funcționează în regim de generator autonom când este singura mașină generatoare de putere, ce alimentează consumatorii conectați la rețea [4.2].

Curbele caracteristice reprezintă grafic relațiile dintre mărimile ce descriu funcționarea mașinii în regim de generator, astfel, se ridică și se studiază următoarele caracteristici [4.2]:

- a) *Caracteristica de mers în gol reprezintă variația tensiunii electromotoare induse, în funcție de curentul de excitație, la frecvență constantă și curent de sarcină nul: $U_{eE}=f(I_{ex})$, $U_0=U_{eE}$, $f=const.$, $I_1=0$ și este un caz particular de funcționare în sarcină [4.2].*

U_0 - tensiunea la bornele generatorului

U_{eE} - tensiunea indusă a câmpului inductor

I_1 - curentul de sarcină

- b) *Caracteristica funcționării în scurtcircuit reprezintă curentul de fază a generatorului sincron în funcție de curentul de excitație, la frecvență constantă: $I_{sc}=f(I_{ex})$, $U=0$, $f=const.$*

I_{sc} - curentul de scurtcircuit

I_{ex} - curentul de excitație

Astfel, *caracteristica de mers în gol (caracteristica de magnetizare)* reprezintă tensiunea la borne la mersul în gol (egală în acest caz cu tensiunea electromotoare) în funcție de curentul de excitație, la curent de sarcină nul.

Proba experimentală se realizează în laborator, pentru un generator sincron cuplat cu un motor de curent continuu. Se pune în funcțiune montajul (Fig. 4.6) având grijă ca prima dată să fie alimentate bornele excitației Mcc, astfel încât valorile curentului și tensiunii de excitație să fie egale cu valorile nominale corespunzătoare; se alimentează apoi indusul Mcc, antrenând astfel, generatorul la turație nominală, respectiv la frecvența de 50 Hz.

După pornire, se are în vedere scoaterea din circuit a rezistenței pe care debitează indusul Mcc, dacă este cazul.

În continuare, se crește valoarea curentului de excitație pentru generatorul sincron de la 0 la valoarea nominală și invers (de la valoarea maximă la 0), măsurând de fiecare dată tensiunea la borne. Valorile citite se trec în tabelul 4.1 și se ridică caracteristica $U_E = f(I_{EX})$ (Fig. 4.7).

Se consideră curentul nominal de excitație ca fiind acel curent care la mersul în gol determină apariția la borne a tensiunii nominale.

Din cauza fenomenului de histereză, curba prezintă două ramuri, o ramură urcătoare și una coborâtore, caracteristica de mers în gol fiind definită ca media celor două ramuri, iar punctul nominal de funcționare se găsește în cotul caracteristicii.

Cuplul corespunzător acestui regim de funcționare nu este nul, el este dat de puterea necesară pentru acoperirea pierderilor în fierul indusului.

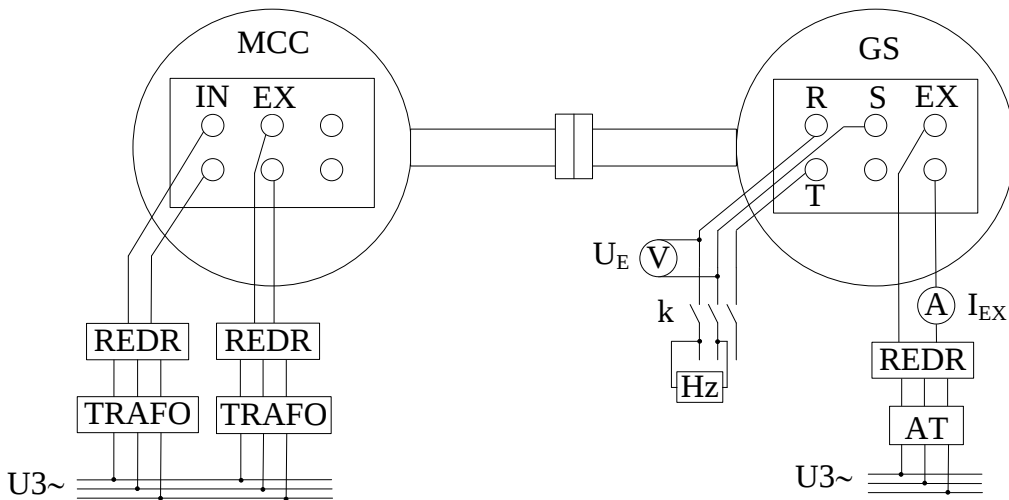


Fig. 4.6 Schema de montaj la funcționarea în gol

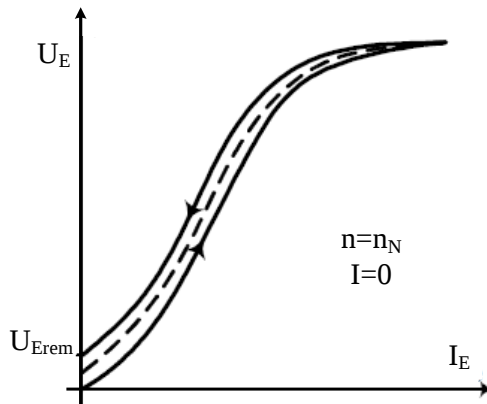


Fig. 4.7 Curba caracteristică la funcționarea în gol

Tabelul 4.1. Rezultate experimentale la funcționarea în gol

I_E [A]	0									
U_E [V]	U_{rem}									Curba ascendentă
U_E [V]										Curba descendentă

Dependența curentului statoric de cel de excitație poate fi urmărită realizând *caracteristica de scurtcircuit* trifazat a înfășurării statorice. Scurtcircuitul este acel regim în care, la bornele generatorului impedanța este nulă. Dacă scurtcircuitul apare la tensiune diferită de zero, se numește scurtcircuit brusc. În cadrul laboratorului vom analiza regimul de scurtcircuit simetric, permanent, pentru care, fenomenele sunt identice pe toate fazele generatorului sincron.

În vederea realizării experimentelor, se pune în funcțiune ansamblul Mcc-GS, asigurând funcționarea acestuia la frecvență constantă ($f=50$ Hz), după care, la curent de excitație zero se cuplează întrerupătorul „k” la care sunt legate cele trei faze ale generatorului sincron (Fig. 4.8).

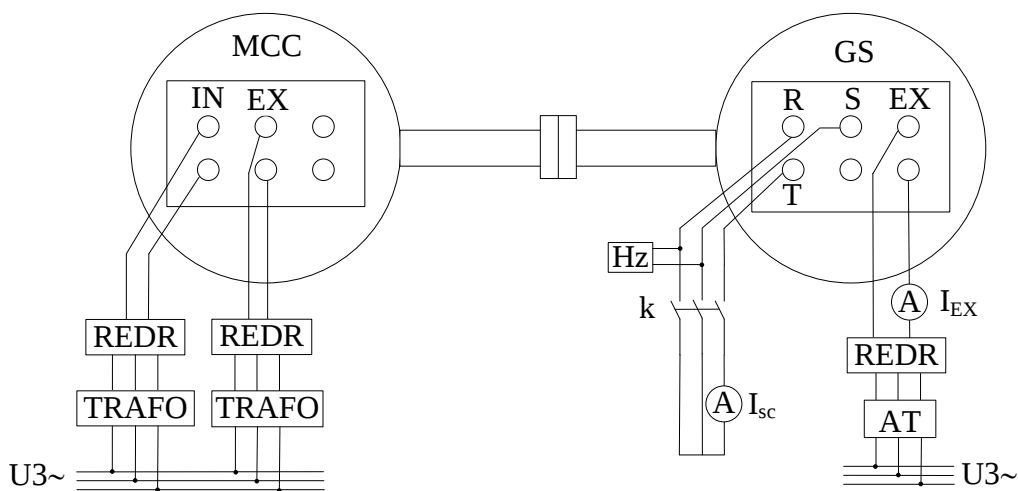


Fig. 4.8 Schema de montaj la funcționarea în scurtcircuit

Cu ajutorul autotransformatorului (AT) creștem treptat curentul de excitație, citind de fiecare dată valoarea acestuia, precum și valoarea curentului de scurtcircuit, care nu trebuie să depășească valoarea $1.25 \cdot I_N$ ($I_{sc} \leq 1.25 \cdot I_N$). Se trec datele citite în tabelul 4.2 și se ridică caracteristica de scurtcircuit: $I_{sc}=f(I_{ex})$ (Fig. 4.9).

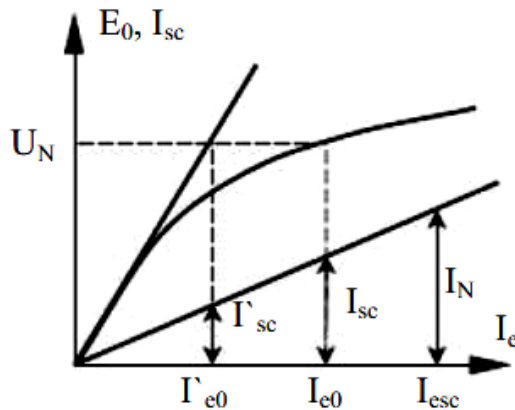


Fig. 4.9 Curba caracteristică la funcționarea în scurtcircuit

Tabelul 4.2 Rezultate experimentale la funcționarea în scurtcircuit

I_E [A]										
I_{sc} [A]										

Ca urmare a experimentelor efectuate, se observă faptul că funcționarea generatorului de curent continuu cu excitație separată este influențată de caracteristicile de material ale circuitului magnetic (ciclul de histerezis).

4.2.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE

Problema 4.1. O mașină sincronă trifazată cu poli plini are următoarele date: $U_{1N}=6000$ V, $f_1=50$ Hz, $p=2$, $I_{1Nf}=1000$ A, conexiunea stea. Mașina funcționează ca generator la curentul nominal și debitează în rețea o putere activă $P_N = 10$ MW.

Să se calculeze:

- cuplul cu care generatorul este antrenat la arbore;
- reactanța sincronă a generatorului dacă la funcționarea în gol, în regim autonom, tensiunea indusă este $U_{e01} = 7200$ V = ct.;
- unghiul de sarcină al mașinii [4.4].

Soluție:

- Neglijând pierderile se poate scrie:

$$P_N = M_{aN} \cdot \Omega_1, \quad \Omega_1 = 2\pi n_1, \quad \text{unde } n_1 = \frac{f_1}{p_1}$$

$$M_{aN} = \frac{P_N}{\Omega_1} = \frac{P_N}{\frac{2\pi f_1 \cdot 60}{60 \cdot p}} = \frac{P_N \cdot p}{2\pi f_1} = \frac{10 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 50} = 63661.97 \text{ Nm}$$

$$b) \quad U_{Nf} = \frac{U_{Nl}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464.1 \text{ V}$$

Din expresia puterii active: $P_N = m \cdot U_{Nf} \cdot I_{Nf} \cdot \cos \varphi_N$, rezultă factorul de putere $\cos \varphi$:

$$\cos \varphi_N = \frac{P_N}{\Omega_1} = \frac{P_N}{m \cdot U_{Nf} \cdot I_{Nf}} = \frac{10 \cdot 10^6}{3 \cdot 3464.1 \cdot 1000} = 0.962$$

$$\text{Putem calcula: } \sin \varphi_N = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_N} = \sqrt{1 - 0.962^2} = \sqrt{1 - 0.925} = \sqrt{0.0745} = 0.273$$

Analizând diagrama fazorială (Fig. 2.5) obținem:

$$\begin{aligned} U_{e0f}^2 &= (U_{Nf} \cdot \cos \varphi_N)^2 + (U_{Nf} \cdot \sin \varphi_N + X_s \cdot I_{Nf})^2 \\ \Rightarrow U_{Nf} \cdot \sin \varphi_N + X_s \cdot I_{Nf} &= \sqrt{U_{e0f}^2 - (U_{Nf} \cdot \cos \varphi_N)^2} \\ \Rightarrow X_s &= \frac{\sqrt{U_{e0f}^2 - (U_{Nf} \cdot \cos \varphi_N)^2} - U_{Nf} \cdot \sin \varphi_N}{I_{Nf}} \\ \Rightarrow X_s &= \frac{\sqrt{4156.9^2 - (3464.1 \cdot 0.962)^2} - 3464.1 \cdot 0.273}{1000} = 1.54 \Omega \end{aligned}$$

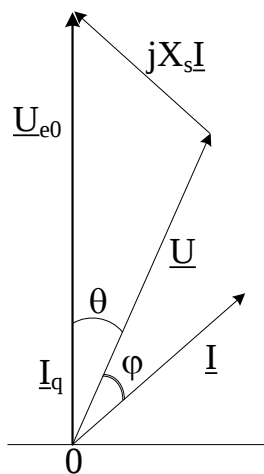


Fig. 4.10 Diagrama fazorială a mașinii sincrone

c) Conform diagramei fazoriale, putem scrie:

$$(X_s \cdot I)^2 = U_{e0f}^2 + U^2 - 2 \cdot U_{e0f} \cdot U \cdot \cos \theta$$

$$\text{Iar pentru regim nominal} \Rightarrow \cos\theta_N = \frac{U_{e0f}^2 + U_{Nf}^2 - (X_s \cdot I_{Nf})^2}{2 \cdot U_{e0f} \cdot U_{Nf}}$$

$$\cos\theta_N = \frac{4156.9^2 + 3464.1^2 - (1.54 \cdot 1000)^2}{2 \cdot 4156.9 \cdot 3464.1} = 0.93432 \Rightarrow \cos\theta_N = 0.93432$$

$$\Rightarrow \theta_N = \arccos(0.93432) = 20.88^\circ$$

$$\Rightarrow \theta_N = 20.88^\circ$$

Problema 4.2. Un generator sincron trifazat cu poli plini are următoarele date: $U_{1Nl} = 6000 \text{ V}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $p = 2$, $I_{1Nf} = 1200 \text{ A}$, conexiunea stea. Mașina funcționează la curentul nominal și debitează în rețea o putere activă $P_N = 12 \text{ MW}$.

Să se calculeze:

- cuplul cu care generatorul este antrenat la arbore;
- reactanța sincronă a generatorului dacă la funcționarea în gol, în regim autonom, tensiunea indusă este $U_{e01} = 6500 \text{ V} = \text{ct.}$;
- unghiul de sarcină al mașinii [4.4].

Întrebări:

- În ce situație mașina sincronă funcționează ca generator autonom?
- Ce înțelegeți prin regimul de scurtcircuit?
- Care sunt caracteristicile influențate de ciclul de histerezis?
- Explicați de ce nu este nul cuplul la funcționarea în gol a generatorului sincron.

4.3 CARACTERISTICILE GENERATORULUI SINCRON AUTONOM

În secțiunea de față vom analiza funcționarea (comportarea) generatorului sincron în sarcină, iar apoi se vor ridica curbele caracteristice: de sarcină, externă și a reglării.

4.3.1 NOȚIUNI TEORETICE

La turație și respectiv frecvență constantă, se vor studia următoarele caracteristici:

- c) ***Caracteristica funcționării în sarcină** se ridică la curent de sarcină $I_1 \neq 0$, reprezentând pe axe tensiunea la borne în funcție de curentul de excitație, la frecvență constantă: $U=f(I_{ex})$, $I_1 = \text{const.}$, $f = \text{const.}$*
- d) ***Caracteristica externă** reprezintă tensiunea la borne în funcție de curentul de sarcină pentru un curent de excitație constant, la frecvență constantă: $U=f(I_1)$, $I_{ex} = \text{const.}$, $f = \text{const.}$*
- e) ***Caracteristica reglării** reprezintă curentul de excitație în funcție de curentul de sarcină, pentru tensiune constantă la borne, la frecvență constantă: $I_E=f(I_1)$, $U = \text{const.}$, $f = \text{const.}$*

Dacă la cele trei faze (R, S, T) ale generatorului legăm prin intermediul întrerupătorului o sarcină inductivă trifazată (Fig. 4.11), putem studia *caracteristica de sarcină (inductivă, $R=0$, $I_1=I_d$)*. Se preferă încărcarea inductivă, cu o inductanță variabilă în limite largi pentru a evita încărcarea activă a mașinii.

Experimentele se încep după pregătirea montajului:

- se asigură funcționarea generatorului la frecvență constantă, inițial cu întrerupătorul deschis și curent de excitație zero ($I_{ex}=0$), după care,

- se conectează sarcina prin intermediul întrerupătorului „k” și creștem excitația, modificând inductanța bobinei, astfel încât să ajungem la valorile nominale ale curentului de excitație, de sarcină și la tensiunea nominală a generatorului.

Când toate cele trei mărimi (I_{ex} , I_1 , U) au valori egale cu cele nominale, pregătirea montajului a luat sfârșit, și putem să începem în continuare să modificăm inductanța (o scădem) astfel încât să putem scădea treptat curentul de excitație, dar totodată să păstrăm constantă valoarea curentului de sarcină $I_1 = \text{const.}$ Valorile pentru curentul de excitație și tensiune se trec în tabel, iar apoi se reprezintă grafic $U=f(I_{ex})$ (Fig. 4.12).

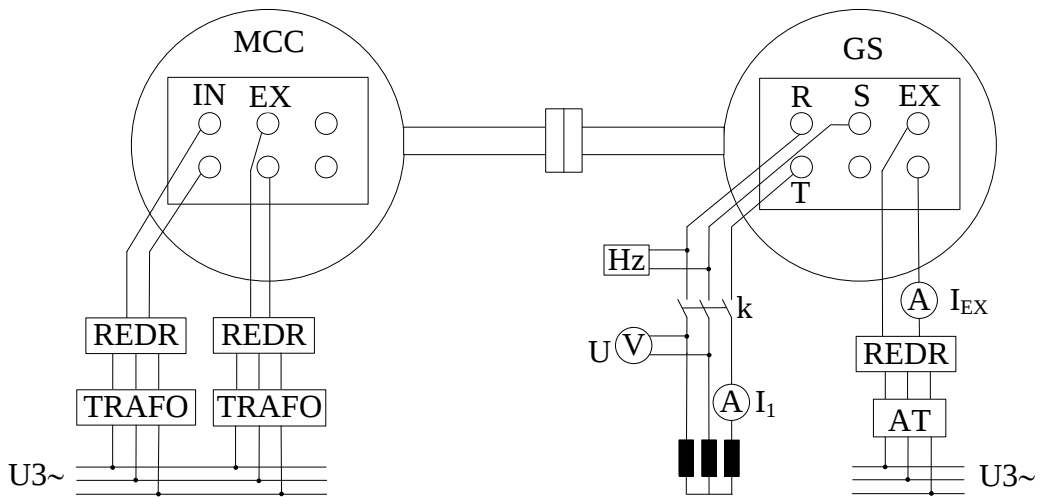


Fig.4.11 Schema de montaj la funcționarea în sarcină

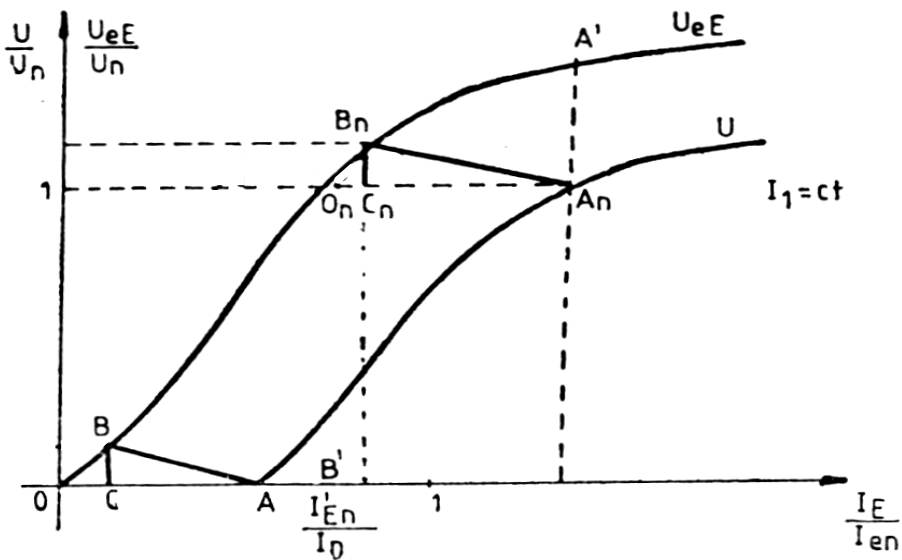


Fig. 4.12 Caracteristica la funcționarea în sarcină [4.3]

Tabelul 4.3 Rezultate experimentale la funcționarea în sarcină

I_E [A]	I_{EN}								
U [V]	$1.5 \cdot U_N$								

Ridicăm în continuare *caracteristica externă* folosind montajul de mai sus (Fig. 4.12), încărcând generatorul pe sarcina inductivă.

Pregătirea montajului este primul pas pe care îl realizăm:

- Se pune în funcționare ansamblul Mcc-GS la frecvența constantă de 50 Hz și $I_{ex}=0$;
- fără să conectăm sarcina creștem curentul de excitație până la valoarea la care tensiunea generatorului ajunge la valoarea nominală și reținem această valoare a curentului I_{ex} , după care, îl scădem din nou la zero și conectăm sarcina.
- Creștem puțin curentul I_{ex} , modificând alternativ și valoarea inductanței pe bobină verificând în același timp ca valoarea curentului de sarcină să nu depășească 1 A; când valoarea curentului de excitație a ajuns egală cu valoarea reținută anterior, iar curentul de sarcină a rămas mai mic decât 1 A, deschidem circuitul sarcinii de încărcare și modificăm valoarea curentului de excitație până când tensiunea ajunge din nou la valoarea nominală.
- Reținem această valoare a curentului I_{ex} și valoarea tensiunii nominale corespunzătoare, ca fiind prima măsurătoare, de la care pornim.

Conectând sarcina în circuit, începem măsurătorile la $I_{ex}=\text{const.}$ (egală cu valoarea reținută anterior). Scădem treptat valoarea pentru inductanța bobinei astfel încât să crească treptat curentul de sarcină, până la valoarea nominală a acestuia, având grijă să citim și tensiunea pentru fiecare modificare a curentului. Trecem în tabel valorile pentru tensiunea și curentul de sarcină și reprezentăm grafic $U=f(I_1)$ (Fig. 4.13a).

Tabelul 4.4. Rezultate experimentale - caracteristica externă.

I [A]										
U [V]										

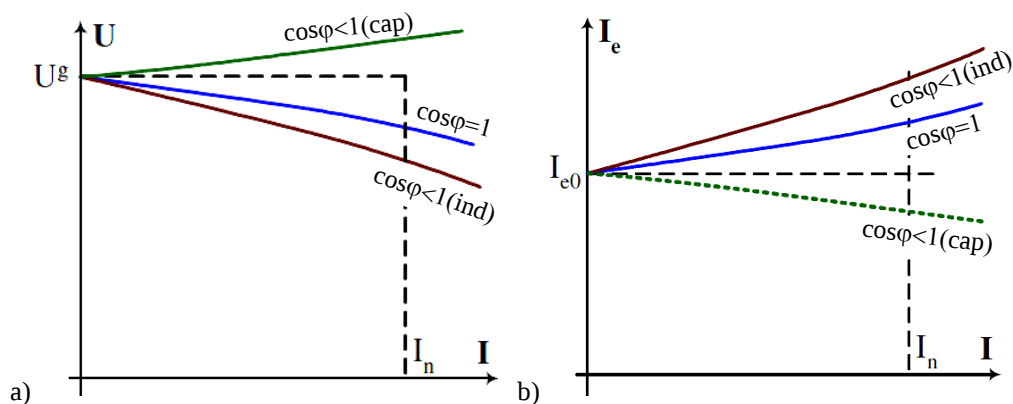


Fig. 4.13 Caracteristicile: a) externă și b) de reglaj ale generatorului sincron

(5) *Caracteristica de reglaj* ($I_E=f(I)$) (Fig. 4.13b) reprezintă curentul de excitație în funcție de curentul de sarcină pentru tensiune la borne și frecvență constante.

Realizarea practică a acestei curbe presupune creșterea curentului de excitație la creșterea curentului de sarcină, pentru tensiune la borne, frecvență și factor de putere, constante.

Tabelul 4.5. Rezultate experimentale - caracteristica reglării.

I_E [A]										
I [A]										

Ca urmare a experimentelor efectuate, se observă faptul că funcționarea generatorului de curent continuu cu excitație separată este influențată de caracteristicile de material ale circuitului magnetic (ciclul de histerezis).

Din caracteristica externă pot fi deduse performanțele pe care trebuie să le obțină sistemul de reglare al curentului de excitație astfel ca la funcționarea în sarcină nominală, tensiunea la borne să fie egală cu tensiunea nominală [4.5].

4.3.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE

Problema 4.3 Un generator sincron trifazat cu poli aparenti având următoarele date: $S_N = 150$ MVA, $U_{N1} = 35$ kV, $U_{e0} = 22$ kV, conexiunea stea, reactanța sincronă longitudinală $X_d = 5\Omega$, reactanța sincronă transversală $X_q = 3\Omega$, iar $R \approx 0$, funcționează în sarcină nominală cu un unghi de defazaj intern $\psi = 45^\circ$.

Să se calculeze:

- unghiul intern al mașinii;
- factorul de putere în cazul în care $\theta = 0$, la menținerea constantă a valorii curentului de excitație, respectiv a curentului de sarcină [4.4].

Soluție:

$$a) U_{Nf} = \frac{U_{N1}}{\sqrt{3}} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 20.2 \cdot 10^3 \text{ V} = 20.2 \text{ kV}$$

Din expresia puterii aparente nominale rezultă curentul nominal al

$$\text{generatorului: } I_{Nf} = \frac{S_N}{3 \cdot U_{Nf}} = \frac{150 \cdot 10^6}{3 \cdot 20.2 \cdot 10^3} = 2475.24 \text{ A}$$

Diagrama fazorială (Fig. 4.14) permite estimarea unghiului intern al generatorului:

$$\text{tg} \theta_N = \frac{X_q \cdot I_q}{U_{e0} - X_d \cdot I_d} = \frac{X_q \cdot I_{Nf} \cdot \cos \psi}{U_{e0} - X_d \cdot I_{Nf} \cdot \sin \psi}$$

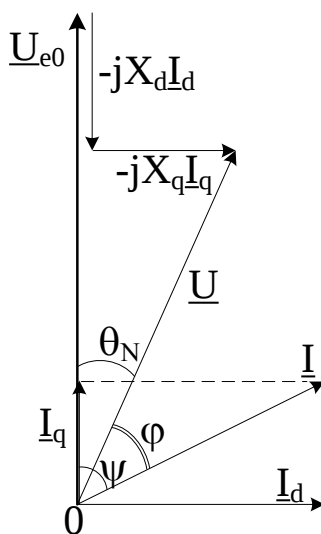


Fig. 4.14 Diagrama fazorială a generatorului

$$\Rightarrow \operatorname{tg} \theta_N = \frac{3 \cdot 2475.24 \cdot \cos 45^\circ}{22 \cdot 10^3 - 5 \cdot 2475.24 \cdot \sin 45^\circ} = \frac{5250.776}{22000 - 8750} = 0.396$$

$$\Rightarrow \theta_N = \arctg 0.396 = 21.6^\circ$$

- b) Dacă $\theta = 0$, $U_{e0} = \text{const}$, $I = \text{const.}$, avem un consumator trifazat simetric, pur inductiv.

Rezultă astfel, $X_q \cdot \cos \psi = 0$

$$\cos(\theta + \varphi) = 0 \Rightarrow \theta + \varphi = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \varphi = \frac{\pi}{2} \text{ și deci, } \cos \varphi = 0$$

Problema 4.4. Un generator sincron trifazat cu poli aparenti are datele: $U_{JN1} = 6$ kV, $I_{1Nf} = 350$ A, $p = 2$, $f_1 = 50$ Hz, conexiunea stea, $\cos \varphi_N = 0.809$ (capacitiv).

Să se calculeze:

- cuplul electromagnetic în regim nominal;
- reactanțele sincrone - longitudinală și transversală, cunoscând $U_{e01} = 4820$ V și unghiul de sarcină $\theta = 30^\circ$ [4.4].

Întrebări:

- Explicați influența caracterului consumatorului asupra caracteristicilor: de sarcină, exterioară și de reglare.

4.4 FUNCȚIONAREA GENERATORULUI SINCRON LA REȚEA ȘI „CURBELE ÎN V“

În general centralele electrice sunt echipate cu mai multe grupuri electrogene, atât pentru exploatarea economică a lor, cât și pentru a permite eventuala reparare a acestora, fără a scădea prea mult puterea centralei. Aceste grupuri trebuie să debiteze pe aceeași rețea, și deci, trebuie să fie cuplate și să funcționeze în paralel.

Se consideră puterea rețelei de alimentare mult mai mare decât cea a generatorului sincron care se conectează la rețea, astfel că amplitudinea și faza rețelei se consideră fixe. Conectarea la rețea trebuie să fie realizată fără șocuri de putere sau curent.

Se urmărește realizarea practică a condițiilor de cuplare la rețea a generatorului sincron, conectarea la rețea, precum și modificarea puterii în vederea ridicării „curbelor în V“.

4.4.1 NOȚIUNI TEORETICE

Pentru *cuplarea la rețea a generatorului sincron*, trebuiesc îndeplinite următoarele 4 condiții:

1. Tensiunea la bornele mașinii trebuie să fie egală cu tensiunea rețelei.
2. Frecvența la care funcționează mașina trebuie să fie egală cu frecvența rețelei.
3. Ordinea de succesiune a fazelor generatorului trebuie să fie identică cu cea a rețelei.
4. În momentul conectării generatorului, tensiunea la borne a generatorului trebuie să fie în fază cu tensiunea la borne a rețelei.

În cazul în care condițiile 1. și 4. nu sunt îndeplinite apar fenomene tranzitorii (apare scurtcircuitul brusc).

Dacă nu se respectă condiția 2. atunci, cuplarea mașinii la rețea atrage după sine regimul de bătaie, caracterizat de oscilații ale curentului. Dacă oscilațiile se amplifică este necesară deconectarea de la rețea, însă dacă oscilațiile se amortizează mașina va continua să funcționeze cu frecvența rețelei.

Nerespectarea condiției 3. duce la vibrații mari ale motorului (scurtcircuit) și mașina trebuie deconectată.

Stabilirea momentului în care sunt îndeplinite condițiile de punere în paralel a generatorului cu rețeaua se face cu ajutorul unui dispozitiv numit sincronoscop, cel mai ușor de utilizat fiind sincronoscopul cu becuri, pe care îl

vom utiliza în varianta de montaj la stingere. În acest caz, excitația generatorului este alimentată de la rețea, prin intermediul unui autotransformator, iar cele trei faze (R, S, T) sunt legate la sincronoscopul cu becuri, alimentat de la rețeaua trifazată. *Sincronoscopul* (Fig. 4.15) se realizează cu trei becuri, fiecare bec fiind legat între o fază a rețelei și o fază a generatorului sincron ce urmează a fi cuplat. Becurile legate între două faze trebuie să suporte dublul tensiunii dată de generator, respectiv rețea.

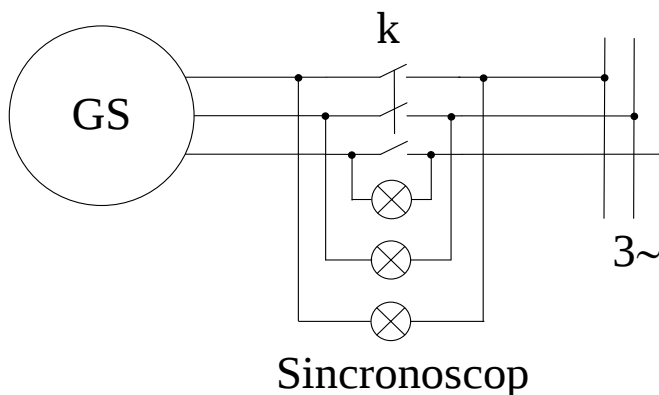


Fig. 4.15 Sincronoscop cu becuri

Succesiunea fazelor este corectă dacă becurile se aprind și se sting simultan și deci, condiția 3, este îndeplinită. Frecvența cu care se aprind și se sting becurile reprezintă diferența dintre frecvența rețelei și cea a mașinii. Când toate becurile rămân stinse înseamnă că frecvența rețelei este egală cu cea a generatorului și deci, condițiile 2 și 4 sunt îndeplinite, acesta fiind și motivul pentru care metoda se numește *montaj la stingere*. Dacă becurile se aprind și se sting alternativ, condiția nu este deocamdată îndeplinită și deci, trebuie reglată faza prin creșterea sau scăderea ușoară a turăției, urmărind ca aprinderea becurilor să se facă tot mai rar, până când nu se mai aprind deloc și rămân stinse.

Cu ajutorul a două voltmetre se verifică egalitatea dintre valoarea tensiunii pe fazele generatorului și cea a rețelei. În momentul în care toate cele patru condiții sunt verificate, se poate conecta în siguranță generatorul sincron la rețeaua trifazată.

Asupra fiecărui bec va fi aplicată o tensiune ΔU , de valoare egală cu diferența: $\Delta U = U - E$ (Fig. 4.16).

Considerăm inițial momentul în care tensiunile rețelei, respectiv tensiunile electromotoare (4.1) la bornele generatorului au expresiile următoare:

$$\begin{aligned}
 U_A &= \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \omega t & E_A &= \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin \omega_g t \\
 U_B &= \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & E_B &= \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin \left(\omega_g t - \frac{2\pi}{3} \right) \\
 U_C &= \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) & E_C &= \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin \left(\omega_g t + \frac{2\pi}{3} \right)
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

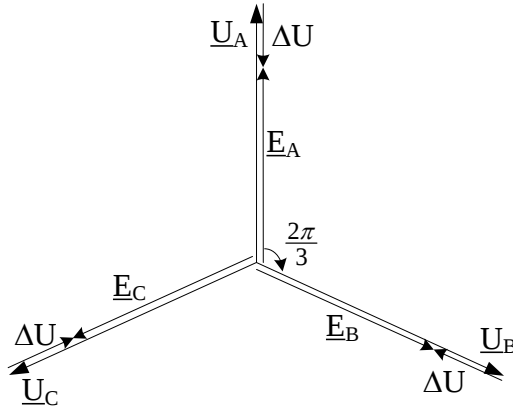


Fig. 4.16 Variația amplitudinii tensiunii rețelei trifazate față de amplitudinea tensiunii pe fazele generatorului sincron

Pentru ca diferența de mai sus, ΔU , să rămână nulă, egalitatea celor două tensiuni se realizează ușor, prin reglajul excitației generatorului și se controlează cu voltmetre.

În concluzie, când becurile sunt stinse și succesiunea fazelor este aceeași, se consideră cu aproximație că fazele celor trei tensiuni sunt aceleași și deci, nu vor apărea șocuri de curent după conectarea la rețea. În practică însă, rămâne un defazaj de câteva grade care conduce la apariția unei diferențe de tensiune ce produce șoc de curent în rețea. Dacă rețeaua nu este suficient de puternică, aceste șocuri de curent trebuie limitate.

După cuplarea la rețea generatorul debitează energie activă în rețea și absoarbe sau cedează energie reactivă rețelei, în funcție de valoarea curentului de excitație.

Curbele în V

Caracteristicile în V (Fig. 4.17) le obținem menținând puterea constantă și modificând valoarea curentului de excitație.

$$I_1 = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} = \sqrt{\left(\frac{U_{eE} - U_1 \cos \theta}{X_d} \right)^2 + \left(\frac{U_1 \sin \theta}{X_q} \right)^2} \tag{4.2}$$

Curbele în V, reprezintă dependența curentului statoric I_1 de curentul de excitație I_E la putere electromagnetică constantă. Acestea, evidențiază faptul că puterea activă se modifică pe la arbore, iar puterea reactivă prin excitație.

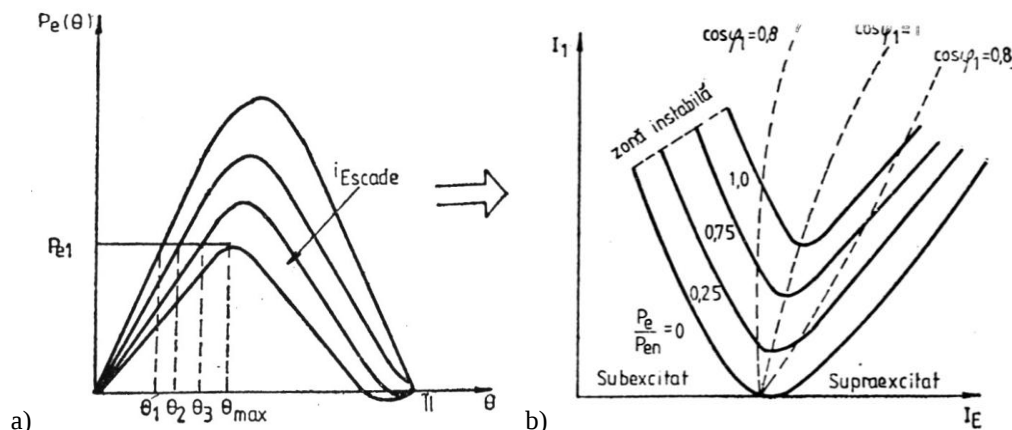


Fig. 4.17 Curbele în V (b) determinate pe baza caracteristicilor unghiulare (a)

4.4.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE

Problema 4.5. O mașină sincronă trifazată cu poli proeminenți are următoarele date: $S_N = 50$ MVA, $U_{NI} = 10$ kV, conexiune stea, reactanțele sincrone $X_d = 2.4 \Omega$, $X_q = 2 \Omega$. În regim de generator, la un unghi intern $\theta = 30^\circ$, puterea reactivă debitată de mașină este $Q = 0$.

Să se determine:

- curentul nominal;
- tensiunea electromotoare indusă U_{e0} ;
- puterea activă debitată de mașină, neglijând pierderile [4.4].

Soluție:

- Expresia puterii aparente nominale este:

$$S_N = m \cdot U_{Nf} \cdot I_{Nf}$$

$$\text{Tensiunea de fază fiind: } U_{Nf} = \frac{U_{NI}}{\sqrt{3}} = \frac{10000}{\sqrt{3}} = 5773.5 \text{ V}$$

$$\text{Rezultă curentul nominal de fază: } I_{Nf} = \frac{S_N}{3 \cdot U_{Nf}} = \frac{50 \cdot 10^6}{3 \cdot 5773.5} = 2886.75 \text{ A}$$

- Expresia puterii reactive este:

$$Q = m \cdot U_{Nf} \cdot I_{Nf} \cdot \sin \varphi = m \cdot U_{Nf} \cdot I_{Nf} \cdot \sin(\psi - \theta)$$

$$Q = m \cdot U_{Nf} \cdot I_{Nf} \cdot \sin \psi \cdot \cos \theta - m \cdot U_{Nf} \cdot I_{Nf} \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi$$

Această relație se poate scrie sub forma:

$$Q = m \cdot U_{Nf} \cdot I_d \cdot \cos \theta - m \cdot U_{Nf} \cdot I_q \cdot \sin \theta.$$

Conform enunțului, la $\theta = 30^\circ$, $Q = 0 \Rightarrow I_d \cdot \cos \theta = I_q \cdot \sin \theta$

$$\text{Știind că: } I_d = \frac{U_{e0} - U_{Nf} \cdot \cos \theta}{X_d}; \quad I_q = \frac{U_{Nf} \cdot \sin \theta}{X_q}$$

$$\text{se obține: } \frac{U_{e0} - U_{Nf} \cdot \cos \theta}{X_d} \cdot \cos \theta = \frac{U_{Nf} \cdot \sin \theta}{X_q} \cdot \sin \theta$$

$$\Rightarrow U_{e0} \cdot \cos \theta - U_{Nf} \cdot \cos^2 \theta = \frac{X_d}{X_q} \cdot U_{Nf} \cdot \sin^2 \theta$$

$$\Rightarrow U_{e0} = \frac{U_{Nf} \cdot \left(\cos^2 \theta + \frac{X_d}{X_q} \cdot \sin^2 \theta \right)}{\cos \theta} = \frac{5773.5}{\cos 30^\circ} \cdot \left(\cos^2 30^\circ + \frac{2.4}{2} \cdot \sin^2 30^\circ \right)$$

$$\Rightarrow U_{e0} \approx 7000 \text{ V}$$

c) Puterea activă debitată de mașină are următoarea expresie:

$$P \approx P_1 = m \cdot U_{Nf} \cdot I_f \cdot \cos \varphi$$

Deoarece $Q = 0$, rezultă $\varphi = 0^\circ$, deci, $\cos \varphi = 1$ și $\psi = \theta$

Curentul I_f este dat de relația: $I_f = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$

Pentru curenții I_d și I_q , se obțin valorile:

$$I_d = I_{Nf} \cdot \cos \psi = I_{Nf} \cdot \cos \theta = 2886.75 \cdot \cos 30^\circ = 2500 \text{ A}$$

$$I_q = \frac{U_{Nf} \cdot \sin \theta}{X_q} = \frac{5773.5 \cdot \sin 30^\circ}{2} = 1443.38 \text{ A}$$

$$\Rightarrow I_f = \sqrt{2500^2 + 1443.38^2} = 2886.75 \text{ A}$$

iar puterea activă debitată de mașină va fi:

$$P = 3 \cdot 5773.5 \cdot 2886.75 \cdot 1 = 50 \cdot 10^6 \text{ W}$$

Problema 4.6. Un generator sincron trifazat cu poli plini debitează putere în rețea la un curent $I = I_{Nf} = 1300 \text{ A}$. Cunoscând $U_{Nl} = 6000 \text{ V}$, conexiunea stea, $p = 3$, $\cos \varphi = 0.82$ și $X_s = 2 \Omega$, să se calculeze: a) unghiul de sarcină; b) cuplul electromagnetic; c) puterea activă debitată în rețea.

4.4.3 CURBELE ÎN V – LUCRARE PRACTICĂ

Se notează datele nominale ale generatorului sincron:

$S_n = \dots\dots$ kVA, $U_n = \dots\dots$ V, $I_n = \dots\dots$ A, $n_N = \dots\dots$ rpm, ținând seama de tipul de conexiune a fazelor („stea“ sau „triunghi“).

Experimental, cu R_p la valoarea maximă, se pornește motorul de curent continuu, având grijă ca după pornire să aducem la minim valoarea rezistenței și din trafa1 să creștem turația generatorului sincron la valoarea de sincronism. Cu excitația generatorului alimentată și k_2 conectat, cu ajutorul sincronoscopului cu becuri se verifică cele patru condiții de punere în paralel (detaliat anterior). În intervalul în care toate becurile sunt stinse se cuplează comutatorul k_3 și astfel se conectează mașina la rețea (Fig. 4.18).

După conectare, se modifică valoarea curentului de excitație, la diferite niveluri de putere ($P_1=0$, $P_2=1/3P_N$, $P_3=2/3P_N$), notând în tabelul 4.6, de fiecare dată, valorile curentului statoric și de excitație.

Mărimile citite se trec în tabel și pentru fiecare nivel de putere se efectuează calculele și se trasează graficul $I_1=f(I_E)$ (Fig. 4.17).

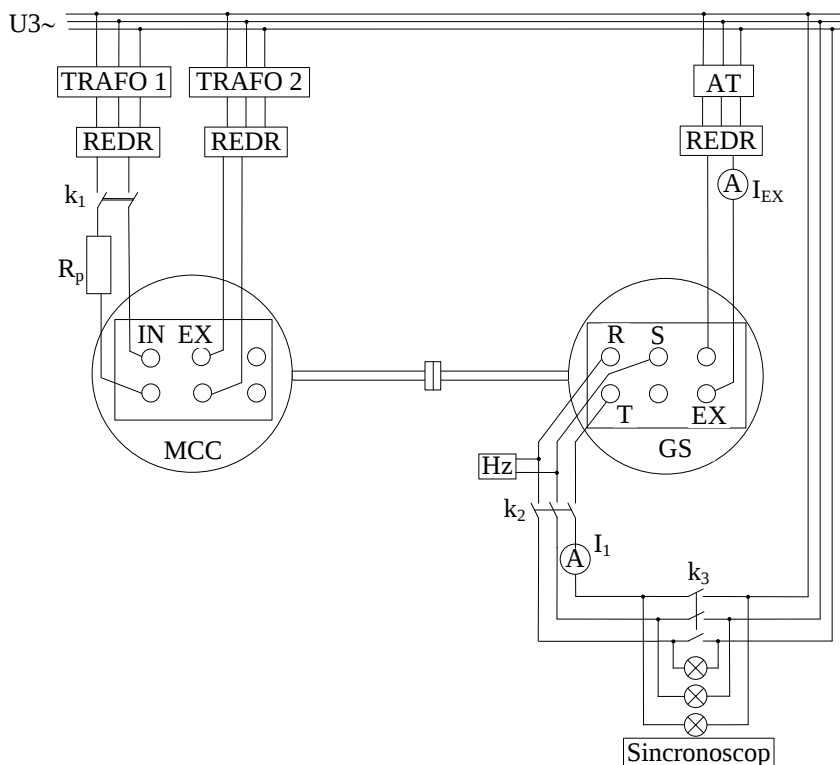


Fig. 4.18. Schema de legare a generatorului sincron în paralel cu rețeaua, cu ajutorul sincronoscopului cu becuri.

Tabel 4.6 Mărimi obținute în urma măsurătorilor.

Mărimi măsurate			Mărimi calculate	
U [V]	P [W]	I _E [A]	I ₁ [A]	cosφ
	P1			
	P2			
	P3			

Întrebări:

1. Care sunt condițiile obligatorii ce trebuie respectate la punerea în paralel cu rețeaua a generatorului sincron?
2. Cum se verifică dacă sunt îndeplinite condițiile de conectare în paralel?
3. Cum luminează becurile dacă succesiunea fazelor nu corespunde?

4.5 PORNIREA ÎN ASINCRON A MOTORULUI SINCRON

Secțiunea de față are ca scop studiul fenomenelor care au loc în cadrul procesului de pornire în asincron a motorului sincron.

4.5.1 NOȚIUNI TEORETICE

În vederea pornirii motoarelor sincrone se utilizează un motor auxiliar, sau, de cele mai multe ori, se pornesc în asincron cu excitația conectată la bornele unei rezistențe de aproximativ 10 ori mai mare decât cea a excitației, pentru a se reduce cuplul monoaxial (fig. 4.19).

Rotorul motorului sincron se conectează la rețea printr-un transformator, iar mașina funcționează precum una de inducție la o viteză mai mică decât cea sincronă. Când turația ajunge la o valoare egală cu 90-95% din turația de sincronism n_1 și deci alunecarea are o valoare de 2-5%, are loc deconectarea înfășurării de excitație de la rezistor și conectarea ei la sursa de c.c., urmată de autosincronizarea mașinii [4.1].

Pornirea în asincron se realizează după cum urmează:

- dacă înfășurarea de excitație este conectată la un rezistor sau
- dacă înfășurarea de excitație este scurtcircuitată.

În timpul funcționării ca motor de inducție, în mașina sincronă se dezvoltă un cuplu rezultat, obținut ca suma a două cupluri: *un cuplu determinat de câmpul magnetic învârtitor și curenții din barele coliviei de pornire* și *un al doilea cuplu (monoaxial) determinat de curentul alternativ din înfășurarea de excitație și curenții induși în înfășurările statorice* ca urmare a nesimetriei excitației.

În cazul în care valoarea rezistenței de excitație R_e (Fig. 4.20) nu este suficient de mare, ea determină un curent ridicat prin înfășurarea de excitație, care, se consideră scurtcircuitată (Fig. 4.19a). Prin urmare, turația mașinii se stabilește la o valoare egală cu jumătate din valoarea de sincronism și rezultă astfel o alunecare prea mare pentru ca sincronizarea motorului să aibă loc. Altfel, în Fig. 4.19b, când înfășurarea de excitație este conectată la R_p (Fig. 4.20) turația mașinii crește, făcând astfel posibilă sincronizarea motorului.

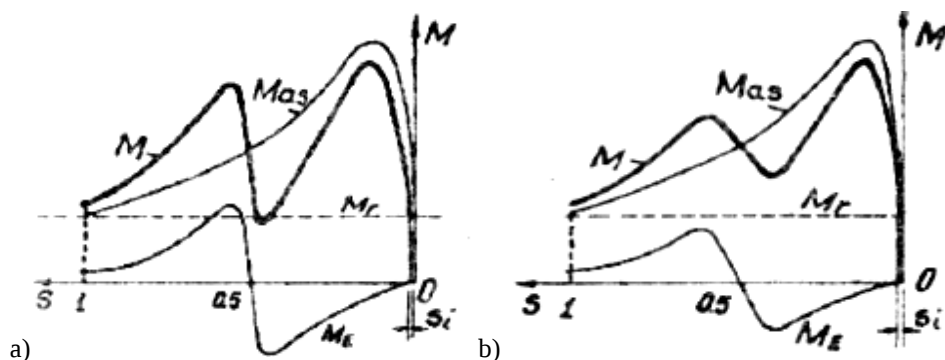


Fig. 4.19 Cuplul dezvoltat în motorul sincron în timpul perioadei de funcționare ca motor de inducție, cu înfășurarea de excitație : a) scurtcircuitată, b) conectată la rezistorul R_p [4.1]

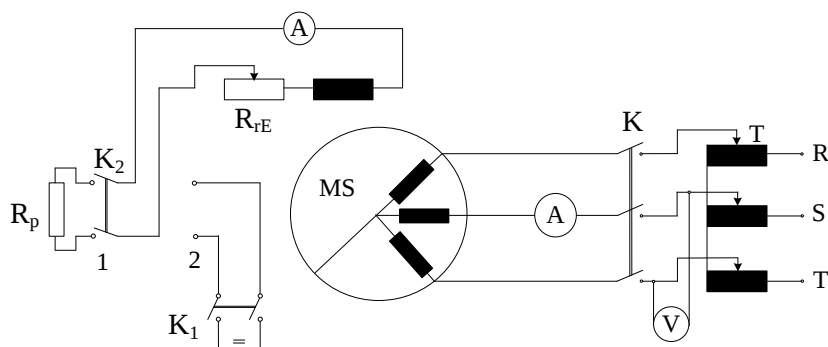


Fig. 4.20. Schema de montaj la pornirea în asincron și autosincronizarea MS [4.3]

4.5.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE

Problema 4.7. Un motor sincron de 10 MW, $U_n=6$ kV (conexiune stea), $p_1=2$, $f_1=50$ Hz funcționează la factor de putere unitar pentru toate valorile sarcinii până la cea nominală. Se cere dependența tensiunii induse de excitație de unghiul intern, dacă $x_d=1.4$ p.u. și $x_q=1.2$ p.u. [4.1].

Soluție:

Pe baza definiției reactanțelor în unități relative rezultă:

$$X_n = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_n} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3} \cdot \frac{P_n}{\eta_n \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}} = \frac{U_{1n}^2 \cdot \eta_n}{P_n} = \frac{6^2 \cdot 10^6 \cdot 0.96}{10 \cdot 10^6} = 3.456 \Omega$$

Prin urmare: $X_d = x_d \cdot X_n = 1.4 \cdot 3.456 = 4.8384 \Omega$ și $X_q = x_q \cdot X_n = 1.2 \cdot 3.456 = 4.1472 \Omega$

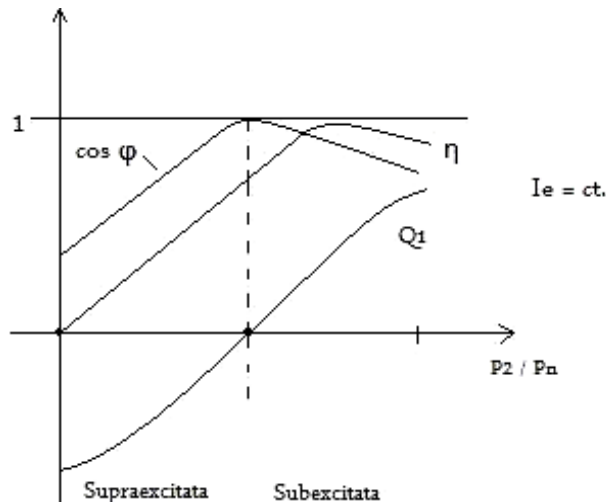


Fig. 4.21 Puterea reactivă Q_1 și factorul de putere și caracteristicile de funcționare la $I_E = \text{ct.}$ [4.1]

Puterea reactivă Q_1 se cere anulată pentru orice valoare a lui θ (de această dată se neglijează pierderile):

$$U_{eE_{\cos\theta_1=1}} = U \left[\frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} \cdot \frac{X_d}{X_q} + \cos \theta \right] = X_{me} \cdot I_E$$

$U_{eE}(\theta)$ se trasează prin câteva puncte:

$$(U_{eE})_{\theta=0} = U = \frac{6 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 3.468 \cdot 10^3 \text{ V}$$

$$(U_{eE})_{\theta=15^\circ} = 3.626 \cdot 10^3 \text{ V}$$

$$(U_{eE})_{\theta=30^\circ}=4.166 \cdot 10^3 \text{ V}$$

$$(U_{eE})_{\theta=45^\circ}=5.307 \cdot 10^3 \text{ V}$$

Trebuie observat că tensiunea indusă și deci și cea de excitație cresc moderat cu unghiul intern (încărcarea) motorului.

În plus, formula tensiunii induse evidențiază faptul că motorul cu poli aparenti ($X_q < X_d$) solicită o excitație mai puternică pentru a păstra factorul de putere constant (în cazul nostru, unitar).

Din motive tehnologice aproape toate motoarele sincrone mari cu excitație electromagnetică sunt prevăzute însă cu rotor cu poli aparenti.

Problema 4.8. Autosincronizarea din regim asincron. Un motor sincron de 22 kW cu $U_n=220$ V (conexiune stea), cu rotor cu poli plini, $p_1=1$, $f_1=60$ Hz, este conectat brusc pentru autosincronizare la $(\theta)_{t=0}$;

Tensiunea excitației $U_{Ee}=150$ V, $J=1.5 \text{ kgm}^2$, $K_a=12 \text{ Nm/rad/s}$, $X_s=2\Omega$.

Să se calculeze fenomenele tranzitorii mecanice la autosincronizare până la unghiul de regim permanent, θ_n , utilizând liniarizarea ecuațiilor la $\theta_0=0$.

4.5.3 PORNIREA ÎN ASINCRON–LUCRARE PRACTICĂ

Înfășurarea de excitație se conectează la bornele unui rezistor R_p și indusul la rețea prin intermediul unui transformator reglabil. Se modifică tensiunea de alimentare a indusului, crescând-o la tensiunea nominală a mașinii sincrone.

În apropierea turației de sincronism, înfășurarea de excitație se deconectează de la bornele rezistorului și se conectează la sursa de curent continuu, stabilindu-se curentul de excitație.

Scăderea bruscă a curentului din stator coincide cu intrarea în sincronism a motorului.

Se notează valorile în tabelul 4.7:

Tabel 4.7 Valorile curentilor înainte și după sincronism.

	n [rpm]	I [A]	I_E [A]
Înainte de sincronism			
După sincronism			

și se deconectează indusul de la rețea.

Observații:

După sincronizarea mașinii sincrone se poate micșora curentul de excitație până la valoarea 0. În continuare, se schimbă sensul lui I_E și se crește valoarea sa până când mașina iese din nou din sincronism.

Dacă în momentul ieșirii din sincronism a MS, se notează valoarea pentru tensiunea de la borne, pe fază, U și valoarea curentului din indus, I , se poate calcula reactanța sincronă transversală (4.3), x_q :

$$x_q = \frac{U}{I} \quad (4.3)$$

Determinarea celorlalți parametri ai motorului sincron se realizează pe parcursul subcapitolului 4.6.

Concluzii:

- Existența simultană a cuplului sincron și a unor cupluri asincrone determină un proces oscilator în care variază:

- alunecarea
- unghiul intern
- curentul statoric
- puterea absorbită.

Dacă acest proces tranzitoriu este amortizat, mașina intră în sincronism, însă dacă oscilațiile nu se amortizează, este necesar să o decuplăm de la rețea, pentru a evita distrugerea ei, după care, se reia procesul de aducere în sincronism.

- intrarea în sincronism se realizează ușor dacă alunecarea are o valoare cât mai mică, neapărat mai mică decât alunecarea critică la care motorul ajunge în sincronism.

- nu se recomandă pornirea mașinii sincrone în asincron cu înfășurarea de excitație deschisă, deoarece tensiunea care se induce este mare și pune în pericol izolația mașinii.

- una dintre cele mai bune condiții de intrare în sincronism se obține când cuplurile rezistent și dinamic au valori cât mai mici, astfel, se preferă ca procesul de pornire în asincron să fie realizat în regim de funcționare în gol al mașinii sincrone.

Întrebări:

1. Care sunt cuplurile care apar în mașină în timpul funcționării ca motor de inducție?
2. De ce trebuie conectată înfășurarea de excitație la un rezistor în timpul pornirii în asincron?
3. De ce se dorește ca pornirea în asincron a MS să aibă loc cu un cuplu rezistent cât se poate de mic?

4.6. DETERMINAREA PARAMETRILOR GENERATORULUI SINCRO

Scopul lucrării este de a determina reactanțele mașinii după axele x_d (longitudinală) și x_q (transversală), reactanțe care intervin în regimul staționar simetric al mașinii, dar și reactanța homopolară x_0 .

4.6.1 NOTIUNI TEORETICE

În regim staționar simetric, comportarea mașinii sincrone este determinată de reactanța sincronă longitudinală, de reactanța sincronă transversală, dar și de reactanța de dispersie ($x_{1\sigma}$). Acești parametri fac parte din parametrii fazei indusului (statorului), corespunzătoare situației în care axele fazei considerate corespund axelor d și q a rotorului.

Se utilizează caracteristicile de mers în gol și de sarcină inductivă (Fig. 4.22), neglijând pierderile în fier și cupru.

Presupunem că se cunoaște $BC = x_{1\sigma} \cdot I_n$, care reprezintă tensiunea electromotoare necesară pentru acoperirea căderii de tensiune pe reactanța de dispersie. Din caracteristica de gol avem curentul OB, care induce tensiunea BC. Punctul A, ce aparține caracteristicii de sarcină inductivă la $I = I_n$, reprezintă și punctul de funcționare în scurtcircuit la $I = I_n$, pentru care $U = 0$. Așadar, OA este curentul de excitație necesar pentru a asigura la scurtcircuit $I = I_n$, prin urmare, triunghiul ABC se numește triunghi de scurtcircuit al mașinii sincrone. Se duce în continuare o paralelă la AO la nivelul la care $U = U_n$, obținându-se astfel $A_n O_n$, și o paralelă $O_n B_n$ la OB, obținând astfel punctul B_n la intersecția cu caracteristica de gol. Prin urmare, putem scrie:

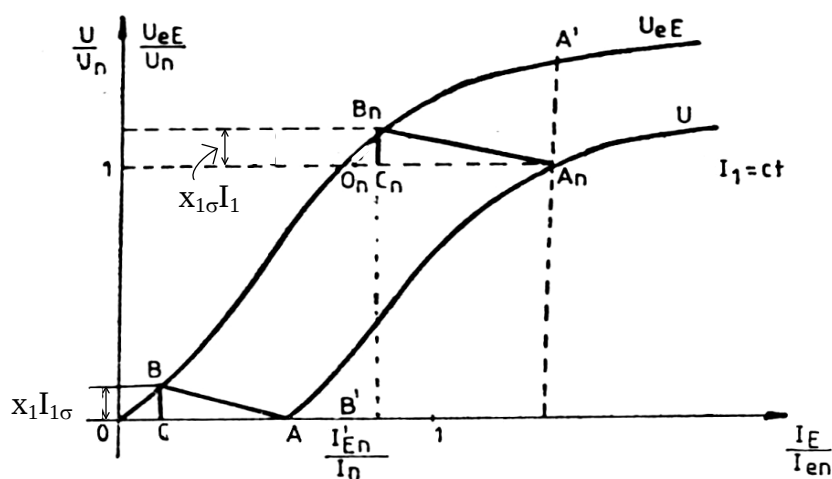


Fig. 4.22 Caracteristica pentru determinarea reactanțelor [4.1]

$$x_{1\sigma} \cdot I_1 = B_n C_n \Rightarrow x_{1\sigma} = \frac{B_n C_n}{I_1} \quad (4.4)$$

În continuare, din caracteristica de scurtcircuit simetric (Fig. 4.23) se obține:

$$x_d = \frac{U_e E}{I_{sc}} \quad (4.5)$$

Din (4.5) se poate observa că *reactanța longitudinală* se determină din raportul tensiunii la mersul în gol și curentul de scurtcircuit corespunzător aceluiași curent de excitație și scade odată cu curentul de scurtcircuit.

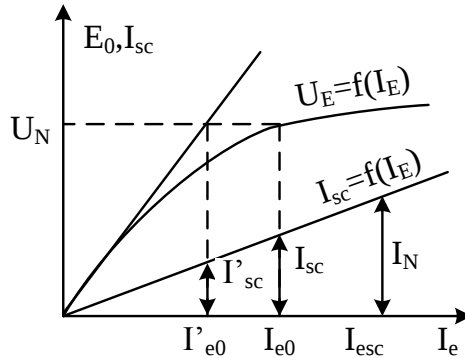


Fig. 4.23 Determinarea reactanței sincrone longitudinale

Pentru determinarea reactanței x_q se realizează montajul din Fig. 4.24, se pornește motorul sincron, iar după sincronizare se micșorează curentul de excitație până când devine nul, iar apoi se schimbă sensul curentului de excitație și se mărește treptat până la ieșirea din sincronism a mașinii, moment în care se măsoară tensiunea U și curentul I .

Se notează aceste valori ale tensiunii și curentului pentru ultimul punct de funcționare stabilă, cu care calculăm x_q : $x_q = \frac{U}{I}$ (4.6)

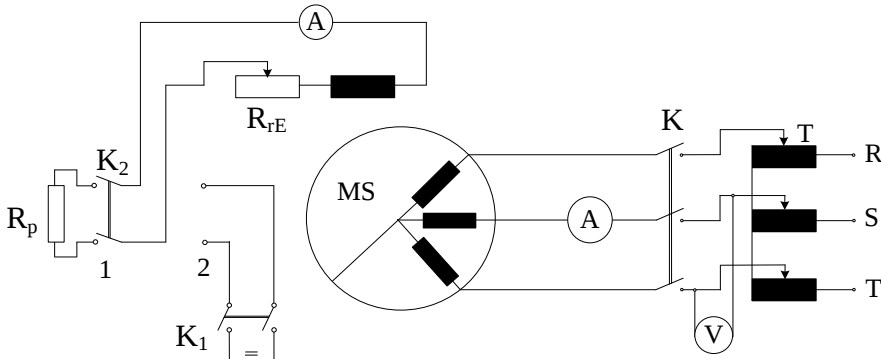


Fig. 4.24 Schema de montaj pentru determinarea reactanței sincrone longitudinale [4.2]

La sarcină dezechilibrată, curenții pe cele trei faze I_A , I_B și I_C sunt nesimetrice, dar sinusoidali în timp, la frecvență constantă ω_1 . Acești curenți se descompun în componente directe, inverse și homopolare. Componentele homopolare ale curenților produc în cele trei faze, decalate spațial cu 120° , un câmp magnetic principal fundamental nul și deci comportarea mașinii în acest caz este dată de o reactanță numită homopolară X_0 , în general chiar mai mică decât $X_{1\sigma}$, în funcție de tipul înfășurării: $X_d > X_q > X_2 > X_{1\sigma} \geq X_0$.

Măsurarea reactanței X_0 se poate realiza conectând cele trei faze statorice în serie și alimentându-le cu tensiune redusă de la un transformator, cu rotorul mașinii sincrone rotit la sincronism, cu excitația în gol (Fig. 4.25).

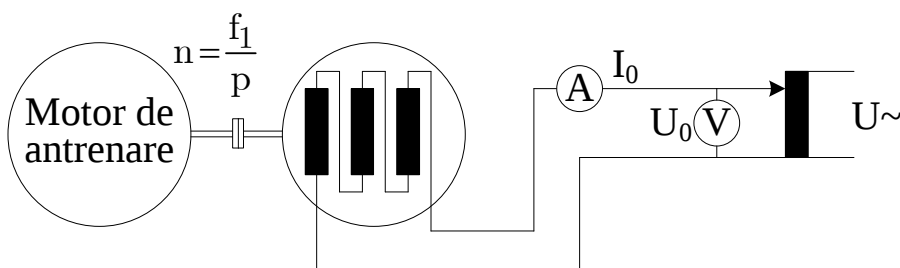


Fig. 4.25 Măsurarea reactanței homopolare X_0 [4.1]

Se măsoară curentul I_0 și tensiunea U_0 , iar în cazul în care nu se neglijează rezistențele, rezultă impedanța homopolară $\underline{Z}_0$:

$$Z_0 = \frac{U_0}{3 \cdot I_0} \quad (4.7)$$

Factorul trei se referă la conectarea în serie a celor trei faze.

Partea activă a impedanței $\underline{Z}_0$ este cu aproximație rezistența R_1 în c.a. a statorului, deoarece câmpul principal este nul (la fundamentală) și deci pierderile în fier sunt foarte mici.

$$R_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_0^2} \quad (4.8)$$

Știind Z_0 (4.7) și R_0 (4.8) putem calcula X_0 :

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad (4.9)$$

4.6.2 PROBLEME REZOLVATE ȘI PROBLEME PROPUSE

Problema 4.9 Un generator sincron are datele $S_n=50$ MVA, $U_n=15$ kV (conexiune stea), $p=2$, $x_d=1.2$ p.u. și $U_{eE}=12$ kV, $x_2=0.3$ p.u., $x_0=0.18$ p.u.. Se

cer valorile curenților de scurtcircuit trifazat (I_{sc3}), bifazat (I_{sc2}) și monofazat (I_{sc1}) [4.1].

Soluție:

Calculul curenților de scurtcircuit se face cu relațiile:

$$I_{sc3} = \frac{U_{eE}}{X_d}; \quad I_{sc2} = \frac{U_{eE} \cdot \sqrt{3}}{X_2 + X_d}; \quad I_{sc1} = \frac{3 \cdot U_{eE}}{X_0 + X_2 + X_d}$$

Trebuie mai întâi determinate reactanțele în Ω după definirea reactanței de bază:

$$\left. \begin{aligned} X_n &= \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} \\ I_n &= \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} \end{aligned} \right\} \Rightarrow X_n = \frac{U_n \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot S_n} = \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{15^2 \cdot 10^6}{50 \cdot 10^6} = 4.5 \Omega$$

Curentul nominal:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{50 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3} = 1924.5 \text{ A}$$

Prin urmare: $I_{sc3} \approx \frac{U_{eE}}{X_d \cdot X_n} = \frac{12 \cdot 10^3}{1.2 \cdot 4.5} = 2.22 \cdot 10^3 \text{ A}$

$$I_{sc2} \approx \frac{U_{eE} \cdot \sqrt{3}}{(x_d + x_2) \cdot X_n} = \frac{12 \cdot 10^3 \sqrt{3}}{(1.2 + 0.3) \cdot 4.5} = 3.079 \cdot 10^3 \text{ A}$$

$$I_{sc1} \approx \frac{3 \cdot U_{eE}}{(x_d + x_2 + x_0) \cdot X_n} = \frac{3 \cdot 12 \cdot 10^3}{(1.2 + 0.3 + 0.08) \cdot 4.5} = 5.063 \cdot 10^3 \text{ A}$$

Problema 4.10 Un generator sincron trifazat cu poli aparenti are datele: $U_{1N}=6$ kV, $I_{1N}=350$ A, $p=2$, $f_1=50$ Hz, conexiunea stea, $\cos \varphi_N=0.809$ (capacitiv). Să se calculeze:

- cuplul electromagnetic în regim nominal;
- reactanțele sincrone - longitudinală și transversală, cunoscând $U_{e01} = 4820$ V și unghiul de sarcină $\theta = 30^\circ$ [4.4].

Problema 4.11 Un generator sincron are datele $S_n=50$ MVA, $U_n=10$ kV (conexiune triunghi), $p=2$, $x_d=1.1$ p.u. și $U_{eE}=10$ kV, $x_2=0.17$ p.u., $x_0=0.15$ p.u.

Se cer valorile curenților de scurtcircuit trifazat (I_{sc3}), bifazat (I_{sc2}) și monofazat (I_{sc1}).

Problema 4.12 Un generator sincron trifazat cu poli aparenti are datele: $U_{1N}=3$ kV, $I_{1N}=100$ A, $p=2$, $f_1=50$ Hz, conexiunea stea, $\cos \varphi_N=0.8$ (inductiv). Să se calculeze:

- a) cuplul electromagnetic în regim nominal;
- b) reactanțele sincrone - longitudinală și transversală, cunoscând $U_{e01} = 6000$ V și unghiul de sarcină $\theta = 45^\circ$.

Întrebări:

Ce se întâmplă cu reactanța sincronă longitudinală la diferite valori ale curentului de excitație?

Referințe bibliografice:

- [4.1]. Voncilă I., Caluleanu D., Badea N., „Mașini electrice“, Editura Fundației Universitare, „Dunărea de Jos“, Galați, 2003.
- [4.2]. Atanasiu Gh., Babescu M., Bogoevici Gh., Boldea I., Irhașiu D., Tănase M., „Încercările mașinilor electrice – manual de laborator –“, Timișoara, 1979.
- [4.3]. Boldea I., „Transformatoare și mașini electrice“, Editura Politehnica, Timișoara, 2009.
- [4.4]. Deaconu S., Iagăr A., Tutelea L., „Mașini electrice – Aplicații“, Editura Destin, Deva, 2000.
- [4.5]. Deaconu S., „Mașini electrice - Lucrări de laborator“, Universitatea Politehnica Timișoara, Facultatea de inginerie Hunedoara.

CUPRINS

1. TRANSFORMATORUL ELECTRIC	5
1.1 Circuite magnetice	5
1.1.1 Noțiuni teoretice	5
1.1.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	8
1.2 Construcția transformatorului electric și noțiuni introductive	10
1.2.1 Noțiuni teoretice	10
1.2.2 Construcția transformatorului electric	13
1.2.3 Răcirea transformatoarelor	14
1.3 Funcționarea în gol a transformatorului electric	15
1.3.1 Noțiuni teoretice	15
1.3.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	17
1.3.3 Proba de gol – lucrare practică	19
1.4 Funcționarea în scurtcircuit a transformatorului electric	22
1.4.1 Noțiuni teoretice	22
1.4.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	24
1.4.3 Proba de scurtcircuit – lucrare practică	28
1.5 Funcționarea în sarcină a transformatorului electric	30
1.5.1 Noțiuni teoretice	30
1.5.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	32
1.5.3 Proba de scurtcircuit–lucrare practică	37
1.6 Transformatorul electric trifazat.	39
Scheme de conexiuni și grupe de conexiuni.	39
1.6.1 Noțiuni teoretice	39
1.6.2 Construcția schemei de conexiuni	42
1.6.3 Scheme de conexiuni–lucrare practică	45
2. MAȘINA DE CURENT CONTINUU	48
2.1 Mașina de curent continuu (MCC): generalități și construcție	48
2.1.1 Noțiuni teoretice	48
2.1.2 Exemple numerice pentru înfășurările MCC	53
2.2 Regimul de gol și de scurtcircuit	57
la generatorul de curent continuu cu excitație separată	57
2.2.1 Noțiuni teoretice	57
2.2.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	59
2.2.3 Proba de gol și scurtcircuit la GCC – lucrare practică	60
2.3 Regimul de sarcină la GCC cu excitație separată	64
2.3.1 Noțiuni teoretice	64
2.3.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	66

2.3.3 Caracteristicile generatorului de curent continuu cu excitație separată – lucrare practică	68
2.4. Caracteristicile motorului de curent continuu cu excitație serie	69
2.4.1 Noțiuni teoretice.....	69
2.4.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	70
2.4.3 Caracteristicile MCC–lucrare practică.....	72
2.5 Caracteristicile motorului de curent continuu cu excitație derivație	75
2.5.1 Noțiuni teoretice.....	75
2.5.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	76
2.5.3 MCC cu excitație derivație–lucrare practică.....	77
2.6. Determinarea randamentului MCC și principiul separării pierderilor	80
2.6.1 Noțiuni teoretice.....	80
2.6.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	82
2.6.3 Principiul separării pierderilor – lucrare practică	83
3. MAȘINA DE INDUCȚIE.....	86
3.1 Noțiuni introductive, construcția și principiul de funcționare a MI.....	86
3.1.1 Noțiuni teoretice.....	86
3.1.2 Principiul de funcționare al mașinii de inducție.....	89
3.2. Funcționarea în gol a mașinii de inducție	93
3.2.1 Noțiuni teoretice.....	93
3.2.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	95
3.2.3 Funcționarea în gol a MI–lucrare practică	97
3.3. Funcționarea în scurtcircuit a mașinii de inducție	100
3.3.1 Noțiuni teoretice.....	100
3.3.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	102
3.3.3 Funcționarea în scurtcircuit a MI–lucrare practică	104
3.4 Funcționarea în sarcină și curba cuplului pentru mașina de inducție	106
3.4.1 Noțiuni teoretice.....	106
3.4.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	109
3.4.3 Curba cuplului–lucrare practică	111
3.5 Metode de pornire. Pornirea prin conectarea directă la rețea a MI.....	114
3.5.1 Noțiuni teoretice.....	114
3.5.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	117
3.6. Motorul de inducție monofazat cu fază auxiliară	120
3.6.1 Noțiuni teoretice.....	120
3.6.2 Motorul de inducție monofazat – lucrare practică	122
4. MAȘINA SINCRONĂ	124
4.1 Noțiuni introductive, principiul de funcționare și construcția MS	124
4.1.1 Noțiuni teoretice.....	124

4.2 Caracteristicile de gol și scurtcircuit la generatorul sincron autonom ..	128
4.2.1 Noțiuni teoretice.....	128
4.2.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	131
4.3 Caracteristicile generatorului sincron autonom	134
4.3.1 Noțiuni teoretice.....	134
4.3.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	137
4.4 Funcționarea generatorului sincron la rețea și „curbele în V“	139
4.4.1 Noțiuni teoretice.....	139
4.4.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	142
4.4.3 Curbele în V – lucrare practică	144
4.5 Pornirea în asincron a motorului sincron	145
4.5.1 Noțiuni teoretice.....	145
4.5.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	147
4.5.3 Pornirea în asincron–lucrare practică.....	148
4.6. Determinarea parametrilor generatorului sincron.....	150
4.6.1 Noțiuni teoretice.....	150
4.6.2 Probleme rezolvate și probleme propuse	152



ISBN 978-606-35-0355-9