

# **MASINI ELECTRICE II**

## **NOTIȚE DE CURS ȘI ÎNDRUMAR DE PROIECTARE**

**Peter Ioan**



Editura  
Universității  
Transilvania  
din Brașov

**2023**

## Cuprins

### I. MAȘINA DE CURENT CONTINUU

1. Construcția.....	3
2. Principiul de funcționare.....	6
3. Ecuațiile mașinii de c.c.....	9
4. Comutație.....	13
5. Generatorul și motorul de curent continuu.....	25
6. Motorul de curent continuu.....	35
7. Înfășurări de curent continuu.....	41

### II. MAȘINA SINCRONĂ

1. Elemente constructive. Principiul de funcționare a generatorului sincron.....	49
2. Ecuația tensiunii generatorului sincron cu poli înecați, în regim sinusoidal.....	57
3. Reacția indusului gen. sincron cu poli aparenti.....	58
4. Ecuațiile tensiunii generatorului sincron cu poli aparenti.....	62
5. Diagrama de fazori a tensiunilor și curenților generatorului sincron cu poli aparenti.....	63
6. Pierderile și randamentul generatorului sincron.....	64
7. Conectarea în paralel a gen. sincrone. Oscilațiile generatorului sincron. care funcționează în paralel. Bilanțul de puteri și cuplul electromagnetic.....	65
8. Curbele în V ale generatorului sincron.....	71
9. Principiul de funcționare a motorului sincron. Ecuația tensiunii motorului sincron.....	73
10. Diagrama de fazori a tensiunii și curenților motorului sincron.....	75
11. Func. mot. sincr. conectat la o rețea de putere infinită. Curbele în V. Compensat. sincron...	77
12. Caracteristicile de funcționare ale motorului sincron.....	79
13. Pornirea motorului sincron. Metoda de pornire cu un motor auxiliar. Metode de pornire în asincron.....	80
14. Regimuri speciale de funcționare ale mașinii sincrone.....	85
15. Mașini sincrone speciale.....	89

### III. INDRUMAR DE PROIECTARE

1. Date de proiectare.....	92
2. Despre citirea de pe caracteristici grafice.....	93
3. Corelare putere, turatie, gabrit.....	94
4. Calculul dimensiunilor principale.....	94
5. Înfășurarea, creștătura, jugul statorului, întrefierul.....	98
6. Înfășurarea, creștătura, jugul rotorului.....	103
7. Curentul de magnetizare.....	105
8. Parametrii motorului.....	107
9. Pierderi.....	110
10. Calculul parametrilor de pornire.....	113
11. Calculul ventilației.....	115
12. Calculul încălzirii.....	116
13. Anexa 1.....	118
14. Anexa 2.....	121
15. Anexa 3.....	123

# MAȘINA DE CURENT CONTINUU

## Întroducere

Mașina de curent continuu(mcc) este primul convertizor electro-mecanic care a fost utilizat în acționările electrice cu turație variabilă, datorită facilităților sale simple de a permite controlul și modificarea vitezei de rotație. Se construiește pentru puteri nominale de la zeci de wati la mii de kWati, gama largă de turații, tensiuni nominale până la 1500-2000V.

## 1. Construcția

În figura 7.1[4] este prezentată o secțiune longitudinală și o secțiune transversală printr-o mașină de curent continuu, cu indicarea părților componente.

O mașină tensiune de c.c. se compune din două părți constructive de bază:

- a. statorul, partea imobilă a mașinii, formată din: carcasa(jugul statoric)1, polii de excitație 4 și înfășurarea concentrată corespunzătoare de c.c. 19, polii de comutație(auxiliari) 5 și înfășurarea concentrată corespunzătoare 18, scuturile frontale 2,3 cu lagăre de rulmenți, sistemul de perii 22 și portperii 11, cutia bornă 16, etc.
- b. rotorul, partea mobilă a mașinii, formată din: miezul(pachetul rotoric) 6, care prezintă la periferie dinții, repartizați uniform, iar spre interior jugul rotoric fixat pe arborele 9, înfășurarea rotorică 8, distribuită uniform în creștăturile ale miezului rotoric, colectorul 12, ventilatorul 21.

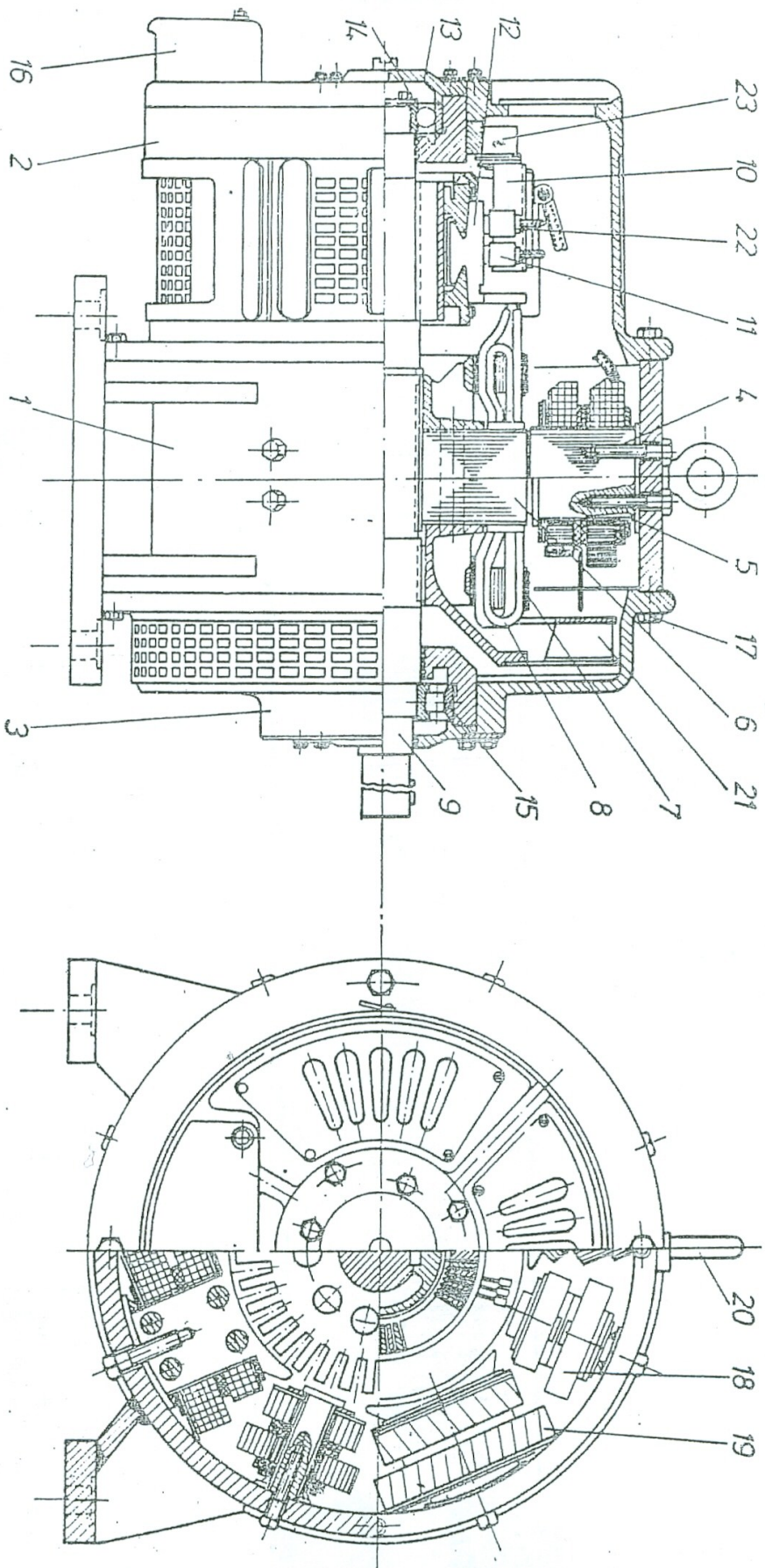


Fig. 7.1. Secțiunii printr-o mașină de curent continuu tetrapolară:

- 1 — carcasă; 2, 3 — scuturi; 4 — pol principal; 5 — pol de comutație; 6 — miezul rotorului; 7 — bandaj; 8 — înfășurarea rotorului; 9 — ax; 10 — suport portperii;  
 12 — colector; 13 — capac exterior; 14, 15 — rulmenți; 16 — cutie de borne; 17 — bulon; 18 — bobina polului de comutație; 19 — bobina polului de excitație;  
 20 — inel de ridicare; 21 — ventilator; 22 — perie; 23 — colier port-perie.

Statorul este constituit dintr-o *carcasă* de fontă sau de oțel, iar în interiorul carcasei sunt fixați *polii principali*, adică *polii inductori*. Aceștia au un miez pe care se așează *înfășurarea de excitație*, iar la partea dinspre întrefier se termină cu o *piesă polară*. Polii se pot executa *masivi* sau *lamelați*. De obicei, se realizează lamelați pentru a micșora pierderile de suprafață prin curenți turbionari și de asemenea din motive tehnologice mai convenabil. Curenții turbionari în poli apar în urma ondulărilor inducției; datorită formei dințate a rotorului, în dreptul aceluiași punct al piesei polare trece succesiv un dinte și o creștătură. Ondulările inducției se produc doar într-un strat subțire, de aceea poate fi lamelată numai piesa polară. Din motive tehnologice se lamelează întregul pol. La construcția polilor se utilizează tablă de oțel de 05-1mm grosime. La mașina de c.c. jugul statorului este realizat chiar din carcasă. Carcasa(jugul statorului) se face de obicei de formă cilindrică din tablă de oțel îmbinată prin sudură, sau din oțel turnat, iar la mașinile mici din țevă trasă de oțel.

La multe mașini se montează și *poli auxiliari*, numiți și *poli de comutație*, care se fixează între polii principali și au rolul de a evita scânteierea la colector. De carcasă sunt fixate două scuturi, prin șuruburi, câte unul de fiecare capăt, care poartă lagărele. La mașinile mari, arborele rotorului este susținut de lagăre care sunt montate separat de scuturi și de carcasă.

La rotirea indusului(rotorul), are loc magnetizarea alternativă a oțelului rotoric, deci apar pierderi mari în oțel, de aceea rotorul se execută din tole de oțel silicios de 0.5mm grosime, izolate între ele cu lac. În urma montării tolelor se formează dinții și creștăturile. În creștături se se așează *înfășurarea indusului*. Creștăturile sunt deschise la mașinile mari ceea ce ușurează izolarea la mașinile mari. La mașinile mai mici se fac creștături semiînchise. *Înfășurarea indusului* este legată de lamelele colectorului, care este elementul caracteristic al mașinii de curent continuu.

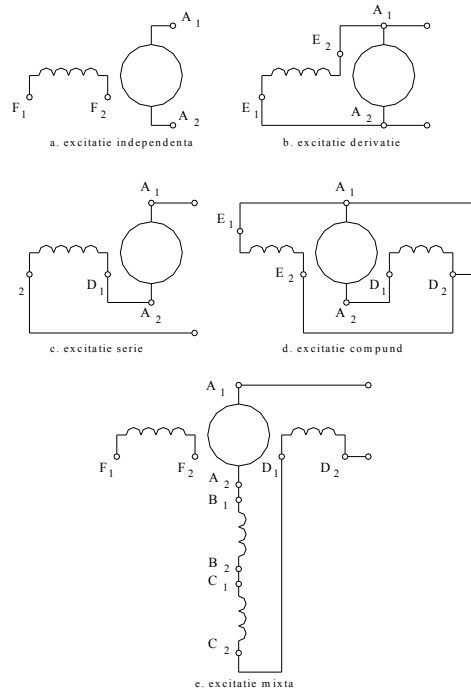
Colectorul este executat din lamele de cupru, separate și izolate între ele cu plăci de micanită și montate pe un butuc cu ajutorul unei flanșe de strângere. Grosimea plăcii de micanită variază cu tensiunea mașinii și grosimea lamelei de colector, de la 0.4-1.2mm. Colectoarele se realizează și din masă pastică, la care lamelele ce colector împreună cu izolația de mecanită se presează în masa plastică la temperatura corepunzătoare de transformare. Butucul colectorului este fixat pe arborele mașinii. Lamelele colectorului sunt izolate de butuc și de flanșa de strângere cu manșoane de mecanită. *Înfășurarea rotorului* este legată la lamelele colectorului.

Periile se confecționează din cărbune grafitat, cupru grafitat sau bronz grafitat. Peria este prinsă într-un braț denumit portperie și este apăsată pe suprafața colectorului de un resort. Portperia se fixează pe un ax orizontal. Pe acest ax pot fi fixate mai multe perii, când culegerea curentului se face prin mai multe perii. Sunt atâtea rânduri de perii câți poli are mașina. În acest caz distanța dintre două rânduri de perii vecine este de un pas polar. Polaritatea rândurilor de perii alternează, iar periile de aceeași polaritate sunt conectate între ele prin câte un inel colector. Inelele se conectează la bornele mașinii prin legături flexibile.

După modul de alimentare a *înfășurării de excitație*, mașinile de curent continuu se clasifică astfel[1]:

- Mașini cu excitație separată sau independentă, la care *înfășurarea de excitație* este alimentată de la o sursă separată.
- Mașini cu autoexcitație, la care *înfășurarea de excitație* este alimentată de la bornele indusului din această categorie fac parte următoarele: 1. *mașina de curent continuu derivație*, care are *înfășurarea de excitație* conectată în paralel cu *înfășurarea indusului*; 2. *mașina de curent continuu serie*, care are *înfășurarea de excitație* conectată în serie cu *înfășurarea indusului*; 3. *mașina de curent continuu compund*, care reprezintă două *înfășurări de excitație*, una conectată în serie cu indusul, iar cea de-a doua în paralel.

- Mașini cu excitație mixtă, care prezintă două sau mai multe înfășurări de excitație, dintre care cel puțin una este alimentată de la o sursă separată, iar alta este alimentată în serie sau în paralel cu indusul.



#### Regimuri de funcționare:

- Generator-transformă puterea mecanică primită de la arbore în putere electrică debitată într-o rețea curent continuu. Este antrenată de un motor primar: motor diesel, turbina cu abur, hidraulică, eoliană etc..., la turația  $n$ . Motorul primar dezvoltă cuplul  $M$ . Înfășurarea de excitație este alimentată de la o sursă de curent continuu cu un curent  $I_e$ . În secțiunile înfășurării rotorice, învartite în câmpul magnetic al polilor de excitație, se va induce o t.e.m. și între bornele mașinii va apărea o tensiune continuă. Colectorul va juca rolul redresorului.
- Motor-transformă puterea electrică primită de la o rețea de c.c. în putere mecanică cedată pe la arbore unui mecanism sau instalații mecanice, prin intermediul câmpului electromagnetic. Se alimentează mașina de la o rețea de c.c. cu tensiunea  $U_0 = \text{const.}$ . În înfășurarea rotorului va apărea curentul  $I_A$ . Înfășurarea de excitație este străbatută de curentul  $I_e$ , provenită de la o sursă diferită sau aceeași cu cea a rotorului. Conductoarele înfășurării rotorului fiind străbatute de curent și aflându-se în câmpul polilor de excitație vor da naștere unui cuplu de rotație.
- Frână- mașina primește putere mecanică pe la arbore și putere electrică de la o rețea de c.c. și le transformă ireversibil în timp în căldură, dezvoltând totodată un cuplu necesar frânării unui mecanism sau unei instalații electrice.

## **2. Principiul de funcționare[1]**

### 2.1.PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE AL MAȘINII DE CURENT CONTINUU CA GENERATOR.

Explicațiile se vor face pe figurile 31.1 și 31.2 [1].

Într-o spiră așezată pe un rotor care se învârtă într-un câmp magnetic constant în timp se induce o tensiune electromotoare datorită fenomenului de inducție electromagnetică. Dacă cele două capete ale spirei sunt legate la două inele colectoare, la aceste inele se culege o tensiune electromotoare alternativă după cum se poate vedea în fig.31.1[1]. Sensul tensiunii electromotoare din fig.31.1 rezultă imediat din plicarea legii inducției electromagnetice, considerând sistemul de referință solidar cu polii inductori. Dacă cele două capete ale spirei sunt legate la două jumătăți de inele, izolate între ele, așa cum se poate vedea în fig.31.2[1], tensiunea culeasă la perii care freacă de cele două jumătăți de inele nu-și mai schimbă sensul, dar variază, după cum se poate vedea în figura 31.2, între o valoare maximă și una minimă, zero. Se obține deci o tensiune pulsatorie. Cele două jumătăți de inele și perii schimbă (comută) sensurile tensiunii și al curentului la borne, ori de câte ori se schimbă sensul tensiunii electromotoare în spiră. Deci, sensul tensiunii și curentului în circuitul exterior, rămân aceleași, deși sensul tensiunii electromotoare din spiră se modifică în timpul rotației spirei în câmpul magnetic. Dispozitivul constituit de cele două jumătăți de inele se numește *colector*.

În loc de a utiliza o singură spiră, se pot așeza mai multe spire decalate pe rotor, fiecare din ele având capetele legate la câte două segmente de inel. În acest caz perii sunt în contact cu segmentele de inel ale unei spire un timp mai scurt și deci limitele maximă și minimă ale tensiunii la perii sunt mai apropiate. Cu cât pe rotor vor fi așezate mai multe spire și deci colectorul va fi compus din mai multe segmente, cu atât tensiunea care se obține la perii va fi mai constantă și pulsațiile mai mici. Infășurarea rotorului fiind strabatută de curent (la borne se conectează o rezistență  $R$ ) va da naștere unui câmp magnetic de reacție, care se suprapune peste câmpul de excitație, dând un câmp magnetic rezultat în întreg. Deci, câmpul de reacție slabeste câmpul de excitație. Pentru eliminarea acestui dezavantaj se urmărește compensarea reacției indusului:

- a. se prevede în creșturile închise sau semiînchise practicate în talpile polare o infășurare de compensație. Câmpul de reacție este anulat pe lungimea talpii.
- b. Între polii principali se plasează poli auxiliari (de comutație) care să anuleze câmpul de reacție a indusului în axa transversală ( $q$ ) a mașinii.



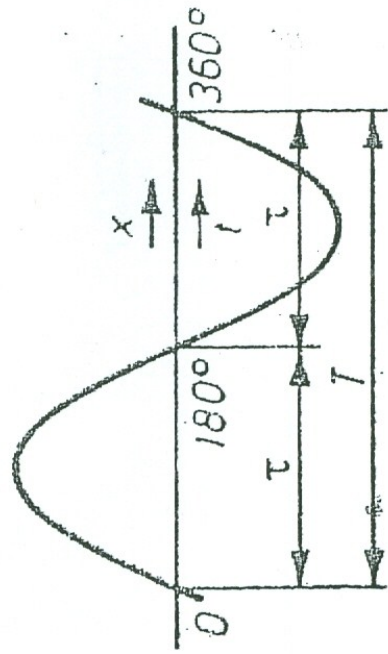
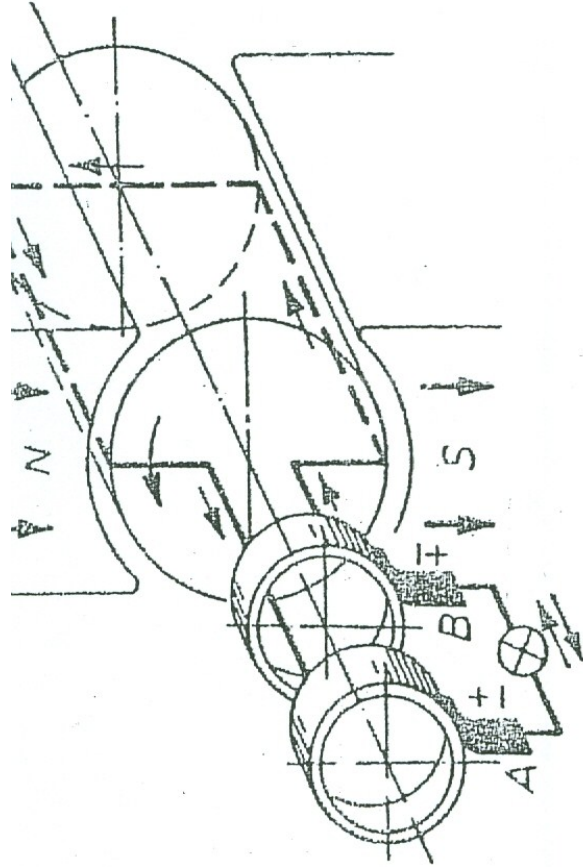


Fig. 31.1. Producerea tensiunii electromotoare într-o spîră legată la două inele.

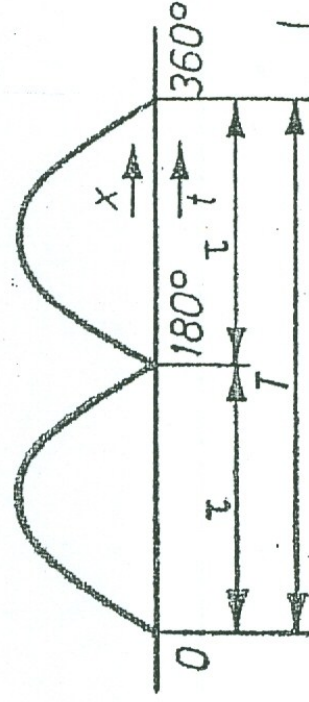
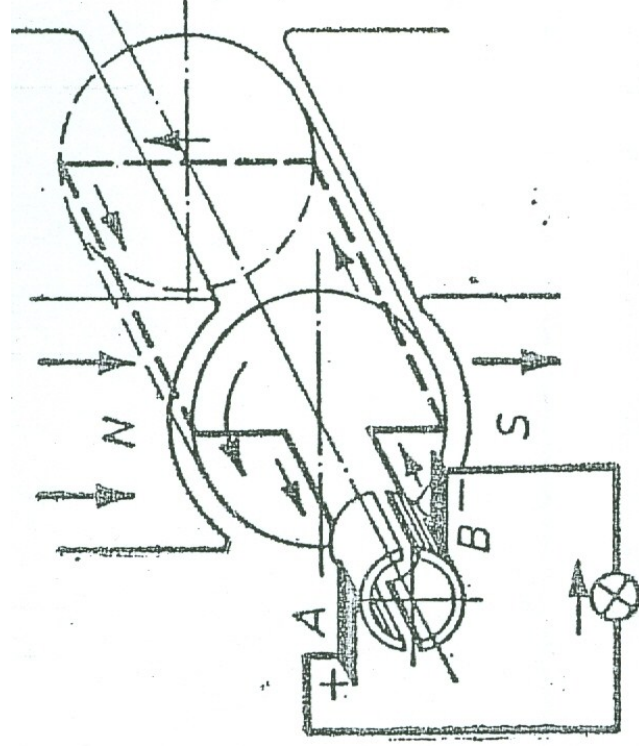


Fig. 31.2. Producerea tensiunii electromotoare într-o spîră legată la două semiinele.



## 2.2. PRINCIPIUL DE FUNCTIONARE A MOTORULUI DE CURENT CONTINUU[1]

Dacă unei mașini de curent continuu se aplică o tensiune la borne, prin indus trece un curent. Datorită interacțiunii dintre curenții care trec prin conductoarele indusului și câmpul magnetic al inductorului, se produce un cuplu, și acesta pune rotorul în mișcare. Expresia acestui cuplu este dată de relația:

$$M = \frac{pN}{2a\pi} I_a \Phi, \text{ unde s-a notat}$$

a-numărul de căi de curent,

p-numarul de perechi de poli

N-numarul total de conductoare al unei infasurari de c.c

$I_a$ -curentul prin indusul unei masini de c.c.

$\Phi$ -amplitudinea fluxului magnetic fascicular produs de un pol.

## 3. ECUATIILE MASINI DE CURENT CONTINUU[1]

1. *Generator*: mașina de c.c. este antrenată de un motor primar(motor Diesel, turbină hidraulică, turbină eoliană, turbină cu aburi) cu turația  $n$  constantă. Motorul primar dezvoltă cuplul activ  $M_a$  de același sens ca și viteza de rotație. Înfășurarea de excitație este alimentată cu un curent continuu  $I_e$ , de la o sursă de c.c.. În secțiile înfășurării rotorice, învârtite în câmpul magnetic al înfășurării de excitație, se vor induce t.e.m.  $E_0$  și între bornele mașinii A, B va apărea o tensiune  $U_{A0}$  egală cu t.e.m.  $E_0$  indusă într-o cale de curent.

Dacă între A și B punem o rezistență  $R$  va apărea un curent  $I_a$  care va străbate înfășurarea rotorului în sensul t.e.m.  $E$ (în sarcină). Înfășurarea rotorului, fiind stăbătită de curent, va da naștere unui câmp magnetic de reacție transversală și se va suprapune peste cel de excitație, dând un câmp rezultat în întrefier  $\Phi$ . Ecuația de funcționare a mașinii ca generator:  $R_A \cdot I_A + \Delta U_p + \Delta U_A = E$ , unde s-a notat

$R_A$ -rezistența totală a înfășurării rotorului;

$\Delta U_p$ -căderea de tensiune în contactul perie-colector.

Se poate neglija  $\Delta U_p$  față de  $I_A R_A$  sau se include în ea. Se consideră că  $E \approx E_0$  dacă se neglijează variația t.e.m. datorită reacției transversale a indusului( $\Phi \approx \Phi_0$ ). Rezultă ecuația:

$$R_A \cdot I_A + \Delta U_A = E_0 \quad (1).$$

Dar, se știe că:  $E_0 = \frac{p}{a} \cdot N \cdot n \cdot \Phi_0$  (2), unde s-a notat: N-numărul de laturi de spiră în creștătura rotor; a-

nr. căilor de curent;  $\Phi_0$ -fluxul de excitație pe un pol; p-nr. de perechi de poli; n-turația rotorului.

$U_A = R \cdot I_A$  (3)-căderea de tensiune pe rezistența de sarcină.

$\Phi_0 = n(f(I_e))$  (4) unde  $I_e$ -curentul de excitație.

În cele 4 ecuații se consideră mărimi cunoscute: n,  $R_A$ ,  $I_e$ , p, a, N, R. Din acestea se vor deduce:  $U_A$ ,  $E_0$ ,  $I_A$ ,  $\Phi_0$  în orice regim de funcționare a mașinii. Dacă mașina de c.c. este excitată de la o sursă(înfășurarea polilor de excitație este alimentată cu curent continuu  $I_e$ ), dacă este rotită cu viteza de rotație  $n$  asupra rotorului acționează următoarele cupluri:

- c.  $M_a$  este cuplul activ al motorului primar care dătează și sensul de rotație;
- d.  $M_m$  cuplul datorită frecărilor: rotorului cu aerul, în lagărele mașinii, pierderi mecanice în ventilatorul fixat pe arbore.  $M_m$  este de sens invers cu  $M_a$ ;
- e.  $M_{Fe}$  cuplul datorită pierderilor în fierul rotorului produse prin fenomenul de histerez

f. is și curenți turbionari.  $M_{Fe}$  de sens invers cu  $M_a$ ;

g.  $M$  cuplul electromagnetic  $M$  de sens invers cu  $M_a$ .  $M = \frac{p}{2\pi a} \cdot N \cdot I_a \cdot \Phi$

Ecuția de mișcare a rotorului este  $M_a - M_m - M_{Fe} - M = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$ , unde s-a notat cu  $J$  momentul de inerție

al grupului generator-motor. Dacă  $\Omega=2\pi n=\text{constant}$ , rezultă  $J \frac{d\Omega}{dt} = 0$  și ecuația de mișcare devine

$$M_a = M_m + M_{Fe} + M.$$

Puterea mecanică transmisă mașinii de c.c. prin intermediul arborelui de către motorul primar:

$$P_1 = M_a \cdot \Omega = P_m + P_{Fe} + P = M_m \cdot \Omega + M_{Fe} \cdot \Omega + M \cdot \Omega \text{ unde s-a notat}$$

$P_m = M_m \Omega$  pierderi datorită frecărilor;

$P_{Fe} = M_{Fe} \Omega$  pierderi în fierul rotorului;

$P = M \Omega$  puterea electromagnetică debitată de generator;

$$P = M \cdot \Omega = \frac{p}{2\pi a} \cdot N \cdot I_a \cdot \Phi \cdot 2\pi \cdot n = \frac{p}{a} \cdot N \cdot I_a \cdot \Phi \cdot n = E \cdot I_a, \text{ unde } E \text{ este t.e.m. debitată de generator}$$

$$E = \frac{p}{a} \cdot N \cdot \Phi \cdot n.$$

Dar  $E = U_A + R_A \cdot I_a + \Delta U_p$  rezultă că  $P$  se poate pune sub forma:  $P = U_A \cdot I_a + \Delta U_p \cdot I_a + R_A \cdot I_a^2$ .

$P$  privit dinspre receptor este o putere electrică!!

$P_2 = U_A \cdot I_a$  este puterea electrică utilă transmisă receptorului legat la bornele mașinii.

$\Delta U_p \cdot I_a + R_A \cdot I_a^2$  pierderi Joule în perii, înfășurările rotorului.

2. *Motor.* Puterea mecanică este obținută la arbore prin intermediul câmpului electromagnetic.

Se conectează mașina la o rețea de c.c. Conductoarele înfășurării rotorului, fiind străbătute de curent și aflându-se în câmpul polilor de excitație, vor fi solicitate de forțe electromagnetice care vor da naștere unui

cuplu de rotație:  $M = \frac{p}{2\pi a} \cdot N \cdot I_a \cdot \Phi$

Dacă cuplul este mai mare decât cuplul static total la arborele motorului, rotorul se pune în mișcare de rotație accelerată până în momentul în care cuplul electromagnetic este egalat de cuplul rezistent. După aceea mișcarea devine uniformă. În înfășurarea rotorului se induc tensiuni electromotoare (ca la generator),

fiindcă se învârt în câmpul de excitație al polilor. Rezultă t.e.m. pe o cale de curent:  $E = -\frac{p}{a} \cdot N \cdot n \cdot \Phi$  unde

$\Phi$ -fluxul rezultat pe un pol;  $n$ -turația rotorului. Semnul minus arată că  $E$  are sens invers sensului pozitiv ales. Ecuția de funcționare a motorului:

$$R_A \cdot I_a + \Delta U_p - U_A = E \text{ sau } R_A \cdot I_a + \Delta U_p - E = U_A$$

*Observație:* Unii autori definesc o t.e.m. egală și de sens contrar cu  $E$ :  $E_m = -E = \frac{p}{a} \cdot N \cdot n \cdot \Phi$  și o numesc

tensiune contraelectromotoare. Rezultă o altă formă pentru ecuația de funcționare:  $R_A \cdot I_a + \Delta U_p + E_m = U_A$  (1) Dacă includem în  $R_A I_a$  pe  $\Delta U_p$  rezultă  $R_A \cdot I_a + E_m = U_A$  și

$$E_m = E_0 = \frac{p}{a} \cdot N \cdot n \cdot \Phi_0 = \frac{p}{a} \cdot N \cdot \frac{\Omega}{2\pi} \cdot \Phi_m = k \cdot \Omega \cdot \Phi_m \text{ rezultă } U_A = R_A I_a + k \cdot \Omega \cdot \Phi_m \text{ (1')} \text{ care este}$$

ecuația de funcționare sau ecuația indusului. Presupunem că motorul antrenează o instalație (strung, macara,