

Valentin Năvrăpescu

Constantin Ghiță

Sorin Mușuroi

Mașini și acționări electrice



Editura Academiei Oamenilor de Știință din România

București

2011

PREFAȚĂ

Lucrarea „*Mașini și acționări electrice*” tratează problemele fundamentale ale mașinilor electrice utilizate în sistemele de acționare electrică, fenomenele principale care se produc în mașinile și acționările electrice moderne precum și tendințele actuale spre care se îndreaptă studiile și realizările practice sau tehnologice din domeniu.

Cartea urmărește, într-o succesiune firească, prezentarea sintetică a elementelor de bază ale mașinilor electrice și ale sistemelor de acționare electrică. Ea se adresează atât profesorilor din învățământul tehnic liceal, postliceal și universitar, aparținând domeniului ingineriei electrice, cât și elevilor sau studenților care își desăvârșesc studiile în acest domeniu.

Se tratează noțiunile privind conversia electromecanică a energiei, elementele constructive, ecuațiile de funcționare și caracteristicile principale ale transformatoarelor electrice, ale mașinilor de curent continuu și de curent alternativ, ale sistemelor de acționare electrică, inclusiv comanda și controlul acestor mașini atunci când sunt incorporate într-un sistem modern de acționare.

Problemelor specifice acționărilor electrice cu motoare sincrone fără perii sau cu motoare pas cu pas le sunt acordate o atenție specială. Pentru o înțelegere clară a materialului prezentat și pentru ilustrarea unor aspecte specifice, cartea conține un număr de probleme numerice aplicative privind elementele de bază tratate.

Lucrarea este densă având are o întindere relativ redusă și cuprinde elementele fundamentale privitoare la subiectele abordate. Partea grafică este sugestivă și ajută la o înțelegere mai ușoară a chestiunilor prezentate.

AUTORII

CUPRINS

<i>Prefață</i>	5
<i>Cuprins</i>	7
1 INTRODUCERE	11
1.1 Noțiuni de conversia electromecanică a energiei	12
1.2 Schema unui convertor electromecanic	13
1.3 Tipuri principale de convertoare electromecanice	15
1.4 Regimurile energetice de funcționare ale mașinilor electrice	15
1.4.1. Regimul de generator	15
1.4.2. Regimul de motor	16
1.4.3. Regimul de frână	17
1.5 Studiul transformatoarelor electrice	17
2 TRANSFORMATORUL ELECTRIC	19
2.1 Construcție, utilizare, tendințe moderne	19
2.1.1 Elemente constructive ale transformatorului	19
2.1.2 Domenii de utilizare	21
2.1.3 Tendințe moderne	21
2.2 Principiu de funcționare, ecuații, schemă echivalentă, caracteristici electrice	21
2.2.1 Principiul de funcționare	21
2.2.2 Ecuații de funcționare	23
2.2.3 Schema echivalentă	26
2.2.4 Caracteristicile transformatorului	26
2.3 Transformatorul trifazat	28
2.3.1 Grupul transformatoric	28
2.3.2 Transformatorul trifazat obișnuit	29
2.3.3. Transformatorul trifazat în regim nesimetric	30
2.4 Elemente de calcul ale transformatoarelor monofazate de mică putere	30
2.4.1 Determinarea curenților nominali	31
2.4.2 Secțiunea de fier a coloanei	31

2.4.3	Numerele de spire ale înfășurărilor	32
2.4.4	Secțiunile conductoarelor înfășurărilor	32
2.4.5	Alegerea tolei miezului magnetic	32
2.4.6	Grosimea miezului magnetic	33
2.4.7	Definitivarea dimensiunilor transformatorului	33
2.4.8	Verificarea termică a înfășurărilor	34
2.5	Probleme aplicative	34
3	MAȘINI DE CURENT ALTERNATIV	37
3.1	Construcție, utilizare, tendințe moderne	37
3.1.1	Elemente privind înfășurările de curent alternativ	37
3.1.2	Câmpul magnetic în mașinile de curent alternativ	39
3.2	Mașini asincrone, construcție, utilizare, scheme, caracteristici, tendințe moderne	43
3.2.1	Construcția mașinii asincrone	44
3.2.2	Utilizarea mașinii asincrone	45
3.2.3	Principiul de funcționare a motorului asincron	47
3.2.4	Schema echivalentă a motorului asincron	47
3.2.5	Cuplul electromagnetic al motorului asincron	48
3.2.6	Caracteristicile motorului asincron	49
3.2.7	Tendințe moderne privind motorul asincron	51
3.2.8	Probleme aplicative	51
3.3	Mașini sincrone, construcție, utilizare, scheme, caracteristici, tendințe actuale	54
3.3.1	Elemente constructive	54
3.3.2	Utilizarea mașinii sincrone	55
3.3.3	Principiul de funcționare al mașinii sincrone	56
3.3.4	Ecuția de tensiuni și cuplul electromagnetic	58
3.3.5	Unele aspecte ale mașinii sincrone cu poli aparenti	59
3.3.6	Comparație între motoarele asincrone și sincrone	60
3.3.7	Tendințe actuale privind mașinile sincrone	61
3.3.8	Probleme aplicative	61
4	MAȘINI DE CURENT CONTINUU	63
4.1	Construcție, utilizare, tendințe moderne	63
4.1.1	Elemente constructive	63
4.1.2	Domenii de utilizare	64
4.1.3	Tendințe actuale	64
4.2	Generatoare de curent continuu	64
4.2.1	Principiul de funcționare	65
4.2.2	T.e.m. și cuplul electromagnetic al mașinii de c.c.	67
4.2.3	Generatorul de c.c. cu excitație independentă	68
4.2.4	Generatorul de c.c. cu excitație derivație	69

4.3	Motoare de curent continuu	70
4.3.1	Principiul de funcționare al motorului de c.c.	70
4.3.2	Motorul de c.c. cu excitație independentă	71
4.3.3	Motorul de c.c. cu excitație serie	73
4.4	Probleme aplicative	74
5	MAȘINI ELECTRICE PENTRU SURSE REGENERABILE DE ENERGIE	76
5.1	Generatoare pentru sisteme eoliene și de valuri	76
5.1.1	Particularități ale generatoarelor eoliene	76
5.1.2	Particularități ale generatoarelor care utilizează valurile	77
5.2	Scheme electrice pentru sisteme eoliene	79
5.3	Probleme specifice sistemelor de producere a energiei din surse regenerabile	80
5.3.1	Generatoare asincrone cu dublă alimentare fără perii	80
5.3.2	Comparație între generatoarele DFIG și BDFIG	81
6	SISTEME DE ACȚIONARE ELECTRICĂ	82
6.1	Structura sistemului de acționări electrice	82
6.2	Condiții de stabilitate statică de funcționare	86
6.3	Probleme aplicative	88
7	ACȚIONĂRI ELECTRICE CU MAȘINI DE CURENT CONTINUU	91
7.1	Pornirea, frânarea și reglarea vitezei mașinii de curent continuu	91
7.1.1	Pornirea mașinii de curent continuu	91
7.1.2	Frânarea mașinii de curent continuu	99
7.1.3	Reglarea vitezei mașinii de curent continuu	104
7.2	Alimentarea mașinii de curent continuu de la convertoare cu stingere naturală și de la convertoare cu stingere forțată	107
7.2.1	Alimentarea de la un variator de tensiune continuă	107
7.2.2	Alimentarea de la un convertor cu stingere naturală	110
7.3	Probleme aplicative	113
8	ACȚIONĂRI ELECTRICE CU MAȘINI ASINCRONE	117
8.1	Controlul mișcării mașinilor de inducție trifazate alimentate de la frecvență variabilă	120
8.2	Controlul scalar al mașinilor de inducție	121
9	ACȚIONĂRI ELECTRICE CU MAȘINI SINCRONE FĂRĂ PERII ȘI MOTOARE PAS CU PAS	129
9.1	Sisteme de acționare cu mașini sincrone cu magneți permanenți	129
9.1.1	Controlul în buclă deschisă al motorului sincron cu magneți permanenți	130

9.1.2	Controlul vectorial al motorului sincron cu magneți permanenți	131
9.1.3	Controlul vectorial cu orientare după câmp	133
9.1.4	Controlul vectorial direct în cuplu și flux	134
9.2	Sisteme de acționare cu motoare pas cu pas	135
9.2.1	Comanda motoarelor pas cu pas	137
9.2.2	Schema bloc de comandă a unui motor pas cu pas	140
9.2.3	Generator de impulsuri	140
9.2.4	Distribuitoare de impulsuri	144
9.2.5	Blocul contactoarelor statice	146
	<i>Bibliografie</i>	149

Capitolul 1

INTRODUCERE

1.1. Noțiuni de conversia electromecanică a energiei

Conversia de tip electromecanic a energiei se produce într-un convertor numit *electromecanic*, care transformă energia electrică în energie mecanică sau energia mecanică în energie electrică. În oricare dintre cele două sensuri, conversia electromecanică se realizează prin intermediul câmpului magnetic și orice mașină electrică rotativă reprezintă, de fapt, un convertor electromecanic.

Este mult mai avantajos să se realizeze conversia electromecanică a energiei în câmp magnetic și nu în câmp electric, deoarece în acest caz volumul convertorului este mult mai mic. Într-adevăr, dacă se face raportul dintre densitățile volumice de energie magnetică w_m și electrică w_e , exprimate în $[J/m^3]$, se găsește relația:

$$\frac{w_m}{w_e} = \frac{B^2 / (2\mu_0)}{\epsilon_0 E^2 / 2} = \frac{B^2}{\epsilon_0 \mu_0 E^2} = \frac{1^2}{\frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot (4\pi \cdot 10^{-7}) \cdot (3 \cdot 10^6)^2} = 10^4, \quad (1-1)$$

relație în care s-au considerat valorile tehnice uzuale ale inducției magnetice ($B = 1 \text{ T}$) și ale câmpului electric ($E = 3 \cdot 10^6 \text{ V/m}$).

Din relația (1.1) se deduce că volumul convertoarelor electromecanice cu conversia energiei în câmp magnetic este de 10^4 ori mai mic decât al acelor cu conversia energiei în câmp electric. Din acest motiv, mașinile și transformatoarele electrice utilizează conversia energiei în câmp magnetic, având circuitele feromagnetice realizate din tole de fier, izolate și nu din materiale dielectrice.

Formal, explicația acestui fapt este aceea că permeabilitatea magnetică relativă a materialelor feromagnetice este de aproximativ 10^4 ori mai mare decât permitivitatea electrică relativă a dielectricilor.

1.2. Schema unui convertor electromecanic

Orice convertor electromecanic este alcătuit din trei sisteme principale (Fig.1.1): sistemul electric (înfășurările) prin care circulă curenți electrici, sistemul magnetic (miezurile feromagnetice statorice și rotorice) prin care circulă fluxurile magnetice și sistemul mecanic care are multiple roluri: susținere, rigidizare mecanică, centrare, ridicare, ventilație, fixare pe platformă.

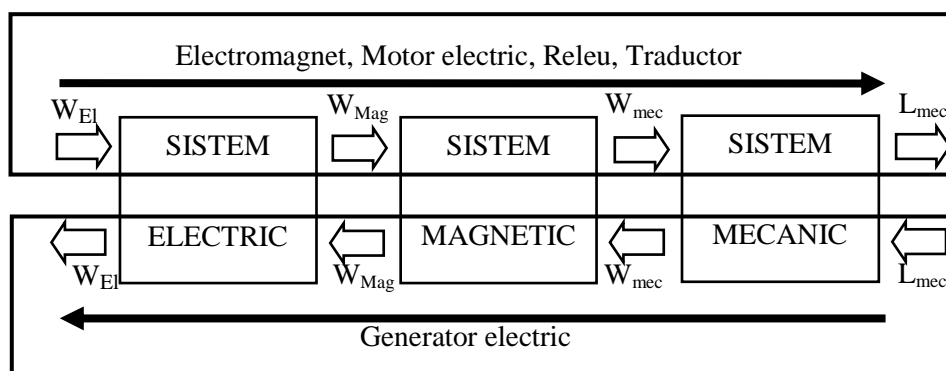


Fig. 1.1. Schema generală a unui convertor electromecanic. (W_{el} – energie electrică; W_{Mag} – energie magnetică; W_{mec} – energie mecanică; L_{mec} – lucru mecanic)

În procesul de conversie electromecanică are loc unul din următoarele fenomene: ori energia electrică, injectată pe la bornele convertorului, este transmisă sistemului magnetic, care o transmite părții mecanice mobile prin intermediul forțelor sau cuplurilor electromagnetice (*electromagneți, motoare electrice, rele, traductoare*), ori energia mecanică, injectată pe la arborele convertorului, este transmisă prin intermediul energiei magnetice sistemului electric, care dezvoltă această energie sub formă de energie electrică la borne (*generatoare electrice*). Sistemul magnetic, prin intermediul energiei magnetice, joacă rolul de sistem de cuplaj între sistemul mecanic și sistemul electric. Elementul de interacțiune dintre sistemul electric și sistemul magnetic îl reprezintă tensiunea electromotoare, iar elementul de interacțiune dintre sistemul mecanic și sistemul magnetic îl reprezintă cuplu electromagnetic.

În convertoarele electromecanice care generează lucru mecanic cuplu electromagnetic, pentru convertoarele rotative, respectiv forța electromagnetă, pentru convertoarele liniare sunt active, deoarece ele produc mișcarea. În cazul convertoarelor electromecanice care generează

energie electrică (generatoarele) cuplul sau forța electromagnetică sunt antagoniste, deoarece se opun cuplului sau forței active care antrenează convertorul, conform regulii lui Lenz. Tot regula lui Lenz ne arată că în primul caz, elementul antagonist este tensiunea electromotoare indusă în înfășurarea convertorului, și de aceea, în cazul convertoarelor care generează lucru mecanic, aceasta se mai numește tensiune contraelectromotoare.

1.3. Tipuri principale de convertoare electromecanice

Orice convertor electromecanic are două armături feromagnetice; una fixă și cealaltă mobilă, separate de un spațiu de aer numit întrefier, care face posibilă mișcarea relativă a celor două armături.

În funcție de mișcarea efectuată de armătura mobilă, convertoarele electromecanice se împart în două categorii: *convertoare de tip electromagnet*, la care armătura mobilă efectuează o mișcare de translație și *mașini electrice*, la care armătura mobilă efectuează o mișcare de rotație sau de translație (la mașinile liniare).

În prima categorie pot fi încadrați electromagneții (Fig.1.2.a), releele și traductoarele electromagnetice de poziție (Fig.1.2.b), care sunt utilizate în aparatura de comutație, de semnalizare, de monitorizare sau de protecție.

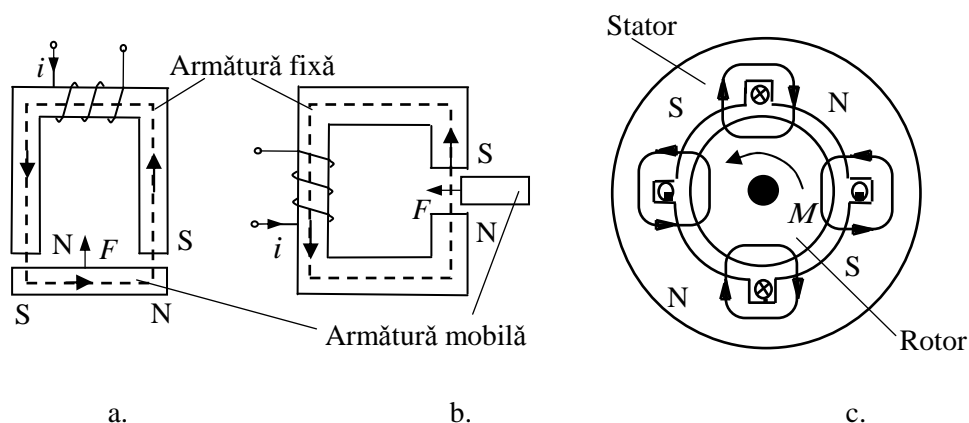


Fig. 1.2. Tipuri de convertoare electromecanice: a – electromagnet; b – traductor de poziție; c – mașină electrică rotativă.

(F – forța de atracție; M – cuplul electromagnetic; N – polul nord; S – polul sud)

Câmpul magnetic din întrefierul acestor convertoare este unipolar, un pol fiind pe o armătură și celălalt pe cealaltă armătură.

În cea de a doua categorie pot fi încadrate mașinile electrice (Fig.1.2.c) de tip motor sau generator, utilizate în acționările electrice, respectiv la producerea energiei electrice. Câmpul magnetic din întrefierul acestor convertoare este heteropolar, având p perechi de poli.

Câmpul magnetic din convertoarele electromecanice este produs fie de curenții electrici care circulă prin înfășurările convertorului, fie de magneți permanenți. În Fig.1.2 toate convertoarele prezentate au câmpul magnetic produs de curenții electrici care circulă prin înfășurările acestora. În Fig.1.3 se prezintă mașini electrice rotative al căror câmp magnetic este produs de magneți permanenți.

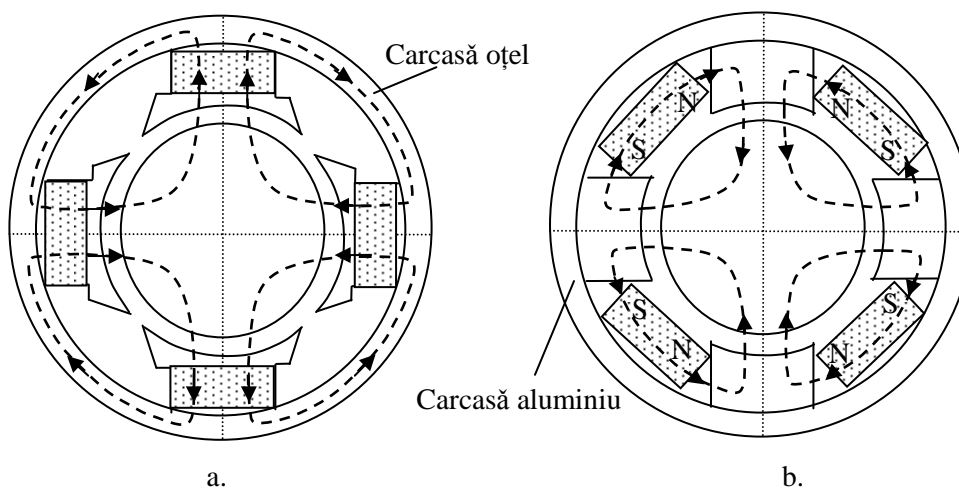


Fig. 1.3. Convertoare electromecanice rotative cu magneți permanenți:
 a – cu magneții permanenți așezați în miezul polului statoric (carcasa din oțel);
 b – cu magneți permanenți așezați între polii statorici (carcasa din aluminiu)

Magneții permanenți desenați în Fig.1.3 produc câmpul magnetic ale cărui linii de câmp sunt desenate punctat. Pentru mașina din Fig.1.3.a magneții sunt plasați în locul miezurilor polilor statorici ai mașinii. Câmpul magnetic se închide prin poli, întrefier, miezul rotoric, din nou prin întrefier și în final închiderea se face prin carcasa statorică din oțel. În Fig.1.3.b se prezintă o altă așezare a magneților și anume între polii statorici.

În acest caz, câmpul magnetic se închide prin cei doi poli statorici și prin rotor, evitându-se carcasa mașinii care se face din aluminiu, un material nemagnetic, care servește doar la consolidarea mecanică a mașinii.

1.4. Regimurile energetice de funcționare ale mașinilor electrice

Convertoarele electromecanice rotative sunt reversibile din punct de vedere energetic, adică pot transforma energia electrică în energie mecanică (motor) sau energia mecanică în energie electrică (generator). Reversibilitatea energetică a acestor convertoare decurge din legea inducției electromagnetice.

1.4.1. Regimul de generator

Se consideră un conductor care se află în repaus față de un câmp magnetic exterior de inducție magnetică constantă \vec{B} . Atâta timp cât conductorul și câmpul sunt în repaus unul față de altul, conductorul nu va sesiza prezența câmpului magnetic (Fig.1.4.a). Dacă conductorul se deplasează perpendicular pe liniile inducției magnetice B (Fig.1.4.b), cu viteza constantă \vec{v} , în conductor se induce o t.e.m. scalară e , dată de produsul mixt:

$$e = \vec{l} \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1-2)$$

în care l este lungimea conductorului care se deplasează în câmpul magnetic de inducție B . Dacă conductorul se închide în afara spațiului în care este câmpul magnetic, astfel încât să se formeze un circuit închis, în acest circuit va circula un curent, al cărui sens va fi același cu cel al t.e.m. induse (Fig.1.4.c), deoarece această tensiune creează curentul electric. Din interacțiunea curentului i cu câmpul magnetic exterior rezultă o forță electromagnetică \vec{F} , care se exercită asupra conductorului, forță dată de produsul mixt:

$$\vec{F} = i \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) \quad (1-3)$$

Forța electromagnetică are un sens ce se determină cu ajutorul regulii produsului vectorial și, după cum se vede din Fig.1.4.c, acest sens este opus sensului de deplasare al conductorului în câmp. Prin urmare, forța electromagnetică se opune forței mecanice aplicate din exterior.

Sistemul electromecanic în care curentul are sensul t.e.m. induse, iar forța electromagnetică se opune vitezei v (este rezistentă), se numește sistem