

Claudia Popescu
Alexandru Hedes
Ovidiu Craiu
Cristinel Mihalache

Proiectarea asistată de calculator în ingineria electrică



Editura Academiei Oamenilor de Știință din România
București
2011

CUPRINS

Capitolul 1 ELEMENTE DE BAZĂ ÎN PROIECTAREA SISTEMELOR ELECTRICE

1.1. Introducere	7
1.2. Descrierea generală a sistemelor electrice reprezentative	8
1.3. Materiale utilizate în construcția sistemelor electrice	11
1.4. Circuite electrice și magnetice	15
1.5. Solicitări electromagnetice și tipuri de pierderi	16

Capitolul 2 ELEMENTE DE DIMENSIONARE ȘI OPTIMIZARE ÎN INGINERIA ELECTRICĂ

2.1. Introducere	21
2.2. Proiectarea optimă. Probleme de analiză și sinteză	22
2.3. Metode de dimensionare și analiză a sistemelor electrice	24
2.4. Criterii tehnico-economice și constrângeri în proiectarea optimă a sistemelor electrice	25
2.5. Algoritmi de optimizare numerică	26

Capitolul 3 UTILIZAREA MDF ȘI MEF PENTRU REZOLVAREA PROBLEMELOR DE CÂMP ELECTROMAGNETIC ȘI TERMIC ÎN ECHIPAMENTELE ELECTRICE

3.1. Metode numerice utilizate la soluționarea problemelor de câmp electromagnetic și termic	33
3.2. Modele diferențiale ale câmpului electromagnetic exprimate în potențiale scalare și vectoriale	36
3.3. Modele diferențiale ale câmpului termic	41
3.4. Calculul forțelor în câmp magnetic staționar	41
3.5. Calculul cuplului dezvoltat în echipamentele electrice cu armături în mișcare utilizând MEF.	43

Capitolul 4 ASPECTE PRIVIND PROIECTAREA ÎN DOMENIUL ELECTRONICII DE PUTERE ȘI SISTEMELOR INTELIGENTE DE ACȚIONARE ELECTRICĂ

4.1. Generalități privind convertoarele statice de putere	45
4.2. Principii de funcționare ale principalelor tipuri de convertoare statice	47
4.3. Elemente de modelare a convertoarelor statice utilizând software dedicat: PSIM, PSPICE	56

Capitolul 5 PROIECTAREA ASISTATĂ DE CALCULATOR A UNEI
MAȘINI ELECTRICE, UTILIZÂND METODE ANALITICE

5.1. Noțiuni introductive	59
5.2. Etapele proiectării transformatorului electric de putere	62
5.3 Schema de principiu pentru conceperea algoritmului de calcul	70

Capitolul 6 ELEMENTE DE STANDARDIZARE ÎN INGINERIA
ELECTRICĂ

6.1. Definiții. Obiectivele standardizării și organisme de standardizare	73
6.2. Tipuri de standarde. Etapele standardizării	75
6.3. Standarde privind sistemele electrice	79
6.4. Conceptul de „eco – design” și standarde aferente	82

Capitolul 1

ELEMENTE DE BAZĂ ÎN PROIECTAREA SISTEMELOR ELECTRICE

1.1. Introducere

Prin sistem electric se înțelege un sistem a cărui funcționare implică într-o formă sau alta utilizarea energiei electrice. Într-o societate modernă sistemele electrice se întâlnesc practic în toate domeniile de activitate, începând cu sisteme de mare putere, de ordinul sutelor de megawați (ex. hidro sau turbogeneratoare electrice ce echipează marile centrale electrice, transformatoare din sistemul electroenergetic etc.) și încheind cu microsiseme electrice cu puteri de ordinul miliwaților (ex. circuite electronice, micromotoare, senzori și traductoare etc.).

Din varietatea covârșitoare a sistemelor electrice ce diferă prin configurație, structură, destinație și altele, lucrarea de față va acorda atenție exclusiv sistemelor electrice clasice, întrucât acestea stau la baza funcționării unui număr foarte important de echipamente complexe întâlnite în peisajul cotidian. Prin sisteme electrice clasice înțelegem transformatoarele, mașinile și acționările electrice.

Provocările tehnologice actuale impun ca sistemele electrice să corespundă unor standarde tot mai ridicate ce presupun:

- Nivel înalt de performanță (ex. randament superior, cupluri ridicate în cazul mașinilor electrice, turații foarte mici sau foarte mari, comandă flexibilă, etc.),
- Fiabilitate ridicată,
- Volum redus,
- Preț competitiv etc.

Proiectarea și optimizarea constructiv-funcțională a mașinilor și acționărilor electrice reprezintă în contextul intensificării concurenței economice o preocupare continuă a inginerilor specialiști, evoluția în acest domeniu fiind influențată major de apariția de:

- Noi materiale cu proprietăți superioare,
- Noi tehnologii de prelucrare și de fabricație,
- Noi sisteme electronice de comandă ale mașinilor ce permit controlul mișcării în timp real la niveluri de putere tot mai ridicate,
- Noi metode numerice de calcul, analiză și optimizare, asistate în întregime de calculator, ce permit estimarea cu precizie a performanțelor prototipurilor.

În trecut proiectarea sistemelor electrice avea la bază mai mult experiența practică, flerul, respectiv anumite formule de calcul analitic simple, valabile în

ipoteze simplificatoare. Modelele de calcul erau ușor de rulat, dar imprecise, necesitând în multe cazuri realizarea unui număr important de prototipuri.

Dezvoltarea fără precedent a tehnicii de calcul din ultimele decenii a stimulat dezvoltarea de pachete de programe profesionale de calcul numeric cu nivel ridicat de generalitate și precizie, capabile să ia în considerare aspecte complexe întâlnite în funcționarea sistemelor electrice, precum neliniarități magnetice, armonici de dantură, cuplaje câmp-circuit-mișcare-comandă etc. Prin calcul numeric pot fi tratate fenomene tot mai complexe ce fac apel la cuplaje multifizică de tipul electromagnetism – transfer de căldură– hidrodinamică, electromagnetism – deformare, evident cu prețul unor eforturi de calcul tot mai importante. Pachetele de programe de calcul numeric actuale au în general la bază modele de circuit, modele de câmp, respectiv modele hibride, de tip câmp-circuit.

Utilizarea noilor mijloace de investigație numerică permite estimarea cu un grad mai ridicat de precizie a performanțelor echipamentului, în condiții tot mai apropiate de realitate, asigurând astfel premisele unei proiectări eficiente. Calculul numeric precis permite reducerea numărului de prototipuri executate necesare pentru identificarea soluției optime, realizându-se astfel economii importante privind cheltuielile materiale și de personal.

1.2. Descrierea generală a sistemelor electrice reprezentative

Lucrarea de față abordează exclusiv sistemele electrice clasice reprezentate de transformatoare, mașini și acționări electrice.

1.2.1. Transformatorul electric

Transformatorul electric reprezintă un convertor electromagnetic static, ce asigură conversia parametrilor energiei electrice de curent alternativ, tensiune și frecvență, în scopul adaptării acestora la cerințele consumatorului. În mod tradițional transformatorul este considerat o categorie aparte de mașină electrică, teoria transformatorului electric reprezentând un punct de plecare pentru descrierea funcționării mașinilor de curent alternativ.

Transformatoarele electrice se împart în mai multe categorii după anumite criterii precum *numărul de faze* (transformatoare monofazate sau trifazate), *modul de răcire* (transformatoare uscate sau cu răcire în ulei), *după destinație* (transformatoare de putere, transformatoare de măsură, transformatoare speciale) etc.

În Fig. 1.1. sunt prezentate câteva exemple de transformatoare electrice, unul monofazat uscat, iar celălalt trifazat. Se pot identifica elementele constructive de

bază, precum înfășurările, miezul magnetic realizat din tole, sistemul de consolidare mecanică, bornele de alimentare, etc.

1.2.2. Mașina electrică

Mașina electrică este un convertor electromecanic ce transformă energia electrică în energie mecanică atunci când funcționează în regim de motor, sau invers, energia mecanică în energie electrică atunci când funcționează în regim de generator. Mașinile electrice sunt în mod natural reversibile, fără a necesita în acest sens modificări constructive.

Transformările energetice ce au loc în mașina electrică se desfășoară prin intermediul câmpului magnetic care se închide prin circuitul magnetic al mașinii.

Câmpul magnetic poate fi produs de către:

- Magneți permanenți (excitație cu magneți permanenți),
- Electromagneți (excitație electromagnetică prin intermediul curenților ce parcurg înfășurările mașinii).



a) transformator monofazat



b) transformator trifazat

Figura 1.1: Exemple de transformatoare electrice.

Mașinile electrice se clasifică funcție de mai multe criterii. După tipul curentului distingem mașini de curent continuu, respectiv mașini de curent alternativ (mașini asincrone, mașini sincrone, etc.). În funcție de tipul constructiv mașinile se clasifică în mașini de construcție normală cu rotor interior și mașini de construcție inversată cu rotor exterior. După tipul mișcării armăturii mobile distingem mașini rotative și mașini liniare. În funcție de orientarea fluxului magnetic mașinile sunt cu flux magnetic radial, axial sau transversal. La rândul lor mașinile de curent alternativ se pot clasifica funcție de numărul de faze în mașini monofazate, bifazate, trifazate și polifazate, cele mai utilizate fiind cele trifazate.

În mod uzual mașinile electrice se compun din două părți principale, *statorul* (partea fixă) și *rotorul* (partea mobilă), cele două părți fiind separate de un strat de aer denumit *întrefier*.

Statorul include miezul magnetic statoric (realizat din tole din oțel magnetic la mașinile de curent alternativ sau din oțel masiv la mașinile de curent continuu), sistemul de înfășurări (realizate din conductor de cupru izolat), carcasa, cutia de borne, sistemul de prindere, scuturile frontale etc.

Rotorul este alcătuit din miezul magnetic rotoric (realizat din tole din oțel magnetic sau din oțel masiv), sistemul de înfășurări, arbore, lagăre, etc.

Elementele constructive principale ale mașinii de curent continuu, respectiv a mașinii asincrone (mașină de curent alternativ) sunt prezentate în Fig. 1.2.

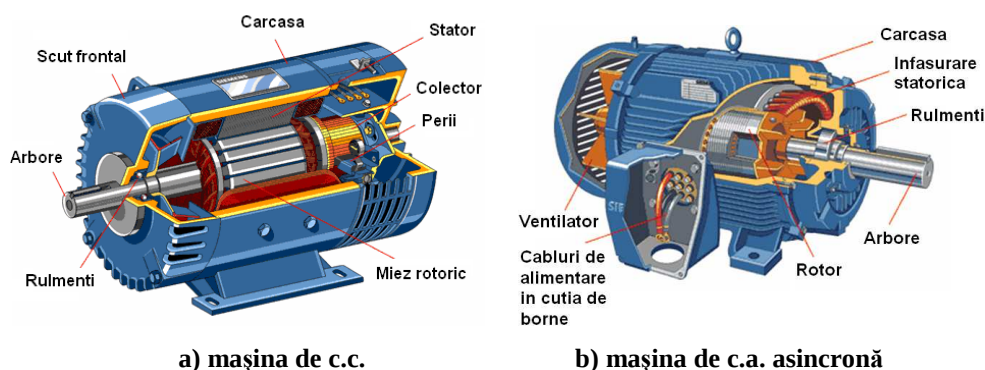


Figura 1.2: Elemente componente ale mașinilor electrice.

1.2.3. Sistemul de acționare electrică

Sistemul de acționare electrică reprezintă un ansamblu de subsisteme ce asigură transformarea energiei electrice în energie mecanică asigurând controlul pe cale electrică a energiei mecanice obținute. În mod clasic un sistem de acționare electrică este compus din sursa de alimentare, mașina electrică (element de execuție), blocul de control, sistemul de transmisie a mișcării, respectiv din mecanismul antrenat (sarcină), Fig. 1.3. Deseori sistemele de acționare electrică includ în mod implicit și alte componente precum aparate electrice de comutație, sisteme de protecție, senzori și traductoare etc.

Sistemele de comandă a mașinilor electrice sunt extrem de variate și depind de tipul mașinii antrenante, de mărimile comandate, de performanțele impuse, etc. Cele mai uzuale sisteme de acționare electrică vizează reglarea vitezei motoarelor electrice antrenate.

În funcție de tipul motorului electric sistemele de acționare pot utiliza diferite metode de reglare a vitezei. De pildă reglarea vitezei mașinilor de curent continuu se poate realiza prin variația tensiunii de alimentare, prin variația rezistenței din circuitul indusului sau prin slăbire de câmp.

Reglarea turației mașinilor asincrone se asigură prin mai multe metode precum: prin modificarea numărului de perechi de poli (utilizând înfășurări speciale), prin modificarea frecvenței tensiunii de alimentare (utilizând convertizoare de frecvență la $U/f = \text{ct.}$), prin modificarea tensiunii de alimentare, prin modificarea rezistenței circuitului rotoric (la mașinile cu rotor bobinat) etc.

În practică, acționarea mașinilor electrice poate avea la bază scheme mai complexe având la bază algoritmi de reglare vectorială cu orientare după fluxul rotoric, statoric, etc.

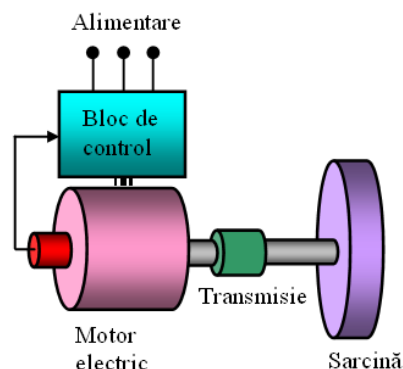


Figura 1.3: Schema de principiu a unui sistem de acționare electrică.

1.3. Materiale utilizate în construcția sistemelor electrice

Materialele utilizate în construcția sistemelor electrice se aleg așa încât să permită obținerea unui produs finit care să corespundă din punct de vedere funcțional, tehnic și economic cerințelor impuse.

În construcția sistemelor electrice se întâlnesc mai multe tipuri de materiale ce sunt utilizate în raport cu proprietățile lor specifice:

- Materiale magnetice (tole din oțel magnetic, ferite etc.),
- Materiale electroconductoare (cupru, aluminiu etc.),
- Materiale semiconductoare (siliciu, germaniu etc.),
- Materiale electroizolante (fibre textile, polietilenă etc.),
- Materiale pentru componente mecanice (oțelul, fonta etc.).

Alegerea materialelor utilizate în construcția sistemelor electrice se efectuează așa încât să respecte anumite criterii, precum:

- Să admită solicitări cât mai mari (electrice, magnetice, termice, mecanice),
- Să reziste în exploatare o perioadă cât mai îndelungată (fiabilitate ridicată),
- Să se poată prelucra ușor (proces tehnologic simple),
- Să nu fie materiale deficitare a căror producție să necesite consum energetic ridicat sau materii prime scumpe etc.

1.3.1. Materiale feromagnetice

Din punct de vedere magnetic, materialele se împart în mai multe categorii precum: materiale diamagnetice $\mu_r < 1$, materiale paramagnetice $\mu_r > 1$, materiale feromagnetice $\mu_r \gg 1$ etc. Cu μ_r se notează permeabilitatea magnetică relativă.

Între inducția magnetică B și intensitatea câmpului magnetic H există relația constitutivă $B = \mu_r \mu_0 H$.

În componența sistemelor electrice se întâlnesc frecvent miezuri magnetice sau circuite magnetice. Acestea sunt construite din materiale feromagnetice și au rolul de canalizare a fluxului magnetic spre zonele de interes. De pildă în cazul transformatoarelor electrice miezul magnetic asigură un cuplaj magnetic cât mai strâns între înfășurările echipamentului. În cazul mașinilor electrice miezurile magnetice asigură un cuplaj magnetic strâns între cele două armături stator și rotor.

Circuitele magnetice ale mașinilor electrice pot fi parcurse de *flux magnetic constant în timp* (ex. miezul magnetic inductor la mașina sincronă), respectiv de *flux magnetic variabil în timp* (ex. miezurile statoric sau rotoric la mașina asincronă).

Energia necesară pentru a crea într-un volum V un câmp magnetic de inducție magnetică impusă B_i (sau un flux magnetic dat Ψ) are valoarea:

$$W = V \cdot B_i \cdot H/2 \quad (1.1)$$

unde H reprezintă intensitatea câmpului magnetic.

Se observă în Fig. 1.4 că energia necesară pentru a produce câmpul magnetic de inducție B_i este mult mai mare în aer decât în miezuri feromagnetice. Prin urmare spațiile de aer în circuitele magnetice ale mașinilor electrice trebuie limitate.

O caracteristică de bază la materialele feromagnetice este dependența inducției magnetice B de intensitatea câmpului magnetic H . Dependența $B = f(H)$ se numește și curbă de magnetizare și are forma unui ciclu de histerezis, Fig. 1.5.

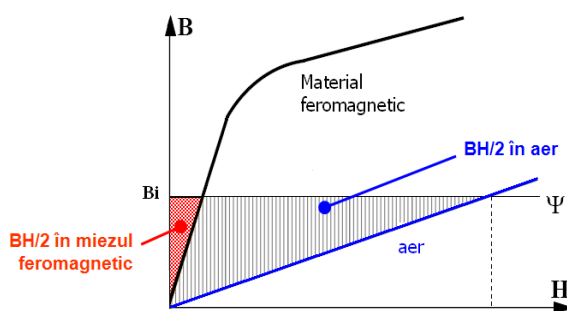


Figura 1.4: Densitatea de energie magnetică în aer și în miezuri magnetice.

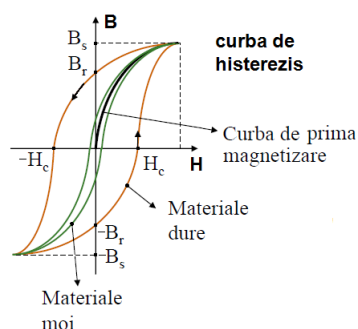


Figura 1.5: Curba de histerezis la materiale feromagnetice.

În Fig. 1.5 s-au făcut notațiile următoare: B_s [T] este inducția magnetică la saturație, H_c [A/m] este câmpul magnetic coercitiv, iar B_r [T] este inducția remanentă. În funcție de alura curbei de histerezis, Fig. 1.6, materialele feromagnetice se împart în: materiale magnetice moi (miezuri magnetice) și materiale magnetice dure (magneți permanenți).

Pentru o bună utilizare în construcția circuitelor magnetice ale mașinilor electrice, proprietățile materialelor feromagnetice trebuie să respecte criterii precum: permeabilitate magnetică relativă μ_r cât mai mare, inducție la saturație B_s cât mai ridicată, pierderi specifice cât mai reduse (prin histerezis și prin curenți turbionari) în cazul miezurilor cu flux magnetic variabil în timp, tehnologie de realizare cât mai ieftină, rezistență mecanică ridicată.

Materialele utilizate la construcția miezurilor cu flux constant sunt de regulă oțeluri laminate cu proprietăți magnetice, cu grosimi între 0.5 – 50 mm, respectiv oțeluri și fonte turnate sau oțeluri forjate.

Miezurile cu flux magnetic variabil se construiesc de regulă din tole din tablă silicioasă (fier-carbon-siliciu) laminată la cald sau la rece, cu cristale orientate (de regulă la transformatoare) sau neorientate (la mașini rotative) uzual cu grosimi de 0.5 mm, izolate cu lacuri sau cu oxizi, feritele, respectiv materiale magnetice moi compozite (ultimele două tipuri de materiale se folosesc de regulă la frecvențe ridicate).

1.3.2. Materiale electroconductoare

Materialele utilizate pentru înfășurări și pentru circuite electrice trebuie în primul rând să aibă o rezistivitate electrică cât mai mică pentru reducerea pierderilor Joule P_j exprimate prin relația:

$$P_j = RI^2 = (\rho L/S)I^2 \quad (1.2)$$

unde R reprezintă rezistența circuitului, I valoarea efectivă a curentului

Cele mai utilizate materiale electroconductoare utilizate în construcția sistemelor electrice sunt cuprul (Cu) și aluminiul (Al). Acestea se folosesc atât în stare pură cât și sub formă de aliaje: alama, bronzul, staniul, siluminiul etc.

Circuitele electrice ale sistemelor electrice, respectiv înfășurările mașinilor și transformatoarelor electrice se realizează de regulă din conductor de bobinaj din Al sau Cu. Acestea sunt standardizate, având formă rotundă sau profilată și se folosesc în varianta izolată (email, fibre textile etc.).

Coliviile rotorice la mașinile asincrone se construiesc uzual din Al sau Cu, prin turnare sub presiune sau prin sudarea barelor rotorice de inelele frontale.

Pentru conductoare supuse la eforturi mecanice importante se alege o variantă de material cu grad mai ridicat de ecruisare.

Câteva proprietăți importante ale Cu și Al la temperatura de 20 °C sunt prezentate sintetic mai jos:

Cupru (Cu):

Rezistivitate electrică: $\rho = 1.784 \cdot 10^{-8} \Omega m$;

Densitate: $\gamma = 8890 \text{ kg/m}^3$;

Coeficientul de temperatură: $\alpha = 3.81 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;