Claudia Popescu

Alexandru Hedes

Ovidiu Craiu

Cristinel Mihalache

Proiectarea asistată de calculator în ingineria electrică

Editura Academiei Oamenilor de Ştiinţă din România

Bucureşti

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 construcţia sistemelor electrice 11
1.4. Circuite electrice şi magnetice 15
1.5. Solicitări electromagnetice şi tipuri de pierderi 16

Capitolul 2 ELEMENTE DE DIMENSIONARE ŞI OPTIMIZARE ÎN INGINERIA ELECTRICĂ
2.1. Introducere 21
2.2. Proiectarea optimală. Probleme de analiză şi sinteză 22
2.3. Metode de dimensionare şi analiză a sistemelor electrice 24
2.4. Criterii tehnico-economice şi constrângeri în proiectarea optimală a sistemelor electrice 25
2.5. Algoritmi de optimizare numerică 26

Capitolul 3 UTILIZAREA MDF ŞI MEF PENTRU REZOLVAREA PROBLEMELOR DE CÂMP ELECTROMAGNETIC ŞI TERMIC ÎN ECHIPAMENTELE ELECTRICE
3.1. Metode numerice utilizate la soluţionarea problemelor de câmp electromagnetic şi termic 33
3.2. Modele diferenţiale ale câmpului electromagnetic exprimate în potenţiale scalare şi vectoriale 36
3.3. Modele diferenţiale ale câmpului termic 41
3.4. Calculul forţelor în câmp magnetic staţionar 41
3.5. Calculul cuplului dezvoltat în echipamentele electrice cu armături în mişcare utilizând MEF. 43

Capitolul 4 ASPECTE PRIVIND PROIECTAREA ÎN DOMENIUL ELECTRONICII DE PUTERE ŞI SISTEMELOR INTELIGENTE DE ACŢIONARE ELECTRICĂ
4.1. Generalităţi privind convertoarele statice de putere 45
4.2. Principii de funcţionare 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 MAŞINI 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. Definiţii. Obiectivele standardizării şi 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” şi standarde aferente 82

Capitolul 1

ELEMENTE DE BAZĂ ÎN PROIECTAREA SISTEMELOR ELECTRICE

1.1. Introducere

Prin sistem electric se înţelege un sistem a cărui funcţionare 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 megawaţi (ex. hidro sau turbogeneratoare electrice ce echipează marile centrale electrice, transformatoare din sistemul electroenergetic etc.) şi încheind cu microsisteme electrice cu puteri de ordinul miliwaţilor (ex. circuite electronice, micromotoare, senzori şi traductoare etc.).

Din varietatea covârşitoare a sistemelor electrice ce diferă prin configuraţie, structură, destinaţie şi altele, lucrarea de faţă va acorda atenţie exclusiv sistemelor electrice clasice, întrucât acestea stau la baza funcţionării unui număr foarte important de echipamente complexe întâlnite în peisajul cotidian. Prin sisteme electrice clasice înţelegem transformatoarele, maşinile şi acţionările electrice.

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

- Nivel înalt de performanţă (ex. randament superior, cupluri ridicate în cazul maşinilor electrice, turaţii foarte mici sau foarte mari, comandă flexibilă, etc.),
- Fiabilitate ridicată,
- Volum redus,
- Preţ competitiv etc.

Proiectarea şi optimizarea constructiv-funcţională a maşinilor şi acţionărilor electrice reprezintă în contextul intensificării concurenţei economice o preocupare continuă a inginerilor specialişti, evoluţia în acest domeniu fiind influenţată major de apariţia de:

- Noi materiale cu proprietăţi superioare,
- Noi tehnologii de prelucrare şi de fabricaţie,
- Noi sisteme electronice de comandă ale maşinilor ce permit controlul mişcării în timp real la niveluri de putere tot mai ridicate,
- Noi metode numerice de calcul, analiză şi optimizare, asistate în întregime de calculator, ce permit estimarea cu precizie a performanţelor prototipurilor.

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

ipoteze simplificatoare. Modelele de calcul erau uşor 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 şi precizie, capabile să ia în considerare aspecte complexe întâlnite în funcţionarea sistemelor electrice, precum neliniarităţi magnetice, armonici de dantură, cuplaje câmp-circuit-mişcare-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 preţul 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 investigaţie numerică permite estimarea cu un grad mai ridicat de precizie a performanţelor echipamentului, în condiţii tot mai apropiate de realitate, asigurând astfel premisele unei proiectări eficiente. Calculul numeric precis permite reducerea numărului de prototipuri executate necesare pentru identificarea soluţiei optime, realizându-se astfel economii importante privind cheltuielile materiale şi de personal.

1.2. Descrierea generală a sistemelor electrice reprezentative

Lucrarea de faţă abordează exclusiv sistemele electrice clasice reprezentate de transformatoare, maşini şi acţionări electrice.

1.2.1. Transformatorul electric

Transformatorul electric reprezintă un convertor electromagnetic static, ce asigură conversia parametrilor energiei electrice de curent alternativ, tensiune şi frecvenţă, în scopul adaptării acestora la cerinţele consumatorului. În mod tradiţional transformatorul este considerat o categorie aparte de maşină electrică, teoria transformatorului electric reprezentând un punct de plecare pentru descrierea funcţionării maşinilor 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 destinaţie* (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 înfăşurările, miezul magnetic realizat din tole, sistemul de consolidare mecanică, bornele de alimentare, etc.

1.2.2. Maşina electrică

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

Transformările energetice ce au loc în maşina electrică se desfăşoară prin intermediul câmpului magnetic care se închide prin circuitul magnetic al maşinii.

Câmpul magnetic poate fi produs de către:

- Magneţi permanenţi (excitaţie cu magneţi permanenţi),
- Electromagneţi (excitaţie electromagnetică prin intermediul curenţilor ce parcurg înfăşurările maşinii).

a) transformator monofazat **b) transformator trifazat**

Figura 1.1: Exemple de transformatoare electrice.

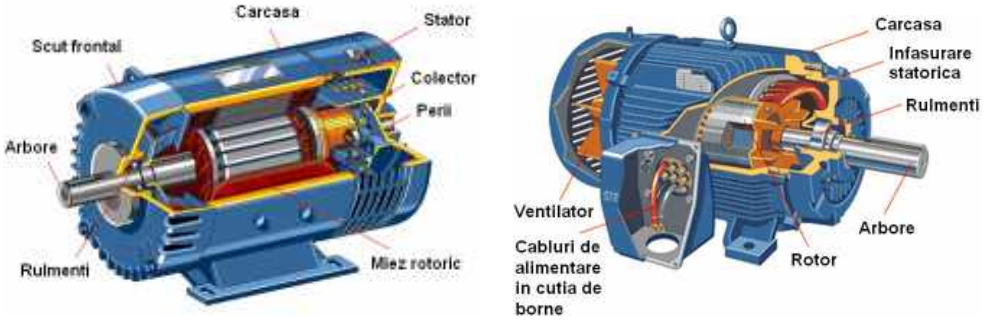
Maşinile electrice se clasifică funcţie de mai multe criterii. După tipul curentului distingem maşini de curent continuu, respectiv maşini de curent alternativ (maşini asincrone, maşini sincrone, etc.). În funcţie de tipul constructiv maşinile se clasifică în maşini de construcţie normală cu rotor interior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

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

Statorul include miezul magnetic statoric (realizat din tole din oţel magnetic la maşinile de curent alternativ sau din oţel masiv la maşinile de curent continuu), sistemul de înfăşurări (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 oţel magnetic sau din oţel masiv), sistemul de înfăşurări, arbore, lagăre, etc.

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



a) maşina de c.c. **b) maşina de c.a. asincronă**

Figura 1.2: Elemente componente ale maşinilor electrice.

1.2.3. Sistemul de acţionare electrică

Sistemul de acţionare electrică reprezintă un ansamblu de subsisteme ce asigură transformarea energiei electrice în energie mecanică asigurând controlul pe cale electrică a energiei mecanice obţinute. În mod clasic un sistem de acţionare electrică este compus din sursa de alimentare, maşina electrică (element de execuţie), blocul de control, sistemul de transmisie a mişcării, respectiv din mecanismul antrenat (sarcină), Fig. 1.3. Deseori sistemele de acţionare electrică includ în mod implicit şi alte componente precum aparate electrice de comutaţie, sisteme de protecţie, senzori şi traductoare etc.

Sistemele de comandă a maşinilor electrice sunt extrem de variate şi depind de tipul maşinii antrenante, de mărimile comandate, de performanţele impuse, etc. Cele mai uzuale sisteme de acţionare electrică vizează reglarea vitezei motoarelor electrice antrenate.

În funcţie de tipul motorului electric sistemele de acţionare pot utiliza diferite metode de reglare a vitezei. De pildă reglarea vitezei maşinilor de curent continuu se poate realiza prin variaţia tensiunii de alimentare, prin variaţia rezistenţei din circuitul indusului sau prin slăbire de câmp.

Reglarea turației maşinilor asincrone se asigură prin mai multe metode precum: prin modificarea numărului de perechi de poli (utilizând înfăşurări speciale), prin modificarea frecvenței tensiunii de alimentare (utilizând convertizoare de frecvență la U/f = ct.), prin modificarea tensiunii de alimentare, prin modificarea rezistenței circuitului rotoric (la maşinile cu rotor bobinat) etc.

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

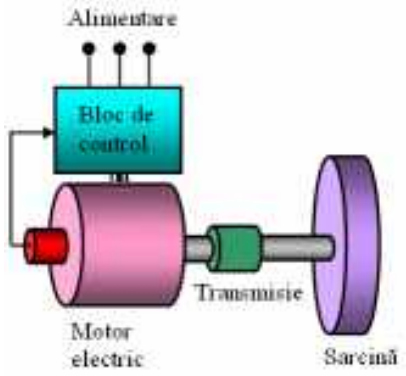


Figura 1.3: Schema de principiu a unui sistem de acționare electrică.

1.3. Materiale utilizate în construcția sistemelor electrice

Materialele utilizate în construcția sistemelor electrice se aleg aşa încât să permită obținerea unui produs finit care să corespundă din punct de vedere funcțional, tehnic şi 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 aşa 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 uşor (procese tehnologice 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 $\alpha_r < 1$, materiale paramagnetice $\alpha_r > 1$, materiale feromagnetice $\alpha_r >> 1$ etc. Cu α_r se notează permeabilitatea magnetică relativă.

Între inducţia magnetică B şi intensitatea câmpului magnetic H există relaţia constitutivă $B = \alpha_r \alpha_0 H$.

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

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

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

$$W = V \cdot Bi \cdot H/2 \qquad (1.1)$$

unde H reprezintă intensitatea câmpului magnetic.

Se observă în Fig. 1.4 că energia necesară pentru a produce câmpul magnetic de inducţie Bi este mult mai mare în aer decât în miezuri feromagnetice. Prin urmare spaţiile de aer în circuitele magnetice ale maşinilor electrice trebuiesc limitate.

O caracteristică de bază la materialele feromagnetice este dependenţa inducţiei magnetice B de intensitatea câmpului magnetic H. Dependenţa B = f (H) se numeşte şi curbă de magnetizare şi are forma unui ciclu de histerezis, Fig. 1.5.

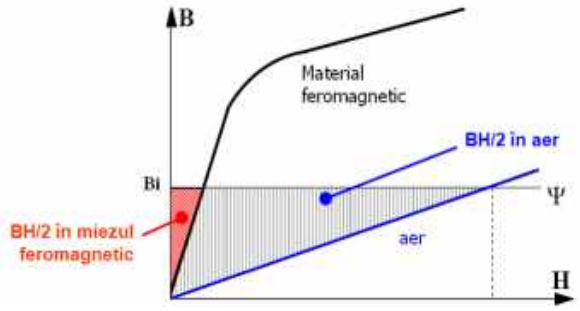


Figura 1.4: Densitatea de energie magnetică în aer şi în miezuri magnetice.

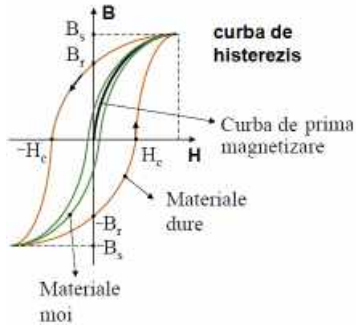


Figura 1.5: Curba de histerezis la materiale feromagnetice.

În Fig. 1.5 s-au făcut notaţiile următoare: Bs [T] este inducţia magnetică la saturaţie, Hc [A/m] este câmpul magnetic coercitiv, iar Br [T] este inducţia remanentă. În funcţie de alura curbei de histerezis, Fig. 1.6, materialele feromagnetice se împart în: materiale magnetic moi (miezuri magnetice) şi materiale magnetic dure (magneţi permanenţi).

Pentru o bună utilizare în construcția circuitelor magnetice ale maşinilor electrice, proprietățile materialelor feromagnetice trebuie să respecte criterii precum: permeabilitate magnetică relativă $\propto_r$ cât mai mare, inducție la saturație Bs cât mai ridicată, pierderi specifice cât mai reduse (prin histerezis şi 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 şi 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 maşini rotative) uzual cu grosimi de 0.5 mm, izolate cu lacuri sau cu oxizi, feritele, respectiv materiale magnetic moi compozite (ultimele două tipuri de materiale se folosesc de regulă la frecvențe ridicate).

1.3.2. Materiale electroconductoare

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

$$P_J = RI^2 = (\rho L/S)I^2 \qquad (1.2)$$

unde R reprezintă rezistența circuitului, I valoarea efectivă a curentului

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

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

Coliviile rotorice la maşinile 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 şi Al la temperatura de 20 °C sunt prezentate sintetic mai jos:

Cupru (Cu):

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

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

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