

UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA
FACULTATEA DE INGINERIE ÎN ELECTROMECHANICĂ, MEDIU
ȘI INFORMATICĂ INDUSTRIALĂ

OPTIMIZAREA TEMATICII DE PROIECTARE ȘI
PROIECTAREA MOTORULUI ASINCRON
PENTRU TRACȚIUNE FERROVIARĂ

- Rezumat -

Doctorand: Ing. Mihail RĂDULESCU

Conducător științific: Prof. univ. dr. ing. Aurel CÂMPEANU

CRAIOVA

- 2010 -

CUPRINS

INTRODUCERE	5
CAP.1. STADIUL ACTUAL AL UTILIZĂRII MOTOARELOR ASINCRONE ÎN TRACȚIUNEA ELECTRICĂ.....	6
1.1. Cerințe impuse motoarelor de tracțiune	6
1.2. Motoare asincrone folosite în tracțiunea electrică și diesel electrică	7
1.2.1. Variante constructive de motoare asincrone de tracțiune	8
1.2.2. Stadiul utilizării motoarelor asincrone de tracțiune pe plan mondial	11
1.2.3. Stadiul utilizării motoarelor asincrone de tracțiune în România	14
1.3. Sisteme de montaj al motoarelor asincrone folosite pe locomotive	15
1.3.1. Motor nesuspendat	17
1.3.2. Motorul semisuspendat	17
1.3.3. Motorul complet suspendat	18
CAP. 2. CONVERTOARE STATICE.....	22
2.1. Reglarea tensiunii de ieșire a convertoarelor	22
2.1.1. Modularea în amplitudine a impulsurilor tensiunii de ieșire	22
2.1.2. Modularea în durată a tensiunii de ieșire	22
2.2. Metode de comandă ale invertoarelor	24
2.3. Invertoare de tensiune multinivel	25
2.3.1. Principiu, schema de principiu, forme de undă	25
2.3.2. Principalii parametri ai convertoarelor folosite în tracțiune.....	28
CAP. 3. CARACTERISTICI DE DEFINIȚIE PENTRU MOTORUL ASINCRON DE TRACȚIUNE	33
3.1. Reglajul vitezei în condițiile menținerii constante a fluxului în întrefier	33
CAP. 4. STUDIU DE FEZABILITATE PRIVIND MODERNIZAREA LOCOMOTIVEI DIESEL ELECTRICE.....	40
4.1. Considerații generale	40
4.2. Cerințe tehnice impuse la modernizarea locomotivei diesel electrice	43
4.2.1. Principale date tehnice ale locomotivei	43
4.2.2. Performanțe de remorcare impuse	45
4.2.3. Bilanțul de putere al locomotivei.....	45
4.2.4. Stabilirea datelor nominale pentru motorul asincron de tracțiune.....	45
4.2.5. Caracteristica de tracțiune a locomotivei.....	47
CAP. 5. PROIECTAREA OPTIMALĂ A MOTORULUI ASINCRON DE TRACȚIUNE DE LA LOCOMOTIVA DIESEL ELECTRICA MODERNIZATĂ	49
5.1. Analiza motoarelor de tracțiune și metodica proiectării	49
5.2. Analiza metodelor de proiectare optimală la motoarelor de tracțiune	50

5.3. Formularea problemei de optim pentru motoarele asincrone de tracțiune.....	52
5.3.1. Modelul matematic al motorului asincron de tracțiune	53
5.4. Criterii de optimizare	65
5.4.1 Funcția obiectiv și restricțiile sale	65
5.4.2 Variabilele funcției obiectiv.....	66
5.4.3. Calculul minimului funcției obiectiv	67
5.5. Rezultate și concluzii privind optimizarea proiectării motoarelor asincrone.....	68
5.5.1 Aspecte avute în vedere la proiectarea optimă a motoarelor asincrone.....	69
5.5.2. Optimizarea dimensiunilor constructive	76
5.5.3. Simulări și rezultate experimentale.....	78
5.5.4. Aspecte privind funcționarea motorului de tracțiune alimentat de la un converor static	93
CAP. 6. MODELE MATEMATICE EVOLUATE PENTRU DETERMINAREA PRIN SIMULARE A COMPORTĂRII ÎN REGIM DINAMIC A MOTORULUI DE TRACTIUNE DIMENSIONAT	102
6.1. Determinări cantitative	103
6.1.1. Verificarea comportării motorului asincron proiectat la pornire	103
6.1.2. Efectul momentului de inerție asupra caracteristicilor de pornire	107
6.1.3. Verificarea solicitărilor electromagnetice și mecanice ale motorului asincron proiectat, supus unor regimuri dinamice particulare	110
CAP. 7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE	121
ANEXA DETERMINĂRI EXPERIMENTALE PE STAND	125
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ	135

Lucrarea de față vizează în primul rând identificarea principalilor parametri specifici utilizării mașinilor asincrone în tracțiunea feroviară.

S-a urmărit în principal realizarea unui fundament teoretic substanțial pentru definirea și analiza funcționării mașinii asincrone. În al doilea rând s-a realizat proiectarea unui motor destinat tracțiunii feroviare insistându-se pe optimizarea construcției și integrării practice într-un gabarit necesar adaptat boghiului de locomotivă existent.

S-au analizat, prin simulare, fenomenele din mașina asincronă precum și comportarea acesteia în cazul alimentării de la convertoare. Cum funcționarea mașinii este strâns legată de vehicul, proiectarea mașinii s-a făcut plecând de la condițiile impuse de vehicul.

Lucrarea este structurată în 7 capitole și acoperă întreaga arie de preocupări în domeniu, de la realizările practice românești și internaționale până la analiza teoretică a regimurilor de funcționare ale mașinii asincrone.

Capitolul 1. STADIUL ACTUAL AL UTILIZĂRII MOTOARELOR ASINCRONE ÎN TRACȚIUNEA ELECTRICĂ

Acționările electrice ale vehiculelor feroviare realizate cu motoare asincrone au stabilit pe piața de tracțiune feroviară cel mai bun sistem tehnic disponibil pe scară largă cunoscut până în prezent. Numeroasele vehicule și tipuri apărute după anii 70, au demonstrat supremația acționărilor cu motoare asincrone și convertoare electronice în fața acționărilor “clasice” de curent continuu.

Funcționarea motoarelor de tracțiune în exploatare are loc în condiții deosebit de grele, din cauza sarcinii de tracțiune care este foarte variabilă chiar la același tren, datorită declivităților, curbelor, opririlor și a demarărilor. De aceea, electromotorul trebuie să aibă o capacitate mare de supraîncărcare, față de puterea lui medie, pentru a putea face față tracțiunii.

Motorul de tracțiune, osia sau roata motoare și transmisia mecanică constituie un ansamblu constructiv complex, în care parametrii transmisiei propriu-zise, parametrii electrici și construcția mecanică a motorului de tracțiune se condiționează reciproc. Construcția acestor elemente este definitorie pentru vehiculul de tracțiune și este determinată de o serie de elemente importante, cum sunt felul de antrenare a osiei motoare, modul de așezare a motoarelor de tracțiune pe vehicul, precum și modul de preluare a greutății motorului de tracțiune de către osia motoare. Din analiza soluțiilor existente rezultă soluțiile moderne adaptate realităților cotidiene.

În funcție de modul de preluare a greutății motorului de tracțiune de către osia motoare, acesta se construiește ca:

- motor nesuspendat,
- motor semisuspendat ,
- motor complet suspendat.

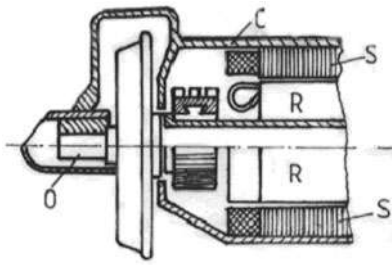


Figura 1. Motor axial nesuspendat secțiune longitudinală;
O-osie; R-rotor; S-stator; C-carcasă

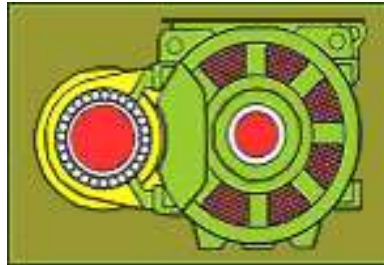


Figura 2. Secțiune transversală motor semisuspendat

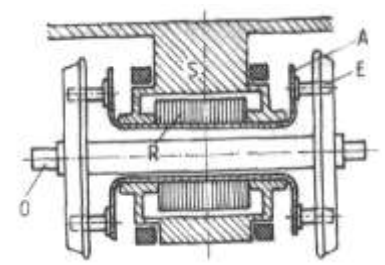


Figura 3. Schema de principiu a motorului axial suspendat:
O-osie; R-rotor; S-stator;
A-arbore gol; E-legături elastic

Astfel, soluția cu motor complet suspendat se folosește în special pentru viteze de deplasare mai mari de 160 km/h, față de vehiculele la care transmisia se poate face și cu sistem cardanic, metodă ce permite transmiterea de cupluri importante schimbând chiar axa după care se efectuează mișcarea vehiculului.

Capitolul 2. CONVERTOARE STATICE

În acest capitol sunt descrise și analizate sistemele de alimentare cu convertoare ale motoarelor asincrone. Convertorul static reprezintă elementul revoluționar care a permis ca mașina de inducție, a cărei caracteristică este rigidă, să devină în prezent principala mașină utilizată în tracțiunea feroviară. După prezentarea tipurilor de convertoare, precum și a metodele de comandă sunt analizate modalitățile de reglare a tensiunii de la ieșirea convertoarelor. Dintre metodele de de modulare sunt analizate modularea în durată sinusoidală, cunoscută și sub numele de principiul submodulării, și modularea precalculată, având drept scop eliminarea selectivă a armonicilor, reducerea pierderilor și pulsațiilor cuplului dezvoltat.

Pentru a diminua armonicile care apar la ieșirea invertoarelor, în tracțiunea feroviară se propun topologii de invertoare de tip multinivel, care asigură o undă de tensiune la iesirea invertoarelor apropiată de cea sinusoidală. În încheierea capitolului se analizează principalii parametri ai convertoarelor utilizare în tracțiune.

Capitolul 3. CARACTERISTICI DE DEFINIȚIE PENTRU MOTORUL ASINCRON DE TRACȚIUNE

Performanțelor de reglare ale vitezei mașinii asincrone, sunt analizate în condițiile menținerii constante a fluxului în întrefier. Pentru exprimarea modelului matematic al mașinii asincrone se prezintă principiul de funcționare al acesteia exprimat prin ecuații. Ecuațiile sunt scrise considerând rotorul atât imobil cât și în mișcare de rotație și sunt prezentate de asemenea schemele echivalente ale mașinii asincrone. O parte importantă a acestui capitol o reprezintă exprimarea cuplului electromagnetic, precum și a caracteristicilor mecanice. Reglarea vitezei mașinii asincrone, esențială în cazul tracțiunii feroviare, a fost abordată atât matematic – prin ecuații și diagrame cât și din punctul de vedere al conectării acesteia cu convertoare de tensiune și frecvență. Reglarea vitezei a fost realizată prin modificarea frecvenței tensiunii de alimentare, în acest mod se poate obține o variație a turației de sincronism și, în funcție de cuplul rezistent, se modifică turația rotorului în scurtcircuit.

Capitolul 4. STUDIU DE FEZABILITATE PRIVIND MODERNIZAREA LOCOMOTIVEI DIESEL ELECTRICE

În evoluția construcției vehiculelor de tracțiune feroviară se manifestă constant două tendințe principale: sporirea puterii instalate ca o consecință a necesităților de creștere a tonajelor remorcate și a vitezelor de mers cu reducerea greutateii vehiculului. Din analiza situației României din punct de vedere al disponibilității locomotivelor, din punct de vedere al consumurilor, al mentenanței dar și a costurilor rezultă că modernizarea parcului existent este soluția optimă pe termen scurt. Plecând de la datele tehnice ale locomotivei ce urmează a fi modernizată, împreună cu performanțele de remorcare impuse, din bilanțul de putere al locomotivei rezultă puterea nominală și maximă, cuplul nominal și maxim, turația nominală și cea maximă precum și diagrama forței de tracțiune.

Capitolul 5. PROIECTAREA OPTIMALĂ A MOTORULUI ASINCRON DE TRACȚIUNE DE LA LOCOMOTIVA DIESEL ELECTRICA MODERNIZATĂ

Metodologia de proiectare și proiectarea efectivă a unui motor asincron de tracțiune feroviară, trebuie să satisfacă: **criteriul funcțional**, în sensul realizării mașinii electrice cu anumite caracteristici tehnice impuse de beneficiar; **criteriul de siguranță**, în sensul asigurării unei comportări sigure a mașinii în exploatare în condiții normale și de suprasarcini de scurtă durată; **criteriul economic**, în sensul realizării mașinii la un preț de cost total minim având în vedere atât cheltuielile constructive cât și cele de exploatare.

După realizarea efectivă a proiectării „clasice” a mașinii de inducție, se propune în acest capitol o metodă de optimizare care poate constitui un criteriu unitar în determinarea univocă a soluției constructive optime, în fabricarea mașinilor electrice de inducție de uz general. Metoda este prezentată și analizată pe cazul unei mașini de inducție trifazate simetrice, cu întrefier constant.

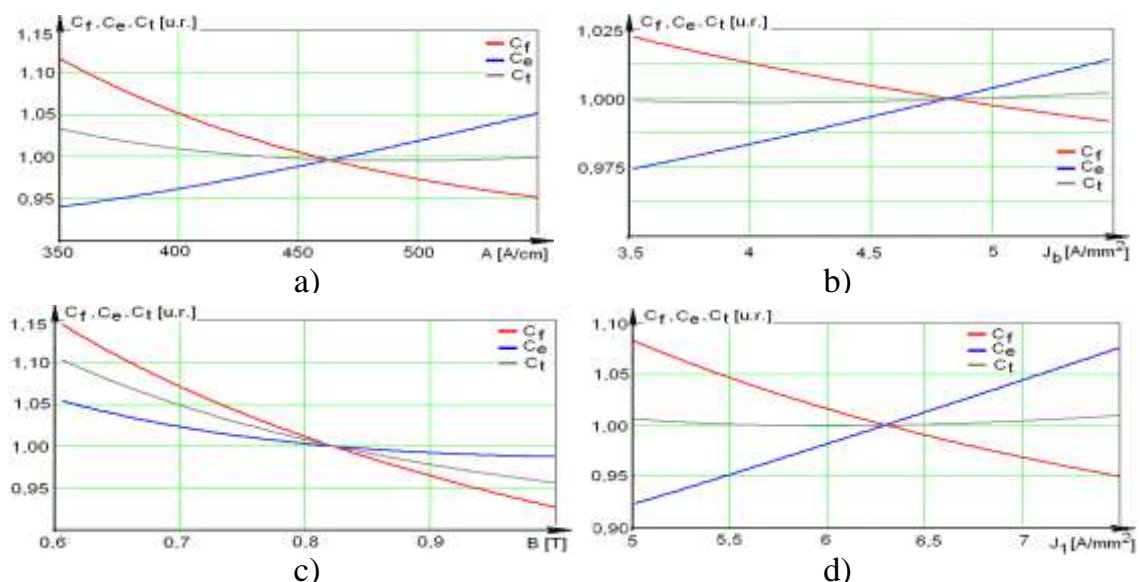


Fig. 5.15. Curbele de variație ale costurilor în raport de variabilele analizate:
a) pătura de curent; b) inducția magnetică din întrefier;
c) și d) densitățile de curent din înfășurările stator și rotor.

Pe baza studiului privind optimizarea în raport cu toate variabilele A , B , J_1 , J_b s-a făcut proiectarea optimală a motorului asincron de tracțiune considerând simultan cele patru variabile și criteriul cost total minim. Pentru optimizarea mașinii de inducție se folosește funcția obiectiv, variabilele funcției obiectiv și restricțiile sale.

În subcapitolul de simulări și rezultate experimentale, se analizează funcționarea în gol, în scurtcircuit și în sarcină a motorului de tracțiune, determinându-se caracteristicile acestuia prin metode numerice. De o importanță majoră este analiza comportării motorului asincron de tracțiune alimentat de la un convertor static de tensiune și frecvență. S-a realizat analiza numerică a regimului deformant, în cazul alimentării motorului asincron de la un convertor static de tensiune și frecvență și s-au comparat rezultatele teoretice cu cele experimentale determinate în regim sinusoidal.

Capitolul 6. MODELE MATEMATICE EVOLUATE PENTRU DETERMINAREA PRIN SIMULARE A COMPORTĂRII ÎN REGIM DINAMIC A MOTORULUI DE TRACȚIUNE DIMENSIONAT

În acest capitol sunt prezentate și interpretate rezultatele unor simulări semnificative care permit predeterminarea comportării motoarelor de tracțiune în procese dinamice date. Analiza are un caracter concret și privește motorul de tracțiune proiectat optimal, astfel încât soluțiile constructive finale să corespundă pe deplin cerințelor impuse de beneficiar.

Din întreaga analiză a proceselor dinamice, se constată în etapa lor cvasistationară, buna corespondență cu rezultatele obținute în proiectarea optimală a motorului considerat. Capitolul este împărțit în două părți, în prima parte sunt analizate cu ajutorul modelelor matematice dinamice evoluate ale mașinii asincrone saturate pe calea fluxului principal, regimurile de pornire în diferite condiții, este studiat efectul momentului de inerție asupra caracteristicilor de pornire, și în al doilea rând s-au efectuat verificări ale solicitărilor electromagnetice și mecanice ale motorului asincron proiectat supus unor regimuri dinamice particulare.

Din confruntarea rezultatelor cantitative obținute prin simulări dinamice cu cele oferite de calculele de proiectare electromagnetică, rezultă o bună corespondență ceea ce denotă că motorul de tracțiune considerat este bine dimensionat pentru toate împrejurările ce pot interveni în exploatare.

Capitolul 7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Prin optimizarea programului de proiectare al mașinii asincrone cu introducerea condițiilor specifice tracțiunii feroviare, cu folosirea metodelor și criteriilor de optimizare împreună cu sistemele moderne de calcul și simulare lucrarea reușește să îmbunătățească proiectarea și în ultimă instanță, realizarea unor motoare asincrone performante care să răspundă cerințelor tot mai mari ale transportului feroviar modern

Dintre contribuțiile aduse în cadrul acestei lucrări, se pot enumera câteva:

- analiza obiectivă a evoluției mașinii asincrone de tracțiune prin prisma condițiilor contemporane;

- studiul metodelor și criteriilor de optimizare staționare folosite în proiectarea mașinilor electrice uzuale;

- identificarea condițiilor restrictive specifice motoarelor asincrone de tracțiune, alimentate de la convertoare statice;

- realizarea unei analize unitare a fenomenelor din mașina asincronă și realizarea unor modele matematice complexe;

- calculul și reprezentarea grafică a inductivităților utile statice și dinamice în raport de curentul de magnetizare, pentru a putea studia influența saturației magnetice asupra regimurilor dinamice specifice locomotivei;

- realizarea unor programe pentru analiza regimurilor staționare și trasarea caracteristicilor statice valabil pentru orice motor, împreună cu un program de determinare a parametrilor motoarelor. Cu ajutorul acestor programe se poate analiza orice motor asincron iar parametri obținuți pot fi folosiți în schemele de reglare după câmp;

- analiza pornirii în gol, la un cuplu egal cu cel nominal, și la cuplul de pornire impus de beneficiar a vizat în principal valori extreme de cupluri, de curenți, mecanice, amplitudinea și durata acestora;

- o altă concluzie majoră se referă la faptul că dacă se fac simulări cu un moment de inerție foarte mare, caracteristica mecanică dinamică, în afară de primele momente ale pornirii, se confundă cu caracteristica mecanică statică.

În **ANEXE** sunt prezentate determinările experimentale pe stand precum și desenul de ansamblu al unei mașini asincrone similare utilizată pentru realizarea experimentărilor practice.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

1. ABB HENSCHTEL, *Traction Vehicle Technic for all Application*.
2. Appelbaum J., Fuchs E. F., White J. C. - *Optimization of three-phase induction motor design, part. 1: Formulation of the optimization technique*, IEEE Trans., 1987, EC-2, No.3, p.407-414;
3. Appelbaum J., I.A. Khan, E. F. Fuchs, J. C. White - *Optimization of three phase induction motor design, part 2: The efficiency and cost of an optimal design*, IEEE Trans., 1987, EC-2, No.3, p.415-422;
4. Bălă C. - *Mașini electrice*, Ed.Didactică și Pedagogică, București, 1982.
5. Bandyopadhyoy M. N. - "Optimization techniques in electrical machine design", J. of the Institution of Engineers, vol. 73, no. 12, pp. 83-91, Jun. 1992.
6. Belatel M. and Benalla H. – “A Novel Approach to Design Ventilation Holes in Machines by Finite Element”, ISESC’05 Conference, Algeria, 2005.
7. Belatel M. and Benalla H. – “Optimization of Stator Slots Geometry in Synchron”, CEE’05 Conference, Portugal, 2005.
8. Bin Wu – *Presentation material extracted from „High Power Converters and AC Drives”*, IEEE Press/Wiley November 2005, ISBN: 0-4717-3171-4.
9. Burdubuș, Fl. - *Construcția și proiectarea vehiculelor de tracțiune cu motoare electrice*, Reprografia Universității din Craiova, 1998.
10. Câmpeanu Aurel – *Mașini electrice. Probleme fundamentale, speciale și de funcționare optimă* – Ed. Scrisul Românesc , Craiova, 1988.
11. Dordea Toma - *Mașini electrice*, Ed.D.P, București, 1977
12. Dordea Toma, Biriescu M., Liuba Gh., Madescu Gh., Moț M – *Mașini electrice. Parte complementară*, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara 2002.
13. Electroputere SA. - Type Test Report No. 1124/0.109.2009.
14. Fu W. N., Ho S. L. and Wong H. C. - "Design and analysis of practical induction motors", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 37, no. 5, pp. 3663-3667, Sep. 2001.
15. Huang H., Fuchs E. F, Zak Z - *Optimization of single-phase induction motor design. Part 2: The maximum efficiency and minimum cost of an optimal design*, IEEE Trans. Of energy Conversion, vol.3, no.2, June 1998, p. 357-366.

16. Lai H. C., P. J. Leonard, Rodger D. and Allen N. – “*3D Finite Element Dynamic Simulation of Electrical Machines Coupled to External Circuits*”, IEEE Trans. on Magn, Vol. 33, No. 2, pp. 2010-2013, March 1997.
17. Liu X. and Slemon G. R - "*An improved method of optimization for electrical machines*", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 6, no. 3, pp. 492-496, Sep. 1991.
18. Madescu G., Boldea I., and Miller T. J. E. - "*The Optimal lamination approach to induction machine design global optimization*", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 34, no. 3, pp. 422-428, May/Jun. 1998.
19. Mohammed O. A. , Üler G. F. and Koh C. S. - "*Design optimization of electrical machines using genetic algorithm*", IEEE Trans. On Magnetics, vol.31, no. 3, pp. 2008-2011, May 1995.
20. Nurdin M., Poloujadoff M. and Faure A. - "*Synthesis of squirrel cage motors- A key to optimization*", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 6, no. 2, pp. 327-333, Jun. 1991.
21. Sames M. - "*Optimization of induction motor design*", Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej Seria Elektryka, z. 176, pp.103-110, 2001.
22. SIEMENS. Die Universal-Lokomotive fur Europa. Prospect.
23. Vlad I., Enache S., Alexandru D.: *Utilizarea metodelor numerice în proiectarea maşinilor electrice de traţiune*, Ed. SITECH, Craiova, 2000.
24. ***: Matlab Reference Guide, The math Works, Inc. Natick, Massachusetts, 1992.
25. ***: Matlab User’s Guide, The math Works, Inc. Natick, Massachusetts, 1992.