

Contribuții în proiectarea și controlul mașinilor sincrone cu magneți permanenți pe bază de Ferite, cu randament ridicat, pentru acționarea compresoarelor de putere redusă

**Teză de doctorat – Rezumat**

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie electrică

**autor ing. Andy-Sorin Isfănuți**

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Ion Boldea

luna 01 anul 2021

**Sumar**

Teza de față este destinată studiului unui număr de topologii de motoare sincrone cu magneți permanenți din ferită, din punct de vedere al proiectării și controlului, destinate utilizării în acționarea compresoarelor cu piston de putere joasă, pentru aplicații casnice de refrigerare.

Frigiderele reprezintă unul dintre principalii consumatori casnici de energie electrică [1], trendul de-a lungul ultimelor decade fiind orientat spre îmbunătățirea clasei energetice a acestora. Acest lucru a devenit posibil atât datorită îmbunătățirilor aduse agentului refrigerant și izolației termice [2], cât și datorită îmbunătățirii aduse eficienței în funcționarea compresorului, care reprezintă principalul consumator de energie din cadrul sistemului de refrigerare. Îmbunătățirile în consumul de energie al compresorului se datorează și îmbunătățirilor aduse în partea de acționare a sa, respectiv al motoarelor electrice. Dacă la început frigiderele erau echipate cu motoare monofazate asincrone cu pornire la rețea, comandate prin intermediul unui termistor în regim on-off [3], introducerea convertoarelor electrice a permis atât utilizarea motoarelor cu randament mai ridicat, ca motoarele sincrone cu magneți permanenți, cât și optimizarea controlului temperaturii, prin asigurarea regimurilor de operare la turații variabile [4].

Mașinile sincrone cu magneți permanenți din pământuri rare sunt cunoscute pentru densitatea lor mare de energie și randament ridicat pe care-l prezintă, fiind utilizate în aplicații în care este nevoie de performanță bună [5], fiind caracterizate însă și de un cost ridicat. Magneții permanenți din ferită au câmp coercitiv și inducție remanentă scăzute, însă beneficiază de marele avantaj ale disponibilității și prețului scăzut. Motivația care a stat la baza studiului realizat în această lucrare este găsirea de noi topologii de motoare sincrone cu magneți permanenți din ferită care îndeplinesc cerințele aplicațiilor de refrigerare, beneficiind în același timp de avantajele magneților permanenți din ferită.

Pentru urmărirea acestui scop, plecând de la analiza cerințelor necesare operării în aplicațiile de acționare a compresoarelor cu piston, lucrarea analizează trei noi topologii de motoare sincrone cu magneți permanenți monofazate, două dintre ele având magneții permanenți plasați în stator unde asistă forța magnetomotoare produsă de înfășurarea statorică, iar a treia având magneții permanenți plasați în rotor. După analiza caracteristicilor și particularităților fiecărei topologii, un aspect important fiind posibilitatea de pornire din orice poziție, motoarele sunt proiectate optimal pe baza unor seturi de cerințe corespunzătoare compresoarelor de puteri mici: putere dezvoltată de 35 / 100 W la o turație nominală de 1600rpm / 3000 rpm. Folosind o metodologie de proiectare geometrică bazată pe analiza FEM [6] integrată în algoritmul de optimizare Hooke Jeeves [7] modificat [5], motoarele au fost

optimizate pentru minimizarea costul materialelor, constrângeri adiționale fiind impuse prin costuri de penalizare [5] pentru asigurarea unui randament minim de 88% și a un cuplu minim de 0.1 Nm (necesar pornirii din orice poziție) în condiții nominale de operare. Soluțiile obținute prezintă un cost al materialelor de 16 \$ sau mai mic, îndeplinind (parțial în unele cazuri) constrângerile adiționale impuse randamentului și cuplului produs. Validările ulterioare cu ajutorul metodei elementului finit și al simulărilor de regim dinamic confirmă performanțele motoarelor.

În continuare, este prezentată o metodologie de proiectare optimală care combină modelul analitic cu analiza FEM, pentru a realiza un compromis între acuratețea rezultatelor și efortul mic de calcul, aplicată în proiectarea unui motor sincron trifazat cu magneți permanenți din ferită și rotor exterior. Metodologia se bazează pe folosirea unui model analitic care este corectat iterativ pe parcursul proiectării optimale folosind metoda elementului finit. Coeficienții de corecție (calculați din diferențele între valorile obținute pe baza modelului analitic și cele obținute prin analiza FEM ale cuplului mediu produs de motor la încărcare nominală și ale inductanței statorice sincrone) corectează expresia analitică a fluxului magnetic polar și a inductanței sincrone. Metodologia de proiectare este aplicată pentru optimizarea mașinii sincrone cu rotor exterior pentru un set de cerințe corespunzătoare acționării unui compresor mic: putere nominală de 1 kW dezvoltată la turația nominală de 4500 rpm. Ca și în cazurile studiate anterior, obiectivele optimizării sunt minimizarea costului materialelor utilizate în construcția motorului și maximizarea randamentului pentru operare în condiții nominale și la turație redusă. Timpul foarte redus de optimizare, de aproximativ 8 minute (în comparație cu timpii de calcul de peste 12 ore, în cazul optimizării bazate pe analiza FEM, obținuți pentru motoarele monofazate) a permis rularea programului de optimizare de 20 de ori, pornind din poziții de start aleatoare, pentru a crește probabilitatea de a găsi optimul global, cel mai bun rezultat fiind reprezentat de un motor având costul materialelor de 12.37 \$ și randamentul de funcționare în condiții nominale de peste 90%. Analiza rezultatelor optimizării arată că valorile modelului analitic converg către cele obținute cu ajutorul metodei elementului finit.

Câteva rezultate experimentale disponibile pentru un prototip construit pe baza unui calcul de proiectare anterior validează metoda de calcul analitic a randamentului motorului.

Ultima parte a lucrării este destinată studiului comparativ a metodelor de control fără senzor de poziție, destinate controlului vitezei (și a curentului) motoarelor trifazate de putere joasă pentru acționarea compresoarelor cu piston. Prima strategie e reprezentată de controlul scalar  $V/f$  constant, îmbunătățit cu 2 bucle de corecție [8] [9] [10], cea de-a doua strategie de control fiind controlul clasic vectorial cu orientare după câmp rotoric. Cele două bucle de corecție utilizate în cadrul controlului scalar au următorul rol: - corecția vitezei vectorului tensiunii de referință pe baza oscilațiilor puterii active, în scopul îmbunătățirii stabilității în regim tranzitoriu, respectiv corecția amplitudinii tensiunii de referință, pe baza controlului în bucla închisă a curentului axei  $d$ , în scopul asigurării unei funcționări eficiente sub condiția de cuplu maxim pe curent [11]. Estimarea poziției rotorului și a mărimilor necesare asigurării regimului de funcționare la cuplu maxim pe curent e realizată cu ajutorul observatorului de flux activ [12].

Ambele strategii au fost implementate și testate comparativ atât prin simulare digitală cât și experimental prin implementare pe un sistem dSpace, folosit pentru controlul unui prototip de mașină sincronă cu magneți permanenți, destinată acestei aplicații. Rezultatele experimentale extensive la turații ridicate și joase arată un răspuns de regim tranzitoriu mai bun în cazul strategiei de control vectorial, însă și strategia de control scalar asigură o funcționare stabilă, fiind capabilă să suporte același regim de accelerare și încărcare, pretându-se a fi utilizată în aplicațiile de control a compresoarelor, unde regimul dinamic nu este ridicat, aducând ca beneficii simplitatea implementării și timpul redus de acordare a parametrilor.

## **Organizarea tezei**

Teza este organizată în următoarele capitole/secțiuni:

Capitolul 1 prezintă motivația care a stat la baza alegerii temei, urmată de o prezentare a sistemului de refrigerare și a tipurilor de compresoare utilizate în aplicațiile frigorifice casnice precum și a tipurilor de motoare utilizate sau propuse pentru utilizare în acționarea acestora. În continuare sunt prezentate cerințele principale pe care trebuie să le îndeplinească un motor folosit în acest tip de aplicații [13].

Cel de-al doilea capitol prezintă un set de elemente teoretice utilizate pe parcursul tezei ca: partea de preprocesare și post-procesare a metodei elementului finit, proprietățile materialelor utilizate în modelele FEM, tipurile de analiză și metodele de calcul a cuplului produs de motor, inductanțelor statorice și a pierderilor în fier. Totodată, este prezentată detaliat structura algoritmului Hooke Jeeves modificat și modelul matematic al compresorului cu piston.

Cel de-al treilea capitol prezintă prima topologie de motor electric studiată: motorul sincron monofazat cu magneți permanenți din ferită plasați în stator, cu doi poli statorici și patru perechi de poli rotorici. Inițial, este prezentată categoria motoarelor monofazate din care acesta face parte („flux reversal motors” [13]), urmată de o prezentare a principiilor de funcționare pe baza analizei FEM, cu o atenție deosebită acordată problemelor de pornire pe care acest tip de motor le prezintă. În continuare este prezentată metodologia de proiectare geometrică bazată pe metoda elementului finit și componența funcției multi-obiectiv bazată pe cost. Pornind de la cerințele unui studiu de caz, rezultatele optimizării motorului sunt prezentate și analizate în detaliu, urmate de validarea rezultatului prin analize FEM suplimentare. Performanțele motorului optimizat sunt analizate și din punct de vedere dinamic prin simulare digitală, utilizând un model de circuit care folosește informații extrase din analiza FEM, integrat într-o strategie de control în bucla închisă a vitezei și a curentului statoric. La final sunt prezentate câteva rezultate experimentale preliminare ale unui prototip construit pe baza unei proiectării anterioare.

Capitolul 4 prezintă cea de-a doua topologie de motor sincron monofazat studiată care, spre deosebire de motorul studiat în capitolul 3, conține patru poli statorici, fiind de așteptat ca cei doi poli suplimentari să asigure o densitate de putere mai mare. În prezentarea acestui motor sunt urmați aceiași pași: analiza principiilor de funcționare folosind metoda elementului finit urmată de prezentarea și validarea rezultatelor optimizării motorului folosind aceeași metodologie de proiectare optimală utilizată în capitolul 3.

Capitolul 5 prezintă cel ce-al treilea motor monofazat studiat, care conține magneții permanenți plasați în rotor, aceasta topologie venind cu avantaje suplimentare ca: operare la frecvență de alimentare redusă la jumătate și capete de bobină mai scurte. Fiind proiectat pe baza cerințelor folosite și în proiectarea motorului monofazat din capitolul 4, rezultatele optimizării și analiza performanțelor celor două motoare sunt prezentate comparativ.

Capitolul 6 prezintă o metodologie de proiectare optimală destinată proiectării motorului sincron trifazat cu magneți permanenți și rotor exterior, care folosește un model analitic corectat iterativ prin analiza FEM. Astfel, sunt prezentate structura motorului, modelul analitic, coeficienții de corecție bazați pe analiza FEM și algoritmul de proiectare. Folosind cerințele unui studiu de caz, algoritmul de optimizare este rulat, analiza rezultatelor fiind urmată de validarea prin FEM a soluției optime. La final sunt prezentate câteva rezultate experimentale preliminare ale curbelor de eficiență obținute experimental pentru un prototip proiectat anterior.

Capitolul 7 este dedicat studiului comparativ al celor două strategii de control fără senzor de poziție: controlul scalar V/f cu bucle de stabilizare (sau corecție) versus controlul vectorial cu orientare după câmp rotoric. Sunt prezentate: modelul matematic al motorului sincron cu magneți permanenți, două din structurile principale de observatoare de poziție a rotorului bazate pe modelul matematic al motorului: observatorul de flux activ [12] și observatorul EMF extins [14], urmate de schemele celor două strategii de control și rezultatele

simulărilor digitale, precum și o analiza a influenței variației parametrilor motorului asupra estimării poziției rotorului. După prezentarea platformei experimentale, sunt prezentate comparativ rezultatele experimentale efectuate la viteze medii, ridicate și joase, pentru diferite niveluri de încărcare.

### Contribuții

Principalele contribuții aduse de această lucrare sunt:

- Prezentarea unei sinteze a soluțiilor de acționare a compresoarelor de putere redusă pe baza mașinilor electrice sincrone cu magneți permanenți și a principalelor cerințe pe care acestea trebuie să le îndeplinească.
- Propunerea și analiza a trei noi topologii de mașini sincrone monofazate cu magneți permanenți.
- Dezvoltarea unor metodologii de proiectare optimală bazate doar pe analiza FEM, ori pe analiza FEM combinată cu calcule analitice, care pot fi utilizate pentru a optimiza motoarele din punct de vedere al costului materialelor, ținând cont și de aspecte ca maximizarea randamentului și îmbunătățirea cuplului de pornire.
- Studiul și implementarea prin simulare digitală a strategiilor de control pentru motoare sincrone monofazate/trifazate cu magneți permanenți.
- Studiul comparativ experimental a două strategii de control fără senzor de poziție (bazate pe observatorul de flux activ) a motoarelor sincrone trifazate cu magneți permanenți. Elementul de noutate în strategiile studiate îl reprezintă implementarea buclei de corecție a amplitudinii tensiunii de referință prin corecția curentului axei d în bucla închisă pentru funcționarea în condiție de cuplu maxim pe curent folosind expresiile energiei magnetice și a amplitudinii fluxului activ.

### Referințe bibliografice selectate

- [1] D. Kamalakannan, V. Mariappan, V. Narayanan și N. S. Ramanathan, „Energy efficient appliances in a residential building,” în *2016 First International Conference on Sustainable Green Buildings and Communities (SGBC)*, Chennai, 2016.
- [2] W. J. Yoon, K. Seo și Y. Kim, „Development of an optimization strategy for insulation thickness of a domestic refrigerator-freezer,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, nr. 3, pp. 1162-1172, 2013.
- [3] Danfoss, HG-EA (<https://www.secop.com>), „Compressor design mechanical and electrical,” September 1974. [Interactiv]. Available: [https://www.secop.com/fileadmin/user\\_upload/technical-literature/danfoss-lectures/compressor\\_design\\_mechanical\\_and\\_electrical.pdf](https://www.secop.com/fileadmin/user_upload/technical-literature/danfoss-lectures/compressor_design_mechanical_and_electrical.pdf). [Accesat 12 12 2020].
- [4] A. H. Sabry și P. J. Ker, „DC Environment for a Refrigerator With Variable Speed Compressor; Power Consumption Profile and Performance Comparison,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 147973-147982, 2020.
- [5] I. Boldea și L. N. Tutelea, *Electric machines: steady state, transients, testing & design, with MatLab*, New York: CRC Press, Taylor&Francis Group, 2009.
- [6] D. Meeker, „FEMM 4.2 - Full-featured finite element package for the solution of 2D planar and axisymmetric problems in low frequency magnetics under Windows,” [Interactiv]. Available: [www.femm.info](http://www.femm.info).
- [7] R. Hooke și T. A. Jeeves, „Direct search solution of numerical and statistical problems,” *Journal of ACM*, vol. 8, nr. 2, pp. 212-229, 1961.
- [8] I. Boldea, A. Moldovan și L. Tutelea, „Scalar V/f and I-f control of AC motor drives: An overview,” în *2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics*

(ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION), Side, Turkey, 2015.

- [9] S. C. Agarlita, C. E. Coman, G. D. Andreescu și I. Boldea, „Stable V/f control system with controlled power factor angle for permanent magnet synchronous motor drives,” *IET Electric Power Applications*, vol. 7, nr. 4, p. 278–286, Apr. 2013.
- [10] P. D. C. Perera, F. Blaabjerg, J. K. Pedersen și P. Thogersen, „A sensorless, stable V/f control method for PMSM drives,” *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 39, nr. 3, p. 783–791, May-Jun. 2003.
- [11] Z. Tang, X. Li, S. Dusmez și B. Akin, „A New V/f-Based Sensorless MTPA Control for IPMSM Drives,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, nr. 6, pp. 4400-4415, June 2016.
- [12] I. Boldea, C. M. Paicu și G. D. Andreescu, „Active flux concept for motion-sensorless unified AC drives,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, nr. 5, p. 2612–2618, May 2008.
- [13] „Small compressor electric motor technologies: EMBRACO’s perspective,” în *2008 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Brasov, 2008.
- [14] M. Cheng, W. Hua, J. Zhang și W. Zhao, „Overview of Stator-Permanent Magnet Brushless Machines,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, nr. 11, pp. 5087-5101, Nov 2011.
- [15] S. Morimoto, K. Kawamoto, M. Sanada și Y. Takeda, „Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, nr. 4, pp. 1054-1061, July-Aug. 2002.