

Rezumatul tezei de doctorat

Autor: GRĂDINARU VLAD-NICOLAE

Titlu: "High speed brushless DC PMSM drives: optimal design and control contributions"

Teza de doctorat analizată este structurată pe 8 capitole, din care cel final conține concluziile și contribuțiile autorului și se întinde pe 268 de pagini. În cele ce urmează, fiecare capitol în parte este descris.

Capitolul 1 oferă o privire de ansamblu asupra acționărilor electrice cu motoare de curent continuu fără perii, referindu-se punctual la topologiile de motor existente, a strategiilor de control cu și fără senzori de poziție și la aplicațiile în care sunt cel mai des utilizate. Actualitatea temei, de dezvoltare a unei acționări cu motor de curent continuu fără perii pentru compresoare de frigider, este evidențiată, luându-se în considerare necesitatea de a obține un produs eficient energetic și ieftin. Cerințele pieței actuale sunt prezentate iar, în colaborare cu acționările existente în industrie, cea mai bună topologie de motor este aleasă.

Capitolul 2 se concentrează pe proiectarea optimală a motorului de curent continuu fără perii pe baza unor specificații de interes practic (150W la 15000 rpm). Într-o primă fază este dezvoltat un model analitic pentru proiectarea preliminară și apoi optimală.

Analizându-se diferite topologii de motoare sincrone cu magneți permanenți în detaliu, varianta cu 6 creștături în stator și 4 poli rotorici este aleasă ca fiind cea mai bună opțiune pentru o aplicație de compresor.

După etapa de proiectare preliminară, analitică, se trece la proiectarea optimală propriu-zisă. În urma calsificării tipurilor de algoritmi de proiectare optimală sunt aleși doi care corespund cerințelor de rapiditate în calcule și probabilitate de calcul al variantei optime într-un timp scurt. Cei doi algoritmi sunt Hooke-Jeeves modificat, din familia metodelor de căutare directă și algoritmul Coloniei Artificiale de Albine (Artificial Bee Colony – ABC), din familia metodelor de optimizare a roiurilor (swarm optimization).

Primul pas este definirea funcției obiectiv pentru a optimiza 10 variabile, împreună cu penalități de cost pentru depășirea temperaturii în stator și rotor și pentru nerealizarea cuplului mediu. Pentru atingerea obiectivului, variabilele sunt limitate atât minim, cât și maxim, iar pentru a fi siguri că se realizează cuplul mediu se introduce verificarea cu metoda elementului finit (FEM) la fiecare pas de optimizare. Ținând cont că introducerea FEM în procesul de optimizare duce la creșterea timpului de calcul, procesul de evaluare în FEM se va face în câteva puncte cheie pentru valorile minime și maxime ale cuplului în gol (cogging) și a celui în sarcină, pe baza unei diagrame "curent-flux".

Rezultatele obținute pentru algoritmul Hooke-Jeeves modificat, un randament de 94% la o greutate de 320 de grame de materiale active sunt satisfăcătoare pentru un număr de 80 de iterații și un timp de 1500 secunde. Pentru a verifica globalitatea optimului obținut cu procedeul Hooke-Jeeves modificat, se utilizează algoritmul Coloniei Artificiale de Albine. Rezultatele obținute pentru același studiu de caz, dar "împrăștierea" rezultatelor în evoluția procesului de optimizare face interpretarea lor mai delicată, deși timpul de calcul scade de la 1500 secunde (Hooke-Jeeves) la 1000 secunde (cu FEM inclus în ambele cazuri).

În **capitolul 3** topologiile obținute prin cele două metode de proiectare optimală sunt analizate și validate prin 2D-FEM. Validarea se face prin studierea distribuției câmpului magnetic, a fluxului magnetic, a formelor de undă ale tensiunii electromotoare induse și a forțelor radiale ce acționează asupra rotorului (teoretic 0), atât în gol cât și în sarcină. Din

acest punct de vedere, soluția obținută prin metoda ABC conduce la forțe radiale încă mici, dar cu 50% mai mari ca soluția optimală Hooke-Jeeves, o indicație că zgomotul și vibrațiile vor fi și ele mai mari pentru soluția ABC.

Un alt aspect important pentru mașinile cu magneți permanenți de suprafață este cuplul în gol (cogging) care trebuie să aibă o valoare cât mai mică, pentru a evita vibrațiile în timpul funcționării. Prin intermediul FEM se studiază soluții de reducere a cuplului în gol care să nu reducă cuplul mediu cu mai mult de 6%.

Prima tehnică încercată este de înclinare (skewing) a rotorului cu 3 și 4 segmente, după ce sunt defazate corect rotorul și înfășurările statorice. Soluția optimă obținută prin metoda Hooke-Jeeves este superioară în cazul înclinării cu 3 segmente, pe când cea obținută cu metoda ABC este superioară la varianta de înclinare cu 4 module. În general, modularizarea rotorului reduce cogging torque cu peste 50% la 4 module.

A doua tehnică de reducere a cuplului în gol investigată se referă la lățimea magnetului/pasul polar opus cu reducerea substanțială a pulsațiilor în cuplul total fără reducerea substanțială a cuplului mediu. În acest caz se observă că optimul Hooke-Jeeves este superior. În continuare s-a investigat asimetrizarea plasării magneților, dar pentru că reducerea pulsațiilor în cuplu este mică în timp ce reducerea cuplului mediu este de 9%, se constată că metoda nu este eficace.

A treia metodă investighează plasarea unor creștături suplimentare în polii statorului, ceea ce duce la reducerea semnificativă a cuplului în gol (aproximativ 50%) cu o reducere de numai 2% în cuplul mediu, dovedindu-se astfel destul de eficientă.

La finalul capitolului se investighează prin FEM pulsațiile în cuplu la excentricități de la 12,5% la 87,5%, observându-se variații mici (în contrast cu mașinile sincrone cu magneți permanenți interiori).

Capitolul 4 este dedicat în întregime dezvoltării și simulării (în Matlab/Simulink) unui model dinamic al motorului fără perii cu magneți permanenți, condus prin intermediul unui invertor PWM. În acest capitol informația despre poziție este dată de senzori Hall, iar viteza motorului, necesară pentru proiectarea corectă a buclelor de control este dedusă din fronturile crescătoare ale celor trei senzori.

Scopul acestui capitol este de a obține un model de simulare cât mai apropiat de cel real, astfel încât diferențele între simulare și experimente să fie cât mai redusă. Astfel, un model care ține cont de fenomenul de comutație este implementat. Deasemenea, formele de undă ale tensiunii electromotoare induse în fiecare fază sunt utilizate din capitolul anterior, din validarea proiectării optime în FEM. Regulatele de tip PI de curent și viteză sunt proiectate pe baza informațiilor obținute din capitolul de proiectare și nu au nevoie de modificări ale parametrilor pentru partea experimentală, demonstrând robustețea modelului dinamic. O altă particularitate a modelului este introducerea unei corecții pentru întârzierea senzorilor Hall, datorită montării incorecte a acestora.

Se investighează pe studiul de caz accelerarea mașinii până la 15000 [rpm] (în mai puțin de 0,1 secunde) cu încărcare și descărcare (de la 0.095 [Nm] la 0.0475 [Nm] și înapoi); la fel accelerarea de la 7500 [rpm] la 15000 [rpm] la cuplu proporțional cu turația este demonstrată ca stabilă.

Capitolul 5 este dedicat proiectării, simulării și realizării de experimente cu o nouă strategie de control fără senzori de poziție. În prima parte a capitolului se întocmește o analiză a metodelor de control fără senzori existente în literatura de specialitate, pentru a dovedi

noutatea metodei ce va fi folosită în continuarea capitolului, o soluție aparent simplă, dar practică, de estimare a vitezei și (prin integrare) a poziției motorului la viteze diferite de zero.

În esență s-a calculat cuplul din puterea activă fără pierderile în cupru și apoi, cu inerția cunoscută și cuplul de sarcină mediu cunoscut la compresoare, s-au calculat din ecuația mișcării viteza și apoi (prin integrare) poziția rotorului. Cum soluția nu funcționează la viteze foarte mici, s-a introdus strategia de pornire I-f care trebuie reconfigurată în cea cu observator de viteză și poziție; autorul a propus soluții pentru această tranziție fără șocuri mari în ambele sensuri.

După simularea pe studiul de caz, autorul trece la experimentări pe platformă experimentală cu două astfel de motoare (motor/generator pe rezistențe). Experimente dificile pe platforma dSpace au dus la rezultate satisfăcătoare, controlul probând soluțiile propuse și concordanța bună cu rezultatele de simulare.

În **capitolul 6** este studiată oportunitatea adăugării unui convertor DC-DC în circuitul intermediar, cu comutarea numai a fazelor în invertor (așa numitul convertor PAM). Această topologie de convertor poate duce la reducerea pierderilor în comutație în invertor și deci, la o soluție bună pentru turații mari. Această soluție este evaluată comparativ, prin simulare, cu și fără senzori Hall. Redresorul de la intrare și convertorul DC-DC au fost simulate realist, cu controlul cu bucle (de viteză, de curent continuu și de curent al redresorului). Dezavantajul major al soluției, la redresorul cu diode la intrare, este pulsația tensiunii continue și, prin urmare, a cuplului cu dublul frecvenței sursei primare. Astfel, pe lângă convertorul DC-DC, este nevoie și de un condensator puternic la intrarea în invertor.

Simulările digitale confirmă funcționarea satisfăcătoare a soluției propuse în regimuri dinamice cheie, cu și fără senzori Hall. Combinarea convertorului PAM cu motorul fără perii cu magneți permanenți cu senzori Hall și cu observator de tensiune indusă este interesantă, mai ales pentru turații foarte rapide (peste 20000 [rpm]) unde frecvența de choppare devine o limită serioasă.

Capitolul 7 este dedicat în întregime prezentării standului experimental, fiecare element al acestuia fiind prezentat în detaliu.

Capitolul 8 adună la un loc concluziile trase în cele 6 capitole și prezintă contribuțiile originale din punctul de vedere al autorului. Teme de viitor ce pot fi dezvoltate din diferitele subiecte tratate în teză sunt prezentate și pot constitui puncte de pornire pentru lucrări ulterioare.

Timișoara, 24.09.2012

Drd.ing. GRĂDINARU Vlad-Nicolae