

Rezumatul tezei de doctorat:

“Acționări electrice cu mașini sincrone cu magneți permanenți, cu cuplu la curent nul redus, comandate cu curent dreptunghiular”

elaborată de d-l inginer Alin Nicușor Știrban

Teza de față investighează un motor sincron cu magneți permanenți interiori cu 8 poli cu magnetizație alternată în rotor și 6+6 creștături neuniforme, cu înfășurare concentrată, fracționară, comandat cu curenți dreptunghiulari.

Calculul electromagnetic de dimensionare a soluției propuse a fost realizat algoritmic și a fost validat prin metoda elementelor finite (MEF). Analiză cu MEF a topologiei proiectate oferă rezultate directe pentru cuplu, t.e.m. și inductanțe. Această configurație este selectată pentru ca are t.e.m. indusă de formă trapezoidală, fiind adecvate pentru alimentare electronică prin curenți cvasidreptunghiulari, are bobine mai puține decât un motor tradițional cu 12 creștături și pare posibilă, cu această configurație, minimizarea directă a cuplul de dantură (de agățare) fără a înclina creștăturile. Procedurile de măsurare sunt descrise și rezultatele măsurătorilor sunt prezentate și discutate. Ori de câte ori este posibil, caracteristicile calculate cu MEF sunt comparate cu cele obținute experimental, în scopul de a valida calculele cu MEF pentru acest tip de mașină.

Estimarea precisă a parametrilor mașinii este foarte importantă pentru dezvoltarea de sisteme de acționări electrice de înaltă performanță, pentru simulări numerice și pentru calibrarea reguletoarelor. În scopul de a obține rezultate precise de la modele matematice ale mașinilor integrate în sistemele de simulare și control, cunoașterea cu precizie a parametrilor este necesară. Modelul de mașină sincronă fără perii, comandată cu curenți dreptunghiulari dezvoltat în această teză, consideră fenomenul de comutație a fazelor, formele de undă reale ale t.e.m. și ale inductanțelor, care sunt modelate prin intermediul unor serii Fourier, și respectiv, prin intermediul unor tabele, bazate pe calcule cu MEF. Prin urmare, poate fi de așteptat că modelul de simulare dezvoltat poate fi un instrument util pentru proiectarea și analiza acționărilor electrice cu mașini sincrone fără perii, comandate cu curenți dreptunghiulari, inclusiv algoritmi de control.

Pentru controlul fără senzori de poziție al mașinilor de curent continuu fără perii cu magneți permanenți, această teză introduce și investighează un observator de poziție și viteză (turație) bazat pe element finit electromagnetic, estimând fluxul de înlănțuire de linie al MP. Utilizarea curenților de fază mășurați și a tensiunilor de linie, care poate fi măsurate sau calculate, fluxul de înlănțuire de linie al MP poate fi estimat. Chiar dacă observatorul propus se bazează pe modelul fundamental al mașinii, o strategie robustă de pornire sub cuplu de sarcină, numit controlul I-f, este utilizat, cu tranziție fără șocuri la controlul fără senzori de poziție propus. Metoda de pornire I-f permite un control fără senzori de poziție la viteză redusă, fără a fi nevoie de cunoașterea poziției inițiale și de identificarea parametrilor mașinii.

Organizarea tezei

Teza este structurată pe 8 capitole:

În **Capitolul 1** se trec în revistă realizările din domeniul mașinilor electrice cu magneți permanenți fără perii, punând accent în mod special pe comanda acestora. Sunt prezentate cele mai semnificative topologii ale mașinilor sincrone cu magneți permanenți, precum și materialele feromagnetice utilizate la construcția lor. În cele din urmă, o prezentare generală a metodelor de reglaj fără senzori mecanici și domeniile de aplicații ale mașinilor sincrone cu magneți permanenți (de la vehicule electrice și hibride până la echipamente din tehnica de calcul) sunt evidențiate.

Capitolul 2 prezintă o sinteză a mașinilor sincrone cu magneți permanenți cu înfășurări concentrate, fracționare. Determinarea de mașinilor cu înfășurări concentrate și dantură/crestare neuniformă este descrisă aici. Ultima parte a acestui capitol conține algoritmul de proiectare al mașinii sincrone cu magneți permanenți în studiu. Scopul este proiectarea unei variante de mașină cu preț redus și ușor de fabricat, care să poată funcționa și la turații mari. Structura de mașină aleasă are opt poli și înfășurări concentrate în cele 6+6 crestături neuniforme, comandată cu curenți cvasi-dreptunghiulari.

Capitolul 3 conține validarea proiectării mașinii sincrone cu magneți permanenți interiori, atât prin calcul numeric de câmp, cât și experimental. Analiza efectuată urmărește determinarea distribuției câmpului magnetic în mașina proiectată, precum și variația inducției magnetice de a lungul întrefierului, atât la mersul în gol cât și la sarcină nominală. De asemenea se prezintă și variația tensiunii electromotoare induse funcție de poziția rotorică. Este foarte important rezultatul calculului cuplului de dantură, deoarece minimizarea acestuia este unul dintre principalele scopuri ale tezei. Tot în acest capitol sunt studiate variațiile cuplului dezvoltat de mașină și se oferă soluții practice pentru reducerea lor. Pentru rotorul cu două segmente de MP deplasate axial, pulsațiile totale la cuplu nominal sunt sub 10%. Calculul inductanțelor încheie partea cu rezultatele calculului de câmp din acest capitol. Formulele de aproximare ale variației inductanțelor în funcție de curent și poziție rotorică se vor utiliza la modelul de circuit al mașinii. Rezultatele calculului de câmp sunt validate și experimental. Măsurătorile sunt efectuate pe un prototip al mașinii sincrone cu magneți permanenți. Standul elaborat pentru acest scop este dotat cu un sistem de dezvoltare dSPACE și unul de achiziții de date avansate. Rezultatele testelor de laborator confirmă pe deplin forma tensiunii electromotoare induse, a cuplului de dantură, a pulsațiilor cuplului dezvoltat, precum și variațiile inductanțelor funcție de curent și poziția rotorică.

În **capitolul 4**, se dezvoltă modelul dinamic în Matlab-Simulink al motorului de curent continuu fără perii, cu tensiunea electromotoare indusă și inductanțele importate din analiza MEF, pentru simularea funcționării prototipului experimental realizat, în regimuri staționare și tranzitorii.

Capitolul 5 tratează o nouă metodă de comandă fără senzori mecanici a motorului în studiu. Sistemul se bazează pe estimarea fluxului de linie al magnetului permanent, din curenții de fază măsurați și tensiunile de linie calculate. Din trecerea prin zero a fluxului de linie al magnetului permanent se poate estima poziția rotorului mașinii. Pentru aplicații de performanță, poziția între punctele de comutație este obținută prin compararea fluxului de linie al MP estimat cu un tabel care conține poziția în funcție de fluxul de linie al MP, calculat prin MEF. Pe baza poziției estimate a rotorului s-au propus și s-au implementat trei variante de estimatoare de

viteză. Primul estimator este bazat pe semnale de poziție obținute la deplasări unghiulare uniforme. Celelalte două utilizează estimatoare de stare cu PLL (buclă blocată în fază), unul bazat direct pe ecuația de mișcare și altul bazat direct pe poziția estimată. Estimatoarele sunt testate și calibrate în mediul SIMULINK și validate prin măsurători experimentale. Pe baza rezultatelor obținute autorul demonstrează pe deplin că observatoarele de stare propuse satisfac cerințele impuse, atât de regimurile staționare, cât și de cele dinamice.

Capitolul 6 prezintă rezultatele implementării controlului fără senzori de poziție rotorică a prototipului experimental, cu observatorii de poziție și viteză propuși și validați anterior. În plus, se adoptă o strategie de pornire în buclă deschisă cu rampă de frecvență și curent constant. Trecerea fără șocuri de la pornirea I-f la controlul fără senzori de poziție este validată prin experimente.

Capitol 7 descrie în detaliu standul experimental elaborat pentru efectuarea măsurătorilor prezentate în teză.

Capitolul 8 prezintă concluziile, contribuțiile originale și perspectivele de viitor.

Contribuții originale

Teza de față include, din punctul de vedere al autorului, următoarele contribuții originale:

- O prezentare generală a mașinilor sincrone fără perii cu magneți permanenți și a controlului lor, concentrându-se pe masini BLDC;
- Calculul electromagnetic de dimensionare a componentei electromecanice a prototipului de motor sincron trifazat cu magneți permanenți interiori (MSTMPI) cu înfășurare indusă concentrată, fracționară și topologie cu 6 dinți mari + 6 dinți mici pe stator, respectiv 8 poli cu MP îngropați și magnetizați alternat pe rotor;
- Programele de calcul numeric de câmp bazat pe metoda elementelor finite utilizate pentru verificarea proiectării mașinii
- Formulele de aproximare ale variației inductanțelor în funcție de curent și poziție rotorică obținute și utilizarea lor la modelul de circuit al mașinii.
- O procedură de măsurare a fost descrisă și rezultatele măsurate au fost prezentate și discutate, confirmând în mod satisfăcător calculele MEF;
- Elaborarea unui model digital avansat de simulare a funcționării prototipului de MSTMPI cu alimentare electronică cu curenți cvasi-dreptunghiulari, în regim staționar și tranzitoriu;
- Dezvoltarea estimatorului de poziție bazat pe detectarea trecerii prin zero a fluxului de linie al magnetului permanent și a estimatoarelor de viteză.
- Realizarea practică și experimentarea controlului fără senzori de poziție rotorică a prototipului de MSTMPI cu observatorii de poziție și viteză cu performanțe la nivelul servo acționărilor.
- Controlul fără senzori de poziție propus este utilizat împreună cu controlul fără senzori de poziție I-f, pentru pornire și funcționare la viteză redusă, cu tranziție fără șocuri, între ele;