

**IMPROVED
INDUCTION MACHINE
TORQUE OBSERVERS AND VIRTUAL LOADING IN INDUSTRIAL
APPLICATIONS, BASED ON REAL-TIME EMBEDDED CONTROLLERS**

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Electrică

autor ing. Adrian Daniel MARTIN

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Lucian TUTELEA

Aprilie 2023

Introducere

În prezent, echipamentele industriale joacă un rol crucial în toate industriile. De la senzori de măsurare la cele mai avansate sisteme complexe de control și supraveghere, echipamentele industriale reprezintă fundamentul în toate tipurile de aplicații, de la aplicații mici (cum ar fi grupuri mici de pompare, ventilatoare, starea mașinii, etc.) până la aplicații foarte mari (cum ar fi rafinării, industria chimică, porturi navale și industria aerospațială, etc.). Scopul acestui prim capitol este dedicat în principal justificării necesității utilizării echipamentelor industriale la o scară mai mare în cât mai multe aplicații industriale posibile și extinderii rolului lor clasic prin dezvoltarea capacităților de procesare în timp real. În afară de rolul primar al acestui sistem de colectare și monitorizare a semnalelor în timp real, în ultimii ani, necesitatea unui sistem SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) a devenit o cerință pentru a crește eficiența, a reduce timpul de nefuncționare al sistemului, a înregistra erori, pentru a facilita comunicarea cu alte echipamente (pompe, senzori, ventilatoare, echipamente complexe, interfețe om-mașină (HMI), etc.) și pentru a participa activ la decizii “inteligente”.

Cu o capacitate ridicată de calcul, PLC-urile (programmable logic controller) reprezintă un component crucial al sistemelor SCADA. Ele sunt răspândite și utilizate la nivel mondial datorită caracteristicilor lor: stabilitate împotriva vibrațiilor, variațiilor de temperatură, a prafului și necesită resurse umane reduse pentru întreținere. În prezent, PLC-urile pot rula sarcini complexe folosind funcții dedicate, fie integrate în sistemele SCADA, fie individual. În calitate de controler principal, PLC-urile pot avea o structură centralizată sau descentralizată complexă. În prezent, PLC-urile reprezintă un element central al automatizării industriale și au devenit o parte esențială a din ce în ce mai multor aplicații [1],[2].

Observație de stare

În majoritatea industriilor, controlul fără senzori reprezintă o realizare importantă datorită beneficiilor sale potențiale. Mai mult decât atât, în aplicațiile critice pentru siguranță, caracterul redundant este adesea realizat prin mai mulți senzori conectați "în paralel". În ultimele decenii, tendința a fost de a înlocui cel puțin unul dintre acești senzori cu un dispozitiv de monitorizare fără senzori. Odată cu creșterea cerințelor de a reduce costurile de operare a proceselor industriale, metodele de monitorizare fără senzori au fost investigate intensiv în toate domeniile. În controlul mașinilor electrice, regimul de funcționare al mașinii electrice poate fi monitorizat prin senzori (tracatoare de cuplu) sau prin estimatoare de viteză sau cuplu

(observatori / filtre). Există mai multe tipuri de observatoare în funcție de principiul lor de funcționare (Observatori clasici: Output based observer, Input based observer, Basic non-linear observer, Proportional-Integral Observer, Luenberger observer; Observatoare de perturbații: Disturbance observer, Unknown Input observer, Perturbation observer, Extended State observer; Observatoare moderne: Kalman Filter, Extended Kalman Filter, H_infinity; Observatoare avansate: observatoare bazate pe inteligență artificială) [3] - [6].

Testarea virtuală a mașinilor electrice

Testarea mașinilor electrice este necesară pentru verificarea preliminară a proiectării și validarea performanței unui întreg lot. Mai mult de atât, testarea termică a mașinilor electrice reprezintă o validare a sistemului de ventilare și a calității izolației și confirmă performanța mașinii. Odată cu dezvoltarea electronicii de putere, procedura de testare "standard" regenerativă a motoarelor electrice a fost realizată în principal într-o configurație de tip back-to-back. În multe cazuri, abordarea clasică a testării mașinilor electrice poate fi o procedură care necesită mult timp nu numai datorită procedurii de testare, ci mai degrabă din cauza necesității de cuplare mecanică între mașini. În cazul mașinilor mari sau cu ax vertical, procedura de încărcare la arbore poate fi foarte costisitoare sau chiar imposibilă. Procedura de încărcare artificială (virtuală) a mașinilor electrice prezintă o cerere mare în toate industriile (proiectare, producție și integrare de mașini electrice în sisteme complexe), în special acolo unde condițiile mecanice sau electrice necesită atenție sporită.

Există mai multe tipuri de proceduri de încărcare virtuală care sunt propuse în literatură: metoda de încărcare cu frecvență mixtă, metoda de injecție a armonicilor de curent, încărcarea termică dinamică și încărcarea artificială a mașinilor polifazate [7] - [9].

În plus față de toate informațiile menționate anterior legate de metodele de încărcare artificială, în această lucrare se propune o nouă metodă sintetică de încărcare a mașinilor electrice. Principalele componente ale noii metode de încărcare artificială sunt reprezentate de două mașini de inducție fără cuplaj mecanic, conduse de două invertoare cuplate între ele în magistrala de curent continuu. Astfel, se permite testarea mașinilor până la 120% din valoarea efectivă a curentului de fază a mașinii, cu o sursă de alimentare de două ori mai mică decât sursa de alimentare folosită pentru testarea artificială a unei singure mașini de inducție [10].

Tehnici de reducere activă a pulsațiilor de cuplu în sarcinile pulsatorii

Controlul activ al vibrațiilor (AVC-active vibration control) reprezintă o tehnică bine cunoscută în literatura de specialitate și este folosită în multe domenii, de la compensarea seismică la reducerea vibrațiilor în navele marine și anularea zgomotului în sistemele de sonorizare. Principiul AVC are la bază faptul că prin adăugarea unei forțe într-un sistem într-un mod opus (față de forța perturbatoare), cu amplitudinea egală sau mai mică decât forța perturbatoare, suma celor două forțe (perturbatoare și cea adăugată) ar trebui să aibă o influență mai mică asupra sistemului decât perturbația singură.

În practică, există diferite surse și tipuri de pulsații de cuplu în mașinile electrice sau sistemele electromecanice antrenate de mașini electrice. Indiferent de sursa pulsațiilor de cuplu (vibrațiile, zgomotul, poziționarea defectuoasă și chiar defectele mecanice) acestea pot produce potențialele efecte negative asupra sistemului. Pulsația de cuplu a unui sistem electromecanic reprezintă unul dintre factorii principali de defect al acestui sistem.

Filtrarea cuplului este o practică recomandată, des întâlnită în multe aplicații caracterizate de un cuplu pulstor. Printre metodele de filtrare a cuplului de sarcină (astfel reducând vibrațiile create și alte influențe negative), metodele pasive de filtrare sunt legate de utilizarea unor volante cu mase inerțiale mari montate pe același arbore cu sarcina. Una dintre cele mai utilizate aplicații practice ale maselor inerțiale mari este regăsită în sistemele de stocare a energiei recuperative (RESS - recuperative energy storage systems) de frecvență joasă.

În această lucrare este prezentată o idee nouă referitoare la principiul de reducere a pulsațiilor de cuplu în sistemele electromecanice cu sarcini dependente de poziție. În comparație cu soluțiile din literatură, această metodă se bazează pe o sarcină dependentă de poziție antrenată de o mașină de inducție conectată la rețea având montată pe același ax o mașină suplimentară (auxiliară). Mașina auxiliară este controlată cu ajutorul unui invertor static de frecvență (VFC – variable frequency inverter). Cuplul electromagnetic al mașinii de antrenare (mașina de inducție conectată la rețea) este estimat online, în timp real cu ajutorul unui estimator de cuplu care folosește cei trei curenți de fază și cele 3 tensiuni de alimentare a mașinii de inducție. Soluția teoretică presupune ca mașina auxiliară să fie utilizată pentru a produce un cuplu opus față de cuplul produs de sarcină, folosind doar informații obținute în timp real de la mașina de inducție conectată la rețea (cuplul estimat).

Echipamente industriale standard low-cost – extinderea utilizării

În ultimii ani, una dintre tendințele semnificative ale industriei a fost integrarea echipamentelor industriale compacte în toate aplicațiile. De la procesele de cercetare și educație până la aplicațiile de siguranță și de tip hardware-in-the-loop, PLC-urile și-au găsit locul în toate industriile: sănătate și medicină, tratarea apelor uzate, sectorul construcțiilor, generarea și gestionarea energiei. În aplicațiile mai complexe, în care automatele programabile reprezintă nucleul principal de control, dispozitive speciale și dedicate sunt utilizate în principal în sub-aplicațiile care necesită condiții speciale de funcționare. În sistemele de acționare electrică, procesul de mentenanță este un factor cheie pentru economia de timp și bani [11]. Monitorizarea în timp real a stării de sănătate a sistemului este un factor esențial în toate aplicațiile.

În cazul unei frecvențe variabile de eșantionare, este obligatoriu ca fiecare acțiune să fie realizată în pasul de calcul în care a avut loc eșantionarea astfel încât să se poate ține cont de caracterul aleatoriu al momentului realizării achiziției. În procesarea și analizarea semnalelor, acest tip de problemă reprezintă o problemă standard de achiziție de date. În literatură, cel mai simplu mod (care necesită un efort minim de calcul), presupune interpolarea semnalului eșantionat non-uniform și apoi "re-eșantionarea" acestuia la o frecvență constantă.

În aplicațiile care nu rulează în timp real, luând în considerare o unitate de control cu performanțe ridicate, utilizarea acestei metode poate fi o soluție practică. Pe de altă parte, în aplicațiile în timp real, cu actualizări ale ieșirilor la fiecare ciclu de program, procesul de interpolare/re-eșantionare nu poate fi implementat cu succes. PLC-urile standard low-cost au fluctuații ale timpului de rulare a programului dependente de sistem. Acest lucru înseamnă că, în funcție de operațiile cu prioritate ridicată sau în timpul activităților de comunicare, ciclul de program poate fi declanșat la momente de timp diferite. Comunicarea între sistemele periferice și unitatea centrală reprezintă o altă influență semnificativă asupra timpului de execuție. În funcție de volumul de date care trebuie schimbat, execuția ciclului program este supusă la devieri considerabile de timp. Fig. 1 prezintă un exemplu practic de variație a ciclului program în PLC. Chiar dacă timpul de execuție este setat la 1 ms, figura următoare arată o medie a timpului de execuție de 0,9086 ms.

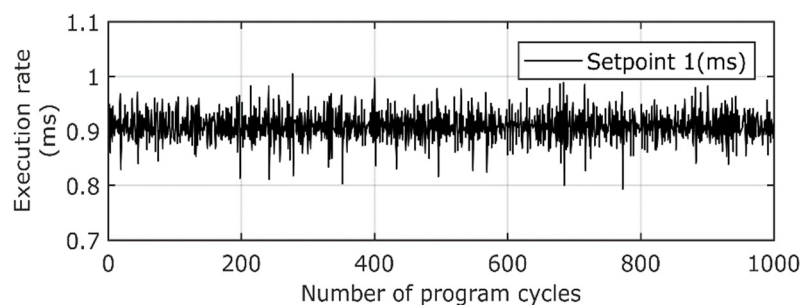


Fig. 1 Exemplu de variații ale ciclului program pentru un PLC low-cost – ciclul program fiind setat la 1ms

Mai mult decât atât, în acest caz timpul de deviere maxim dintre două execuții succesive reprezintă aproape 19% din timpul setat pentru execuția ciclului program. Variațiile inconsistente ale timpului determină ca utilizarea PLC-urilor să fie o provocare pentru aplicațiile de estimare a cuplului cu performanțe ridicate în timp real, la viteze mari. În unele cazuri pot fi realizate unele îmbunătățiri prin măsurarea timpului între două calcule succesive și folosirea acestuia ca o variabilă utilizată în realizarea integralelor. Funcția utilizată pentru citirea timpului actual poate produce o încărcare mai mare a unității centrale de procesare (CPU) prin urmare o variație și mai mare, inconsistentă a ciclului program total.

În plus față de investigația anterioară care demonstrează că un PLC cu cost redus nu poate fi folosit cu succes pentru realizarea estimării în timp real a cuplului electromagnetic al unei mașini de inducție, din cauza inconsistențelor în rata de achiziție și procesare, în continuare se prezintă o metodă teoretică cât și experimentată pentru a utiliza un PLC standard cu cost redus pentru analiza spectrului de frecvență a unui semnal de frecvență mică, utilizând Transformata Fourier Rapidă [12] în timp discret: Transformata Fourier Discretă (DFT).

În sistemele de monitorizare standard și predictivă a “stării de sănătate” a echipamentelor electromecanice (MCM și PHM - condition monitoring and predictive health monitoring), prezența sau absența unei frecvențe specifice din spectrul de frecvență al unui semnal măsurat (tensiune, curent, vibrație, viteză, etc.) poate prezice apariția unui posibil defect în sistem. Necesitatea analizei spectrului de frecvență pentru detectarea defecțiunilor sistemului poate reprezenta o practică bună de reducere a costului și a timpului de reparație. O analiză inițială poate conduce la o întreținere preventivă, reducând astfel timpul total de inactivitate al sistemului. În general, analiza spectrului de frecvență poate fi realizată online cu echipamente specializate sau prin măsurarea semnalelor și procesarea datelor offline cu software dedicat. Algoritmul Cooley-Tukey reprezintă una dintre cele mai populare metode de Transformare Fourier Rapidă în timp discret. Datorită faptului că necesită resurse reduse de date și constă în operații de date reale, algoritmul Cooley-Tukey este larg utilizat pentru implementarea DFT. Există multe versiuni ale acestui algoritm, bazate pe diferite abordări de procesare a datelor. Metoda este utilizată pentru matrici de date cu elemente complexe de lungimi egale cu puterile lui 2 (pentru a maximiza eficiența metodei) [13]. Există două posibilități de a efectua DFT: decimarea în timp (DIT) și decimarea în frecvență (DIF). Ambii algoritmi efectuează $N \cdot \log_2 N$ calculurile, unde N reprezintă lungimea totală a vectorului de intrare.

Estimarea cuplului pentru mașinile de inducție conectate la rețea cu ajutorul echipamentelor industriale

În general, dispozitivele de control dedicate ar trebui utilizate în funcție de tipul aplicației (aplicații critice, aplicații medicale, etc.) și de specificațiile aplicației (timp de răspuns, frecvență de achiziție, timp de actualizare a ieșirii, etc.). În sistemele de acționare electrică, procesul de întreținere este un factor cheie pentru reducerea costului de exploatare. Monitorizarea în timp real a stării de sănătate a sistemului este un factor important în toate aplicațiile [14].

Standul de testare utilizat în acest capitol (Fig. 2) este constituit din două mașini de inducție cuplate: cea conectată la rețea, cu trei perechi de poli (conexiune delta), cu o putere nominală de 11 kW, numită motorul principal (MM) și cealaltă, controlată prin invertorul de frecvență variabilă (VFC), cu două perechi de poli și o putere nominală de 15 kW.

Unitatea PLC este utilizată pentru controlul în timp real al mașinii de încărcare: prescrie modelul de încărcare al sarcinii. Platforma cRIO-9086 citește toate datele electrice necesare pentru estimarea cuplului mașinii de inducție conectate la rețea. Procesul de estimare a cuplului poate fi efectuat offline sau online (pe modulul FPGA).

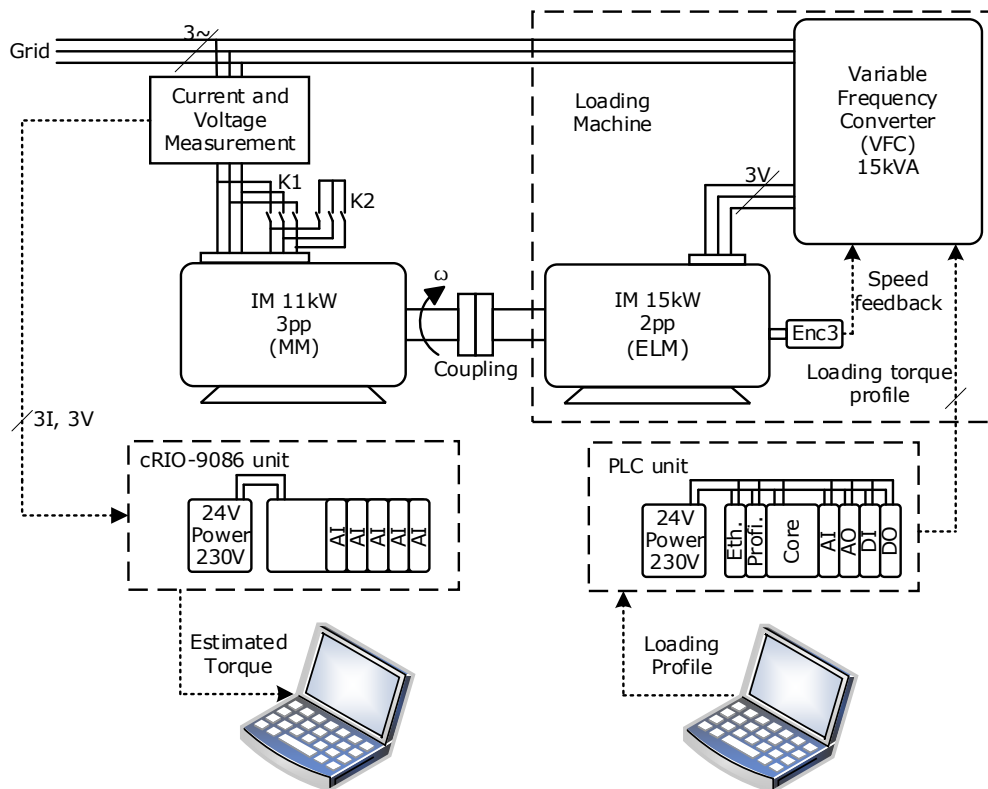


Fig. 2 Standul experimental utilizat pentru estimarea cuplului mașinii de inducție.

Pentru a realiza estimarea cuplului electromagnetic al mașinii de inducție în timp real, au fost simulate și studiate experimental trei estimatoare de cuplu (observatorul Luenberger, metoda de calcul direct al cuplului și metoda de calcul dinamică a cuplului - bazată pe modelul mașinii de inducție utilizat pentru simulări).

În capitol se prezintă rezultatele simulate în două situații distincte: când mașina de inducție este alimentată cu o sursă ideală de tensiune trifazată și când mașina de inducție este alimentată cu un sistem de tensiune trifazat ce reproduce caracteristicile reale ale tensiunii trifazate. Pentru a obține o medie mai precisă a conținutului relativ al armonicilor și pentru a reproduce mai precis influențele componente inverse a tensiunii reale, sistemul de tensiune trifazat care alimentează mașina de inducție a fost măsurat în fabrica în care se află standul experimental, timp de mai multe zile la diferite ore ale zilei.

Corectitudinea achiziției prezintă o influență semnificativă asupra acurateții simulărilor mașinii de inducție.

Figura 3 arată cuplul electromagnetic simulat al unui motor de inducție atunci când mașina este alimentată cu un sistem de tensiune trifazat ideal. În schimb, în timpul procesului de achiziție, frecvența de achiziție a fost modificată aleatoriu (pentru a simula inconsistența în procesul de achiziție). În funcție de variațiile timpului de achiziție, chiar și un PLC cu performanțe decente prezintă o variație a timpului de rulare mai mare de 6% din timpul setat.

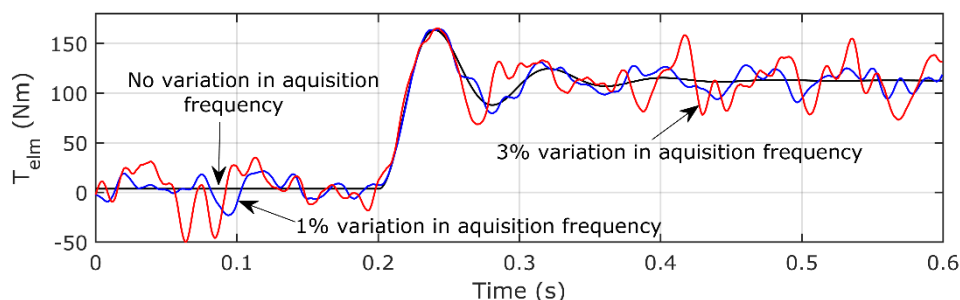


Fig. 3 Influența variațiilor timpului de achiziție asupra funcționării mașinii de inducție - simulări

Se poate observa că la o variație aleatorie de doar 1% a frecvenței de achiziție (graficul albastru), mașina de inducție simulată are o funcționare instabilă, în timp ce la o variație de 3% a frecvenței de achiziție (graficul roșu), cuplul electromagnetic variază în regim stabilizat chiar cu mai mult de 50% față de valoarea sa medie.

Figura următoare arată rezultatele experimentale comparative ale celor trei estimatoare ca răspuns la un semnal treaptă prescris mașinii de încărcare. La încărcarea nominală, în lipsa oscilațiilor, metoda dinamică produce un cuplu electromagnetic defazat față de observatorul Luenberger, în timp ce metoda de calcul direct prezintă cel mai mică variație de cuplu, în ciuda limitărilor de estimare a vitezei. Nu sunt observate diferențe semnificative între estimatoare în timpul regimului tranzitoriu.

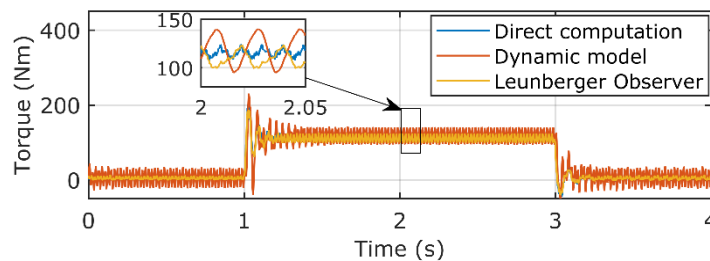


Fig. 2 Cuplul electromagnetic estimat cu ajutorul celor trei estimatoare pentru o încărcare treaptă a mașinii de inducție de la gol la valoarea nominală a cuplului

Încărcarea artificială a mașinilor de inducție cu ajutorul PLC-urilor

Acest capitol prezintă o metodă artificială de încărcare a două mașini de inducție (IM) fără cuplaj mecanic, utilizând două invertoare de frecvență variabilă (VFC) conectate împreună prin intermediul magistralei de curent continuu. Invertoarele utilizate, echipamente de control și protocoale de comunicație respectă standardele industriale în vigoare. Metoda încărcării artificiale propusă în acest capitol presupune încărcarea mașinilor de inducție la curent nominal prin comutarea rapidă între regimul de motor și regimul de generator. Două dintre cele mai semnificative avantaje ale acestei metode sunt reprezentate de reducerea costurilor cu resursele umane și absența cuplajului mecanice între cele două mașinile. În schimb, metoda necesită utilizarea a două mașini identice și a două invertoare identice. În plus, testarea a două mașini simultan poate fi considerată o metodă de eficientizare a timpului de testare. În literatură se pot găsi mai multe metode de încărcare artificială a mașinilor electrice [15].

Testarea mașinilor prin injectarea puterii oscilante în rețea ar putea fi o opțiune viabilă, dar un inverter bidirecțional ac-dc-ac costă aproximativ la fel ca două invertoare unidirecționale în cazul invertoarelor industriale standard. În plus, în cazul unei rețele electrice slabe, oscilațiile puternice de putere din rețea au un impact negativ asupra tensiunii rețelei (determină apariția efectului “flicker” sau funcționarea necorespunzătoare a altor echipamente) [16].

Figura 5 prezintă diagrama standard a stadului experimental utilizată pentru realizarea încărcării artificiale. Sunt utilizate două invertoare de frecvență variabilă industriale standard (VFC1, VFC2). Astfel, comunicarea PLC-VFC utilizează protocoale industriale standard. Nu s-au realizat modificări suplimentare la principiul de funcționare al VFC-urilor. Două mașini de inducție trifazate identice sunt conectate direct la cele două invertoare. VFC1 conduce IM1, în timp ce IM2 este condus de VFC2. Mașinile de inducție nu sunt cuplate mecanic. Nu s-au utilizat tractoare de poziție sau senzori de viteză în această metodă de încărcare artificială.

Având în vedere conexiunea în stea a mașinilor de inducție și utilizarea invertoarelor statice, se evidențiază faptul că în timpul procedurii de încărcare artificială, curentul care circulă între cele două invertoare nu conține armonici de ordin $3k$ ($k = 0,1,2, \dots$) nici armonici semnificative de ordin 5 și 6.

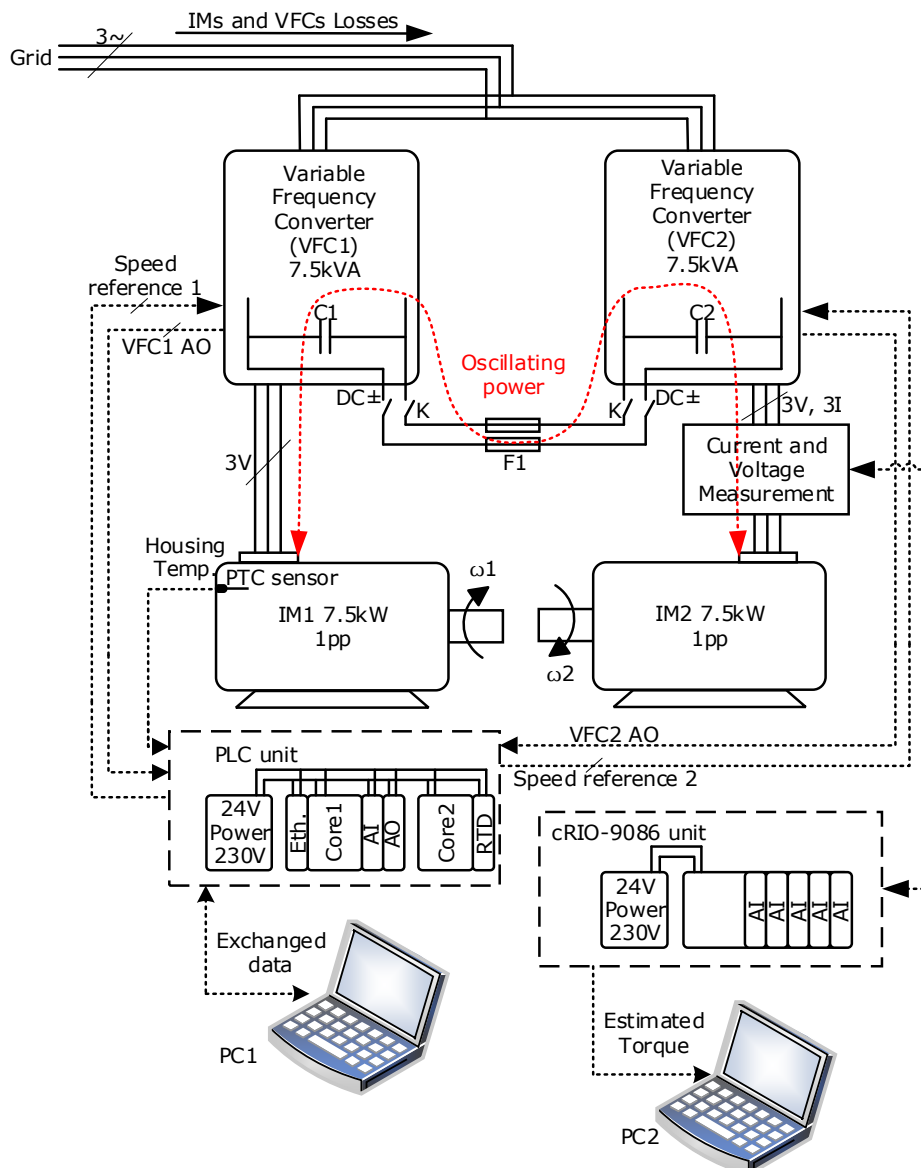


Fig. 3 Diagrama simplificată a standului experimental utilizat pentru realizarea încărcării artificiale

În cadrul metodei încărcare artificială în care cele două mașini de inducție au fost încărcate la curent nominal pe fază, au fost utilizate numai echipamente industriale / comerciale și protocoale de comunicare standardizate. Când o mașină de inducție accelerează, cealaltă frânează. Puterea circulă de la o mașină de inducție la cealaltă prin intermediul magistralei comune de curent continuu a celor doua invertoare de frecvență. Sunt prezentate mai multe modalități de modificare a curentului efectiv al mașinilor de inducție: fie prin modificarea amplitudinii referinței de viteză, fie prin modificarea frecvenței referinței de viteză. În timpul testelor, componenta continuă a referinței de viteză pentru cele doua mașini a fost setată la 2500rpm (în interiorul celor două invertoare). Limita curentului setată în invertoare este de 130% din curentul nominal al mașinilor de inducție (aproximativ 20,5 A).

Pentru limitarea curentului sursei de alimentare a standului experimental au fost investigate diferite referințe de viteză: referințe de viteză defazate la 180 de grade, defazaj variabil între cele două referințe - în cazul în care mașina de inducție în modul de motor era întârziată să accelereze, și referință triunghiulară - în cazul în care mașinile de inducție schimbau regimul de funcționare mai rapid. Încărcarea artificială poate fi realizată fie în buclă deschisă fie în buclă închisă. Testul termic, prezentat în Figura 6, poate fi considerat o aplicație practică a procedurii automatizate de pornire-încărcare-oprire în buclă închisă.

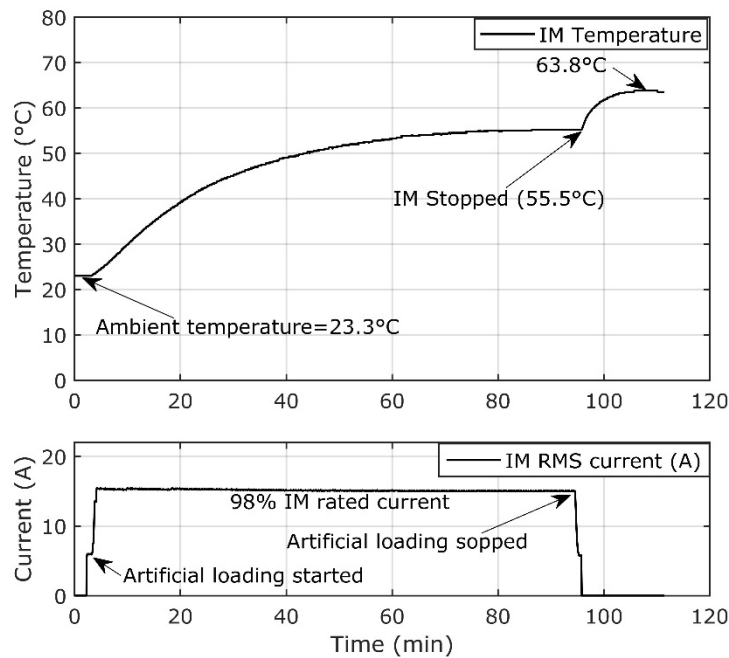


Fig. 4 Temperatura mașinii de inducție (măsurată în locul cârligului de ridicare) și valoarea efectivă a curentului de fază pentru o încărcare la 2500rpm cu ± 500 rpm amplitudine și 6Hz frecvență de oscilație

Reducerea activă a pulsațiilor de cuplu în sarcini pulsatorii ce depind de poziția pe tură

Tehnica de control activ al vibrațiilor (AVC) este reprezentată de utilizarea unei forțe externe adăugate în sistem, în sens opus forței perturbatoare (sursa principalelor vibrații), pentru a reduce parțial sau total efectul nedorit al vibrațiilor. O altă aplicabilitate modernă a acestei tehnici poate fi întâlnită în aplicații cu roboți, unde poziționarea fără vibrații joacă un rol cheie în creșterea preciziei [17].

Ca o particularitate, în cazul căștilor audio, anularea activă a zgomotului (active noise canceling - ANC), care este - mai mult sau mai puțin - bazată pe același principiu ca AVC, a fost adoptată de toți cei mai importanți venditori de pe piață. În acest caz, anularea activă a zgomotului (ANC) este destul de similară cu AVC deoarece, forța suplimentară adăugată în sistem este înlocuită cu sunetul/zgomotul (care trebuie eliminat) măsurat în afara căștilor și apoi reconstruit în interiorul căștilor pentru a elimina zgomotul de fundal nedorit [18].

Unul dintre cele mai simple metode pentru reducerea pulsațiilor de cuplu în sisteme electromecanice cu mașini electrice rotative este reprezentat de utilizarea metodelor mecanice pasive: mase inertiabile mari montate pe același arbore cu sarcina pulsatorie.

Acest capitol tratează metodele de reducere a pulsațiilor de cuplu pentru sarcini pulsatorii dependente de poziție (cum ar fi compresoarele cu pistoane) antrenate de mașini de inducție conectate la rețea.

În comparație cu soluțiile prezentate în literatură, metoda prezentată în această lucrare se bazează pe un motor auxiliar antrenat de un VFC, montat pe același arbore ca și sarcina pulsatorie și mașina de antrenare (Fig. 7). În plus, această metodă de reducere a pulsațiilor de cuplu implică o tehnică de control relativ simplă în comparație cu controlul repetitiv (Repetitive Control - RC). Principala diferență, constă în faptul că această soluție nu necesită cunoașterea parametrilor mecanici; această are nevoie doar de momentul de inerție pentru amortizarea activă a pulsațiilor de cuplu.

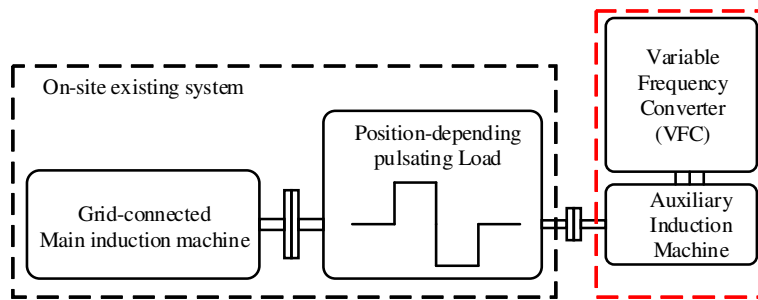


Fig. 5 Diagrama de bază a principiului de reducere a pulsațiilor de cuplu propus

Rezultatele metodei de reducere activă a pulsațiilor de cuplu obținute cu ajutorul sistemului de control în buclă deschisă sunt prezentate în Figura 8. În acest caz, experimentul este împărțit în cinci sectoare. În intervalul 2s și 5s, cuplul de încărcare urmează o componentă sinusoidală de 70% componentă continuă + 30% componentă sinusoidală (din putere nominală a mașinii de inducție de antrenare). Până la aplicarea metodei de reducere a pulsațiilor de cuplu, mașina auxiliară este conectată doar mecanic la sistem fără a produce cuplu (doar momentul de inerție are influență asupra funcționării sistemului). În intervalul 3s - 5s, se aplică metoda de reducere activă a pulsațiilor de cuplu în buclă deschisă. În sectorul 3s-4s, mașina auxiliară produce un cuplu sinusoidal defazat la 180 de grade, luând în considerare cuplul mașinii de inducție conectată la rețea. În sectorul 3s-4s, mașina auxiliară compensează 14% din cuplul nominal al mașinii de inducție conectată la rețea, în timp ce în sectorul 4s-5s, mașina auxiliară compensează 17% din cuplul nominal al mașinii de inducție conectată la rețea.

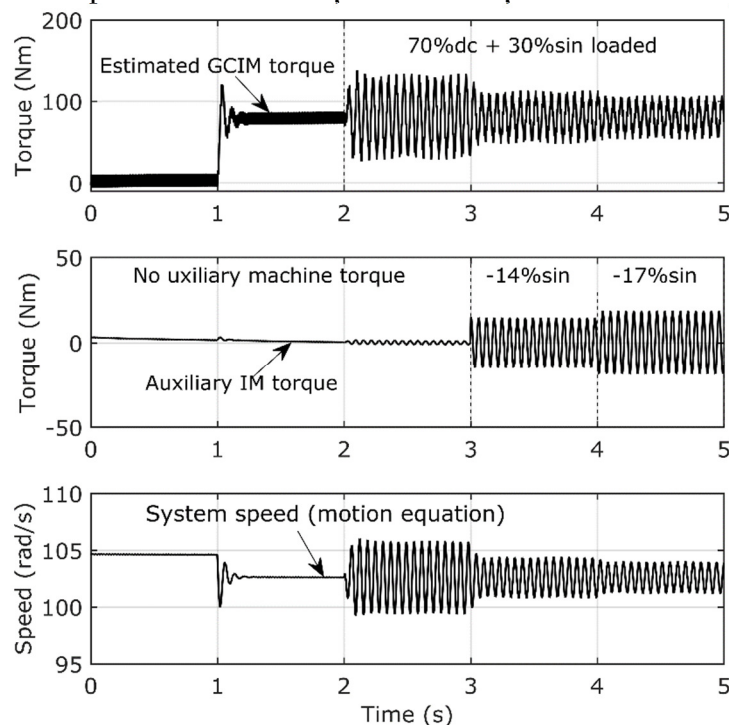


Fig. 6 Cuplul estimat al mașinii de iducție conectată la rețea (GCIM), cuplul mașinii auxiliare (Auxilliary IM), viteza sistemului în cazul metodei de reducere a pulsațiilor de cuplu în buclă deschisă la diferite valori ale cuplului auxiliar

Având în vedere că sarcinile pulsatorii care depind de poziția pe tură nu își modifică semnificativ unghiul cuplului de încărcare, s-a propus o metodă în două etape (“two-step method”) pentru detectarea preliminară a momentului de inerție total și a cuplului de încărcare produs de mașina de încărcare. În acest capitol sunt prezentate rezultatele simulării și experimentale pentru diferite spectre ale frecvenței ale cuplului de încărcare. Limitările configurației experimentale sunt evidențiate pentru cupluri de încărcare complexe compuse din

primele trei armonice. Figura 9 prezintă referința de cuplu dată din PLC către inverterul static de frecvență, cuplul real de încărcare produs de inverter (ambele citite din inverter pe fibră optică) și cuplul rezultat obținut după aplicarea metodei în doi pași.

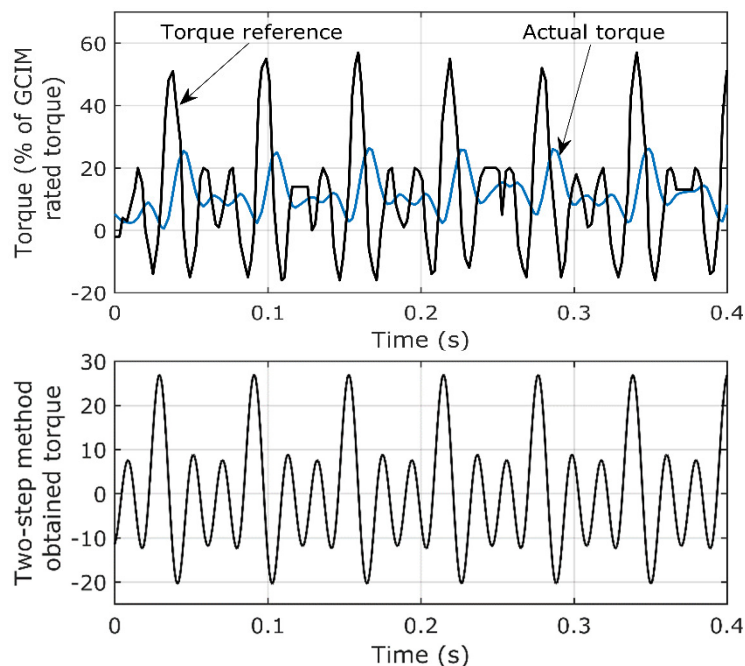


Fig. 7 Referința de cuplu de încărcare prescrisă de către PLC către inverter, cuplul real produs de inverter în mașină și cuplul de încărcare reconstruit prin metoda în doi pași

Concluzii, contribuții și direcții de viitor

Concluzii

Scopul principal al acestei lucrări reprezintă în principal studiul posibilității de extindere a rolului clasic al echipamentelor de comandă și control industrial. În acest context, utilizând echipamente industriale clasice, sunt prezentate trei aplicații diferite, simulate și validate experimental (1. Utilizarea PLC-urilor clasice ca și estimatoare de cuplu, 2. Realizarea unei noi metode de încărcare artificială, 3. Reducerea activă a pulsațiilor de cuplu din sistemele electromecanice cu sarcini care depind de poziția pe tură antrenată de mașini electrice conectate la rețea). Pentru a extinde rolul principal tradițional al PLC-urilor, au fost investigate în mod extensiv trei PLC-uri diferite de cost redus pentru a fi utilizate ca observatori de cuplu electromagnetic al mașinii de inducție conectată la rețea. S-a demonstrat că factorul principal care trebuie luat în considerare pentru acest tip de aplicație nu este reprezentat de frecvența de achiziție, ci de variația ciclului programului PLC-ului.

S-a propus o procedură de încărcare artificială (sintetică) pentru două mașini de inducție identice necuplate mecanic, antrenate de două invertoare statice de frecvență unidirecționale identice conectate împreună printr-o magistrală comună de tensiune continuă. Testul de încărcare la curent nominal pe fază și testul termic pot fi efectuate cu echipamente standard industriale. Nu au apărut supratensiuni pe magistrala comună de tensiune continuă chiar și la 120% din curentul nominal al mașinii de inducție testată. Experimentul a demonstrat că eficiența mașinilor de inducție joacă un rol important atât timp cât vârfurile de curent ale sursei de curent alternativ sunt date de pierderile mașinilor de pe o perioadă completă de încărcare.

Pentru sistemele electromecanice rotative, rezultate acceptabile pot fi obținute în ceea ce privește reducerea activă a pulsațiilor de cuplu pentru un cuplu de încărcare dependent de poziție, folosind o nouă configurație electromecanică cu o mașină auxiliară mai mică montată pe același arbore. Deși această configurație necesită o a treia mașină condusă de un inverter

unidirecțional, mașina auxiliară poate netezi cu succes pulsațiile de cuplu alternativ prin producerea unui cuplu defazat la 180 de grade față de cuplul de încărcare. S-a demonstrat analitic și experimental că aceeași configurație a standului experimental poate fi utilizată într-o metodă în doi pași pentru detectarea inerției sistemului și a cuplului de încărcare al mașinii de lucru. S-a arătat experimental că faza cuplului de încărcare necesită atenție specială pentru o compensare eficientă. Metoda în doi pași poate fi de asemenea utilizată pentru cupluri de încărcare complexe cu conținut armonic și defazațe diferite de 0 grade. Frecvența cuplului de încărcare al mașinilor din cadrul standului experimental este limitată de inerția totală a sistemului.

Contribuții

Principalele contribuții ale autorului sunt rezumate mai jos:

- Implementarea pe PLC a trei estimatoare de cuplu electromagnetic pentru mașini de inducție și implementarea transformatei Fourier Discretă bazată pe algoritmul Cooley-Tokey Radix-2.
- Simularea, atât pentru date ideale, cât și pentru date ideale cu caracteristici reale, a tuturor celor trei estimatoare de cuplu: metoda de calcul directă, metoda de calcul dinamică al cuplului și observatorul Luenberger.
- Crearea unui algoritm dedicat în mediul de programare Labview (modul de programare FPGA + RT) pentru platforma cRIO-9086 pentru investigarea online a tuturor celor trei estimatoare de cuplu, inclusiv a procedurii de comunicare Modbus TCP cu invertoarele de frecvență și a citirii de mare viteză a semnalului incremental de tip TTL din encoder.
- Propunerea unei noi metodologii de încărcare artificială a două mașini identice necuplate mecanic antrenate de două invertoare cuplate pe magistrala de tensiune continuă cu analiză detaliată, modelare numerică și validare experimentală.
- Simularea și validarea experimentală a metodei propuse de reducere activă a pulsațiilor de cuplu atât în simulare cât și experimental.
- Propunerea, testarea și validarea experimentală a unei noi unelte matematice în doi pași bazată pe soluția propusă cu o mașină auxiliară montată pe același arbore, utilizată pentru procedura de detectare preliminară a momentului total de inerție și a cuplului de încărcare al sistemului.

Direcții de viitor

Se propun următoarele investigații suplimentare:

- Identificarea unui nou PLC low-cost cu performanțe reduse care poate fi utilizat cu succes pentru estimarea cuplului mașinii de inducție pe baza observatoarelor de cuplu tradiționale.
- Identificarea de noi estimatoare de cuplu adecvate pentru automate programabile de costuri reduse.
- Îmbunătățirea estimării pierderilor pentru metoda de încărcare artificială, ținând cont și de profilul referinței de viteză (sinus, triunghi, sinus cu defazaj).
- Crearea unei baze de date sub formă de tabel (lookup table) pentru utilizarea mai exactă a întârzierilor semnalelor de comandă dintre PLC și inverter în cazul metodei de determinare preliminară a momentului de inerție prin metoda în doi pași.
- Dezvoltarea de noi strategii de reducere a pulsațiilor de cuplu ținând cont și de stresul mecanic maxim admis asupra cuplajelor mecanice din mașini.

Referințe

- [1] G. Yadav and K. Paul, 'Architecture and security of SCADA systems: A review', *Int. J. Crit. Infrastruct. Prot.*, vol. 34, p. 100433, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.ijcip.2021.100433.
- [2] D. Pliatsios, P. Sarigiannidis, T. Lagkas, and A. G. Sarigiannidis, 'A Survey on SCADA Systems: Secure Protocols, Incidents, Threats and Tactics', *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 22, no. 3, pp. 1942–1976, 2020, doi: 10.1109/COMST.2020.2987688.
- [3] A. Radke and Z. Gao, 'A survey of state and disturbance observers for practitioners', Jul. 2006, p. 6 pp. doi: 10.1109/ACC.2006.1657545.
- [4] D. Astolfi, L. Zaccarian, and M. Jungers, 'On the use of low-pass filters in high-gain observers', *Syst. Control Lett.*, vol. 148, p. 104856, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.sysconle.2020.104856.
- [5] D. Luenberger, 'An introduction to observers', *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 16, no. 6, pp. 596–602, Dec. 1971, doi: 10.1109/TAC.1971.1099826.
- [6] T. Lacey, 'Tutorial: the Kalman Filter 11.1 Introduction 11.2 Mean Squared Error', 1998. Accessed: Dec. 12, 2022. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Tutorial%3A-the-Kalman-Filter-11.1-Introduction-11.2-Lacey/2a4761df17525de463341320bf0458c98e04c654>
- [7] 'IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators', *IEEE Std 112-2017 Revis. IEEE Std 112-2004*, pp. 1–115, Feb. 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8291810.
- [8] A. Meyer and H. W. Lorenzen, 'Two-Frequency Heat Run - A Method of Examination for Three-Phase Induction Motors', *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-98, no. 6, pp. 2338–2347, Nov. 1979, doi: 10.1109/TPAS.1979.319433.
- [9] J. Herman, J. Bojkovski, R. Fišer, and K. Drobnič, 'An Improved Design of Synthetic Loading Method for a Rapid In-Wheel Motor Characterization in Different Operating Points', *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 7, no. 4, pp. 2562–2575, Dec. 2021, doi: 10.1109/TTE.2021.3089482.
- [10] A. D. Martin, L. N. Tutelea, and I. Boldea, 'Twin Inverter-Fed Induction Machines Artificial Loading Without Mechanical Coupling', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 58, no. 3, pp. 3738–3749, May 2022, doi: 10.1109/TIA.2022.3151320.
- [11] M. A. Sehr *et al.*, 'Programmable Logic Controllers in the Context of Industry 4.0', *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 17, no. 5, pp. 3523–3533, May 2021, doi: 10.1109/TII.2020.3007764.
- [12] J. W. Cooley, P. A. W. Lewis, and P. D. Welch, 'The Fast Fourier Transform and Its Applications', *IEEE Trans. Educ.*, vol. 12, no. 1, pp. 27–34, Mar. 1969, doi: 10.1109/TE.1969.4320436.
- [13] A. Madanayake *et al.*, 'Fast Radix-32 Approximate DFTs for 1024-Beam Digital RF Beamforming', *IEEE Access*, vol. 8, pp. 96613–96627, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2994550.
- [14] B. Klima, L. Buchta, M. Dosedel, Z. Havranek, and P. Blaha, 'Prognosis and Health Management in electric drives applications implemented in existing systems with limited data rate', in *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Sep. 2019, pp. 870–876. doi: 10.1109/ETFA.2019.8869520.
- [15] L. Tutelea, I. Boldea, A. E. Ritchie, P. Sandholdt, and F. Blaabjerg, 'Thermal Testing for Inverter-Fed Induction Machines using Mixed Frequency Method', in *Proceedings of International Conference on Electrical Machines, ICEM'98, Istanbul, Turkey, Sept. 1998*, Faculty of Engineering: Middel East Technical University, 1998. Accessed: Jul. 29, 2021. [Online]. Available: <https://vbn.aau.dk/en/publications/thermal-testing-for-inverter-fed-induction-machines-using-mixed-f>
- [16] K. Li and Y. Wang, 'DC-Link Voltage Fluctuation Reduction of Vector Controlled

PMSM Drives with Reduced DC-Link Capacitor', in *2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, Dec. 2018, pp. 909–912. doi: 10.1109/ITOEC.2018.8740730.

[17] D. Williams, H. H. Khodaparast, and S. Jiffri, 'Active vibration control of an equipment mounting link for an exploration robot', *Appl. Math. Model.*, vol. 95, pp. 524–540, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.apm.2021.02.016.

[18] J. Wang, J. Zhang, J. Xu, C. Zheng, and X. Li, 'An optimization framework for designing robust cascade biquad feedback controllers on active noise cancellation headphones', *Appl. Acoust.*, vol. 179, p. 108081, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108081.