

**MODELAREA, CONTROLUL ȘI TESTAREA MAȘINILOR ELECTRICE
CU MAGNEȚI PERMANENȚI ȘI RELUCTANȚĂ VARIABILĂ PENTRU
APLICAȚII ÎN ENERGII REGENERABILE ȘI AUTOMOTIVE**

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Electrică

autor ing. Liviu-Dănuț VITAN

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Nicolae MUNTEAN

luna 03 anul 2025

Această teză prezintă strategii noi de control pentru mașinile electrice cu magneți permanenți și reluctanță variabilă, utilizate în domeniul surselor regenerabile și automotive. Sunt propuse și analizate patru strategii de control: o metodă fără encoder pentru un generator sincron cu reluctanță variabilă care are rotor pasiv cu bariere de flux (SynRG), și trei strategii bazate pe encoder pentru o mașină sincronă cu reluctanță variabilă care are rotor pasiv anizotrop cu tole axiale (ALA Rotor RSM) și pentru o mașină sincronă cu magneți interpolari cu concentrare de flux magnetic (IPMSM). ALA Rotor RSM și IPMSM sunt prototipuri noi proiectate și fabricate, destinate pentru autovehicule electrice. Acestea sunt investigate în această teză pentru a stabili dacă pot fi considerate o alternativă a celor existente oferind costuri mai reduse de manufacturare și performanțe mai ridicate pentru funcționarea într-un domeniu extins de turații.

Metoda propusă de control pentru ALA Rotor RSM se bazează pe o funcție de gradul 1, determinată înainte de punerea în funcțiune a mașinii electrice utilizând inductanțele măsurate pe axele dq, considerând și cuplajul magnetic dintre acestea. Scopul metodei este de a conduce ALA Rotor RSM astfel încât randamentul acesteia să fie cât mai apropiat de cel maxim, chiar și în condiții de saturație. O a doua strategie de control propusă, bazată pe o funcție de tip look-up table este utilizată pentru a valida eficiența primei metode. Funcția look-up table conține perechile de curenți pe axele dq pentru care ALA Rotor RSM și inverterul acesteia au randamentul maxim. Acestea au fost măsurate experimental pentru un domeniu larg de turații și cupluri de încărcare, începând de la o valoare minimă până la cea nominală.

În final se prezintă un concept propus pentru un microbuz/autobuz electric destinat pentru transportul public, a cărui încărcare se realizează pe durata opririi în stații, utilizând supercondensatoare ca și element de stocare a energiei electrice. Pentru tracțiune se utilizează mașina IPMSM care are magneți permanenți de tip Bonded-NdFeB. Transferul energiei electrice dintre supercondensatoare și circuitul de DC al inverterului care conduce IPMSM-ul se realizează cu un convertor hibrid bidirecțional de curent continuu cu raport mare de conversie (HBDC). Sunt analizate două cazuri: un model la scară completă (1:1) verificat prin simulări și un model experimental la scară de laborator (1:20) care include subsistemele principale ale microbuzului.

Strategia de control propusă pentru IPMSM este analizată și testată atât pentru funcționarea mașinii individual cât și împreună cu celelalte subsisteme (HBDC și SC).

Capitolul 1 prezintă o introducere în domeniul tezei și analizează directivele, legislația și obiectivele UE privind eficiența motoarelor electrice și creșterea producției de energie din surse regenerabile. De asemenea sunt specificate tendințele industriei în ceea ce privește dezvoltarea de noi motoare cu eficiență ridicată.

În continuarea celor de mai sus, este prezentată o analiză a principalelor strategii de control fără encoder (Fig. 1) pentru mașinile electrice sincrone cu reluctanță variabilă și o prezentare generală a metodelor de determinare a parametrilor și strategiile de control cu encoder identificate în literatura de specialitate pentru ALA Rotor RSM și IPMSM. De asemenea, sunt analizate arhitecturile sistemelor electrice al autovehiculelor electrice, în principal al celor care utilizează supercondensatoare ca element de stocare.

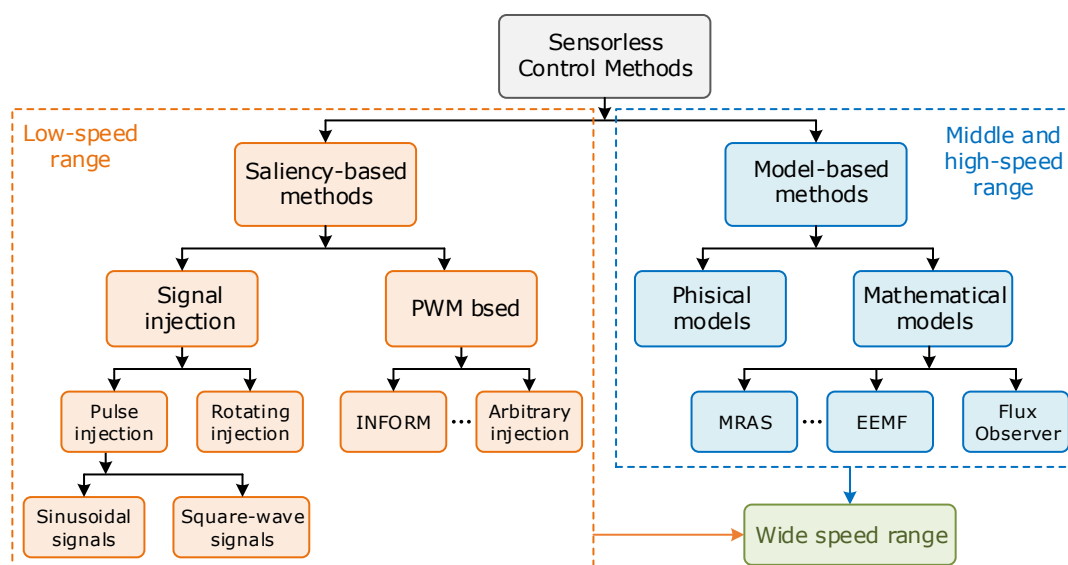
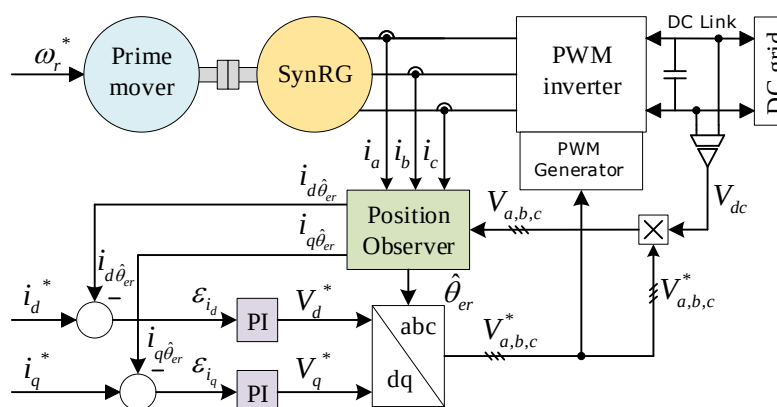


Fig. 1 Principalele metode de control fără encoder pentru SynRM [1], [2]

Dezvoltarea surselor de energie regenerabilă, a vehiculelor electrice (EVs) și creșterea cerințelor în ceea ce privește eficiența energetică, au condus la evoluția rețelelor clasice de current alternativ (AC) către rețele hibride în care este inclusă distribuția în current continuu. Beneficiile integrării infrastructurii DC împreună cu distribuția în AC sunt date de majoritatea surselor de energie regenerabilă (panouri fotovoltaice) care în mod natural furnizează current continuu, de sisteme de stocare cu baterii și dezvoltarea vehiculelor electrice cu sisteme de încărcare în current continuu. În plus, rețele AC/DC pot să distribuie energia bidirecțional cu vehiculele electrice, cunoscute sub numele de aplicații vehicle-to-grid, ceea ce deschide oportunități noi pentru strategii de stabilizare a rețelelor și stocare a energiei. În acest context, este prezentată o propunere de rețea rezidențială de tip AC/DC, numită nanogrid, care include o turbină eoliană și panouri fotovoltaice ca și surse de energie electrică, un sistem de stocare cu baterii, transfer bidirecțional de putere între rețelele de AC și DC, electrocasnice alimentate în DC și interfața cu EV [3], [4].

Capitolul 2 prezintă o strategie de control fără encoder propusă pentru o mașină sincronă cu reluctanță variabilă de turație redusă care funcționează ca generator (SynRG) [5]. Un observator este implementat pentru a determina poziția unghiulară a rotorului folosind modelul SynRG și

Diagrama de control propusă pentru SynRG este prezentată în Fig. 2. Aceasta include o mașină de inducție (Prime Mover) condusă în referință de turație, utilizată ca și mașină de antrenare a SynRG. Prime Mover emulează de fapt o sursă de energie care poate fi o turbină eoliană, hidro, turbină cu abur sau în esență, orice sursă capabilă să producă viteză unghiulară și cuplu mecanic. Desigur, pentru a reduce poluarea, ar trebui să utilizeze o sursă de energie regenerabilă. SynRG este condus de un inverter al cărui circuit intermediar de curent continuu este conectat la o rețea de DC în care este injectată energia produsă de SynRG. În timpul procedurii de punere în funcțiune sau când Prime Mover nu funcționează, inverterul absoarbe energie din rețeaua de DC pentru a-și alimenta circuitele interne. Strategia de control este implementată în sistemul de coordonate dq. Referința de putere pentru SynRG este obținută prin prescrierea curenților pe axa d (i_d^*) și pe axa q (i_q^*). Referințele de curenți sunt comparate cu valorile măsurate ($i_{d\hat{\theta}_{er}}$ și $i_{q\hat{\theta}_{er}}$) transformate în sistemul de coordonate dq utilizând poziția estimată ($\hat{\theta}_{er}$) furnizată de observator. Erorile de curenți sunt procesate cu regulatoare de tip PI pentru a obține tensiunile de referință pe axe dq (V_d^*, V_q^*) care sunt apoi trimise către unitatea PWM a inverterului. Poziția rotorului estimată ($\hat{\theta}_{er}$) necesară pentru transformarea de coordonate și pentru estimarea turației este furnizată de către observator utilizând curenții de fază mășurați ai SynRG (i_{abc}) și valoare tensiunii din circuitul intermediar de curent continuu al inverterului (V_{dc}). De asemenea V_{dc} este utilizată pentru a estima tensiunile de fază ale SynRG (V_{abc}) din tensiunile de referință.



O metodologie de control implementată în coordonate rotorice dq, necesită cunoașterea

poziției rotorului în principal pentru transformarea de coordonate și estimarea anumitor parametri. Sistemul real de referință în coordonate dq al SynRG diferă față de cel staționar $\alpha\beta$ cu unghiul dat de poziția rotorului θ_{er} , și se rotește cu turația ω_{er} . Atunci când este utilizat un encoder pentru a furniza poziția rotorului θ_{er} , sistemul de coordonate dq al strategiei de control este în principiu aliniat cu cel real al SynRG. În schimb, în cazul strategiei de control fără encoder, poziția rotorului trebuie estimată. Astfel că rezultă un sistem de referință în coordonate dq estimat ($\hat{d}\hat{q}$) având unghiul dat de poziția rotorului estimat ($\hat{\theta}_{er}$) față de sistemul de referință în coordonate staționare $\alpha\beta$. Sistemul de coordonate rotorice estimate $\hat{d}\hat{q}$ se rotește cu turația estimată $\hat{\omega}_{er}$ și are eroarea de poziție ε_θ față de sistemul real de coordonate dq. Scopul unui observator este de a determina eroarea de poziție și astfel să alinieze cele două sisteme de coordonate rotorice: cel estimat ($\hat{d}\hat{q}$) și cel real (dq). Eficacitatea metodologiei de control depinde de acuratețea estimării poziției rotorului. Modelul de observator pentru estimarea poziției rotorului propus în acest capitol, se bazează pe utilizarea modelului matematic al SynRG în sistemul de referință dq dar fiind estimat față de cel real. Astfel că, pentru a determina poziția estimată a rotorului $\hat{\theta}_{er}$, curentul estimat pe axa q din modelul observatorului ($\hat{i}_q$) este comparat cu curentul măsurat pe axa q dar transformat în sistemul de coordonate dq utilizând poziția estimată ($i_{q\hat{\theta}_{er}}$). Eroarea rezultată dintre cei doi curenți ($\varepsilon_{i_{d\hat{\theta}_{er}}}$) este procesată de un regulator de tip PI a cărui ieșire reprezintă turația estimată.

Acesta este apoi integrată și obține noua poziție a rotorului care este utilizată în transformata de coordonate. În principiu, poziția rotorului estimată $\hat{\theta}_{er}$ este ajustată până când eroarea de curenților este zero, ceea ce înseamnă că curentul măsurat pe axa q este egal cu cel estimat și astfel se obține poziția reală a rotorului. În acest caz, regulatorul de tip PI împreună cu transformarea de coordonate au un comportament similar cu cel al unui sistem de tip PLL (phase-locked loop).

A fost efectuată o analiză pentru a înțelege mai bine modul în care diferențele dintre valorile introduse în observator ale inductanțelor de pe axele dq și rezistența statorului, față de valorile reale ale SynRG influențează estimarea poziției rotorului. Pentru a realiza acest lucru, eroarea de poziție (ε_θ) a fost descrisă matematic în funcție de ambele modele analitice ale observatorului și SynRG. A rezultat în final o ecuație de regim staționar care a fost rezolvată utilizând software-ul Matlab. Utilizând soluțiile ecuației, s-au efectuat simulări pentru diferite referințe de curenți și valori ale vitezei și pentru variația rezistenței statorului și a inductanțelor în p.u. între 0,5 și 2.

Analiza în regim staționar de mai sus a dezvăluit modul în care poziția estimată a rotorului SynRG, de către observator, este afectată de diferențele dintre rezistența statorului și inductanțele axelor dq introduse în observator și valorile lor reale din SynRG. Cu toate acestea, această analiză nu stabilește dacă soluția de regim staționar este stabilă sau modul în care coeficienții controlerului PI ai observatorului afectează stabilitatea. Prin urmare, a fost efectuată o analiză de stabilitate prin liniarizarea modelului folosind metoda variațiilor de semnal mic în jurul unui punct stabil. După obținerea sistemului liniarizat de ecuații, a fost utilizat criteriul Routh-Hurwitz pentru a analiza stabilitatea observatorului pentru fiecare combinație de viteză (60, 120 și 200 rpm), diferite perechi de referințe de curent pe axele dq, variația parametrilor k_r , k_d , k_q (în intervalul de 0.5 -2 utilizând un pas de 0.1) și pentru variația coeficienților k_p și k_i a regulatorului PI (valorile au fost considerate de la 1 la 10^6 , distribuite logaritmice). Din rezultatele obținute, un interval de fezabilitate pentru coeficienții controlerului PI, care sunt cel mai plauzibili pentru a asigura stabilitatea observatorului, a fost obținut prin evaluarea criteriului Hurwitz de 2×10^9 ori și realizarea intersecțiilor 2×10^5 matrici de fezabilitate rezultate (Fig. 3). S-au dezvoltat algoritmi în software-

ul Matlab pentru rezolvarea ecuației de stabilitate și pentru efectuarea analizei de stabilitate a observatorului (disponibili în anexele tezei 1-3).

Strategia de control a fost mai întâi validată prin simulări și apoi prin rezultatele experimentale pentru funcționarea SynRG la valori nominale și între ele. Rezultatele experimentale arată faptul că viteza și cuplul estimate de observator sunt foarte apropiate de cele estimate de inverterul mașinii de inducție, chiar și atunci când SynRG funcționează cu tensiuni supramodulate. Se poate observa și pulsația cuplului, cu o variație de amplitudine de aproximativ $\pm 1\%$ raportată la valoarea medie, atunci când tensiunile de fază sunt saturate (din cauza tensiunii insuficiente din circuitul intermediar al inverterului aferent SynRG).

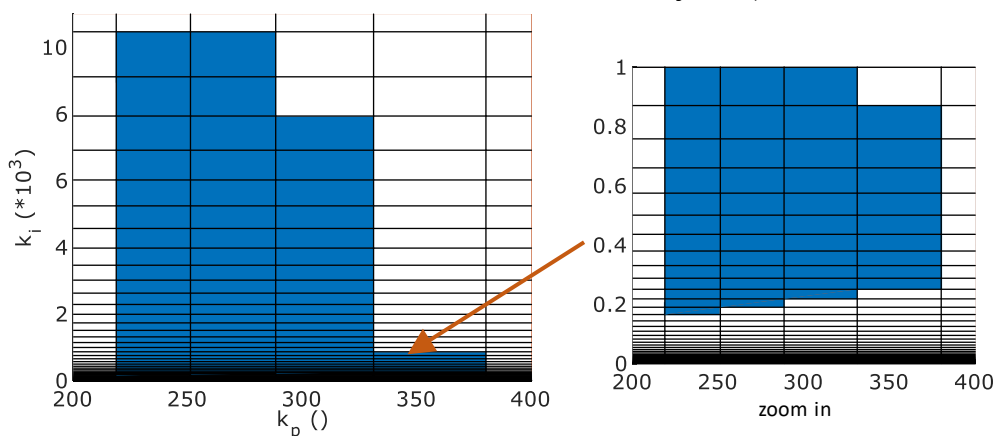
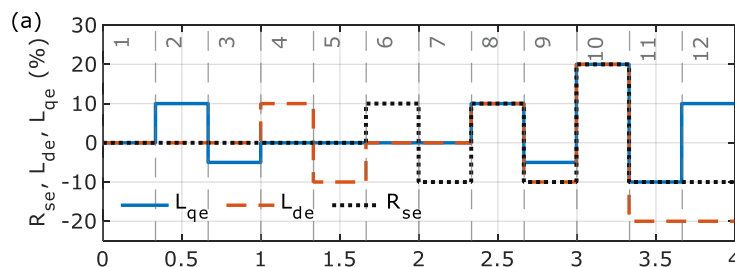


Fig. 3 Domeniul de fezabilitate pentru k_p și k_i (figura din stânga); zoom-in (figura din dreapta)

În această etapă, puterea de ieșire a SynRG a fost setată prin prescrierea manuală a referințelor de curent pe axele dq. Această abordare a fost făcută pentru a analiza răspunsul observatorului și pentru a verifica analiza de stabilitate fără influența unui regulator PI suplimentar.

O analiză mai aprofundată demonstrează că sistemul rămâne stabil pentru variațiile în per unit a parametrilor setați în observator în următoarele intervale: $k_r = -15\% - +25\%$; $k_d = \pm 25\%$; $k_q = -10\% - 20\%$ (Fig. 4). Variații mai mari pot fi acceptate în funcție de condițiile de operare. Cu toate acestea, dacă inductanțele pe axele dq setate în observator au un raport mai mare decât raportul salienței al SynRG ($L_d/L_q \approx 2.7$), strategia de control devine instabilă.

Metoda prezentată pentru analiza erorii de poziție și a stabilității ar putea fi utilizată și pentru evaluarea performanțelor observatoarelor de poziție a rotorului din literatură, cum ar fi cele care utilizează fluxul statoric [6], [7], [8], sau conceptul de flux activ [9].



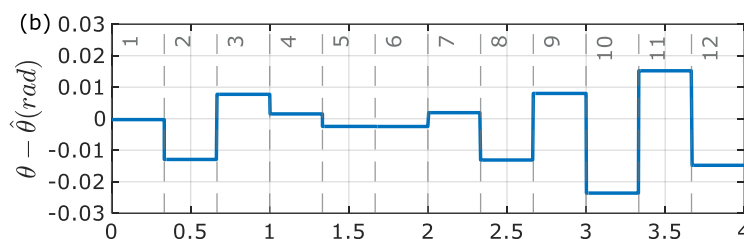


Fig. 4 Valorile estimate de observator în funcție de variația parametrilor: (a) Variația R_{se} , L_{de} , L_{qe} raportată la valorile reale ale SynRG, (b) diferența dintre poziția reală și cea estimată a rotorului

Rezultatele obținute în acest capitol arată că strategia de control propusă ar putea reprezenta o alternativă la strategiile existente de control fără encoder a SynRG pentru a evita compensarea valorii inițiale a fluxului magnetic, compensarea offset-urilor integratoarelor și necesitatea unei rezerve de tensiune în circuitul intermediar de DC pentru metoda cu injecție de semnal cu frecvență ridicată. Rezultate mai bune se pot obține în cazul în care SynRG are un raport al salienței (L_d/L_q) mai ridicat.

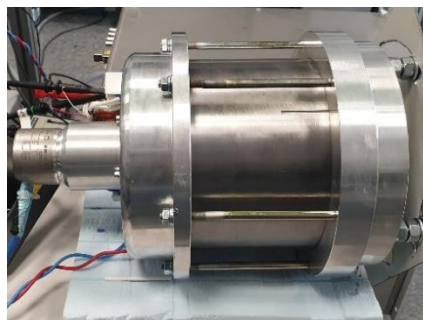
Domeniul de turație al SynRG este potrivit pentru aplicații cu turbine eoliene și hidro. Ca o lucrare extinsă al acestui capitol, autorul a dezvoltat un emulator de turbină eoliană de tip hardware-in-the-loop, cu costuri reduse, care să fie utilizat ca și Prime Mover pentru SynRG. Emulatorul a fost deja testat cu succes pe un generator sincron cu magneți permanenți (PMSG) cu o putere aparentă de 5 kVA și o turație nominală de 120 rpm, detaliat în [10].

Capitolul 3 prezintă determinarea parametrilor și o caracterizare detaliată a performanțelor unui prototip de mașină sincronă cu reluctanță variabilă cu rotor anizotrop cu tole axiale (ALA Rotor RSM) și este propusă o strategie de control al cărei scop este de a conduce mașina electrică astfel încât să funcționeze în zona de randament maxim.

Prototipul ALA Rotor RSM (Fig. 5) a fost proiectat și fabricat pentru aplicații de tracțiune pentru a investiga dacă acesta ar putea reprezenta o alternativă mai eficientă față de mașinile de inducție convenționale și o soluție mai rentabilă din punct de vedere economic în comparație cu mașinile sincrone cu magneți permanenți [11]. Prototipul are două perechi de poli, o putere nominală de 10kW și poate produce un cuplu nominal de 40Nm la turația de bază de 2400rpm și 20Nm la turația maximă de 4800rpm, ceea ce înseamnă un domeniu de viteză la care puterea este constantă (CPSR) de 2 la 1. Pentru a permite investigații ulterioare privind posibilitatea extinderii intervalului de viteză de putere constantă (CPSR) și pentru a fi mai robust în privința defectelor în fazele statorice, statorul este proiectat cu două înfășurări duble trifazate de tip dublu strat, fiecare având opt bobine diametrice pe fază și nouă spire pe bobină. Pentru a reduce pierderile în fier din rotor și pulsațiile de cuplu, rotorul a fost împărțit în trei segmente cu o înclinare de 7,5 mm (15 grade electrice) între ele. Fiecare segment are o lungime de 45 mm, rezultând o lungime totală a pachetului de tole rotorice de 135 mm și o înclinare totală de 15 mm, corespunzătoare unui pas de creșteră statorică.



Rotor asamblat



Prototipul final

Fig. 5 Prototipul ALA Rotor RSM fabricat (10kW)

O etapă esențială după fabricarea unui prototip de mașină electrică este validarea prin măsurători experimentale a parametrilor estimați prin proiectare, parametrii necesari de asemenea și pentru proiectarea și implementarea strategiei de control [12]. Inductanțele pe axele dq considerând și cuplajul magnetic dintre acestea au fost măsurate experimental utilizând scheme consacrate de regim staționar cu rotorul în repaus, atât în curent continuu cât și în curent alternativ (Fig. 6). Inductanța pe axa q a fost măsurată fără a considera cuplajul magnetic dintre bobine deoarece echivalarea fluxurilor magnetice de pe fazele b și c ($\Psi_{b,c}$) cu jumătate din valoarea fluxului magnetic de pe faza a Ψ_a , nu este validă. Astfel că în Fig. 7. este prezentată inductanța pe axa q determinată prin metoda stingerilor de curent doar pentru curent în axa d egal cu zero.

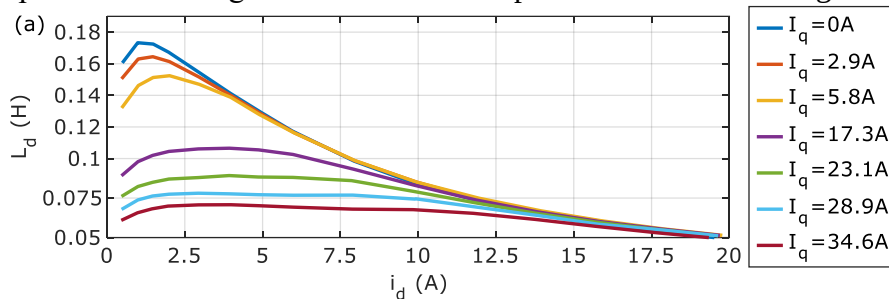


Fig. 6 Inductanța pe axa d (L_d) măsurată experimental prin metoda stingerilor de curent considerând cuplajul magnetic dintre axele dq

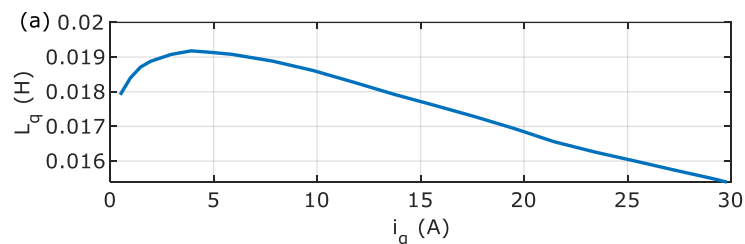


Fig. 7 Inductanța pe axa q (L_q) măsurată experimental prin metoda stingerilor de curent pentru $i_d=0A$

Determinarea experimentală a inductanțelor pe axele dq a fost realizată și în curent alternativ pentru a observa modul în care frecvența influențează valoarea acestora datorită pierderilor în fier și pentru a compara rezultatele obținute cu cele determinate prin metoda stingerilor de curent. Valorile inductanțelor pe axele dq obținute la frecvența de 5Hz sunt puțin mai ridicate față de cele determinate prin metoda stingerii de curent. Acest lucru este oarecum de așteptat deoarece metoda stingerii de curent este mai predispusă la erori de măsură datorită

decalibrării sondelor de măsură, chiar dacă offset-ul acest a fost compensat, și datorită fluxului magnetic remanent în tole după finalizarea perioadei aferentă stingerii de curent. Un dezavantaj al determinării inductanțelor în curent alternativ este dat de provocările procesării tensiunii și curentului măsurate în curent alternativ și, în special, în acuratețea stabilirii punctului de trecere prin zero, care este esențială pentru a avea o determinare consistentă a valorii unghiului (φ) dintre tensiune și curent pentru toate perioadele de semnal achiziționat. Această problemă poate duce la erori în determinarea valorilor inductanței pe axe dq de până la 20%. A fost propusă o metodă de creștere a preciziei de detectare a punctului de trecere prin zero care a fost integrată într-un algoritm dezvoltat în Matlab și aplicat pentru calculul inductanțelor. Algoritmul se poate utiliza și pentru alte aplicații similare (Disponibil în teza Anexa 5).

Prototipul a fost testat în regim de generator fără inverter, pentru a investiga pierderile în fier și capacitatea mașinii de a produce cuplul nominal. S-a utilizat o mașină asincronă de inducție (IM), condusă de un inverter ABB cu control de tip DTC (Direct torque Control), pentru a antrena prototipul în regim de generator la diferite turații. Considerând faptul că ALA Rotor RSM este o mașină fără magneți permanenți, s-au utilizat condensatoare într-o conexiune triunghi (C_{Δ}) conectate în paralel cu fazele prototipului pentru autoexcitare. Valoarea capacității echivalente a condensatoarelor a fost modificată, prin modificarea numărului de condensatoare, pentru a menține tensiunea indusă în limitele acceptate în funcție de turația prototipului și cuplul de încărcare. Pentru a încerca prototipul la diferite niveluri de putere, s-a utilizat o sarcină rezistivă trifazată (R_{load}) configurabilă, pentru a disipa puterea generată. Puterea mecanică de intrare la arbore (p_{input}) a fost măsurată utilizând un traductor de cuplu cu domeniul de măsură $\pm 50\text{Nm}$ și un encoder. Puterea electrică generată (p_{el}) a fost măsurată cu un osciloscop. Pentru a separa pierderile în fier s-au determinat experimental pierderile în cupru și pierderile mecanice. Pierderile în cupru au fost determinate prin măsurarea rezistenței statorice, în curent continuu, pentru fiecare test efectuat. Pierderile mecanice au fost măsurate inițial acestor teste prin antrenarea prototipului, fără curent de excitație în stator, cu IM în intervalul de turație 100rpm-4800rpm, cu un increment de 100rpm pentru care s-a măsurat puterea la arbore. Un extras din rezultatele obținute pentru testarea prototipului în regim de generator sunt prezentate în Fig. 8.

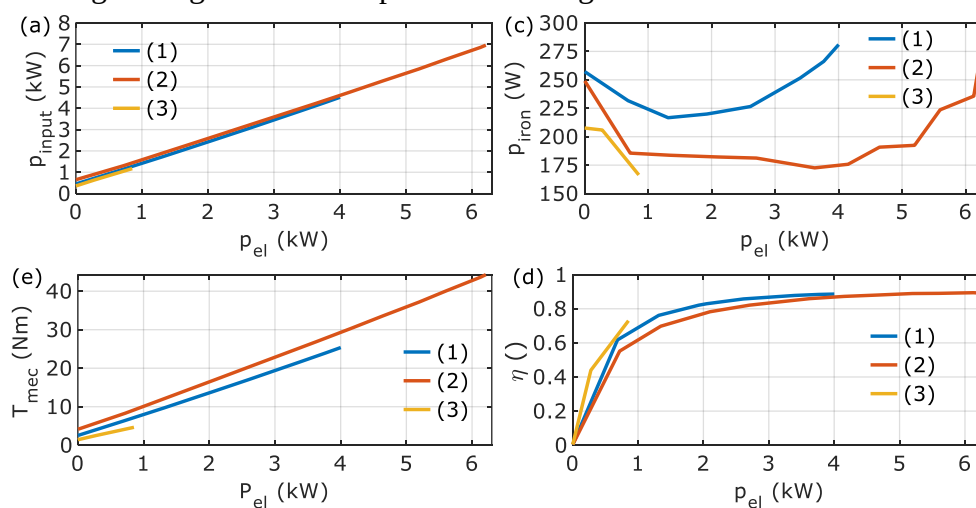


Fig. 8 ALA Rotor RSM regim de generator, investigarea pierderilor în fier – rezultate experimentale: (1) $c=33.4\mu\text{F}$, $n=1700\text{rpm}$; (2) $c=66\mu\text{F}$, $n=1500\text{rpm}$; (3) $c=25\mu\text{F}$, $n=2400\text{rpm}$;

Pentru a procesa cantitatea mare de date achiziționate, s-au dezvoltat algoritmi gata de utilizare în Matlab, pentru procesarea simultană a mai multor fișiere cu extensia .csv, pentru determinarea punctului de trecere prin zero a formelor de undă în curent alternativ și pentru evaluarea măsurătorilor în vederea determinării inductanțelor, valorilor efective de fază, pierderilor, cuplului, turației, fluxurilor magnetice, tensiunilor induse și a randamentului (disponibili în anexele tezei 4-6).

În continuare acest capitol preintă o analiză detaliată a performanțelor prototipului ALA Rotor RSM și a inverterului său de antrenare pentru un domeniu larg de turații și cupluri la care acestea au fost testate utilizând o strategie de control în coordonate rotorice dq. Diagrama platformei experimentale utilizată pentru aceste încercări experimentale este prezentată în Fig. 9.

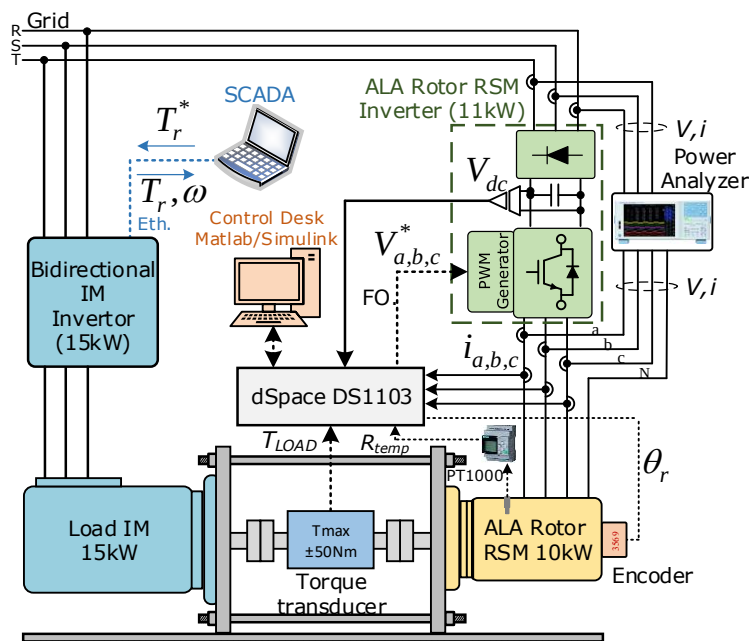


Fig. 9 Evaluarea performanțelor a ALA Rotor RSM - diagram platformei experimentale

Pentru fiecare turație și cuplu la care s-a încercat mașina, s-au modificat curenții de referință pe axele dq între valoarea minimă și valoarea maximă date de regiunea în care controlul este stabil pentru a determina valorile acestora la care randamentul este maxim. Randamentul prototipului și a inverterului a fost determinat utilizând un analizor de putere hexafazat pentru a măsura puterea electrică de intrare și de ieșire a inverterului, respectiv a prototipului, în timp ce puterea mecanică la arbore a prototipului a fost determinată utilizând valorile cuplului și a turației furnizate de traductorul de cuplu și de encoder.

Din toate măsurătorile efectuate au fost extrase punctele asigură randamentul maxim atât a prototipului (Fig. 10) cât și a inverterului său pe baza cărora s-au determinat caracteristicile de curenți de referință pe axele dq. În plus, pentru fiecare punct de operare, au fost măsurate puterea activă și aparentă de intrare atât pentru inverter, cât și pentru ALA Rotor RSM, factorul de putere total și pe fundamentală, precum și pierderile în fier și în cupru pentru ALA Rotor RSM. Acestea au oferit o înțelegere profundă a comportamentului ALA Rotor RSM și a modului în care perechile de curent prescrise pe axele dq influențează performanțele.

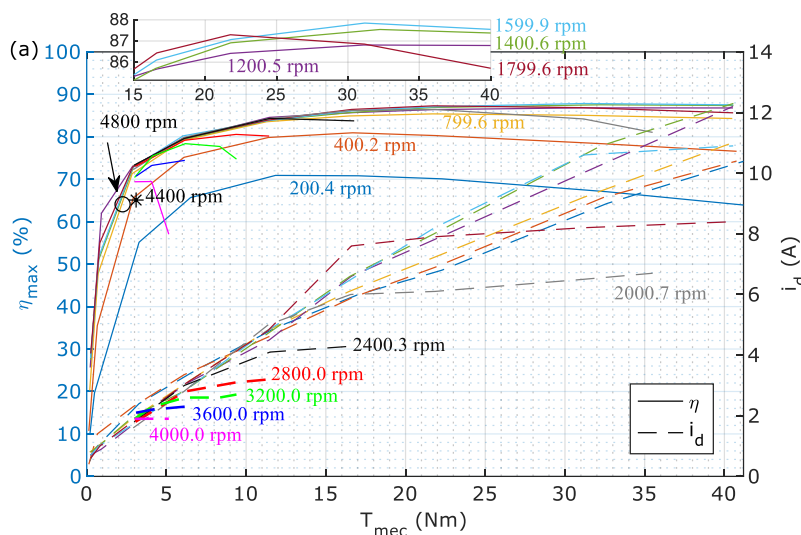


Fig. 10 Caracteristicile de randament maxim măsurate experimental ale ALA Rotor RSM

În continuare, este detaliat în capitol un model de simulare pentru ALA Rotor RSM, care include inductanțele determinate experimental considerând cuplajul magnetic dintre axe și pierderile măsurate: mecanice, în cupru și în fier. Având în vedere complexitatea utilizării valorilor măsurate direct în modelul de simulare, sunt prezentate metode de aproximare a acestora. În plus, pentru cazul inductanțelor, funcția de aproximare bazată pe teorema reciprocității determină inductanța pe axa q considerând cuplajul magnetic dintre axe utilizând măsurătorile inductanței axei d. Astfel modelul de simulare are un răspuns cât se poate de apropiat cu cel al prototipului real.

Metoda de control propusă pentru ALA Rotor RSM este apoi prezentată. Aceasta se bazează pe o funcție de tip Cuplu Maxim per Curent (MTPA) calculată offline (OFC) cu o tranziție fără perturbații către o funcție de tip Cuplu Maxim per Flux (MTPF) pentru regiunea în care mașina este saturată. Diagrama metodei propuse este prezentată în Fig. 11. Se utilizează un regulator de turației de tip PI pentru a prescrie curentul de referință pe axa q. Acesta este comparat cu valoarea curentului maxim pe axa q care poate fi realizat în limitele disponibile ale fluxului magnetic, iar valoare minimă dintre acestea este prescrisă ca și curent de referință pe axa q. Referința de curent pe axa d este obținută fie din funcția MTPA în funcție de valoarea curentului de referință din axa q, fie din funcția MTPF dacă mașina funcționează în zona de saturație. Apoi, ambele referințe de curent pe axele dq sunt comparate cu valorile măsurate și erorile rezultate sunt procesate de regulatoare PI a căror ieșire reprezintă referințele de tensiune pe axele dq. Aplicând inversa transformatei Park pe acestea se obțin tensiunile de referință pe cele trei faze care sunt trimise către unitatea PWM a invertorului.

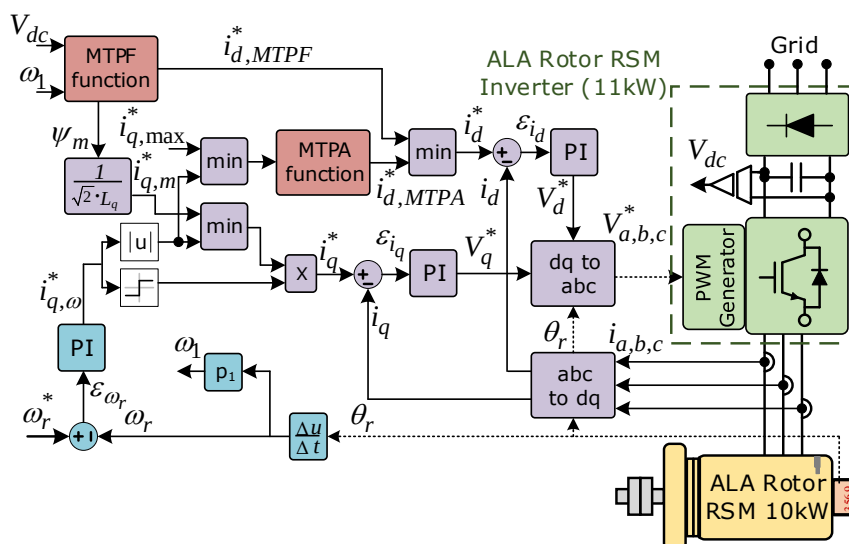


Fig. 11 Diagrama strategiei de control propusă pentru ALA Rotor RSM

Funcția MTPA este obținută prin utilizarea unui algoritm (disponibil în anexa 8 a tezei) care determină offline, înainte de punerea în funcțiune a ALA Rotor RSM, caracteristica optimă a curenților pe axe dq utilizând doar inductanțele măsurate pe axe dq (considerând cuplajul magnetic dintre axe). În esență, algoritmul generează o matrice de cupluri electromagnetice pentru un domeniu larg de combinații ale curenților pe axe dq (patru milioane pentru acest ALA Rotor RSM). Din această matrice, sunt selectate perechile de curenți dq care produc cele mai mari valori ale cuplului și astfel se obține caracteristica curentului pe axa d în funcție de curentul pe axa q, ilustrată în Fig. 12 (cu albastru). Pentru a simplifica implementarea în strategia de control, caracteristica a fost aproximată cu o funcție polinomială de ordinul întâi (Fig. 12 – linia roșie), care reprezintă funcția MTPA ($i_{d,MTPA}^* = d_1 \cdot i_q^* + d_0$).

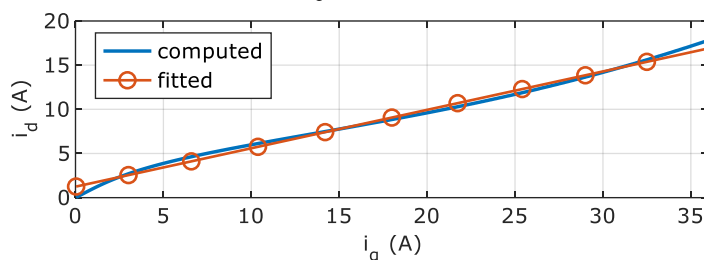


Fig. 12 Funcția MTPA calculată vs. Caracteristica aproximată $i_d = f(i_q)$

Funcția MTPF furnizează curenții pe axe dq în funcție de fluxul magnetic maxim disponibil. Valorile lor sunt determinate în funcție de: turația la care funcționează ALA Rotor RSM, valoarea tensiunii de curent continuu din circuitul intermediar al invertorului și inductanța axei d considerând cuplajul magnetic. Inductanța axei d este implementată utilizând o funcție aproximată din caracteristicile determinate experimental prin metoda stingerilor de curent, considerând regiunea cea mai probabilă de funcționare a ALA Rotor RSM cu MTPF.

Pentru a evalua strategia de control propusă, a fost dezvoltată o funcție de tip „look-up table” care conține valorile măsurate ale perechilor de curenți dq pentru care prototipul a avut randamentul maxim (MLT). Această funcție acoperă întregul domeniu de turație și cuplu, deoarece

măsurătorile au fost efectuate doar pentru o gamă de cupluri și turații. Funcția MLT rezultată este prezentată în Fig. 13 în comparație cu caracteristicile de curenți dq măsurate experimental. După cum se poate observa, funcție MLT se potrivește aproape perfect cu curbele măsurate.

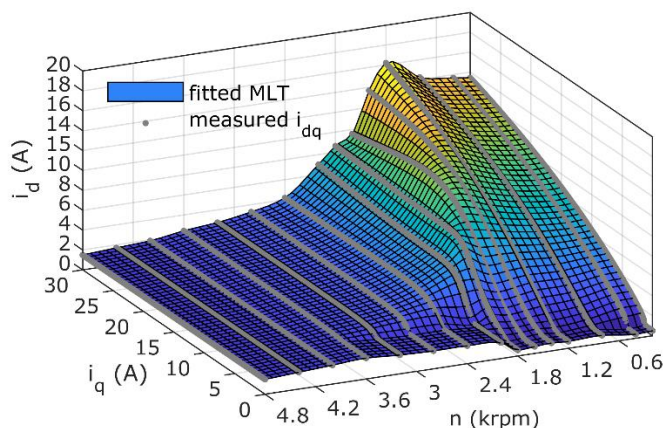
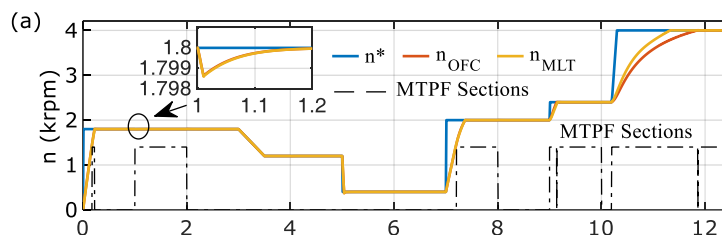


Fig. 13 Funcția MLT aproximată vs. curbele de curenți dq măsurate

Înainte de a fi utilizată ca metodă de validare, MLT a fost verificată prin simulări și compararea rezultatelor cu cele obținute din măsurătorile experimentale, care au fost aproximativ aceleași. Acest lucru validează, de asemenea, și modelul de simulare propus pentru ALA Rotor RSM și fidelitatea funcțiilor de aproximare pentru: inductanțele axelor dq, pierderile în cupru, mecanice și în fier. Funcția MLT generată, poate fi utilizată ca metodă de control. Aceasta cu siguranță va oferi perechile de curenți dq optime, fiind anterior măsurate. Dezavantajul major al acestei funcții constă în cantitatea mare de măsurători experimentale necesare pentru furniza date suficiente pentru identificarea caracteristicilor de randament maxim și astfel să se determine funcția MLT. Totuși ar putea reprezenta o alternativă pentru producția de masă a motoarelor electrice.

În cele din urmă, strategia de control propusă (OFC) este comparată cu MLT prin simulări. Un extras din rezultatele de simulare este prezentat în Fig. 14 pentru funcționarea la diferite valori de turație și cuplu. Graficul (h) arată randamentul obținut de ALA Rotor RSM folosind ambele metode. Rezultatele indică faptul că această metodă este o alternativă promițătoare pentru a conduce ALA Rotor RSM aproape de randamentul maximă pe un domeniu larg de turații și cupluri de încărcare, chiar și atunci când mașina este foarte saturată. Tranziția dintre MTPA și MTPF este foarte lină în ambele direcții, fără a provoca perturbații.



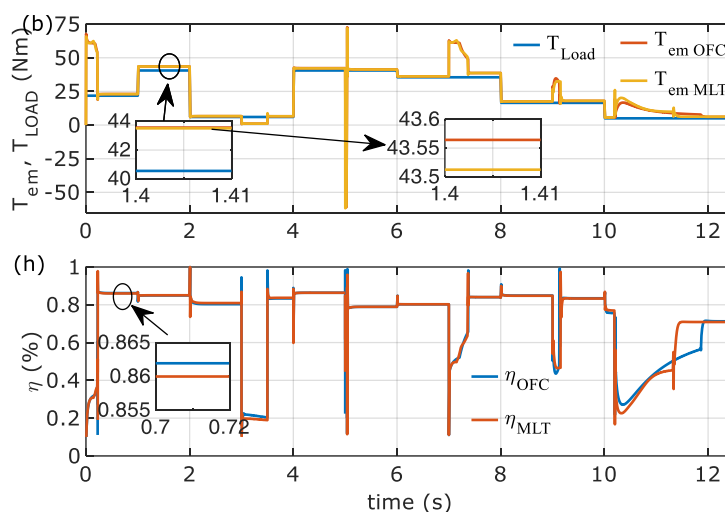


Fig. 14 Rezultate de simulare OFC vs. MLT: (a) referința de turație vs. turația realizată; (b) cuplul de încărcare vs. cuplul electromagnetic; (h) randamentului medii OFC vs. metoda MLT

Un dezavantaj al metodei OFC este dat de necesitatea măsurării inductanțelor axelor dq considerând cel puțin pentru axa d cuplajul magnetic. Totuși, acesta este compensat de principalul avantaj al acestei metode și anume simplitatea de implementare, considerând că funcția MTPA rezultată este o ecuație de gradul întâi, care de asemenea este mai puțin susceptibilă la probleme de stabilitate. În plus, pentru aplicații de tracțiune (și nu numai) unde ALA Rotor RSM poate fi produs în serie, măsurătorile experimentale inițiale sunt efectuate o singură dată. Mai mult, procedura experimentală poate fi automatizată și astfel completată în decurs de una sau două ore.

Capitolul 4 prezintă un concept propus pentru un sistem de conversie și stocare a energiei destinat unui vehicul electric pentru transportul public (microbuz/autobuz) care utilizează supercondensatoare (SC) ca element de stocare [13], [14]. S-a ales un model de microbuz standard cu motor cu ardere internă (IEC) și s-au înlocuit toate componentele aferente IEC cu cele necesare sistemului electric. Pentru tracțiunea electrică s-a ales un motor sincron cu magneți permanenți interiori (IPMSM). Magneții sunt de tip Bonded-NdFeB amplasați pe axa d a rotorului iar pe axa q a acestuia sunt bariere de flux. Pentru antrenarea acestuia se utilizează un inverter cu o strategie de control propusă pentru această aplicație. Transferul de putere dintre SC și circuitul de DC intermediar al inverterului se realizează cu un convertor de curent continuu bidirecțional cu raport mare de conversie (HBDC). De asemenea, același HBDC este utilizat și pentru încărcarea SC de la stația de încărcare sau pe perioada de frânare recuperativă. Sistemul este studiat pentru două cazuri: (i) un model de microbuz la scară reală (1:1) pentru care sunt furnizate rezultate de simulare pentru diferite condiții de operare cu un profil de viteză generat (viteza de deplasare și cuplul de încărcare dat de masa microbuzului, numărul de pasageri, înclinația drumului, viteza vântului, etc) și pentru un studiu de caz în care s-a măsurat un profil de viteză în condiții de trafic real; (ii) un model de microbuz la scară de laborator (1:20) pentru care s-a dezvoltat un stand hardware al microbuzului care include mașina de antrenare IPMSM cu inverterul aferent, SC, HBDC, o sursă de DC pentru a emula stația de încărcare și un emulator al transmisiei mecanice.

Conceptul de microbuz urban a fost propus, dezvoltat, implementat și analizat printr-un proiect experimental demonstrativ (PED) finanțat de Ministerul Cercetării și Inovării din România. [15]. Schema bloc a sistemului de conversie a energiei, stocare și propulsie microbuzului (ECSPS) este prezentată în Fig. 15. După cum se poate observa pentru stocarea principală a energiei se utilizează mai multe module de supercondensatoare. Acestea sunt conectate la un bus de DC comun prin intermediul convertoarelor bidirecționale de curent continuu denumite împreună CSU (converter-supercapacitor unit). Numărul de module CSU se stabilește în funcție de autonomia necesară a microbuzului și limitările constructive ale acestuia. Ca soluție de rezervă, un modul auxiliar de baterie (BM) furnizează energie pentru a acoperi o distanță scurtă în cazul în care CSU-urile sunt complet descărcate. Motorul electric de tracțiune este un prototip cu densitate mare de cuplu și costuri relativ mai scăzute în comparație cu cele care utilizează magneți de tip “Sintered NdFeB”. IPMSM-ul este direct cuplat la transmisia microbuzului fără a utiliza o cutie de viteze datorită cuplului mare de pornire și a domeniului extins de turație pe care acesta le poate asigura. De asemenea se utilizează un encoder pentru poziția rotorului necesară în strategia de control. Controlul transferului de putere și a valorii tensiunii bus-ului de curent continuu este asigurat de sistemul de management al energiei (EMS). Având în vedere limitările date de echipamentele disponibile în laborator și posibilitățile de manufacturare ale acestora, structura analizată în continuare a fost simplificată în ceea ce privește stocarea energiei, utilizând un singur CSU și fără BM. Schema bloc simplificată este similară cu cea a unui vehicul electric cu baterie (BEV) în care SC a înlocuit bateria.

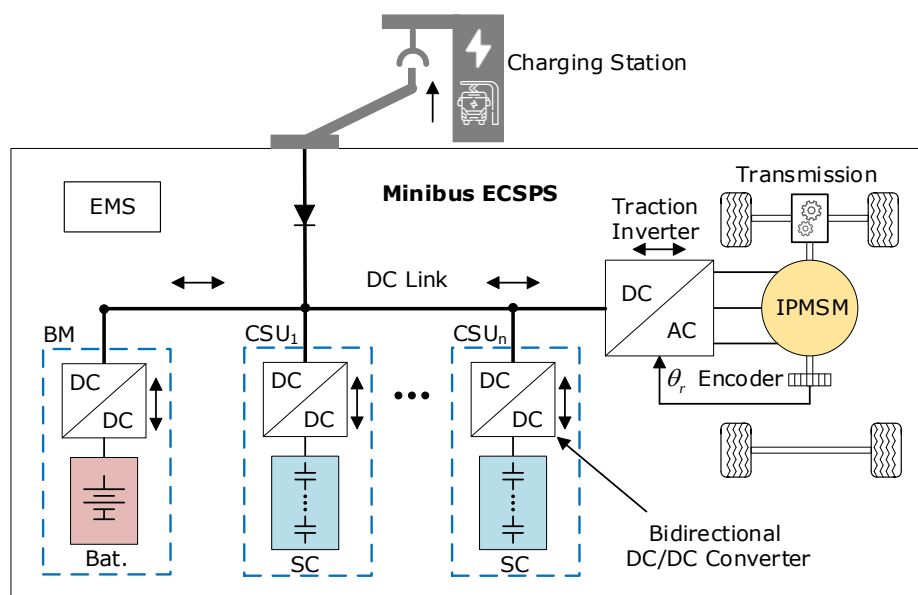


Fig. 15 Schema bloc de conversie și stocare a energiei a microbuzului

Prima parte a capitolului prezintă modelele matematice pentru fiecare subsistem și compară masele principalelor componente ale microbuzului standard cu IEC și cel echipat cu tracțiune electrică. După care se detaliază strategia de control propusă și se prezintă rezultate de simulare pentru microbuzul scară 1:1, utilizând un profil de viteză generat și considerând atât operarea în condiții normale de funcționare cât și în condiții de funcționare cu o avarie la unul sau mai multe

convertoare de curent continuu. IPMSM-ul proiectat pentru scara 1:1 are 3 perechi de poli, o putere nominală de 100kW și un cuplu nominal de 400Nm la turația de bază de 2400rpm și 200Nm la turația maximă de 4800rpm, astfel având domeniu de viteză la care puterea este constantă (CPSR) de 2 la 1. Rotorul are două segmente înclinate cu 30 de grade electrice pentru a reduce pulsațiile de cuplu și bariere de flux pe axa q pentru a reduce inductanța. Mai multe detalii despre proiectarea acestuia împreună cu rezultate obținute prin FEM sunt oferite în [16]. Modulul de SC a fost proiectat pentru a avea o capacitate de aproximativ 8.52kWh. Valoarea a fost determinată considerând consumul de energie al microbuzului în sarcină maximă (7t) pentru un traseu de rulare cu o lungime de 6,2 km, cinci stații de autobuz, o înclinație a drumului de 10% pentru o lungime de 200 m, mai multe viteze de deplasare (30, 50 și 70 km/h) și o valoare de 17,1 m/s a vitezei vântului. Din energia totală disponibilă în SC, doar 75% este utilizată datorită caracteristicii naturale de tensiune a SC, care va produce curenți mari prin SC și HBDC, reducând astfel eficiența acestora. Descărcarea SC-ului mai mult de 25% va necesita, de asemenea, un raport mai mare de conversie a tensiunii pentru HBDC. În proiectare, s-a luat în considerare și o limită de timp de un minut (timpul necesar de obicei pentru o oprire într-o stație de autobuz) pentru încărcarea completă a SC din starea de încărcare de 25% și un consum suplimentar de 2,5 kWh de energie de către echipamentul auxiliar al microbuzului.

În continuare se prezintă rezultate de simulare pentru cazul în care s-a utilizat un profil de viteză măsurat în condiții reale de trafic pentru a valida conceptul de microbuz propus și a strategiei de control. Profilul de viteză a fost achiziționat pentru o linie de troleibuz (linia 16) din Timișoara (România) (Fig. 17). Traseul analizat are 7 stații intermediare, o lungime totală de 4.26km iar înclinația drumului este apropiată de 0% (orașul Timișoara este situat în Câmpia de Vest a României).

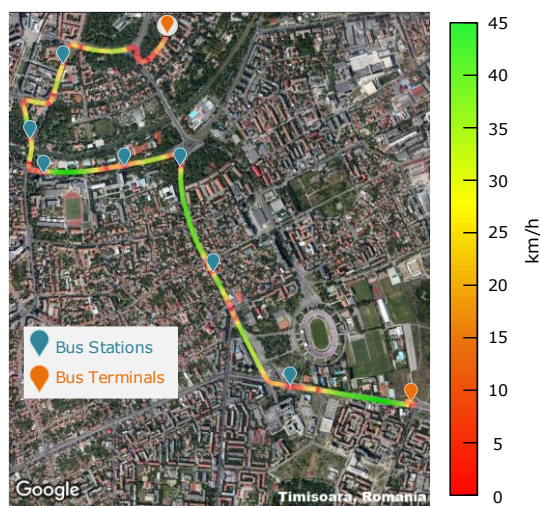


Fig. 16 Linia 16 de autobuz, Timișoara, Romania (Google Maps 2021) și viteza măsurată a troleibuzului

Un extras din rezultatele de simulare este prezentat în Fig. 17. După cum se poate observa în graficul (a), pentru secțiunile cu accelerație mare (ex. la momentul de timp 600s) există o abatere redusă între profilul de viteză măsurat și prescris ca și referință și valoarea realiză de microbuz. Aceasta se datorează fie cuplului superior mai mare al troleibuzului datorită existenței cutiei de viteze sau fie a unor erori de măsură.

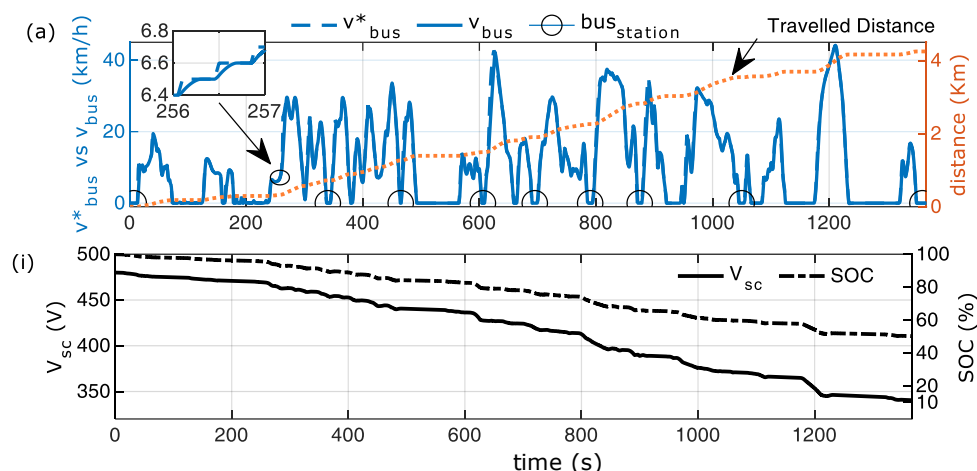


Fig. 17 Funcționarea în condiții reale de trafic: (a) Viteza autobuzului (referința vs. realizat) și distanța parcursă (Km); (i) tensiunea pe supercondensator și starea de încărcare (SOC);

IPMSM-ul poate produce cuplul necesar pentru a atinge viteza de referință (dată fiind perioada scurtă), dar curentul prin inverterul de tracțiune este limitat. Nu este fezabil ca pentru transportul public urban să se proiecteze inverterul de tracțiune pentru o putere mai mare de 140% din puterea nominală a motorului doar pentru a obține o accelerație mai mare, având în vedere că sunt recomandate accelerații de valori moderate.

Rezultatele de simulare obținute validează conceptul propus de microbuz și funcționarea IPMSM-ului cu strategia de control propusă. De asemenea, evidențiază faptul că SC și convertoarele de putere trebuie proiectate în funcție de locația de utilizare a microbuzului și de lungimea traseului (când este posibil) pentru a obține cel mai mare factor de încărcare pentru pasageri. Pentru traseul studiat, în timpul funcționării normale, SC poate fi încărcat într-o perioadă de 8 minute la sfârșitul traseului utilizând o stație de încărcare de ~50kW, deja existente pentru vehiculele electrice. Aceasta poate fi comparată cu o funcționare asemănătoare cu cea a unui microbuz cu IEC, care are o pauză scurtă la capătul de linie al traseului. Pe baza rezultatelor de simulare furnizate de studiul de caz, s-a efectuat o comparație a costurilor între a utiliza baterii cu litiu-ion (LiB) pentru stocarea energiei și SC. În urma acestei analize a rezultat faptul că SC au un avantaj financiar semnificativ de ~2.5 la 1 față de LiB pentru această aplicație, considerând întreaga durată de exploatare a acestora.

A doua parte a capitoului prezintă rezultate de simulare și experimentale pentru scara de laborator (1:20). Pentru a valida sistemul de acționare propus și metodologia de control al acestuia, a fost proiectat și fabricat un prototip de laborator IPMSM de 5 kW (2,4-4,8 krpm, 20-10 Nm) la scara 1:20 (Fig. 18) pe baza proiectului de IPMSM realizat pentru scara 1:1. Au fost efectuate măsurători experimentale inițiale în curent alternativ cu rotorul în repaus pentru determinarea inductanțelor subtranzitorii în axele dq ale prototipului, urmate de încercări în regim de generator pentru a verifica parametrilor estimați prin proiectare. A fost dezvoltată o platformă experimentală dedicată pentru testarea funcționării IPMSM-ului atât în regim staționar cât și pentru regimuri tranzitorii. Rezultatele obținute validează funcționarea IPMSM-ului pe întreg domeniul de turații și capacitățile acestuia de a produce cuplul nominal de 20Nm la turația de bază de 2400rpm și 10Nm la turația maximă de 4800rpm. În plus, s-a propus un regulator de turație

de tip “supertwisting sliding mode” modificat pentru strategia de control astfel încât să îmbunătățească referința de curent pe axa q pentru regulatorul de curent de tip PI.

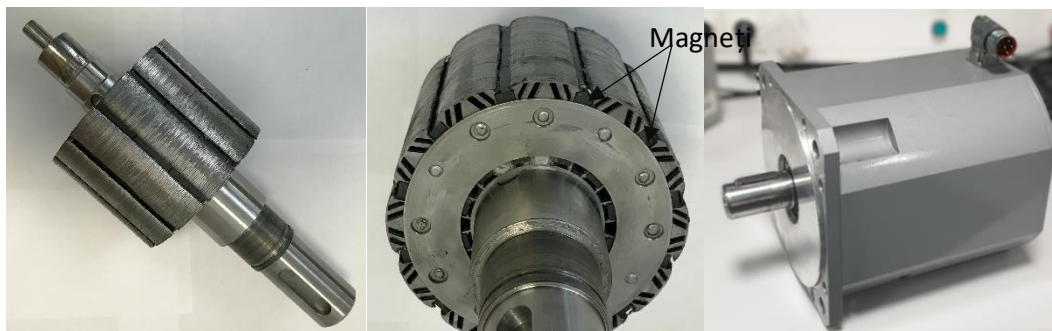
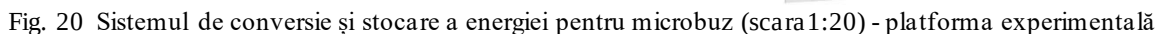
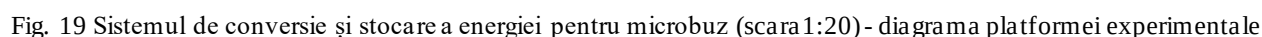


Fig. 18 Prototipul IPMSM fabricat (5kW)

În cele din urmă, pentru a valida conceptul de sistem de conversie și stocare a energiei propus pentru microbuz, a fost dezvoltată o platformă experimentală, care include mașina de antrenare IPMSM cu inverterul aferent, SC, HBDC, o sursă de DC pentru a emula stația de încărcare și un emulator al transmisiei mecanice (Fig. 20-Fig. 21). Platforma este bazată pe conceptul descris anterior. Convertorul HBDC transferă puterea bidirecțional către și de la SC pentru a menține nivelul circuitului de DC intermediar (DC-Link) al inverterului la 375 V (setat din motive de siguranță). HBDC-ul menține nivelul de tensiune prin descărcarea SC pe perioada în care IPMSM antrenează transmisia și prin încărcarea SC în timpul frânării regenerative a IPMSM. Pentru a simula încărcarea SC în timp ce microbuzul este oprit în stațiile de încărcare, se utilizează o sursă de curent continuu, conectată la magistrala DC-Link printr-o diodă pentru a preveni transferul invers de putere. Pentru emularea cuplului rezistiv al transmisiei, se utilizează un motor asincron de inducție de 15 kW (IM) cuplat cu IPMSM printr-un traductor de cuplu care are domeniul de măsurare de ± 100 Nm. Un inverter industrial bidirecțional de 15kW cu control DTC este utilizat pentru conducerea IM cu referință de cuplu determinată pe baza modelului matematic al transmisiei implementat pe un automat programabil industrial (PLC) pentru calcul în “real-time”. Convertorul HBDC este un prototip dezvoltat pentru acest proiect [17]. Este un convertor hibrid DC-DC bidirecțional cu condensatoare comutate (BHCC) și are un raport mare de conversie a tensiunii potrivit pentru SC. Acesta este o topologie îmbunătățită, care, pe lângă topologiile convenționale, în afară de raportul mare de conversie, mai are avantaje precum componente pasive de dimensiuni reduse și pierderi mai scăzute prin componentele semiconductoare.



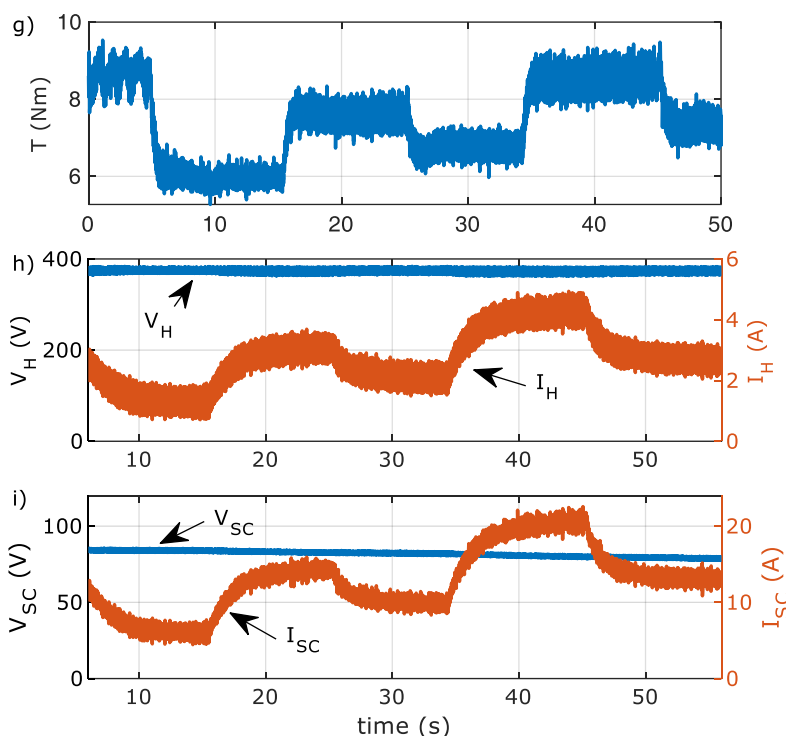


Fig. 21 a) Referința de turație vs. valoarea măsurată (axa din stânga), viteza microbuzului în km/h (axa din dreapta); g) cuplu de încărcare al IPMSM; h) Curentul și tensiunea BHCC -ului către inverter i) Curentul și tensiunea BHCC -ului către SC

Chapter 5 prezintă concluziile tezei, contribuțiile originale ale autorului și viitoare direcții de cercetare în domeniul subiectului prezentat.

Această teză se focusează pe strategii de control pentru mașini electrice cu magneți permanenți și cu reluctanță variabilă utilizate în domeniul surselor regenerabile și automotive și pe analiza unui concept propus de microbuz electric cu stocare în supercondensatoare.

Sunt propuse și analizate patru strategii de control: o metodă fără encoder pentru un generator sincron cu reluctanță variabilă care are rotor pasiv cu bariere de flux (SynRG), și trei strategii bazate pe encoder pentru o mașină sincronă cu reluctanță variabilă care are rotor pasiv anizotrop cu tole axiale (ALA Rotor RSM) și pentru o mașină sincronă cu magneți interpolari cu concentrare de flux magnetic (IPMSM). ALA Rotor RSM și IPMSM sunt prototipuri noi proiectate și fabricate, destinate pentru autovehicule electrice. Acestea sunt investigate în această teză pentru a stabili dacă pot fi considerate o alternativă a celor existente oferind costuri mai reduse de manufacturare și performanțe mai ridicate pentru funcționarea într-un domeniu extins de turații. S-a demonstrat pentru IPMSM că utilizarea magneților de tip “Bonded NdFeB” poate reprezenta o alternativă cu costuri mai scăzute față de utilizarea magneților de tip Sintered NdFeB [18] și capacitatea acestuia de a realiza un domeniu de viteză la care puterea este constantă (CPSR) de 2 la 1. Pentru prototipul ALA Rotor RSM studiat în detaliu, s-a obținut un randament de $\sim 90\%$ în regim de generator și 88% în regim de motor și un raport al salienței care variază de la ~ 9 la ~ 4.5 în funcție de condițiile de operare. În ceea ce privește randamentul se consideră că o valoare mai mare se poate obține prin conectarea celor două înfășurări statorice în paralel, astfel fiind disponibil un

domeniu mai mare al turației cu încărcare nominală pentru care mașina nu se saturează. De asemenea probabil se va putea obține și o valoare a CPSR de 2 la 1 pentru domeniul de turație proiectat al mașinii.

Pentru metoda de control fără encoder s-a verificat stabilitatea observatorului de poziție și modul în care poziția estimată este afectată de variația parametrilor mașinii electrice. Analiza de stabilitate furnizează un domeniu de coeficienți posibili pentru regulatorul de tip PI al observatorului pentru care se presupune că acesta va fi stabil. S-au selectat coeficienții din domeniul de fezabilitate și rezultatele obținute prin simulare și încercări experimentale au validat funcționarea stabilă a observatorului. În ceea ce privește variația parametrilor setați în observator s-a demonstrat că acesta rămâne stabil pentru a variație a acestora în per unit pentru următoarele intervale: $k_r = -15\%$ to $+25\%$; $k_d = \pm 25\%$; $k_q = -10\%$ to 20% . Pot fi acceptate variații mai mari în funcție de condițiile de operare. Metoda prezentată pentru analiza erorii de poziție și a stabilității ar putea fi utilizată și pentru evaluarea performanțelor observatoarelor de poziție a rotorului din literatură bazate utilizarea fluxului statoric pentru estimarea poziției.

Metoda de control propusă pentru ALA Rotor RSM este o alternativă promițătoare pentru a conduce ALA Rotor RSM aproape de randamentul maximă pe un domeniu larg de turații și cupluri de încărcare, chiar și atunci când mașina este foarte saturată. Principalul dezavantaj al metodei este dat de necesitatea măsurării inductanțelor axelor dq considerând cel puțin pentru axa d cuplajul magnetic. Totuși, acesta este compensat de principalul avantaj al acestei metode și anume simplitatea de implementare, considerând că funcția MTPA rezultată este o ecuație de gradul întâi, care de asemenea este mai puțin susceptibilă la probleme de stabilitate. Metoda a fost validată prin rezultate de simulare și experimentale utilizând o a doua strategie de control propusă. Aceasta este o funcție de tip look-up table care conține perechile de curenți măsurate pe axele dq pentru care ALA Rotor RSM și inverterul acesteia au randamentul maxim. Aceasta din urmă poate fi utilizată ca și strategie de control care cu siguranță va oferi perechile de curenți dq optime, fiind anterior măsurate. Dezavantajul major al acestei funcții constă în cantitatea mare de măsurători experimentale necesare pentru furniza date suficiente pentru identificarea caracteristicilor de randament maxim și astfel să se determine funcția de tip look-up table.

Determinarea detaliată a parametrilor pentru ALA Rotor RSM evidențiază importanța procedurii utilizate și a preciziei de determinare a mărimilor de interes deoarece chiar dacă măsurătorile sunt achiziționate fără erori, procesarea acestora poate cauza erori în rezultatele obținute de până la 20-30% sau chiar mai mult.

Conceptul propus de conversie și stocare a energiei pentru un microbuz destinat transportului public a fost investigat pentru două cazuri:

- un model la scară completă (1:1), pentru care sunt prezentate rezultate de simulare în condiții reale de trafic;
- un model experimental la scară de laborator (1:20), care include un emulator al transmisiei, IPMSM-ul cu inverterul aferent, supercondensatorul, convertorul bidirecțional și stația de încărcare, pentru care sunt prezentate atât rezultate de simulare cât și experimentale.

Strategia de control propusă pentru IPMSM pentru această aplicație a fost verificată atât pentru funcționarea mașinii individual cât și în relație cu celelalte componente (HBDC și SC). Rezultatele obținute pentru întregul sistem în condiții de trafic real demonstrează că un modul de SC cu o capacitate de 190F, încărcat complet (480V) poate asigura energie pentru un microbuz de 7t, încărcat cu 28 de pasageri, pentru a parcurge o distanță de 4,2 km pe un traseu fără înclinație. În schimb dacă se consideră o variație a altitudinii de 72m și o creștere a consumului de energie auxiliar atunci este necesar un modul de SC de 266F ceea ce înseamnă o scădere a numărului de pasageri la 24. Pentru condiții normale de operare a microbuzului, modulul de SC poate să fie încărcat în 8 minute la capătul de linie a traselui utilizând o stație de încărcare electrică de 50kW. Totuși dacă traseul este mai lung acesta se poate încărca într-un minut dar este necesară o stație de încărcare de 400kW.

Rezultatele experimentale obținute pentru întregul sistem în condiții de laborator validează conceptul și posibilitatea de a fi extins la un prototip real de microbuz pentru care se presupune că va avea performanțe similare. De asemenea în urma analizei comparative a costurilor între a utiliza ca și element de stocare o baterie de tip litiu-ion versus SC a rezultat un avantaj financiar semnificativ a SC de ~2.5 la 1 față de LiB pentru această aplicație, considerând întreaga durată de exploatare a acestora.

Contribuții Originale

Principalele contribuții ale autorului sunt prezentate mai jos:

- Analiza directivelor, a legislației și a obiectivelor UE privind eficiența motoarelor electrice și creșterea producției de energie din surse regenerabile;
- Analiza principalelor strategii de control fără encoder pentru mașinile sincrone cu reluctanță variabilă;
- Analiza literaturii de specialitate în ceea ce privește metodele de determinare a parametrilor mașinilor electrice și în domeniul arhitecturilor autovehiculelor electrice;
- Propunerea unei metode de control fără encoder pentru un generator sincron cu reluctanță variabilă. Efectuarea analizei de stabilitate pentru observator și o analiză a erorii de poziție în funcție de variația parametrilor a generatorului;
- Măsurători experimentale detaliate pentru determinarea parametrilor prototipului ALA Rotor RSM;
- Măsurarea experimentală a randamentului atât a prototipului ALA Rotor RSM cât și a invertorului său pentru un domeniu larg de combinații ale curenților pe axele dq;
- Introducerea în modelul de simulare a ALA Rotor RSM a saturației și a pierderilor în cupru, în fier și mecanice prin diferite funcții de aproximare a acestora;
- Propunerea unei strategii de control pentru ALA Rotor RSM care conduce mașina astfel încât să se obțină o valoare cât mai apropiată de randamentul maxim al acesteia;
- Propunerea unui concep de microbuz electric pentru transportul public care utilizează supercondensatoare pentru stocarea energiei electrice și un IPMSM cu magneți permanenți de tip Bonded-NdFeB pentru tracțiune;
- Propunerea unei strategii de control pentru IPMSM și a unui regulator de turație pentru încercările experimentale;
- Dezvoltarea platformelor experimentale și a două aplicații SCADA pentru toate aplicațiile descrise în teză.

Direcții de cercetare

Cel puțin următoarele direcții de cercetare rămân deschise pentru dezvoltare și îmbunătățiri ulterioare:

- Metoda de control fără encoder propusă pentru SynRG necesită îmbunătățiri, cum ar fi un regulator de putere sau de tensiune, și testarea SynRG și a metodei propuse împreună emulatorul de turbină eoliană “hardware-in-the-loop” dezvoltat (ca extensie a tezei) pentru a analiza funcționarea acestuia în condiții de operare similare cu cele ale unei turbine reale de vânt;
- Testarea prototipului ALA Rotor RSM cu cele două înfășurări statorice conectate în paralel pentru a investiga CPSR de 2 la 1 până la turația de 4800rpm și variația salienței;
- Metoda de control propusă pentru ALA Rotor RSM este promițătoare, dar necesită măsurători ale inductanțelor axelor dq considerând cuplajul magnetic ale acestora; prin urmare, o procedură pentru determinarea unor valori acceptabile ale inductanțelor dq în timpul punerii în funcțiune, ar îmbunătăți metoda.
- Cu toate că pentru conceptul propus de microbuz cu stocare în supercondensatoare, s-au obținut rezultate experimentale acceptabile la scara de laborator 1:20 ar trebui extins, cel puțin pentru început, la un prototip de microbuz la scară redusă (una sau două tone) pentru a analiza provocărilor legate de condițiile reale de funcționare.

Bibliografie

- [1] G. Wang, M. Valla, and J. Solsona, “Position Sensorless Permanent Magnet Synchronous Machine Drives—A Review,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 7, pp. 5830–5842, Jul. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2955409.
- [2] “A Review of Synchronous Reluctance Motor-Drive Advancements.” Accessed: Mar. 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/2/729>
- [3] A. M. Iuoras, N. C. Szekely, L. D. Vitan, M. Bojan, and P. D. Teodosescu, “AC home appliances retrofitting for DC microgrids,” in *2020 12th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, Jun. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/ECAI50035.2020.9223183.
- [4] R. Buzatu, V. Ungureanu, A. Ciutina, M. Gireadă, D. Vitan, and I. Petran, “Experimental Evaluation of Energy - Efficiency in a Holistically Designed Building,” *Energies*, vol. 14, no. 16, Art. no. 16, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14165061.
- [5] L.-D. Vitan, L. Tutelea, N. Muntean, and I. Boldea, “Sensorless Synchronous Reluctance Generator Control Based on q Axis Estimated Current,” in *2019 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2019 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, Aug. 2019, pp. 260–267. doi: 10.1109/ACEMP-OPTIM44294.2019.9007225.
- [6] D. V. M, B. Singh, and B. G, “Position Sensor-less Synchronous Reluctance Generator Based Grid-Tied Wind Energy Conversion System with Adaptive Observer Control,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, pp. 1–1, 2019, doi: 10.1109/TSST.2019.2903891.
- [7] X. Dianguo, J. Xinhai, and C. Wei, “Sensorless control of synchronous reluctance motors,” in *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Aug. 2017, pp. 1–4. doi: 10.1109/ITEC-AP.2017.8080935.
- [8] I. BOLDEA, Z. X. FU, and S. A. NASAR, “Torque Vector Control (tvc) of Axially-Laminated Anisotropic (ala) Rotor Reluctance Synchronous Motors,” *Electr. Mach. Power Syst.*, vol. 19, no. 4, Art. no. 4, Jul. 1991, doi: 10.1080/07313569108909543.
- [9] S. Agarliță, M. Fătu, L. N. Tutelea, F. Blaabjerg, and I. Boldea, “I-f starting and active flux based sensorless vector control of reluctance synchronous motors, with experiments,” in *2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, May 2010, pp. 337–342. doi: 10.1109/OPTIM.2010.5510564.
- [10] L.-D. Dănuț, D. Hulea, O. Cornea, N. Muntean, M. A. Iuoras, and N. Hinov, “Low Cost Implementation of a Wind Turbine Emulator,” in *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering*

- and 2020 *IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe)*, Jun. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/IEEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160604.
- [11] I. Boldea, I. Torac, A. Martin, D. Vitan, and L. Tutelea, “Axially-Laminated-Anisotropic-rotor Reluctance Synchronous Motor characterization: analytical design, key FEM validations and preliminary experiments: 10kW, 2.4-4.8krpm,” in *2022 IEEE 20th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Sep. 2022, pp. 113–120. doi: 10.1109/PEMC51159.2022.9962869.
- [12] L.-D. Vitan, L. Tutelea, A.-D. Martin, N. Muntean, and I. Boldea, “Axially laminated anisotropic (ALA) rotor reluctance synchronous motor (RSM): comprehensive experiments characterization,” in *2023 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2023 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, Sep. 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/ACEMP-OPTIM57845.2023.10287071.
- [13] L. – D. Vitan, A. Martin, L. Tutelea, I. Boldea, I. Torac, and N. Muntean, “Supercapacitor City Minibus Bonded – NdFeB IPMSM Propulsion System: Design and System Modeling Methodology via a Case Study and Laboratory Experiments,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 59, no. 2, pp. 1405–1417, Mar. 2023, doi: 10.1109/TIA.2022.3220500.
- [14] L.-D. Vitan, A.-D. Martin, L. Tutelea, and I. Boldea, “Supercapacitor City Minibus Propulsion System Simulations, Methodology, and Case Study,” in *2021 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2021 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, Sep. 2021, pp. 181–190. doi: 10.1109/OPTIM-ACEMP50812.2021.9590081.
- [15] “ECOBUS 307PED2020 - ECON-BUS 307PED2020.” Accessed: Nov. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.econbus.academiattm.ro/>
- [16] L. Tutelea, I. Torac, and I. Boldea, “100kW 2400-4800rpm -spoke-PM bonded NdFeB traction motor preliminary design with FEM imported parameter circuit controlled dynamics validation,” in *2021 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2021 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, Sep. 2021, pp. 72–78. doi: 10.1109/OPTIM-ACEMP50812.2021.9590050.
- [17] D. Hulea, M. Gireadă, O. Cornea, and N. Muntean, “An Improved Bidirectional Hybrid Switched Capacitor Converter,” in *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Oct. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/IECON49645.2022.9969058.
- [18] D. D. Patel, I. Boldea, and B. Fahimi, “Bonded Nd-PM Claw-Pole Synchronous Motor Drive for Traction Applications: Benefits and Challenges,” in *2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Oct. 2023, pp. 4682–4689. doi: 10.1109/ECCE53617.2023.10362865.