

ESTIMAREA ZONEI DE OPERARE A UNUI MOTOR DE CURENT CONTINUU FĂRĂ PERII PE BAZA MODELELOR NUMERICE

Leonard MELCESCU, Ovidiu CRAIU

Universitatea POLITEHNICA din București, Facultatea de Inginerie ELECTRICA,
Departamentul de Mașini, Materiale și Acționări Electrice
lmelcescu@yahoo.co.uk, ocraiu@yahoo.com,

Rezumat. Lucrarea prezintă două metode de estimare numerică a zonei de operare, din planul caracteristicii mecanice, a unui motor de curent continuu fără perii alimentat de la o sursă de tensiune continuă prin intermediul unui invertor de tip PWM. Prima metodă constă în elaborarea în mediul MATLAB-Simulink a unui model pentru simularea funcționării motorului alimentat de la invertor, la turație impusă și curent impus, controlat prin intermediul unui regulator cu histerezis. A doua metodă prezentată se bazează pe un model numeric de tip cuplaj câmp-circuit, în care invertorul este implementat cu elemente de circuit disponibile în biblioteca mediului de lucru, Flux2D. În acest caz invertorul asigură numai comutația curenților, valorile acestora rezultând în funcție de tensiunea de alimentare. Sunt prezentate două scenarii pentru determinarea zonei de operare a motorului: funcționare la turație impusă și funcționare la cuplu de sarcină impus.

1. INTRODUCERE

Datorită simplității și performanțelor funcționale motorul de curent continuu fără perii este folosit într-o gamă variată de aplicații din diverse domenii: electrocasnice, sisteme electrice auto, sisteme și echipamente aerospațiale, echipamente medicale, tracțiune electrică și automatizări industriale [1].

Constructiv acest motor este similar cu un motor sincron cu magneți permanenți, diferența fiind dată de modul de variație a tensiunii electromotoare indusă de câmpul magnetic produs de magneții permanenți situați pe rotor și de forma de undă a curenților din indus. În cazul unei mașini sincrone atât tensiunea electromotoare cât și curenții variază sinusoidal în timp, pe când în cazul motorului de curent continuu fără perii tensiunea electromotoare și curenții prezintă intervale de timp, de până la 2/3 dintr-o perioadă, în care acestea au valori constante. Practic tensiunea electromotoare are o variație în timp trapezoidală, iar curenții, atunci când sunt controlați, au o variație dreptunghiulară.

Motoarele de curent continuu fără perii sunt alimentate de o sursă de tensiune continuă prin intermediul unui invertor PWM. Comutația curenților este comandată prin intermediul unor traductoare de poziție, de obicei sonde Hall, astfel încât aceștia să fie în fază cu tensiunile electromotoare corespondente. În afară de comutație, invertorul poate fi folosit și pentru controlul mărimii curenților și implicit a formei de undă a acestora. Cum în intervale de conducție atât curentul cât și tensiunea electromotoare a unei faze sunt constante cuplul electromagnetic dezvoltat va fi constant [2].

În raport cu motoarele sincrone cu magneți permanenți, motoarele de curent continuu fără perii au o densitate de cuplu mai mare, iar implementarea controlului se face într-o manieră mai simplă, fără a fi necesar un sistem de calcul performant, cum ar fi de exemplu în cazul controlului vectorial.

Pentru a se fructifica avantajele acestui tip de motor trebuie ca, printr-o proiectare adecvată, să se obțină o formă de undă a tensiunii electromotoare cât mai apropiată de cea ideală atât la

funcționarea în gol cât și în sarcină. De asemenea parametrii circuitului indusului, rezistența electrică și inductivitatea trebuie corelate cu frecvența, respectiv cu turația și numărul de poli astfel încât să se poată obține curenți cu variație dreptunghiulară.

Proiectarea modernă a motoarelor electrice presupune o combinație între metodele analitice, clasice, și cele numerice și adesea se urmărește identificarea unei variante constructive optime pentru un anumit punct de funcționare, de obicei cel nominal. Dacă motorul urmează să funcționeze în regim dinamic caracterizat de variații ale turației sau ale cuplului, între anumite limite, trebuie ca în etapa de proiectare să se analizeze caracteristicile de funcționare ale motorului, în punctele definite de diagrama de lucru. De regulă aceste analize se fac cu ajutorul modelelor numerice. Cum funcționarea motorului de curent continuu fără perii este dată de modul în care se face alimentarea prin intermediul inverterului, este necesar ca modele numerice folosite în proiectarea și analiza funcționării motorului să considere și modelarea inverterului.

În lucrarea se prezintă simularea în MATLAB-Simulink a funcționării unui motor de curent continuu fără perii, alimentat de la o sursă de tensiune continuă printr-un inverter. Se analizează funcționarea la turație impusă și curent impus, controlat prin intermediul unui regulator cu histerezis. Prin considerarea unei variații în trepte a turației se obțin valorile maxime ale cuplului pe care îl poate furniza motorul alimentat de la inverter, pentru un curent maxim ales. Astfel rezultă limita de operare din planul caracteristicii mecanice a sistemului motor-inverter.

Cel de-al doilea model numeric analizat este un model de tip cuplaj câmp-circuit, elaborat în mediul de calcul Flux2D, în care inverterul este implementat cu elementele de circuit disponibile în biblioteca acestuia. În acest caz inverterul asigură numai comutația curenților, valorile acestora rezultând în funcție de tensiunea de alimentare. Sunt prezentate două scenarii pentru determinarea zonei de operare a motorului: funcționare la turație impusă și funcționare la cuplu de sarcină impus. În al doilea caz turația rezultă prin integrarea ecuației de mișcare a rotorului.

2. DATELE PRINCIPALE ALE MOTORULUI ANALIZAT

Motorul investigat funcționează cu o sarcină variabilă definită prin intermediul unei zone din planul caracteristicii mecanice delimitată de cuplul maxim, $M_A = 7,4 \text{ Nm}$, turația maximă, $n_B = 3450 \text{ rot/min}$ și puterea maximă, $P_A = P_B = 1100 \text{ W}$, Fig. 1.

Alimentarea motorului se face de la o sursă de tensiune continuă $U_{DC} = 45 \text{ V}$ prin intermediul unui inverter PWM. Acesta asigură atât comutarea cât și controlul curenților.

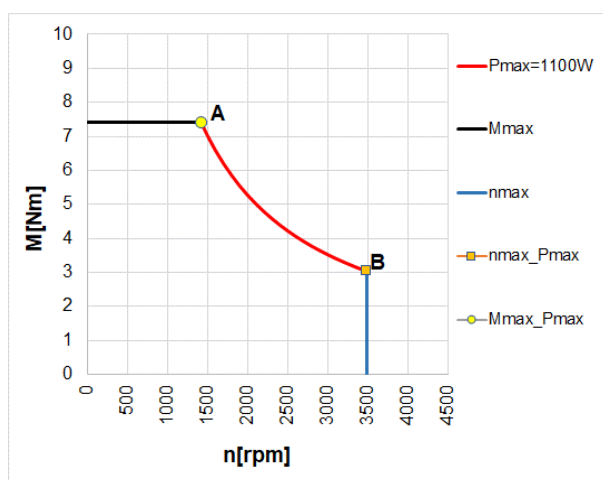


Fig. 1 Locul geometric din planul caracteristicii mecanice al punctului de funcționare al sarcinii motorului

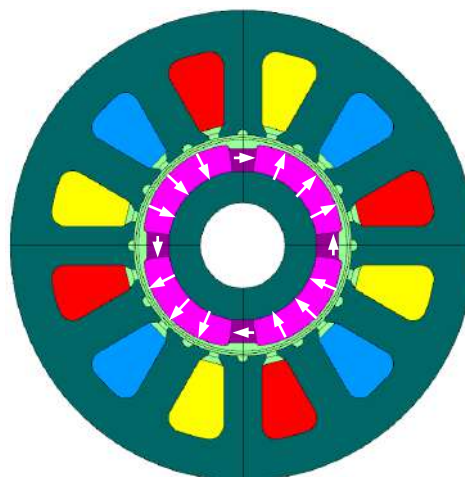


Fig. 2 Secțiunea transversală a motorului

Într-o prima etapă cu ajutorul metodelor analitice și a modelării numerice s-a realizat o dimisionare electromagnetă și s-a obținut o variantă a motorului, cu $2p = 4$ poli și $Z = 12$ creștături, Fig. 2, având următoarele caracteristici: tensiunea nominală, $U_n = 45$ V, constanta de cuplu, $k_T = 0,091$ Nm/A, curentul nominal, $I_n = 39,57$ A, cuplul nominal, $M_n = 3,01$ Nm, turația nominală, $n_n = 3450$ rot/min, curentul maxim, $I_{max} = 84,5$ A, cuplul maxim $M_{max} = 7,4$ Nm, cuplul static de frecări $M_0 = 81,2$ mNm, coeficientul cuplului dinamic de frecări, $F = 1,36$ mNm/(rad/s), rezistența electrică la borne la $T_{max} = 180^\circ\text{C}$, $R_{AB} = 0,134$ Ω , inductivitatea indusului la borne $L = 0,3$ mH. Dimensiunile principale ale motorului sunt trecute în Tabelul 1.

Tabelul 1 Dimensiunile motorului

Mărime	Valoare
Diametrul exterior al statorului	66 [mm]
Diametrul interior al statorului	31 [mm]
Diametrul exterior al rotorului	29 [mm]
Diametru interior al rotorului	12 [mm]
Grosimea întrefierului	1 [mm]
Lungimea pachetului de tole	135 [mm]
Numărul de spire fază	14 spire

Miezul magnetic este realizat din tole din fier siliciu aliat cu cobalt de tip Vacodur50, iar magneții permanenți sunt de tip NdFeB având inducția remanentă $B_r = 1,2$ T și câmpul coercitiv $H_c = 915$ kA/m. Pe miezul rotorul se află rotor opt magneți permanenți, patru magnetizați radial și patru unidirecțional alcătuind o structură de tip șir Halbach [2]. În secțiunea transversală din Fig. 2 cu ajutorul unor săgeți sunt specificate direcțiile și sensurile magnetizației magneților permanenți.

Pentru a se obține o tensiune electromotoare cu variație trapezoidală, Fig. 3, înfășurarea este realizată într-un strat, cu pas diametral. În vederea reducerii oscilațiilor cuplului electromagnetic la funcționarea în sarcină, Fig. 4 și a cuplului de agățare la gol, Fig. 5 dinții statorului au creștături în axele lor, Fig. 2.

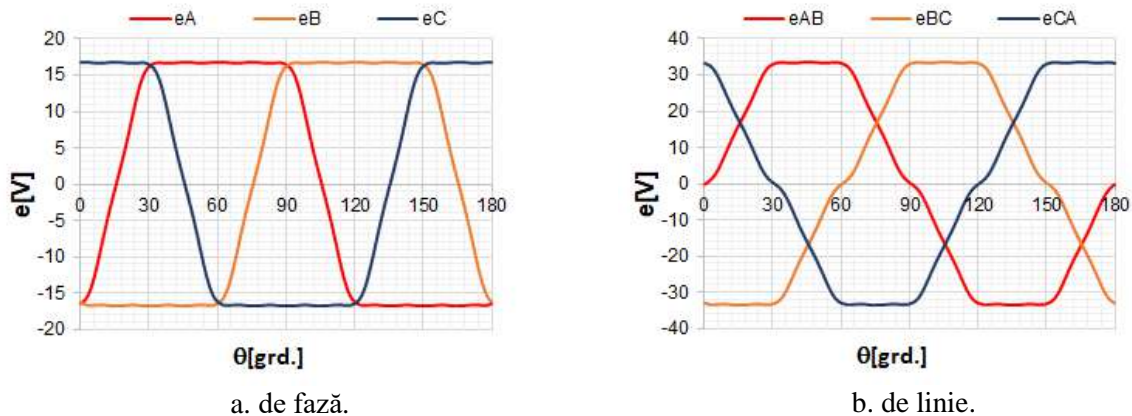


Fig. 3. Tensiunile electromotoare în funcție de poziția rotorului la turația $n_B = 3450$ rot/min.

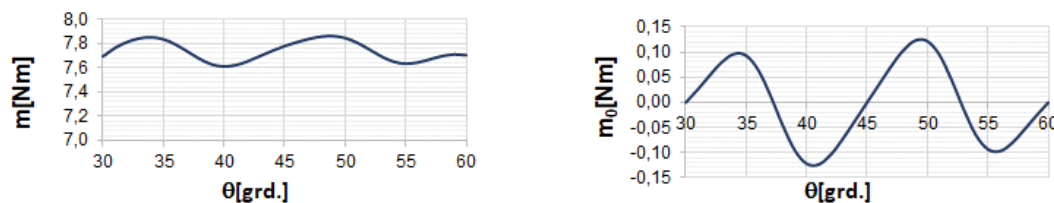


Fig. 4. Cuplul electromagnetic în funcție de poziția rotorului la $I = I_{max} = 84,5$ A Fig. 5. Cuplul de agățare, de prindere magnetică

3 MODELE NUMERICE PENTRU ANALIZA FUNCȚIONĂRII MOTORULUI DE CURENT CONTINUU FĂRĂ PERII ALIMENTAT DE LA INVERTOR

3.1 Simularea funcționării în MATLAB-Simulink

Proiectarea modernă a sistemelor de acționare electrică implică realizarea unor modele matematice pentru simularea funcționării componentelor și a subsistemelor. Cel mai utilizat mediu de simulare numerică a sistemelor electromecanice este MATLAB-Simulink.

În Fig. 6. este prezentat modelul sistemului motor de curent continuu fără perii – invertor implementat cu elemente din biblioteca *SimPowerSystem* [3].

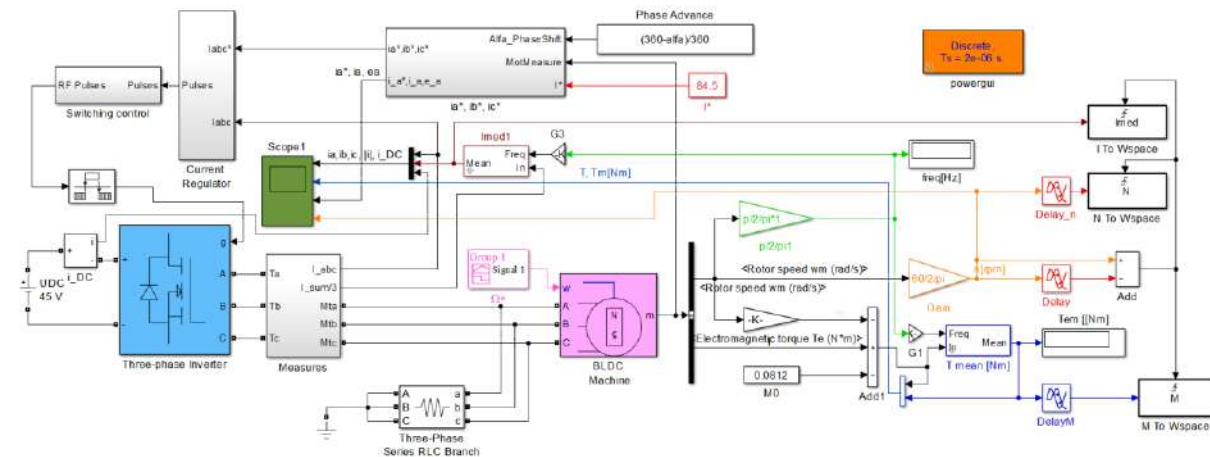


Fig. 6. Modelul pentru simularea motorului alimentat de la invertor la turație constantă și curent impus

Modelul motorului este elaborat pe baza sistemului de ecuații diferențiale (1), în ipoteza că înfășurarea statorului este conectată în stea, iar tensiunile electromotoare de fază au o variație trapezoidală având o valoarea constantă pentru o deplasare a rotorului de 120° electrice, [3].

$$\begin{aligned}
 \frac{di_A}{dt} &= \frac{1}{3L_s} [2v_{AB} - v_{BC} - 3R_s i_A - \Phi p \Omega (-2e'_A + e'_B + e'_C)] \\
 \frac{di_B}{dt} &= \frac{1}{3L_s} [v_{AB} - 2v_{BC} - 3R_s i_B - \Phi p \Omega (e'_A - 2e'_B + e'_C)] \\
 \frac{di_C}{dt} &= -\left(\frac{di_A}{dt} + \frac{di_B}{dt}\right) \\
 m_{em} &= p\Phi(e'_A i_A + e'_B i_B + e'_C i_C) \\
 \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{1}{J} (m_{em} - m_s - M_0 - F\Omega) \\
 \frac{d\theta}{dt} &= \Omega
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

În relația de mai sus i_A, i_B, i_C sunt curenții de fază, v_{AB}, v_{BC}, v_{CA} tensiunile de line, R_s rezistența electrică la borne, L_s inductivitatea indusului la borne, Φ amplitudinea fluxului magnetic al unei faze produs de magneții permanenți, p numărul de perechi de poli, m_{em} cuplul electromagnetic produs de motor, m_s cuplul de sarcină, M_0 cuplul static de frecări, F coeficientul cuplului dinamic de frecări, J momentul de inerție polar al motorului și al

sarcinii, Ω viteza unghiulară a rotorului, iar θ poziția acestuia. Cu e'_A , e'_B și e'_C s-au notat valorile, în unități relative, ale tensiunilor electromotoare de fază având o variație trapezoidală cu poziția rotorului. Modelul motorului poate furniza pe portul de măsură mărimile de stare precum și trei semnale digitale de tip sonda Hall, prin intermediul cărora se identifică poziția rotorului și se pot genera semnalele de comandă pentru inverter. Parametrii modelului motorului folosiți în simulare sunt cei prezentați în paragraful anterior.

Pentru modelul inverterului s-au ales tranzistoare de tip MOSFET cu diode de regim liber. S-a considerat că rezistență electrică a tranzistoarelor în stare de conducție are valoarea $R_t = 0,05 \Omega$.

Amplitudinea curentului impus este specificată în blocul de tip sursă notat I^* , iar viteza unghiulară impusă este furnizată de generatorul de semnal notat cu Ω^* . Schema a fost concepută să funcționeze la diverse viteze ale rotorului și să transmită către mediul de lucru MATLAB valorile medii ale curentilor și cuplului, după atingerea regimului stabilizat.

În Fig. 7 sunt prezentate formele de undă ale principalelor mărimi ale motorului pentru funcționarea în sarcină, la puterea maximă $P = 1100 \text{ W}$, în punctele A și B prezentate în planul caracteristicii mecanice al sarcinii, Fig. 1, la cuplu maxim, respectiv la turație maximă.

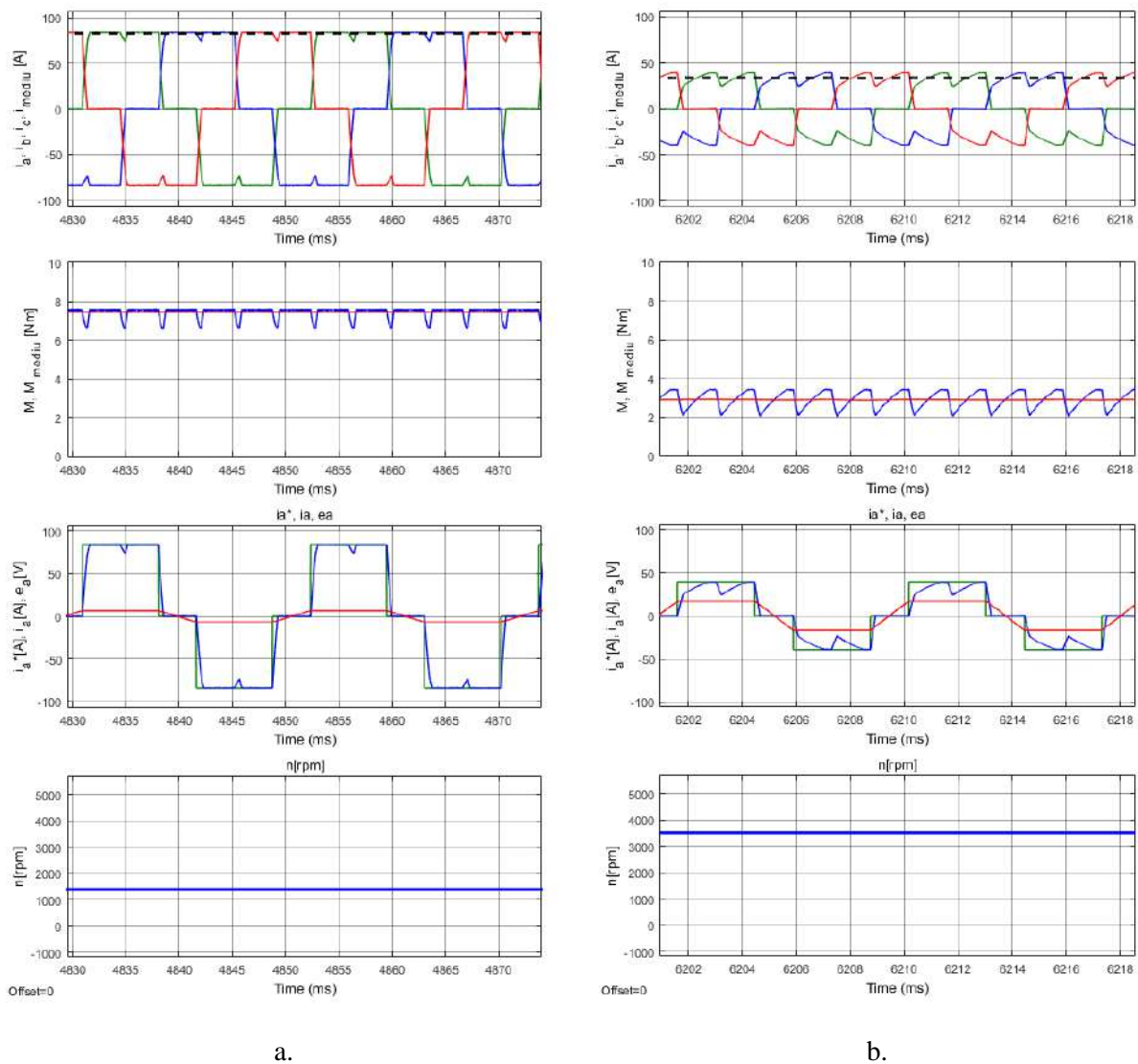


Fig. 7 Evoluția formelor de undă ale principalelor mărimi ale motorului la curent și la turație impuse: a. $I^* = I_{\max} = 84,5 \text{ A}$ $n^* = n_A = 1420 \text{ rot/min}$, b. $I^* = 39,5 \text{ A}$ $n^* = n_B = 3450 \text{ rot/min}$.

În primele grafice se prezintă formele de undă ale curenților de fază și valoarea medie a acestora, respectiv curentului absorbit de inverter de la sursa de tensiune continuă. În următorul grafic sunt reprezentate evoluția cuplului util instantaneu și a mediei acestuia. În cel de-al treilea grafic, prin intermediul mărimilor primei faze, se ilustrează modul de comandă al motorului prin impunerea curentului în fază, i_A^* , în fază cu tensiunea electromotoare, e_A . Răspunsul sistemului motor-inverter este reflectat prin reprezentarea formei de undă a curentului i_A , stabilit prin înfășurarea primei faze. La turații mici tensiunea electromotoare are valori reduse, iar curentul din motor reușește să atingă și să rămână la valoarea impusă, în cea mai mare parte a intervalului de 120° , în care tensiunea electromotoare este constantă, Fig. 7.a. La turații mari, tensiunea electromotoare crește, durata intervalului de 120° scade, datorită creșterii frecvenței, iar curentul reușește să atingă valoarea impusă un interval de timp mult mai redus, Fig. 7.b. Astfel, la turații mari diferența dintre curentul impus și valoarea medie a curentului din motor este semnificativă. Ultimele grafice prezintă turația pentru care s-au obținut formele de undă de mai sus.

3.2 Modelul numeric de regim tranzitoriu de tip câmp-circuit

O altă metodă numerică folosită în analiza funcționării motorului de curent continuu fără perii se bazează pe calculul câmpului magnetic din motor prin metoda elementelor finite. Pentru surprinderea fenomenelor legate de comutație s-a elaborat un model de regim tranzitoriu alcătuit dintr-o serie de probleme de câmp, de regim magnetic staționar, de tip cuplaj câmp-circuit, rezultate în urma discretizării în timp a mișcării rotorului. Modelul numeric este un model numeric bidimensional și a fost elaborat în mediul de calcul Flux2D [4].

Domeniul de calcul este ales într-o secțiune transversală a motorului și cuprinde un pol, Fig. 8, fiind delimitat de două axe interpolare, de exteriorul miezului statorului și de suprafața axului. Problema de câmp neliniară este formulată prin intermediul potențialului magnetic vector, \mathbf{A} , iar determinarea câmpului magnetic, pentru fiecare moment de timp, se face prin rezolvarea ecuației (2) în toate nodurile rețelei de discretizare:

$$\text{rot}[(1/\mu(B)) \cdot \text{rot}(\mathbf{A})] = \mathbf{J} + \text{rot}[(1/\mu(B)) \cdot \mathbf{B}_r] \quad (2)$$

În relația de mai sus $\mu(B)$ reprezintă permeabilitatea magnetică, \mathbf{J} densitatea curentului, iar \mathbf{B}_r inducția remanentă. Pe exteriorul miezului statorului și pe frontiera dinspre arborele mașinii câmpul magnetic este tangențial și acest lucru se impune prin condiții de tip Dirichlet nule, $\mathbf{A} = 0$. Frontierele din lungul razelor definite axele interpolare sunt legate între ele printr-o condiție de tip antiperiodicitate, $\mathbf{A}_2 = -\mathbf{A}_1$, Fig. 8.

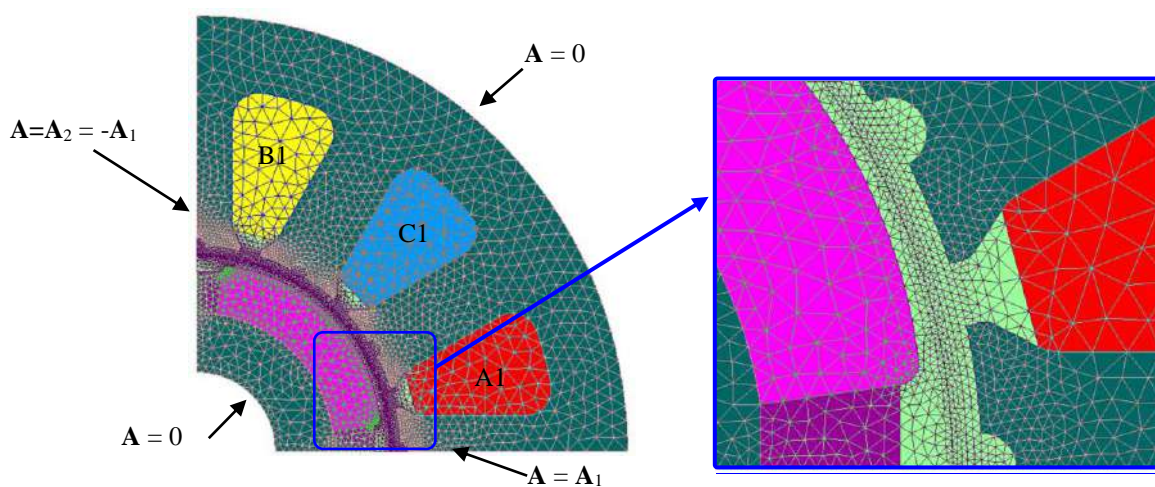


Fig. 8 Discretizarea domeniului de calcul și condițiile pe frontieră

Deplasarea rotorului, respectiv a rețelei de discretizare din zona rotorului, se face prin intermediul unei suprafețe de glisare, Fig. 8, [4]. Pentru limitarea erorilor în calculul cuplului electromagnetic, în zona întrefierului s-au considerat trei cercuri concentrice care asigură o rețea de discretizare suficient de fină. Considerarea mișcării rotorului se poate face la viteză constantă sau prin intermediul ecuației mecanice (3), prin impunerea cuplului de sarcină, m_s .

$$J \frac{d\Omega}{dt} = m_{em} - m_s - M_0 - F\Omega. \quad (3)$$

În relația de mai sus s-au folosit următoarele notații: J - momentul de inerție polar al rotorului și al sarcinii, Ω - viteza rotorului, m_{em} - cuplul electromagnetic produs de motor, M_0 - cuplul static de frecări, și F - coeficientul cuplului dinamic de frecări. Momentul de inerție polar al rotorului are valoarea $J_m = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, iar pentru sarcină s-a considerat o valoare similară. Circuitul electric asociat problemei de câmp cuprinde elemente de circuit ale motorului, respectiv elemente pentru considerarea inverterului, Fig. 9. Astfel în circuitul fiecărei faze a motorului se afla câte un element de circuit pentru laturile active ale înfășurărilor aflate în creștăturile din domeniul de calcul, B_A1, B_B1, B_C2, câte o rezistență, R_A, R_B, R_C, câte o inductivitate pentru dispersiile din zonele capetele frontale ale înfășurărilor, L_sigmaA, L_sigmaB, L_sigmaC, și câte o rezistență pentru considerarea pierderilor în fier, R_FeA, R_FeB, R_FeC, Fig. 9.

Din punct de vedere numeric modelarea tranzistoarelor s-a făcut prin intermediul unor rezistente electrice variabile. Acestea au valori ridicate, $R = 10 \text{ M}\Omega$, când tranzistoarele sunt blocate, respectiv valori reduse când sunt în stare de conducție. Cum starea tranzistoarelor depinde de poziția rotorului s-a ales ca pentru modelarea acestora să se folosească elementul de circuit de tip contact perie-lamelă colector, G_{ij}, existent în biblioteca Flux 2D [4], dedicat modelării mașinilor de curent continuu cu perii, Fig. 9. Pentru a surprinde cele două perioade, în care un tranzistor al inverterului se află în stare de conducție în timpul unei rotații complete, pentru echivalarea fiecărui tranzistor al inverterului s-au folosit două contacte de tip perie-lamelă colector cuplate în paralel. Cum tranzistoarele conduc unidirecțional, în serie cu contactele tip perie lamelă s-au conectat diode, D_{ij}. Suplimentar, în paralel cu fiecare tranzistor se află o diodă de regim liber, DRL_i, înseriată cu o sursă de tensiune pentru considerarea tensiunii de prag. Inverterul este alimentat de la sursa de tensiune continuă V_DC, Fig. 9. Valorile rezistențelor modelelor semiconductoarelor pentru starea de conducție s-au ales astfel încât rezistența totală a circuitului echivalent al unui tranzistor să fie egală cu valoarea de catalog a unui tranzistor real, $R_t = 0,05 \text{ }\Omega$.

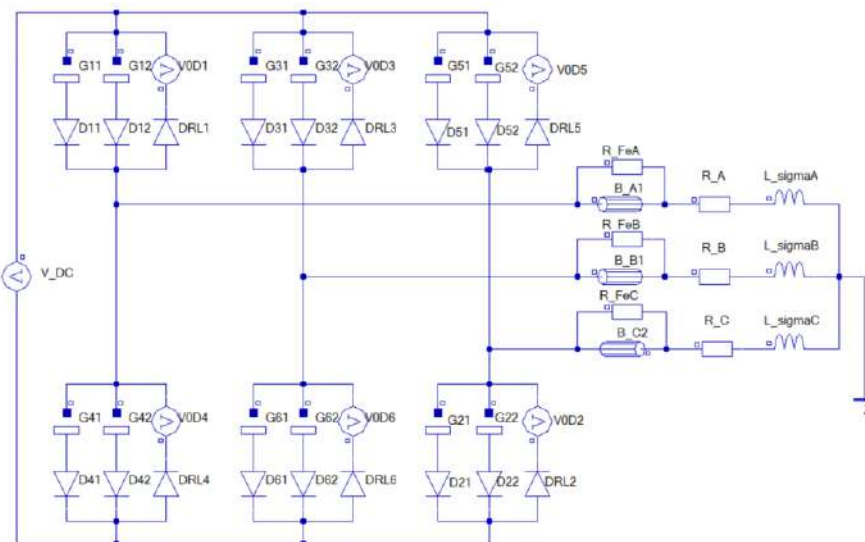


Fig. 9 Circuitul electric asociat problemei de câmp

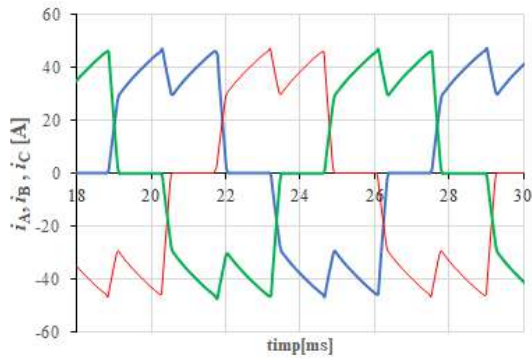


Fig. 10 Evoluția curenților prin indus

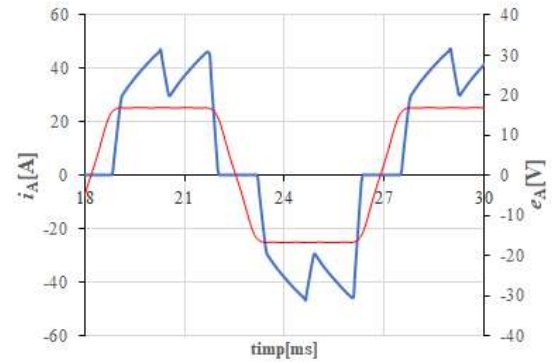


Fig. 11 Formele de undă ale curentului și tensiunii electromotoare ale primei faze

Validarea modelului, respectiv a circuitului asociat problemei de câmp s-a făcut prin simularea funcționării la turație impusă, $n^* = 3450$ rot/min. În Fig. 10 sunt prezentate formele de undă ale curenților de fază, i_A , i_B , și i_C , iar în Fig. 11 curentul primei faze, i_A , împreună cu tensiunea electromotoare a aceleiași faze, e_A .

Spre deosebire de modelul din MATLAB-Simulink, în acest caz curenții nu mai sunt controlați de reglaje, fiind limitați de diferența dintre tensiunea sursei de alimentare și tensiunea electromotoare.

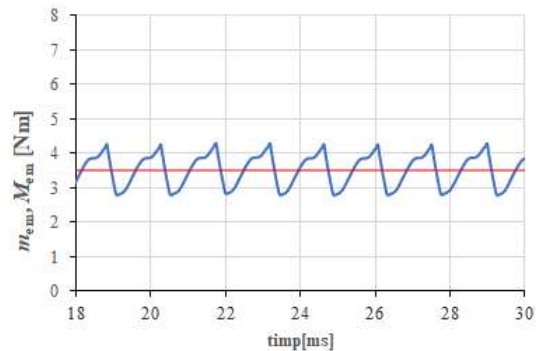


Fig. 12 Cuplul electromagnetic instantaneu și cuplul mediu

Evoluția în timp a curenților este dată de parametrii circuitului electric echivalent al indusului, respectiv de rezistența și inductivitatea acestuia. Formele de undă reprezentate în Fig. 11 validează modul de implementare al tranzistoarelor, respectiv al inverterului și a comenzii acestuia în funcție de poziția rotorului. Variațiile curenților în intervalele în care aceștia ar trebui să fie constanți, determină apariția unor oscilații în curba cuplului electromagnetic, Fig. 12, care au o amplitudine de aproximativ 23% din valoarea medie.

Distribuția câmpului magnetic din interiorul motorului, la funcționarea în sarcină este ilustrată în Fig. 13 prin intermediul liniilor câmpului magnetic și a hărții inducției magnetice, pentru momentul de timp de la jumătatea pulsului pozitiv al curentului primei faze. În acest moment, la $t = 20,5$ ms, calea de întoarcere a curentului primei faze se mută din înfășurarea fazei a doua în înfășurarea fazei a treia, Fig. 10.

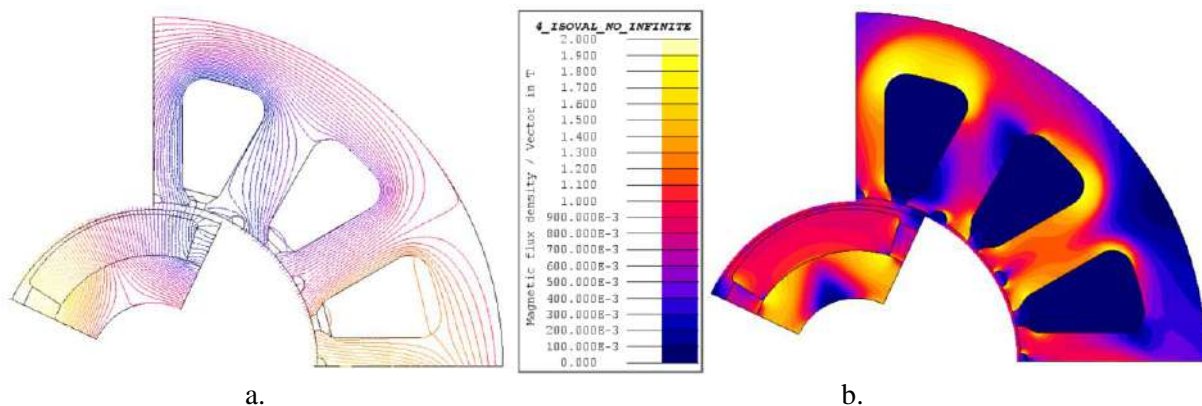


Fig. 13 Distribuția câmpului magnetic din motor la $t = 20,5$ ms, la jumătatea pulsului pozitiv al curentului primei faze: a. liniile câmpului rezultat, b. harta inducției magnetice.

4. ESTIMAREA NUMERICĂ A ZONEI DE OPERARE A MOTORULUI DE CURENT CONTINUU FĂRĂ PERII

4.1 Estimarea zonei de operare a motorului din modelul numeric implementat în MATLAB-Simulink

Limita zonei de funcționare a motorului de curent continuu fără perii reprezintă curba din planul caracteristicii mecanice, alcătuită din puncte definite de valorile maxime ale cuplului pe care îl poate furniza motorul la diverse turații impuse.

Coordonatele acestor puncte pot fi obținute prin simularea modelului prezentat în Fig. 6, în care curentul impus, $I^* = I_{\max} = 84,5 \text{ A}$, corespunde cuplului maxim, iar viteza impusă, Ω^* , rezultă prin alegerea unei variații în trepte a turației, Fig. 14, în intervalul $[100, 5000] \text{ rot/min}$, cu un increment $\Delta n = 100 \text{ rot/min}$. Durata intervalului în care turația este constantă, corespunde unui interval de 5 perioade ale curentului. Aceasta a fost aleasă astfel încât să se obțină regimul stabilizat, pentru care se poate calcula și reține în final valoarea medie a cuplului la ax, Fig. 14.

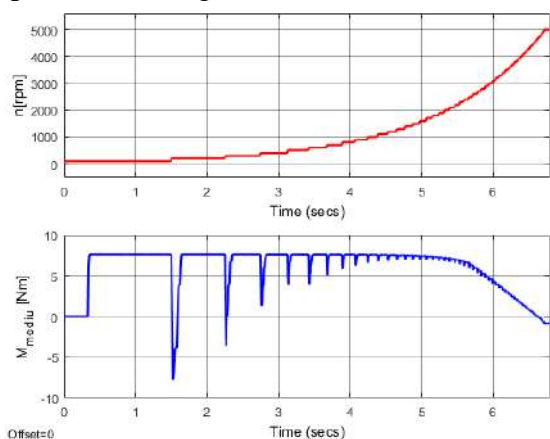


Fig. 14 Evoluția în trepte a turației impuse și a cuplului rezultat la ax

Pentru un curent maxim, impus, $I_{\max} = 84,5 \text{ A}$, în Fig. 15 sunt prezentate variațiile în timp ale principalelor mărimi ale motorului, în aceeași ordine ca în Fig. 7, pentru o valoare a turației impuse, $n^* = 3450 \text{ rot/min}$, apropiată valorii maxime din planul caracteristicii mecanice a sarcinii din Fig. 1.

În al treilea grafic se observă faptul că pentru această turație, curentul nu poate atinge valoarea impusă, din cauza valorii radicate a tensiunii electromotoare. În urma simulării funcționării la această turație, rezultă valoarea medie a cuplului maxim pe care îl poate furniza motorul, în limitele date de tensiunea de alimentare și de raportul dintre constanta de timp a înfășurării și perioada pulsului de curent.

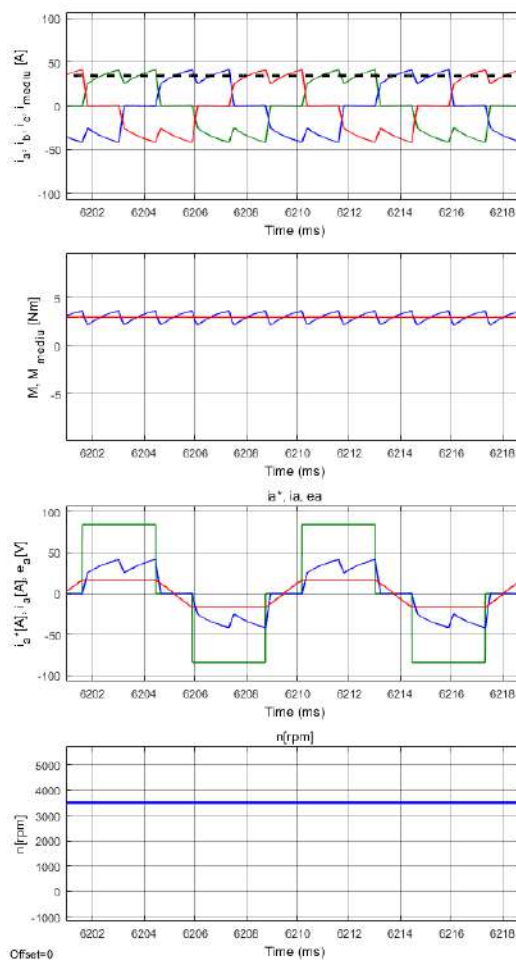


Fig.15 Evoluția formelor de undă ale principalelor mărimi ale motorului la curent maxim impus $I^* = I_{\max} = 84,5 \text{ A}$ și la turație maximă impusă: $n^* = n_B = 3450 \text{ rot/min}$.

În primul grafic se observă formele de undă ale curenților din înfășurări și a curentului absorbit de la sursa de tensiune continuă. Cuplul util instantaneu și media acestuia sunt ilustrate în al doilea grafic, iar turația în ultimul grafic din Fig. 15.

În Fig. 16, în planul caracteristicii mecanice a motorului este prezentată curba limită a zonei de operare alcătuită din puncte ale căror coordonate au fost obținute prin simularea modelului din Fig. 3, împreună cu hiperbola definită de puterea maximă cerută de sarcină.

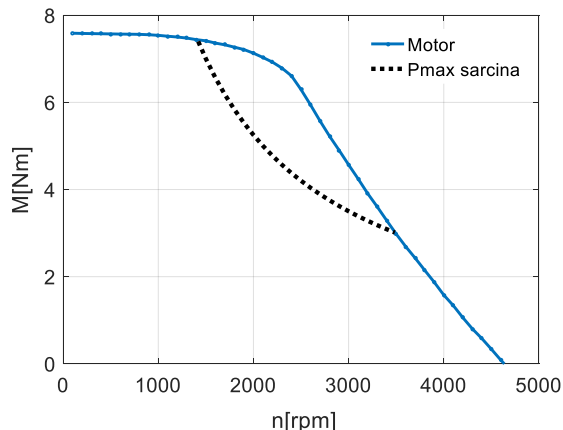


Fig. 16 Limita zonei de operare a motorului de curent continuu fără perii obținută prin simularea motorului alimentat de la inverter controlat în curent.

4.2 Estimarea zonei de operare din modelul numeric de tip câmp-circuit.

4.2.1. Simularea funcționării la turație constantă

Din punct de vedere al efortului de calcul, această abordare a utilizării modelului de tip cuplaj câmp-circuit este relativ mai eficientă. Eliminarea ecuației de mișcare a rotorului, (3), prin impunerea vitezei, face ca durata intervalelor timp necesare pentru atingerea regimului stabilizat să fie mai mică.

Pentru determinarea limitei zonei de operare s-a ales o variație în trepte a turației, Fig. 17, în intervalul [1250, 4250] rot/min, cu un increment $\Delta n = 500$ rot/min. Simularea funcționării motorului în zona turațiilor mici nu este utilă, deoarece în această zonă limitarea este în cuplul. Aceasta se obține prin controlul amplitudinii curentului, iar modelul de tip câmp-circuit implementat nu consideră acest lucru.

Variația cuplului util instantaneu produs de motor este prezentată în al doilea grafic din Fig. 17. Prin medierea acestuia, în intervale de timp de la sfârșitul perioadelor de $\Delta t = 19$ ms ale treptelor de turație, după atingerea regimului stabilizat, se obțin coordonatele punctelor care definesc curba limită a zonei de operare a motorului din planul caracteristicii mecanice, Fig. 18.

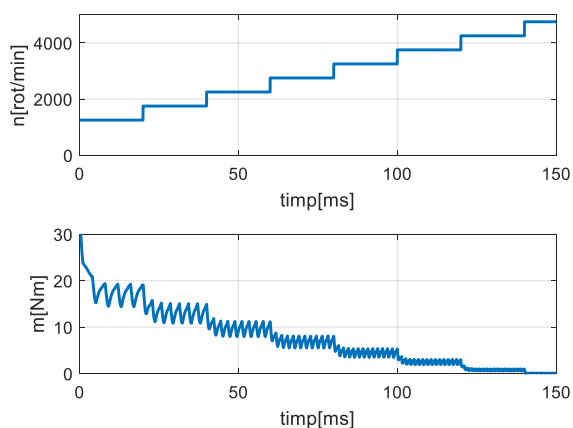


Fig. 17 Evoluția în trepte a turației impuse și a cuplului util la axul motorului

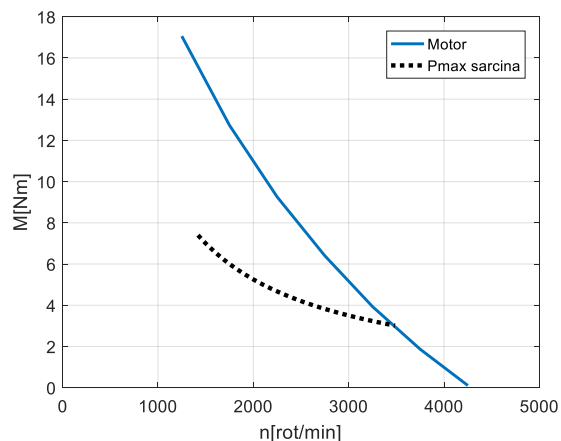


Fig. 18 Limita zonei de operare a motorului de curent continuu fără perii obținută din modelul de tip cuplaj câmp circuit la turație constantă

4.2.2. Simularea funcționării la cuplu de sarcină impus

Această manieră de utilizare a modelului de tip cuplaj câmp-circuit aproximează cel mai bine funcționarea motorului alimentat de la inverter. Prin impunerea cuplului de sarcină, motorul va absorbi de la sursa de tensiune continuă curentul necesar pentru a produce un cuplul electromagnetic care să acopere cerințele sarcinii și frecările, iar turația va rezulta prin integrarea ecuației (3). Totuși această soluție implică un efort de calcul important și are neajunsul că nu permite controlul mărimii curenților.

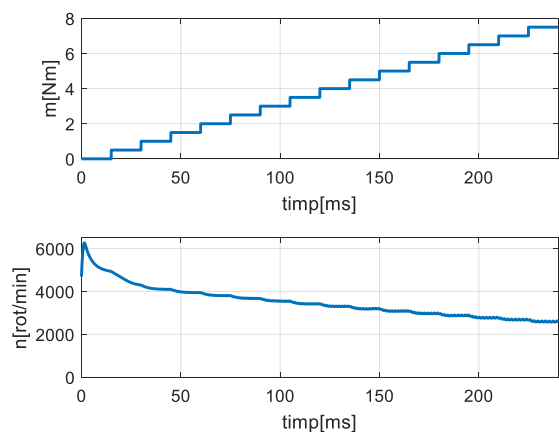


Fig. 19 Evoluția în trepte a cuplului de sarcină impus și variația turației motorului

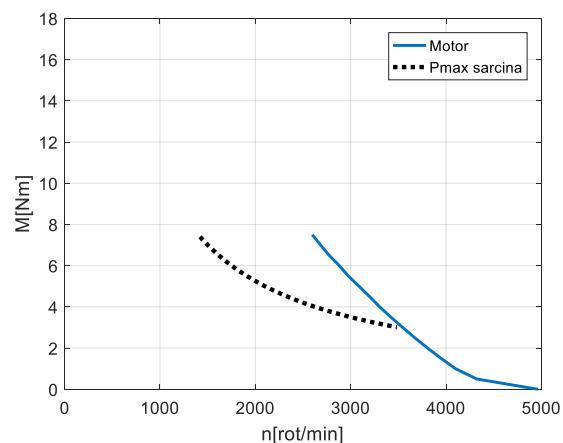


Fig. 20 Limita zonei de operare a motorului de curent continuu fără perii obținută din modelul de tip cuplaj câmp-circuit la cuplul de sarcină impus

Pentru determinarea limitei zonei de operare s-a ales o variație a cuplului în trepte, Fig. 19, în intervalul $[0, 7,5]$ Nm, cu un increment $\Delta m_s = 0,5$ Nm. Evoluția turației este prezentată în al doilea grafic din Fig. 19. Prin medierea turației pe perioade de la sfârșitul intervalelor de timp de $\Delta t = 15$ ms, asociate treptelor de variație a cuplului de sarcină, rezultă coordonatele punctelor de pe curba limită a zonei de funcționare a motorului din Fig. 20.

5. CONCLUZII

Proiectarea motorului de curent continuu fără perii care funcționează la turație și sarcină variabile este relativ dificilă, deoarece acest motor este alimentat de la sursa de tensiune prin intermediul unui inverter și trebuie considerate toate aspectele legate de comutația curenților. Prin comenzile date de sondele Hall, tranzistoarele inverterului asigură corelarea dintre curenți și tensiunile electromotoare ale fazelor și pot fi folosite, printr-o comandă de tip PWM, și pentru controlul mărimii curenților și implicit a cuplului. Totuși controlul curenților nu se poate face cu rigurozitate în toate punctele din planul caracteristicii mecanice, în special la turații ridicate, din cauza limitării tensiunii sursei de alimentare și a limitării date de constanta de timp a circuitului indusului.

Pentru identificarea zonei din planul caracteristicii mecanice care poate fi acoperită de un motor sunt necesare modele numerice care să permită simularea funcționării acestuia cât mai apropiate de condițiile reale.

Modele numerice de tip MATLAB-Simulink, bazate pe schemele electrice echivalente ale motorului de curent continuu fără perii, permit simularea funcționării acestuia asociat cu un inverter, în scheme complexe în care se poate realiza controlul curenților, respectiv al cuplului și se pot implementa bucle de reglaj pentru viteză și poziție. Aceste modele sunt eficiente din

punct de vedere al efortului de calcul și permit obținerea rapidă, în câteva minute, a unor rezultate cu un grad de precizie ridicat.

Modelele de tip câmp-circuit aproximează mult mai bine modelul fizic al motorului, considerând neliniaritatea circuitului magnetic, neuniformitatea întrefierului, deplasarea rotorului. Implementarea inverterului asigură comutația curenților în fază cu tensiunile electromotoare, însă nu permite controlul mărimi acestora. Utilizarea acestor modele presupune un efort de calcul însemnat, iar rezultatele se obțin după intervale mari de timp, de ordinul orelor. Totuși aceste modele permit o estimare a pierderilor din circuitele magnetice și a curenților induși în piesele masive. Rezultatele oferite de cele două modele numerice sunt comparabile.

Identificarea unei variante constructive optime pentru un motor de curent continuu fără perii, într-un interval de timp rezonabil, presupune utilizarea ambelor metode pentru determinarea limitelor zonei de operare.

BIBLIOGRAFIE

- [1] D. Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, 2nd ed.: The Writers' Collective, 2003.
- [2] J.R. Hendershot, T.J.E. Miller, *Design of Brushless Permanent-Magnet Machines*, Motor Design Books LLC; Second Edition, 2010.
- [3] TransÉnergie Technologies Hydro-Québec, *SimPowerSystems For Use with Simulink*, User's Guide, , The MathWorks, Inc., 2004.
- [4] CEDRAT *Flux 2D User's Guide*, Vol 1-4, 2010.