



UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI
SCOALA DOCTORALA DE INGINERIE ELECTRICĂ

REZUMAT
TEZĂ DE DOCTORAT
STUDII PRIVIND MOTORELE ELECTRICE
MULTIFAZATE

Coordonator științific
Profesor Dr. ing. Virgiliu Firețeanu

Autor:
Ing. Constantin Dumitru

BUCUREȘTI 2023

CUPRINS

| | |
|---|----|
| INTRODUCERE | 4 |
| CAPITOLUL 1. MODELE 2D ÎN ELEMENT FINIT ALE MOTOARELOR MULTIFAZATE DE INDUCȚIE (3-5-7-9) | 7 |
| 1.1 INTRODUCERE..... | 7 |
| 1.2 ANALIZA ÎN ELEMENT FINIT A PERFORMANȚELOR MAȘINILOR STUDIAȚE | 9 |
| 1.2.1 Rezultatele câmpului electromagnetic | 9 |
| 1.2.2 Curenții statorici și cuplul electromagnetic pentru funcționarea nominală a motorului și pentru pornire | 10 |
| 1.3 OBSERVAȚII | 10 |
| CAPITOLUL 2. TOLERANȚA CU PRIVIRE LA DEFECȚIUNILE DE ALIMENTARE ELECTRICĂ LA MOTOARELE MULTIFAZATE DE INDUCȚIE..... | 10 |
| 2.1 ANALIZA TOLERANȚEI ÎN REGIM STAȚIONAR..... | 11 |
| 2.1.1 Analiza toleranței în regim staționar a mașinii de inducție cu 3 faze | 11 |
| 2.1.2 Analiza toleranței în regim staționar a mașinii de inducție cu 5 faze | 12 |
| 2.1.3 Analiza toleranței în regim staționar a mașinii de inducție cu 7 faze | 14 |
| 2.1.4 Analiza toleranței în regim staționar a mașinii de inducție cu 9 faze | 16 |
| 2.2 ANALIZA TOLERANȚEI LA PORNIRE | 18 |
| 2.2.1 Analiza toleranței la pornire a MAS cu 3 faze având Faza-1 întreruptă..... | 18 |
| 2.2.2 Analiza toleranței la pornire a MAS cu 5 faze având o fază și două faze întrerupte | 18 |
| 2.2.3 Analiza toleranței la pornire a MAS cu 7 faze având o fază și două faze întrerupte | 19 |
| 2.2.4 Analiza toleranței la pornire a MAS cu 7 faze având până la trei faze întrerupte..... | 20 |
| 2.3 OBSERVAȚII | 21 |
| CAPITOLUL 3. CERCETĂRI PRIVIND MOTOARELE MULTIFAZATE SINCRONE CU MAGNEȚI PERMANENȚI | 22 |
| 3.1 MODELE 2D CU ELEMENTE FINITE ALE MOTOARELOR SINCRONE MULTIFAZATE CU MAGNEȚI PERMANENȚI | 22 |
| 3.2 CUPLUL DE AGĂȚARE ȘI BACK-EMF ALE PMSM MULTIFAZATE STUDIAȚE | 23 |
| 3.2.1 Analiza cuplului de agățare..... | 23 |
| 3.2.2 Analiza Back-EMF | 23 |
| 3.2.3 Observații | 24 |
| 3.3 FAZA INIȚIALĂ A CURENȚILOR STATORULUI CORESPONDENTE CU VALOAREA MAXIMĂ A CUPLULUI ELECTROMAGNETIC ÎN PMSM | 24 |
| 3.4 PERFORMANȚELE FUNCȚIONĂRII MOTOARELOR SINCRONE CU MAGNEȚI PERMANENȚI MULTIFAZATE..... | 25 |
| 3.4.1 Câmpul magnetic la funcționarea nominală și armonicile spațiale ale câmpului magnetic în întrefier..... | 26 |
| 3.4.2 Cuplul electromagnetic pentru funcționarea PMSM-urilor în condiții nominale..... | 26 |
| 3.4.3 Tensiunea fazelor statorice pentru funcționarea nominală a PMSM-urilor | 26 |

| | | |
|---|---|----|
| 3.4.4 | Eficiența PMSM-urilor | 27 |
| 3.4.5 | Adnotare..... | 27 |
| 3.5 | OBSERVAȚII | 28 |
| CAPITOLUL 4. PROIECTAREA UNUI MOTOR DE INDUCȚIE CU COLIVIE CU 5 FAZE | | 28 |
| 4.1 | PREZUMȚII PENTRU PROIECTAREA PRELIMINARĂ A MOTORULUI..... | 29 |
| 4.2 | MODELUL NUMERICAL BAZAT PE FORMULE ANALITICE ALE MAS CU 5 FAZE..... | 29 |
| 4.2.1 | Criterii de verificare | 29 |
| 4.2.2 | Calculul analitic al motorului cu 5 faze pentru funcționare nominală..... | 30 |
| 4.3 | CALCULUL CU ELEMENTE FINITE AL MAS CU 5-FAZE..... | 30 |
| 4.3.1 | Funcționarea sănătoasă a MAS cu 5 faze | 32 |
| 4.3.2 | Funcționarea cu o fază întreruptă a MAS cu 5 faze..... | 34 |
| 4.4 | OBSERVAȚII | 36 |
| CAPITOLUL 5. REALIZAREA ȘI ÎNCERCAREA UNUI MOTOR DE INDUCȚIE CU COLIVIE CU 5 FAZE..... | | 36 |
| 5.1 | REALIZAREA PACHETULUI DE TOLE LAMINATE A STATORULUI..... | 36 |
| 5.1.1 | Realizarea tolelor statorice..... | 36 |
| 5.1.2 | Așezarea tolelor statorice pe dorn..... | 37 |
| 5.1.3 | Consolidarea mecanică a pachetului de tole laminate statorice..... | 37 |
| 5.2 | BOBINAREA MIEZULUI STATORULUI SI MONTAJUL MOTORULUI | 38 |
| 5.3 | TESTE EXPERIMENTALE ȘI REZULTATE | 39 |
| 5.3.1 | Verificarea izolației dintre carcasă și fază | 39 |
| 5.3.2 | Măsurarea rezistenței pe fază..... | 39 |
| 5.3.3 | Bancul de testare | 40 |
| 5.3.4 | Funcționarea sănătoasă a modelului fizic de MAS cu 5 faze | 41 |
| 5.3.5 | Funcționarea cu fază întreruptă a modelului fizic de MAS cu 5 faze..... | 42 |
| 5.3.6 | Observații..... | 42 |
| 5.4 | SENSUL DE ROTAȚIE PENTRU UN MOTOR CU 5 FAZE | 42 |
| 5.5 | OBSERVAȚII | 43 |
| CONCLUZII..... | | 43 |
| CONTRIBUȚII ALE TEZEI ÎN INVESTIGAREA MAȘINILOR ELECTRICE MULTIFAZATE..... | | 45 |
| PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE | | 46 |
| BIBLIOGRAFIE..... | | 47 |

INTRODUCERE

Primul sistem de acționare pentru un motor multifazic a fost propus în 1969, după cunoștințele autorului tezei, în lucrarea [1], de către Dr. E. E. Ward și Ing. H. Härer care lucrau la acea vreme la Universitatea din Southampton, Anglia și, respectiv, la Universitatea din Stuttgart Institutul pentru Transmisia Energetică și Tehnologia de Înaltă Tensiune, Germania. În această lucrare sunt prezentate experimente preliminare pe un motor cu inducție cu 5 faze alimentat de un invertor cu 10 impulsuri, având tiristoare ca elemente de comutație. În comparație cu un motor cu inducție cu trei faze, a fost observată o reducere de trei ori a ondulației cuplului. De asemenea, pierderile din motor au fost mari din cauza unui factor de formă slab al curentului de linie.

Conform lucrării [2], din 1969 până în 1990, acționările motoarelor multifazate au atras o atenție limitată, dar din anii 1990 - 2000, acest subiect a devenit un punct de interes pentru comunitatea de cercetare, în special pentru domenii specifice de aplicare, respectiv propulsia electrică a navelor, vehicule electrice și hibride, aplicații industriale de mare putere și avioane electrice

Lucrarea [3] reprezintă un studiu privind mașina asincronă (MAS) multifazată și acționarea sa, care acoperă peste 30 de ani de investigație pe acest subiect. Această lucrare analizează mașina trifazată, dublu trifazată, în cinci faze și în șase faze. O concluzie comună a acestui studiu constă în următoarele avantaje ale mașinii de inducție multifazice acoperite față de sistemele convenționale:

- Fiabilitate îmbunătățită, mașina funcționează în continuare în condiții specifice defectuoase;
- Pierderi reduse de fier;
- Curenți mai mici pe fază cu aceeași tensiune pe fază, util în aplicațiile în care există limite de tensiune și curent, precum vehiculele electrice;
- Manipularea unei puteri mai mici pe fază, astfel utilizarea de semiconductori de putere mai mică;
- Eliminarea anumitor armonici spațiale din inducția magnetică din întrefier, eliminând astfel unele dintre vârfurile caracteristice cuplu-viteză.

În lucrarea [4] este elaborat un model numeric dinamic al unui motor multifazat cu înfășurare statorică în șase faze și înfășurare rotor trifazat și se arată că regimul tranzitoriu de pornire al curentului, vitezei și cuplului sunt calitativ apropiate de cele ale unui motor trifazat.

În [5] se arată că motoarele electrice multifazate pot îndeplini cerințele necesare în propulsia marină. Se arată că prin creșterea numărului de faze, pierderile Joule în înfășurarea statorului pot fi reduse cu câteva procente, rezultând o eficiență mai mare. Menținând același nivel de pierderi Joule, cuplul poate fi crescut cu un procent similar, astfel densitatea de putere poate fi crescută.

În [6], autorii au făcut o comparație a distorsiunii armonice totale (THD) în tensiunea de fază de ieșire a invertorului sursei de tensiune în cinci faze. Au fost considerate următoarele unghiuri de conducere: 180° , 162° , 144° , 126° și 108° , ale formei de undă pătrată, autorii au concluzionat că cel mai mic THD se obține pentru 144° .

Mai multe avantaje ale mașinilor multifazate sunt descrise în [2], printre care:

- Câmpul electromagnetic generat de înfășurarea statorului într-o mașină multifazică are un conținut mai scăzut de armonici spațiale, contribuind astfel la creșterea randamentului acestuia;
- Se remarcă o toleranță mai mare la defecțiuni pentru aceste tipuri de mașini față de mașinile trifazate, inclusiv capacitatea de autopornire și de funcționare continuă, dar cu o abatere minimă;
- La aceste tipuri de mașini se observă o susceptibilitate mai mică la componentele armonice în timp ale sistemului de alimentare în comparație cu mașinile trifazate. Aceste componente produc pulsații de cuplu.

De asemenea, în [2] este prezentată matricea de transformare Clarke pentru un sistem simetric m-faze pentru mașină de inducție cu distribuție sinusoidală a înfășurării conectată în stea cu un singur punct neutru.

Pe lângă avantajele generale ale mașinilor multifazate, printre care capacitatea de toleranță la defecte, ondulația redusă a cuplului, densitatea de cuplu mai mare, un avantaj al motoarelor multifazate este scăderea cu aproximativ 5% a pierderilor Joule statorice odată cu creșterea numărului de faze [2] și [7].

Mașina cu cinci faze oferă 120 de secvențe posibile care pot fi conectate, transpunerea de fază poate fi calculată din permutările numărului de faze. Câmpul rotativ echilibrat poate fi realizat prin doar 20 de conexiuni. Alte conexiuni conduc la modul dezzechilibrat, în care ambele secvențe prima și a treia sunt aplicate motorului. Zece din cele douăzeci de conexiuni oferă viteză maximă datorită primei secvențe. Celelalte 10 conexiuni rulează mașina cu o treime din viteza maximă din cauza celei de-a treia secvențe [8].

Datorită limitărilor în manipularea puterii mari, generatoarele trifazate se confruntă cu dificultăți în utilizarea generației de mare putere în ordinul de megawați. Utilizarea compensatoarelor statice de VAR (putere reactivă) implică următoarele: cheltuieli semnificative, control dificil al circuitului, armonici de comutare și regimuri tranzitorii în ondulara cuplului care implică vibrații mecanice. În acest sens, mașinile multifazate sunt utilizate în diferite domenii de utilizare, de exemplu, EV-uri (vehicule electrice), avioane, propulsie electrică a navelor, sisteme de colectare a energiei [9], [10], [11] și [12].

Multe studii au fost redirecționate încet către sistemele multifazate pentru generarea de energie în aplicații independente. Examinările în aplicația de generare independentă de energie dobândesc beneficiile motoarelor, precum permit modalități de utilizare a nivelurilor suplimentare de grade de libertate, de exemplu, utilizarea interfeței convertorului electronic de putere în sistemele de recoltare a energiei eoliene [10], [13] și [14].

Mașini multifazice, inclusiv cinci faze [15], șase faze [16], [17], [18], [19] și [20], șapte faze [13], [21], [22], [23] și cu douăsprezece faze [24] au fost implicate în aplicațiile de acționare electrică în anii precedenți. Mașinile multifazate oferă avantaje care concurează cu cerințele industriei eoliene, deoarece împart în mod natural puterea de până la 10 MW și îmbunătățesc fiabilitatea prin creșterea capacității de toleranță la erori [10], [15], [22], [23] și [25].

Lucrarea [26] prezintă o comparație a distribuției inducției în diferite părți, în principal întrefierul, jugul și dinții miezurilor statorului și rotorului, a unui motor de inducție cu cinci faze între funcționarea sa sănătoasă și defect cu două faze deschise. Modelul analitic arată rezultate foarte asemănătoare în comparație cu modelul cu elemente finite și cu măsurătorile pe

un prototip. S-a constatat că densitatea fluxului magnetic în dinții statorului și rotorului, în cazul funcționării defectuoase, are armonici spațiale cu amplitudine crescută.

În lucrările [27] și [28], densitatea fluxului magnetic în întrefier este descrisă prin formule analitice care derivă componentele secvenței curențe, rezultând o dependență de timp a densității fluxului magnetic pentru diferite viteze. Lucrarea [26] extinde formulările din lucrările de mai sus pentru a include armonici spațiale ale densității fluxului magnetic, cu ordin mai mare decât a treia.

Lucrările [29] și [30] arată performanțe îmbunătățite la trei motoare de inducție cu înfășurare distribuită comparativ cu cele concentrate. Cu toate acestea, în studii mai recente, [31], [32] și [33], pentru o combinație specifică de număr de faze și creștături, se arată că înfășurările concentrate pot oferi performanțe similare în comparație cu înfășurarea distribuită pentru funcționarea sănătoasă și defectuoasă. Studiile referitoare la tipul de înfășurare au fost efectuate în [34] pe un motor cu inducție în șase faze. Înfășurarea pseudo-concentrată propusă de autori, cu înfășurare finală mai scurtă, prezintă performanțe îmbunătățite față de înfășurarea concentrată și performanțe înrăutățite față de înfășurarea distribuită.

Câteva avantaje ale acționărilor și motoarelor cu inducție multifazice (mai mari de trei faze) sunt prezentate în [2], [35], [36], [37], [38] și [39], toleranța privind funcționarea în condiții defectuoase este una dintre principalele avantaje.

De la utilizarea magneților permanenți (PM) în rotoarele mașinilor sincrone, interesul pentru motoarele sau generatoarele sincrone cu magnet permanenți (PMSM sau PMSG) a crescut, oferind performanțe în general mai bune în aplicațiile cu viteză variabilă [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46] în comparație cu mașinile cu inducție. Diferite topologii ale PMSM-urilor sunt analizate de-a lungul timpului, prezentând avantaje importante din punct de vedere al eficienței, pierderile Joule semnificativ reduse în rotor și a sistem de acționare dedicat [47], [48], [49], [50], [51], [52] și [53].

Această teză completează și cuantifică argumentul tolerant la erori descris în [2], precum și cuantificarea ondulației cuplului. Se observă o diminuare a ondulației cuplului electromagnetic odată cu creșterea numărului de faze statorice.

În lucrarea [10] sunt prezentate generatoare de inducție autoexcitate cu trei și șapte faze utilizate pentru un model de turbină eoliană de 2,1 [MW], arătând o creștere a puterii de ieșire pentru generatorul cu șapte faze, pentru aceeași viteză a vântului. De asemenea, lucrarea afirmă capacitatea generatorului cu șapte faze care funcționează sub defecțiuni cu una și două faze. Teza completează studiul de toleranță la erori [10], se analizează capacitatea motorului cu inducție cu 7 faze de a funcționa în anumite condiții de defecțiune a înfășurării, atât la pornire, cât și atunci când defecțiunea apare în timpul funcționării.

Descrierea tezei

Obiectivele generale ale tezei sunt: validarea cantitativă a informațiilor din literatura de specialitate privind comportamentul și avantajele mașinilor multifazate, identificarea numărului de faze, dintre cele studiate, care prezintă cele mai bune performanțe atât pentru cele motoarele sincrone, cât și pentru motoarele de inducție, proiectarea și fabricarea unui motor de inducție cu cinci faze.

Această teză de doctorat este structurată în cinci capitole la care se adaugă introducerea și concluziile generale, contribuțiile și perspectivele de dezvoltare. În **primul capitol** sunt descrise cazurile studiate de motoare asincrone și analizate performanțele pentru punctul nominal de funcționare. În **cel de-al doilea capitol** este analizat comportamentul motoarelor de inducție cu trei faze, cu cinci faze, cu șapte faze și cu nouă faze, atât pentru toleranța în regim

staționar, cât și pentru toleranța la pornire în ceea ce privește una sau mai multe defecțiuni ale fazelor înfășurării statorice. **Capitolul trei** prezintă o analiză a motoarelor sincrone multifazate cu magneți permanenți. Aceste modele au fost dezvoltate pornind de la modelele motoarelor analogice de inducție, descrise în capitolele precedente. În **capitolul patru** sunt prezentate formule și o analiză bazată pe modelul cu elemente finite a motorului de inducție cu cinci faze pentru funcționare sănătoasă. De asemenea, este propus și analizat un punct de funcționare pentru funcționare continuă cu o defecțiune de fază luând în considerare câteva criterii. În **capitolul al cincilea** sunt prezentate procesul de fabricație a pachetului laminat statoric, procesul de înfășurare a statorului, bancul de încercare și rezultatele măsurate pe modelul fizic al motorului de inducție cu colivie pentafazat.

CAPITOLUL 1. MODELE 2D ÎN ELEMENT FINIT ALE MOTOARELOR MULTIFAZATE DE INDUCȚIE (3-5-7-9)

În acest capitol sunt descrise, analizate și comparate performanțele motoarelor de inducție în 3, 5, 7 și 9 faze la funcționare nominală.

1.1 INTRODUCERE

Diverse studii ale mașinilor de inducție cu colivie sunt efectuate în modele cu elemente finite (FE) pas cu pas în domeniul timp. Sunt considerate modele cuplate câmp - circuit - mișcare rotativă, impunând valorile corespunzătoare tensiunii de alimentare și ale cuplului rezistiv.

Potențialul vectorial magnetic \mathbf{A} [0, 0, A(x, y, t)] definește modelul vectorial al câmpului electromagnetic quasistatic bidimensional în sistemul de coordonate carteziene, satisfăcând ecuația (1.1). Proprietățile materialului sunt permeabilitatea magnetică (μ) și conductivitatea electrică (σ). Densitățile de curent ale creștăturilor statorice sunt definite de vectorul \mathbf{J}_1 [0, 0, J₁], respectiv, al barelor coliviei, \mathbf{J}_2 , sunt reprezentate prin termenul $\sigma \cdot [\partial \mathbf{A} / \partial t]$.

$$\text{rot} \left[\left(\frac{1}{\mu} \right) \cdot \text{rot} \mathbf{A} \right] + \sigma \cdot \left[\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right] = \mathbf{J}_1 \quad (1.1)$$

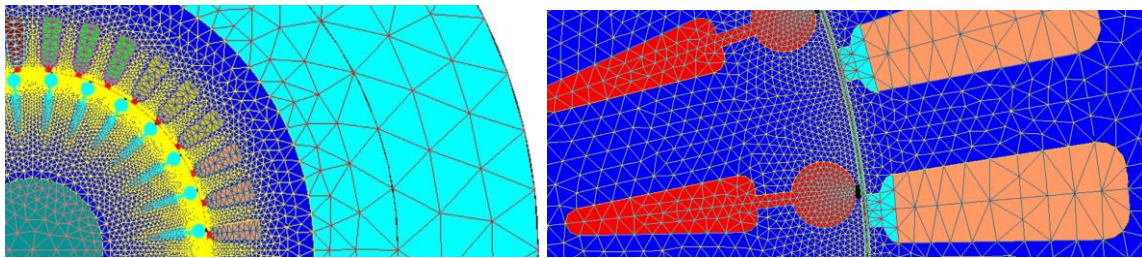
Domeniul bidimensional pentru calculul câmpului electromagnetic, Fig. 1.1, bazat pe potențialul A(x, y, t) include:

- creștăturile statorice – modelate ca regiuni nemagnetice și neconductoare, cu $\mu_r = 1$ și $J_1 \neq 0$;
- creștăturile/barele rotorului – regiuni de tip conductor solid, cu $\mu_r = 1$ și $J_2 \neq 0$;
- miezurile statorului și rotorului – regiuni magnetice neliniare și neconductoare, cu $\mu \neq \mu_0$ și $\sigma = 0$;
- izolațiile electrice, întrefier și aerul învecinat – regiuni nemagnetice și neconductoare, cu $\mu_r = 1$ și $\sigma = 0$.

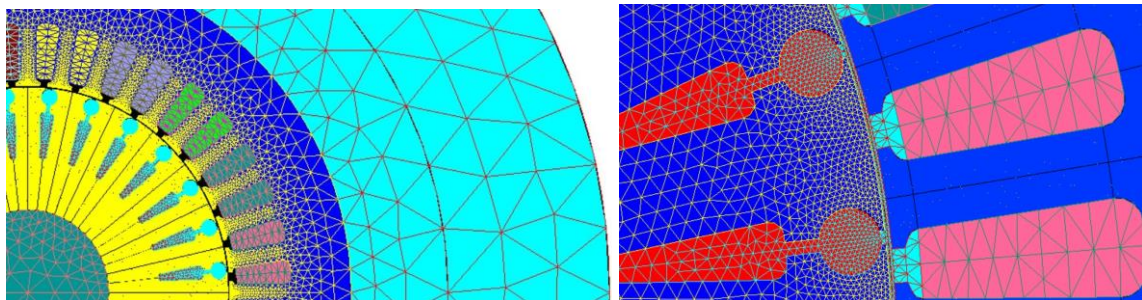
Sunt analizate patru motoare de inducție (MAS), cu număr diferit de faze și anume $m = 3, 5, 7$ și 9 . Numărul de creștături statorice ale fiecărei MAS este 36, 40, 56 și, respectiv, 36. Numărul de creștături/bare ale rotorului este același pentru motoarele cu 3 faze, 5 faze și 9 faze și anume 28, iar motorul cu 7 faze are 32 de bare.

Rezultatele prezentate în acest capitol pot fi găsite și în lucrarea autorului [55].

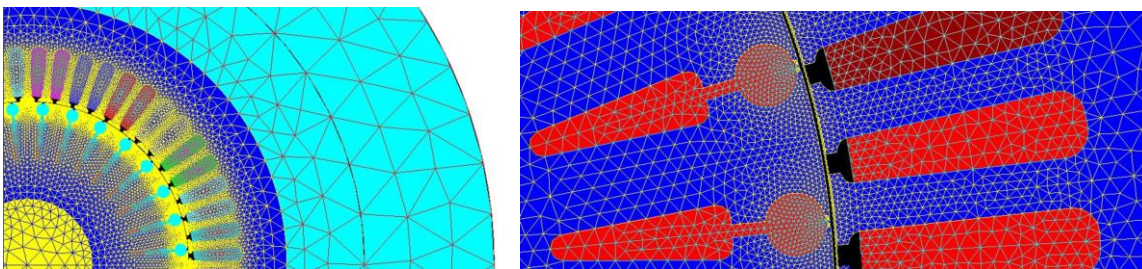
În Figura 1.1 este prezentată geometria și distribuția nodurilor de rețea a modelelor numerice 2D. Un spațiu asimptotic (*Infinite Box*) definește limitele domeniului de calcul. Regiunile modelului de MAS sunt descrise în Fig. 4.1. Studiile au fost realizate utilizând software-ul Altair Flux 2D. Efectul de înclinare al rotorului nu a fost luat în considerare.



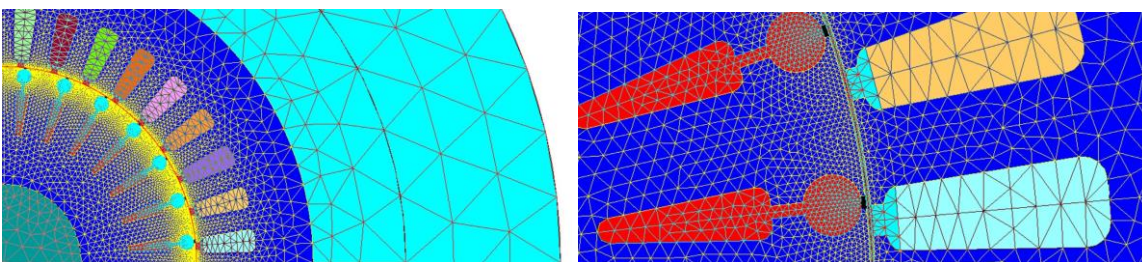
MAS 3-faze, $Z_1 = 2mpq = 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3 = 36$ creștături statorice



MAS 5-faze, $Z_1 = 2mpq = 2 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 2 = 40$ creștături statorice



MAS 7-faze, $Z_1 = 2mpq = 2 \cdot 7 \cdot 2 \cdot 2 = 56$ creștături statorice



MAS 9-faze, $Z_1 = 2mpq = 2 \cdot 9 \cdot 2 \cdot 1 = 36$ creștături statorice

Fig. 1.1. Geometriile modelelor în FE și zoom în vecinătatea spațiului de întrefier [55]

Se consideră motoare cu patru poli cu viteza sincronă de 1500 [rpm] și aceleași dimensiuni principale ale miezurilor magnetice și ale grosimii întrefierului. Alimentarea electrică se caracterizează prin valoarea tensiunilor fază-nul de 400 [V] și frecvența de 50 [Hz]. Funcționarea în sarcină a MAS este caracterizată de valoarea cuplului de sarcină de 50 [Nm] și momentul de inerție de 0,05 [kg·m²].

Schemele de înfășurare a statorului pentru MAS multifazate studiate sunt prezentate în **Anexa 1**, prezentată în versiunea extinsă a tezei.

1.2 ANALIZA ÎN ELEMENT FINIT A PERFORMANTELOR MAȘINILOR STUDIATE

1.2.1 Rezultatele câmpului electromagnetic

În acest subcapitol sunt analizate și comparate performanțele motoarelor prezentate în Fig. 1.1. Pentru toate motoarele investigate, înfășurarea statorului are același număr de spire pe fază, și anume 222. La calcularea rezistenței de fază s-au considerat aria creștăturilor statorului și conexiunea în serie a tuturor bobinelor înfășurării statorului cu un singur strat și un factor de umplere de 0,55. Rezistența de fază a celor patru motoare este: 2,247 Ω , 3,369 Ω , 4,396 Ω și, respectiv, 6,738 Ω . Rezistențele de fază sunt diferite deoarece numărul de faze, numărul de creștături pe pol și fază, numărul de creștături statorice și suprafața creștăturii statorice sunt diferite la fiecare caz. Circuitele electrice asociate cu geometria motoarelor sunt prezentate în Fig. 1.2.

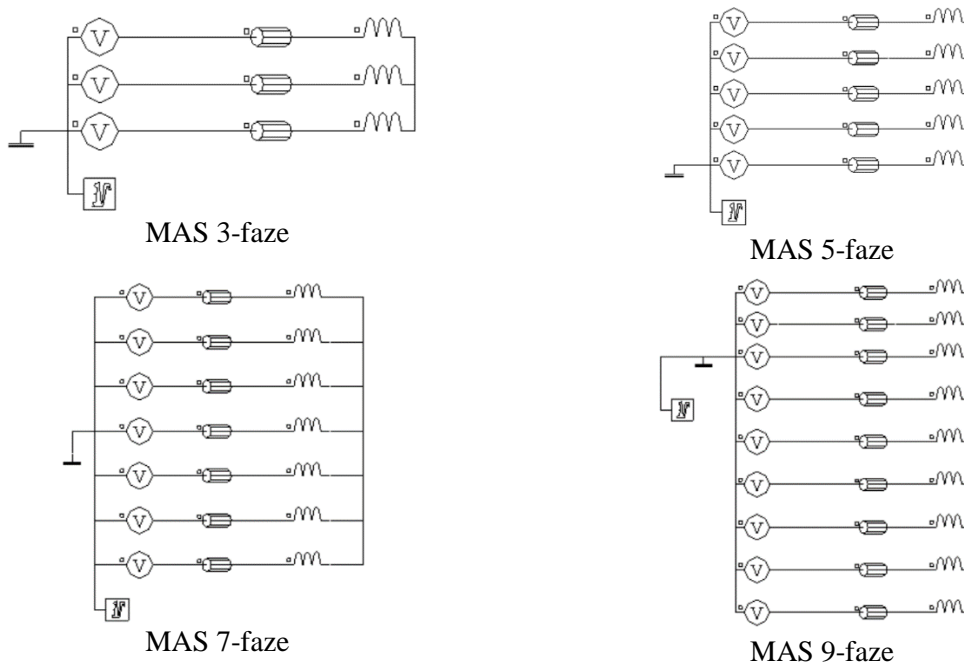


Fig. 1.2. Modelele de circuite ale motoarelor studiate [55]

Rezultatele de mai jos corespund regimului staționar al câmpului electromagnetic. S-a considerat o valoare a pasului de timp de 0,05 [ms], aplicația impune cuplul rezistiv, având valoarea de 50 [Nm] și turația inițială a rotorului, având valoarea de 1450 [rpm] (la $t = 0$), pentru o tranziție mai rapidă. Curentul de pornire și cuplul de pornire nu sunt evaluate pentru acest tip de aplicație.

Hărțile densității fluxului magnetic în miezurile motoarelor arată o saturație magnetică similară și structura cvadripolară a câmpului electromagnetic. Valorile maxime ale densității fluxului magnetic se găsesc în vârfulurile dinților statorului și rotorului. Datorită geometriei cu creștături, conținutul de armonici spațiale ale densității fluxului magnetic este semnificativ crescut. MAS cu 7 faze prezintă cel mai scăzut conținut de armonici spațiale ale densității fluxului magnetic, urmat de MAS cu 9 faze.

1.2.2 Curenții statorici și cuplul electromagnetic pentru funcționarea nominală a motorului și pentru pornire

Toate rezultatele de mai jos corespund regimului staționar al câmpului electromagnetic. S-a considerat o valoare a pasului de timp de 0,05 [ms] și o aplicație având valoarea cuplului de sarcină impusă de 50 [Nm].

Conținutul total de armonici ale curenților statorici, în raport cu fundamentală de 50 [Hz] a curenților, cu amplitudine peste 1 % sunt: 10,06 %, 14,36 %, 9,36 % și, respectiv, 60,75 %.

Valorile medii ale cuplului electromagnetic al fiecărei MAS sunt foarte asemănătoare. Viteza rotorului este: 1428,4 [rpm], 1426,8 [rpm], 1429,2 [rpm] și, respectiv, 1422,6 [rpm]. Valoarea cuplului este de: 24,73 [Nm], 8,857 [Nm], 10,489 [Nm] și, respectiv, 5,943 [Nm]. S-a observat că prin creșterea numărului de faze ondulația cuplului scade. În raport cu valoarea medie a cuplului, conținutul total al armonicilor oscilațiilor de cuplu cu amplitudine peste 1 % sunt: 20,57 %, 6,44 %, 7,41 % și respectiv 3,69 %.

Cel mai important parametru pentru caracterizarea unui sistem electric este eficiența cu care energia electrică este convertită în mișcare. Pentru evaluarea eficienței electrice a fost luată în considerare următoarea formulă:

$$\text{Randament [\%]} = \frac{\text{Valoare medie \{Cuplu Electromagnetic\} \cdot Valoare medie \{Viteză Unghiulară\}}}{\text{Valoare medie \{Puterea activă a surselor de alimentare\}}} \quad (1.2)$$

Rezultatele arată că motorul cu 7 faze are cea mai mare eficiență de 91,30 %, urmat de motorul cu 5 faze cu 90,62 %, motorul cu 3 faze cu 89,86 % și motorul cu 9 faze cu o eficiență de 87,62 %.

1.3 OBSERVAȚII

Comparând parametrii de funcționare în regim staționar ale motoarelor studiate, se constată că (a) motorul cu 7 faze prezintă cea mai scăzută distorsiune armonică totală (THD) a componentei normale a densității fluxului magnetic de-a lungul unui cerc mijlociu în întrefier, viteza nominală mai mare, cea mai scăzută distorsiune armonică totală a curenților statorici, cea mai mare eficiență electrică și (b) motorul cu 9 faze prezintă cea mai mică ondulație a cuplului electromagnetic și cea mai mică distorsiune armonică totală a acesteia.

CAPITOLUL 2. TOLERANȚA CU PRIVIRE LA DEFECȚIUNILE DE ALIMENTARE ELECTRICĂ LA MOTOARELE MULTIFAZATE DE INDUCȚIE

În acest capitol sunt analizate comportamentul mașinilor de inducție cu 3 faze, 5 faze, 7 faze și 9 faze, privind toleranța la starea staționară și toleranța de pornire în cazul apariției defecțiunilor uneia sau mai multor faze ale alimentării electrice. Defectarea unei faze a alimentării electrice semnifică întreruperea acelei faze, iar curentul prin acea fază este zero.

O mașină de inducție care înainte de defecțiune funcționează în regim staționar ca motor este considerată a fi tolerantă față de o anumită defecțiune în regim staționar, dacă după defecțiune noua funcționare în regim staționar este ca motor de inducție. După defecțiune

mașina continuă să funcționeze ca motor cu inducție, cu parametrii de funcționare ușor diferiți de cei anteriori.

Toleranța la defect la pornire a unei mașini de inducție, în ceea ce privește defecțiunile de fază ale alimentării electrice, se referă la capacitatea de a porni și de a funcționa în regim staționar ca motor de inducție după pornire atunci când una sau mai multe faze ale alimentării electrice sunt întrerupte.

Următoarele modele cu elemente finite sunt analizate în domeniul temporal (TD) și iau în considerare valoarea pasului de timp de 0,25 [ms], care este adecvată atunci când se ține cont de cantitățile luate în considerare în post-procesarea rezultatelor.

Rezultatele prezentate în acest capitol pot fi găsite și în lucrarea autorului [54].

2.1 ANALIZA TOLERANȚEI ÎN REGIM STAȚIONAR

În acest subcapitol este analizată toleranța în regim staționar a mașinilor de inducție cu 3 faze, 5 faze, 7 faze și 9 faze.

2.1.1 Analiza toleranței în regim staționar a mașinii de inducție cu 3 faze

2.1.1.1 Pornirea și funcționarea în regim staționar a mașinii sănătoase de inducție cu 3 faze

Pentru motorul sănătos trifazat care pornește la sarcina nominală de 50 [Nm], dependențele de timp ale turației rotorului și ale cuplului electromagnetic sunt prezentate în Figura 2.1. Circuitul asociat cu geometria mașinii de inducție trifazată, cu faze legate în stea și nul inaccessibil, este prezentat în Figura 2.2.

Funcționarea în regim staționar, după pornire, este caracterizată de valoarea medie a turației rotorului de 1429,1 [rpm]. Cele mai importante armonice ale cuplului sunt: 5 [Hz] / 0,33 [Nm], 565 [Hz] / 5,35 [Nm], 570 [Hz] / 3,71 [Nm], 865 [Hz] / 1,47 [Nm], 870 [Hz] / 1,09 [Nm].

Valorile RMS ale curenților statorului sunt 7,89 [A]. Amplitudinile armoniilor curenților sunt: 50 [Hz] / 11,1 [A], 615 [Hz] / 0,63 [A], 620 [Hz] / 0,40 [A], 815 [Hz] / 0,22 [A].

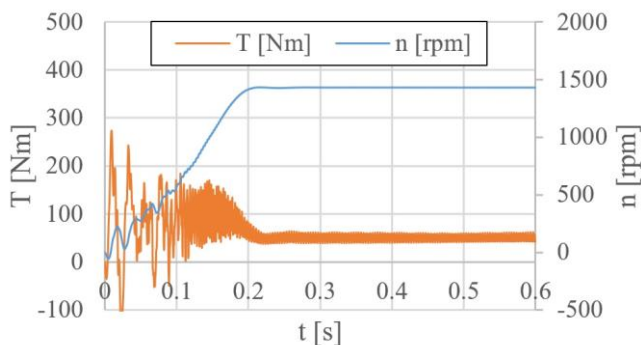


Fig. 2.1. Dependența de timp a vitezei rotorului (n) și a cuplului motorului (T) în timpul pornirii motorului trifazat [54]

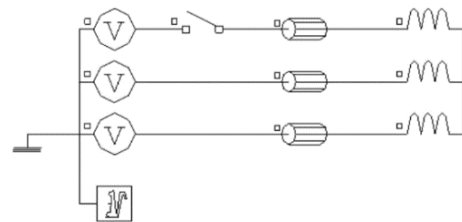


Fig. 2.2. Modelul de circuit al unei mașini cu inducție trifazată cu fazele conectate în stea, nul inaccessibil și comutatorul conectat la o fază [54]

2.1.1.2 Întreruperea fazei 1 după pornirea mașinii trifazate în stare sănătoasă

Defectarea unei faze a alimentării electrice este controlată prin intermediul comutatorului din Fig. 2.2 care își schimbă starea (Pornit/Oprit) la 0,3 [sec], când se atinge regimul staționar de funcționare a mașinii ca motor.

După întreruperea fazei, mașina funcționează ca generator cu valoarea medie a turației rotorului de -1556 [rpm]. Scăzând valoarea cuplului de sarcină de la 50 [Nm] la 45 [Nm], se obține un rezultat similar. Dar dacă cuplul de sarcină scade la 40 [Nm], viteza corespunzătoare

arată că, după defecțiunea Fazei-1, mașina continuă să funcționeze ca motor. Noua valoare a vitezei rotorului este 1398 [rpm]. Noua funcționare permanentă a motorului, cu defecțiunea Fazei-1, se caracterizează prin valoarea de 120,45 [Nm] a ondulației cuplului, mult mai mare decât valoarea de 22,2 [Nm] în cazul funcționării sănătoase a motorului.

A fost studiat un alt caz pentru mașină trifazată cu faze legate în stea și nul accesibil. Noua funcționare permanentă a motorului, cu defecțiunea Fazei-1, este caracterizată de noua valoare medie a vitezei rotorului de 1408,2 [rpm].

2.1.1.3 Observații

Comparând armonicile oscilației cuplului electromagnetic între MAS trifazată sănătoasă, Fig. 2.1 și cazul cu defecțiunea Fazei-1 a MAS cu înfășurare conectată în stea și nul accesibil se constată o deplasare a frecvențelor armonice de același ordin, cu amplitudinile aproape dublate. În cazul funcționării cu defect apar noi armonici ale cuplului electromagnetic, cea mai importantă armonică este 100 [Hz] / 24,69 [Nm]. Noua funcționare permanentă a motorului, cu defecțiunea Fazei-1, se caracterizează prin valoarea de 93,56 [Nm] a ondulației cuplului, mai mare decât valoarea de 22,2 [Nm] în cazul funcționării sănătoase a motorului. În ceea ce privesc amplitudinile armonicilor curenților, defectarea de fază determină o creștere până la 62,5% a curentului pentru armonica fundamentală de 50 [Hz].

Deoarece creșterea armonicilor și a ondulației cuplului este semnificativă, funcționarea de lungă durată la sarcină nominală a MAS cu 3 faze, după defecțiunea Fazei-1, nu ar trebui să fie acceptată. În consecință, MAS cu 3 faze nu este considerată tolerantă în regim staționar la defecțiunea unei faze.

2.1.2 Analiza toleranței în regim staționar a mașinii de inducție cu 5 faze

2.1.2.1 Pornirea și funcționarea în regim staționar a mașinii sănătoase de inducție cu 5 faze

Dependențele de timp ale turației rotorului și ale cuplului electromagnetic sunt prezentate în Fig. 2.3. În Fig. 2.4 este prezentat modelul de circuit al MAS cu 5 faze asociat cu geometria acestuia.

Pentru funcționarea în regim staționar a motorului sănătos cu 5 faze care pornește la sarcină nominală de 50 [Nm], valoarea medie a turației rotorului este de 1429,33 [rpm]. Cele mai importante armonice ale cuplului sunt: 460 [Hz] / 0,75 [Nm], 465 [Hz] / 0,38 [Nm], 470 [Hz] / 0,40 [Nm], 660 [Hz] / 0,75 [Nm], 770 [Hz] / 0,32 [Nm]. Valorile RMS ale curenților statorului sunt 4,61 [A]. Amplitudinile armonicilor curenților sunt: 50 [Hz] / 6,47 [A], 150 [Hz] / 0,13 [A], 615 [Hz] / 0,52 [A], 620 [Hz] / 0,36 [A] și 815 [Hz] / 0,14 [A].

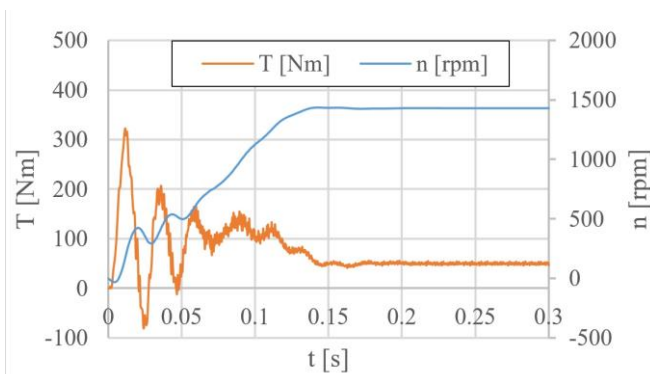


Fig. 2.3. Dependenta de timp a vitezei rotorului (n) și a cuplului motorului (T) în timpul pornirii motorului cu 5 faze [54]

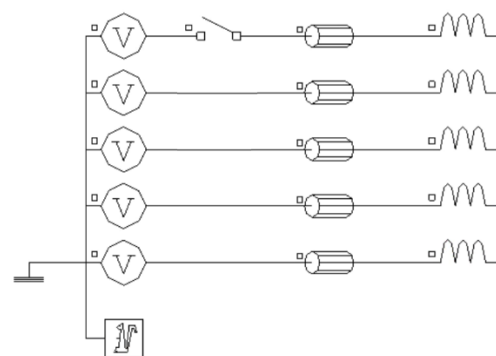


Fig. 2.4. Modelul de circuit al mașinii de inducție cu 5 faze, cu fazele conectate în stea și comutatorul conectat la o fază

2.1.2.2 Întreruperi succesive ale fazelor statorice după pornirea motorului cu 5 faze în stare sănătoasă

Mașina de inducție sănătoasă cu 5 faze ajunge la starea de echilibru și la 0,3 [sec] o fază este întreruptă. După o scurtă perioadă tranzitorie, mașina continuă să funcționeze ca motor, Fig. 2.5. Noua funcționare a motorului, cu defecțiunea Fazei-1, se caracterizează prin valoarea medie a turației rotorului este de 1420,68 [rpm], valoarea de 47,52 [Nm] a ondulației cuplului, mult mai mare decât valoarea 8,2 [Nm] în cazul funcționării sănătoase a motorului. Amplitudinea celei mai importante armonice a oscilației cuplului electromagnetic este de 100 [Hz] / 15,73 [Nm]. Valorile RMS ale curenților statorului sunt $I_1=0$ [A], $I_2 = 7,51$ [A], $I_3 = 4,71$ [A], $I_4 = 6,2$ [A], $I_5= 6,86$ [A]. Amplitudinile armonicii de 50 [Hz] a celor patru curenți nenuli sunt: 10,56 [A], 6,57 [A], 8,67 [A] și 9,62 [A].

Mașina de inducție cu 5 faze pornește la sarcină nominală, la 0,3 [sec] Faza-1 este întreruptă și la 0,45 [sec] Faza-2 este întreruptă. În regim staționar, valoarea medie a turației rotorului este -543,14 [rpm], astfel, mașina funcționează ca frână electrică.

Dacă Faza-3 a mașinii cu 5 faze este întreruptă la 0,45 [sec] în locul Fazei-2, mașina continuă să funcționeze ca un motor și are o turație medie a rotorului în regim staționar de 1405,37 [rpm], Fig. 2.6. Valoarea ondulației cuplului este de 76,15 [Nm] în noul regim de funcționare a motorului cu întreruperea Fazelor -1 și -3, semnificativ mai mare decât valoarea de 8,2 [Nm] în funcționarea sănătoasă a motorului. Amplitudinea celei mai importante armonice ale oscilației cuplului electromagnetic este de 100 [Hz] / 26,66 [Nm]. Valorile RMS ale curenților statorului sunt $I_1=0$ [A], $I_2=11,03$ [A], $I_3=0$ [A], $I_4=9,5$ [A] și $I_5=7,4$ [A]. Amplitudinile armonicii de 50 [Hz] a celor trei curenți nenuli sunt: 15,50 [A], 13,22 [A] și, respectiv, 10,32 [A].

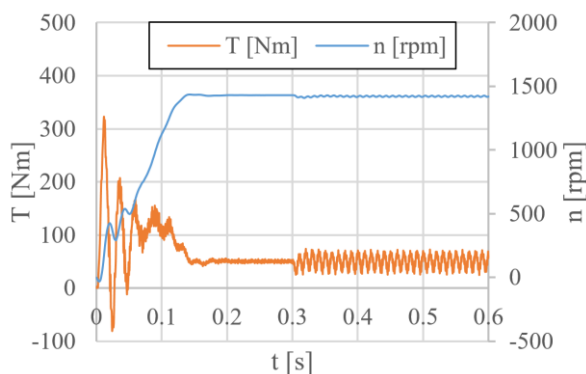


Fig. 2.5. Întreruperea Fazei-1 după pornirea în sarcină a mașinii sănătoase cu 5 faze [54]

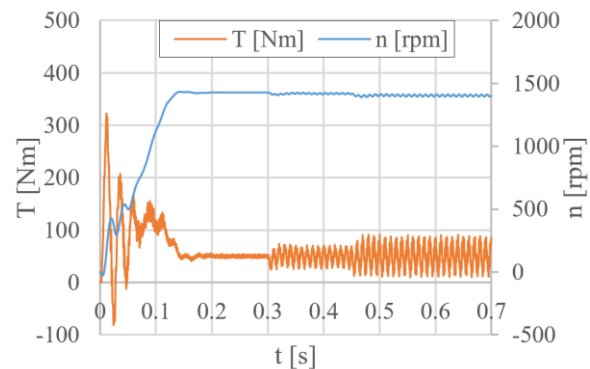


Fig. 2.6. Întreruperi succesive ale Fazelor-1 și -3 după pornirea mașinii sănătoase cu 5 faze [54]

Faza-1 este întreruptă la 0,3 secunde, Faza-2 este întreruptă la 0,4 [sec] și Faza-3 este întreruptă la 0,5 [sec] după pornirea în sarcină a mașinii de inducție cu 5 faze. Un alt caz este evaluat în care Faza-4 este întreruptă la 0,5 [sec], în locul Fazei-3. La sfârșitul perioadei tranzitorie, valoarea medie a turației rotorului este -1717,2 [rpm] în primul caz și -1567,04 [rpm] în al doilea caz, astfel mașina funcționează în regim de generator asincron. Ca urmare, motorul cu 5 faze nu este tolerant în regim staționar în ceea ce privește defecțiunea a trei faze ale alimentării electrice.

2.1.2.3 Observații

Scăderea amplitudinii curenților de alimentare, a amplitudinilor armonice ale oscilațiilor cuplului și curenților și a ondulației de cuplu de la 22,2 [Nm] la 8,2 [Nm], în cazul motorului cu 5 faze comparativ cu motorul trifazat reprezintă avantaje importante.

Comparând cazurile (a) MAS sănătoasă cu 5 faze, Fig. 2.3, (b) întreruperea Fazei-1, Fig. 2.5 și (c) întreruperea Fazelor-1 și -3, Fig. 2.6, se constată următoarele:

- creșterea alunecării în regim staționar de la 4,7% la 5,3% și la 6,3%, respectiv scăderea vitezei rotorului generată de defecțiuni ar trebui să fie acceptabilă pentru continuarea pentru un timp a funcționării motorului cu 5 faze. după întreruperile corespondente;
- creșterea importantă a ondulației cuplului de la 8,2 [Nm] la 47,52 [Nm] și, respectiv, la 76,15 [Nm], ar trebui să fie inacceptabilă pentru continuarea îndelungată a funcționării motorului cu 5 faze după defecțiuni;
- se constată apariția unei noi armonici ale oscilației cuplului de 100 [Hz] în cazurile (b) și (c), cu amplitudinile de 15,73 [Nm], respectiv 26,66 [Nm];
- armonica fundamentală (50 [Hz]) a curenților crește de aproximativ 1,6 ori (b) și de 2,4 ori (c) în comparație cu MAS sănătosă cu 5 faze (a).

În consecință, motorul de inducție cu 5 faze trebuie considerat tolerant la defectarea a până la două faze ale alimentării electrice, dacă aceste faze nu sunt adiacente.

2.1.3 Analiza toleranței în regim staționar a mașinii de inducție cu 7 faze

2.1.3.1 Pornirea și funcționarea în regim staționar a mașinii sănătoase de inducție cu 7 faze

Motorul sănătos cu 7 faze pornește la sarcină nominală de 50 [Nm] și în regim stabilizat atinge la turația medie a rotorului de 1428,3 [rpm], Fig. 2.7. În Fig. 2.8 este prezentat modelul de circuit al MAS cu 7 faze. Cele mai importante armonice ale oscilației cuplului sunt: 10 [Hz] / 0,165 [Nm], 105 [Hz] / 0,163 [Nm], 655 [Hz] / 0,535 [Nm], 660 [Hz] / 1,917 [Nm], 665 [Hz] / 1,049 [Nm], 670 [Hz] / 0,363 [Nm], 1215 [Hz] / 0,198 [Nm], 1225 [Hz] / 0,587 [Nm] și 1230 [Hz] / 0,457 [Nm]. Valorile RMS ale celor șapte curenți satorici sunt: 2,81 [A]. Amplitudinile armonicilor curenților sunt: 50 [Hz] / 3.963 [A], 710 [Hz] / 0.085 [A], 810 [Hz] / 0.083 [A], 1085 [Hz] / 0.082 [A].

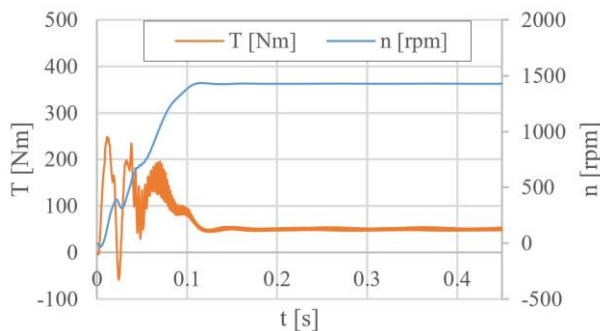


Fig. 2.7. Dependenta de timp a vitezei rotorului (n) și a cuplului motorului (T) în timpul pornirii motorului cu 7 faze [54]

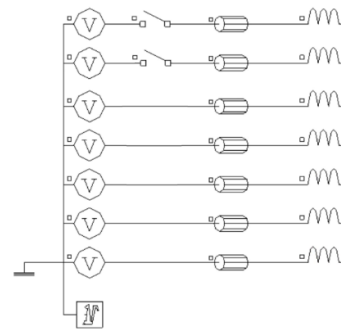


Fig. 2.8. Modelul de circuit al mașinii de inducție cu 7 faze, cu fazele conectate în stea

2.1.3.2 Întreruperi succesive ale fazelor satorice după pornirea motorului cu 7 faze în stare sănătoasă

Pentru acest studiu, mașina cu 7 faze pornește cu sarcină nominală, Faza-1 este întreruptă la 0,15 [sec] și Faza-2 este întreruptă la 0,3 [sec], Fig. 2.9, comutatoarele din Fig. 2.8 își schimbă starea. Mașina de inducție continuă să funcționeze ca motor, chiar dacă două faze adiacente sunt întrerupte. În funcționarea în regim stabilizat, motorul cu Faza-1 întreruptă are valoarea medie a vitezei rotorului de 1425,3 [rpm] și ondulația cuplului electromagnetic este de 26,31 [Nm]. În cazul întreruperii Fazelor-1 și -2, motorul atinge valoarea medie a turației rotorului de 1414,94 [rpm] și valoarea de 47,81 [Nm] a ondulației cuplului, mult mai mare decât

valoarea 6,54 [Nm] în cazul funcționării sănătoase a motorului. Amplitudinea celei mai importante armonice a oscilației cuplului electromagnetic este 100 [Hz] / 18,65 [Nm]. Valorile RMS ale curenților statorului sunt $I_1=0$ [A], $I_2=0$ [A], $I_3=5,7$ [A], $I_4=3,66$ [A], $I_5=3,75$ [A], $I_6=4,16$ [A] și $I_7=5,53$ [A]. Amplitudinea armonicii de 50 [Hz] a celor cinci curenți nenuli sunt: 8,03 [A], 5,16 [A], 5,28 [A], 5,87 [A] și 7,81 [A].

După trei întreruperi succesive, Faza-1 este întreruptă la 0,25 [sec], Faza-2 la 0,4 [sec] și Faza-3 la 0,55 [sec], mașina cu 7 faze nu își schimbă comportamentul de funcționare. Noua funcționare permanentă a motorului, cu defecțiunile celor trei faze, se caracterizează prin valoarea medie a turației 1351,1 [rpm] și valoarea 87,8 [Nm] a ondulației cuplului. Amplitudinea celei mai importante armonice a cuplului electromagnetic este de 100 [Hz] / 33,15 [Nm]. Valorile RMS ale curenților sunt $I_1=0$ [A], $I_2=0$ [A], $I_3=0$ [A], $I_4=11,15$ [A], $I_5=6,02$ [A], $I_6=6$ [A] și $I_7=10,59$ [A]. Amplitudinea armonicii de 50 [Hz] a celor patru curenți nenuli sunt: 15,73 [A], 8,48 [A], 8,43 [A] și 14,94 [A].

După trei întreruperi succesive, Faza-1 este întreruptă la 0,25 [sec], Faza-3 la 0,4 [sec] și Faza-5 la 0,55 [sec], Fig. 2.10, mașina cu 7 faze nu se schimbă comportamentul său de motor. Noua funcționare permanentă a motorului, cu trei faze întrerupte, se caracterizează prin valoarea medie a turației de 1409,96 [rpm] și valoarea de 36,4 [Nm] a ondulației cuplului, mai mică decât cazul similar al întreruperii a trei faze. Amplitudinea celei mai importante armonice a oscilației cuplului electromagnetic este de 100 [Hz] / 8,62 [Nm]. Valorile RMS ale curenților sunt $I_1=0$ [A], $I_2=6,26$ [A], $I_3=0$ [A], $I_4=6,33$ [A], $I_5=0$ [A], $I_6=4,88$ [A] și $I_7=4,73$ [A]. Amplitudinea armonicii de 50 [Hz] a celor patru curenți nenuli sunt: 8,81 [A], 8,90 [A], 6,87 [A] și 6,65 [A].

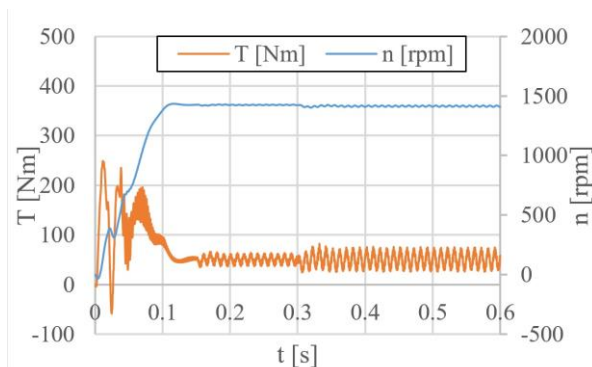


Fig. 2.9. Întreruperea Fazelor-1 și -2 după pornirea în sarcină a mașinii sănătoase cu 7 faze [54]

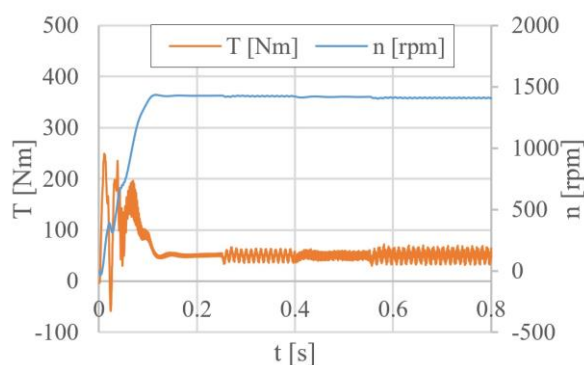


Fig. 2.10. Întreruperea Fazelor-1, -3 și -5 după pornirea în sarcină a mașinii sănătoase cu 7 faze [54]

După trei întreruperi succesive, Faza-1 este întreruptă la 0,25 [sec], Faza-4 la 0,4 [sec] și Faza-7 la 0,55 [sec], mașina cu 7 faze nu își schimbă comportamentul de funcționare ca motor. Noua funcționare permanentă a motorului, cu întreruperea celor trei faze, se caracterizează prin valoarea medie a turației de 1404,7 [rpm] și valoarea de 73,73 [Nm] a ondulației cuplului. Amplitudinea celei mai importante armonice a ondulației cuplului electromagnetic este de 100 [Hz] / 30,27 [Nm]. Valorile RMS ale curenților sunt $I_1=0$ [A], $I_2=6,48$ [A], $I_3=5$ [A], $I_4=0$ [A], $I_5=5,84$ [A], $I_6=6,1$ [A] și $I_7=0$ [A]. Amplitudinea armonicii de 50 [Hz] a celor patru curenți nenuli sunt: 9,10 [A], 7,03 [A], 8,21 [A] și 8,58 [A].

Pentru acest studiu, mașina cu 7 faze pornește cu sarcină nominală și este urmată de patru întreruperi succesive: Faza-1 este întreruptă la 0,25 [sec], Faza-2 la 0,4 [sec], Faza-3 la 0,55 [sec] și Faza-4 la 0,7 [sec]. Mașina cu 7 faze, după patru defecțiuni succesive, funcționează în regim staționar ca generator electric.

Cu toate acestea, mașina cu 7 faze continuă să funcționeze ca motor dacă cele patru întreruperi succesive sunt aplicate Fazelor-1, -3, -5 și -7. Valoarea medie a vitezei rotorului este 1381,58 [rpm], iar valoarea ondulației cuplului este de 52,96 [Nm]. Amplitudinea celei mai importante armonice a oscilației cuplului electromagnetic este de 100 [Hz] / 13,67 [Nm]. Valorile RMS ale curenților sunt $I_1=0$ [A], $I_2=9.1$ [A], $I_3=0$ [A], $I_4=7.8$ [A], $I_5=0$ [A], $I_6=9.25$ [A] and $I_7=0$ [A]. Amplitudinea armonicii de 50 [Hz] a celor trei curenți nenuli sunt: 12,82 [A], 10,98 [A] și 13,05 [A].

2.1.3.3 Observații

Scăderea amplitudinilor curenților de alimentare, a amplitudinilor oscilațiilor cuplului și armoniilor de curent, de asemenea, a ondulației cuplului de la 8,2 [Nm] la 6,54 [Nm], în cazul motorului cu 7 faze în funcționare sănătoasă față de motorul sănătos cu 5 faze, reprezintă avantaje importante.

În subcapitolul 2.1.3 se arată că în cazul întreruperii Fazelor-1, -3 și -5 (faze neadiacente) are cel mai mic impact al parametrilor funcționali, astfel că acest caz rămâne reprezentativ pentru întreruperea a trei faze pentru MAS cu 7 faze.

Comparând cazurile (a) MAS sănătoasă cu 7 faze, Fig. 2.7, (b) întreruperea Fazelor-1 și -2, Fig. 2.9, (c) întreruperea Fazelor-1, -3 și -5, Fig. 2.10 și (d) întreruperea Fazelor-1, -3, -5 și -7, se constată că:

- creșterea alunecării în regim staționar de la 4,78% la 5,67%, la 6% și la 7,9%, respectiv scăderea vitezei rotorului generată de defecțiuni ar trebui să fie acceptabilă pentru continuarea funcționării pentru un timp a MAS cu 7 faze după defecțiunile corespunzătoare;
- creșterea ondulației cuplului de la 6,54 [Nm] la 47,8 [Nm], la 36,4 [Nm] și la 52,96 [Nm], respectiv, ar trebui să fie inacceptabile pentru continuarea îndelungată a motorului cu 7 faze după defecțiuni;
- apariția unei noi armonici de cuplu de 100 [Hz] se remarcă în cazurile (b), (c) și (d), cu amplitudinile de 18,65 [Nm], 8,62 [Nm] și respectiv 13,67 [Nm];
- amplitudinile armoniilor fundamentale (50 [Hz]) ale curenților cresc de aproximativ 2 ori (b), de 2,2 ori (c) și 3,3 (d) în comparație cu cazul MAS sănătoase cu 7 faze (a).

În consecință, motorul de inducție cu 7 faze poate fi considerat tolerant la întreruperea a două faze și a trei faze neadiacente ale alimentării electrice.

2.1.4 Analiza toleranței în regim staționar a mașinii de inducție cu 9 faze

2.1.4.1 Pornirea și funcționarea în regim staționar a mașinii sănătoase de inducție cu 9 faze

În cazul motorului sănătos cu 9 faze care pornește cu sarcină nominală de 50 [Nm], dependențele de timp ale turației rotorului și ale cuplului electromagnetic sunt prezentate în Fig. 2.11. În Fig. 2.12 este prezentat modelul de circuit al MAS cu 9 faze. Valoarea medie a vitezei rotorului este 1428,57 [rpm]. Cele mai importante armonice ale oscilației cuplului sunt: 260 [Hz] / 0,22 [Nm], 565 [Hz] / 0,78 [Nm], 570 [Hz] / 0,34 [Nm], 575 [Hz] / 0,24 [Nm], 865 [Hz] / 1,22 [Nm], 875 [Hz] / 0,26 [Nm]. Valoarea RMS medie ale curenților statorici este 2,7 [A]. Amplitudinile armoniilor curenților sunt: 50 [Hz] / 3,56 [A], 515 [Hz] / 0,12 [A], 615 [Hz] / 0,64 [A], 620 [Hz] / 0,34 [A], 715 [Hz] / 0,73 [A], 720 [Hz] / 0,35 [A].

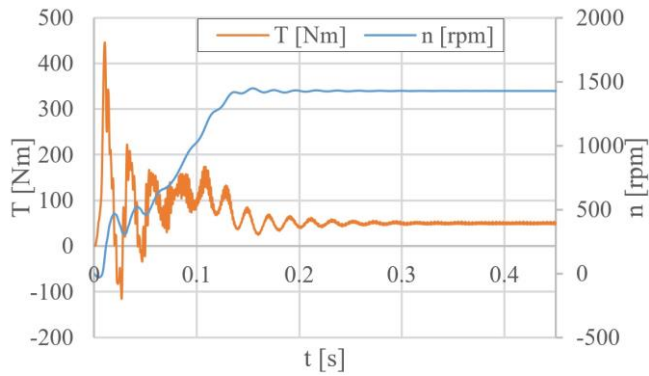


Fig. 2.11. Dependenta de timp a vitezei rotorului (n) și a cuplului motorului (T) în timpul pornirii motorului cu 9 faze [54]

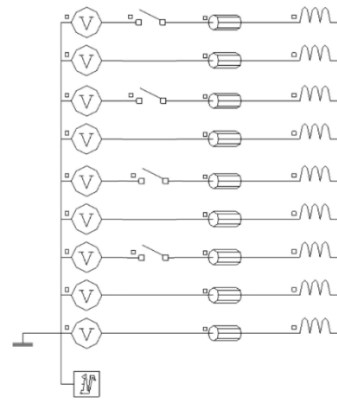


Fig. 2.12. Modelul de circuit al mașinii de inducție cu 9 faze, cu fazele conectate în stea

2.1.4.2 Întreruperi succesive ale fazelor statorice după pornirea motorului cu 9 faze în stare sănătoasă

Pentru acest studiu, mașina cu 9 faze pornește în sarcină nominală și este urmată de patru întreruperi succesive: Faza-1 este întreruptă la 0,3 [sec], Faza-3 la 0,4 [sec], Faza-5 la 0,5 [sec] și Faza-7 la 0,6 [sec], Fig. 2.13. Mașina cu 9 faze, după patru întreruperi succesive, continuă să funcționeze ca motor. Valoarea medie a turației rotorului este de 1407,7 [rpm], iar ondulația cuplului este de 86 [Nm], mult mai mare decât valoarea de 6,37 [Nm] în cazul funcționării sănătoase a motorului. Amplitudinea celei mai importante armonice a oscilației cuplului electromagnetic este 100 [Hz] / 4,69 [Nm]. Valorile RMS ale curenților statorului sunt $I_1=0$ [A], $I_2=5.83$ [A], $I_3=0$ [A], $I_4=5.88$ [A], $I_5=0$ [A], $I_6=6.06$ [A], $I_7=0$ [A], $I_8=5.89$ [A] și $I_9=4.52$ [A]. Amplitudinea armonicii de 50 [Hz] a celor cinci curenți nenuli sunt: 7,97 [A], 7,98 [A], 8,27 [A], 7,52 [A] și 6,02 [A].

La momentele de timp 0,3, 0,4, 0,5, 0,6 și 0,8 [sec], corespunzătoare Fazelor-1, -3, -5, -7 și -9, după pornirea în sarcină a mașinii sănătoase cu 9 faze, această mașină continuă să funcționeze ca motor, Fig. 2.14. Valoarea medie a vitezei rotorului este de 1377,5 [rpm], iar ondulația cuplului electromagnetic este de 157,5 [Nm]. Amplitudinea celei mai importante armonice a oscilației cuplului electromagnetic este de 100 [Hz] / 11,27 [Nm]. Valorile RMS ale curenților statorului sunt $I_1=0$ [A], $I_2=9.15$ [A], $I_3=0$ [A], $I_4=6.86$ [A], $I_5=0$ [A], $I_6=8.16$ [A], $I_7=0$ [A], $I_8=8.86$ [A] și $I_9=0$ [A]. Amplitudinea armonicii de 50 [Hz] a celor patru curenți nenuli sunt: 12,62 [A], 9,26 [A], 11,07 [A] și 12,15 [A].

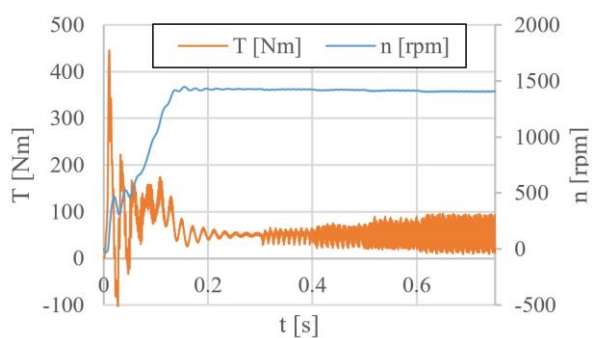


Fig. 2.13. Întreruperea Fazelor-1, -3, -5 și -7 după pornirea în sarcină a mașinii sănătoase cu 9 faze [54]

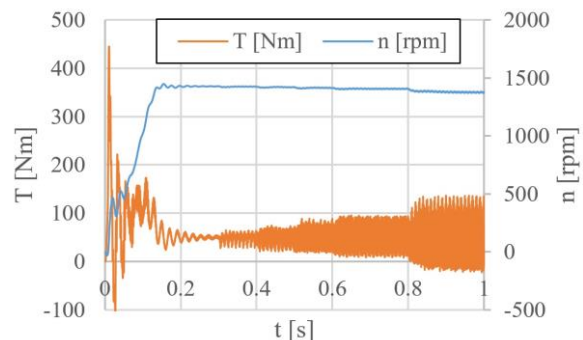


Fig. 2.14. Întreruperea Fazelor-1, -3, -5, -7 și -9 după pornirea în sarcină a mașinii sănătoase cu 9 faze [54]

2.1.4.3 Observații

Scăderea amplitudinilor curenților de alimentare, a amplitudinilor armonicilor oscilației cuplului și curențului și a ondulației cuplului de la 22,2 [Nm] la 6,37 [Nm], în cazul motorului cu 9 faze comparativ cu motorul trifazat reprezintă avantaje importante.

Comparând cazurile (a) MAS sănătoasă cu 9 faze, Fig. 2.11, (b) întreruperea a patru faze, Fig. 2.13 și (c) întreruperea a cinci faze, Fig. 2.14, se constată că:

- creșterea alunecării în regim staționar de la 4,76% la 6,16% și la 8,17%, respectiv scăderea vitezei rotorului generată de întreruperi ar trebui să fie acceptabilă pentru continuarea funcționării pentru un timp a motorului cu 9 faze. după întreruperile fazelor corespondente;
- creșterea foarte importantă a ondulației cuplului de la 6,37 [Nm] la 86 [Nm] și, respectiv, la 157,5 [Nm], ar trebui să fie inacceptabilă pentru continuarea îndelungată a funcționării motorului în 9 faze după defecțiuni;
- se constată apariția unei noi armonici ale oscilației cuplului de 100 [Hz] în cazurile (b) și (c), cu amplitudinile de 25,86 [Nm], respectiv 38,95 [Nm];
- valoarea armonice fundamentale (50 [Hz]) a curenților crește de aproximativ 2,3 ori (b) și de 3,5 ori (c) în comparație cu cazul MAS sănătoase cu 9 faze (a).

În consecință, motorul de inducție cu 9 faze trebuie considerat tolerant la întreruperea a până la patru faze neadiacente ale alimentării electrice.

2.2 ANALIZA TOLERANȚEI LA PORNIRE

În acest subcapitol este analizată toleranța la pornire a MAS cu 3 faze, cu 5 faze, cu 7 faze și cu 9 faze.

2.2.1 Analiza toleranței la pornire a MAS cu 3 faze având Faza-1 întreruptă

Având în vedere sarcina redusă de 5 [Nm], Faza-1 este întreruptă (comutatorul cu stare Off în Fig. 2.2) și inaccesibilitatea conexiunii în stea a înfășurării statorului, se constată că mașina funcționează în regim staționar ca frână electrică. Valoarea medie a turației rotorului este de -110 [rpm] și prezintă oscilații foarte importante. În prezența a patru conductoare de alimentare, întreruperea Fazei-1 și cuplul de sarcină redus de 30 [Nm], tentativa de pornire a mașinii trifazate se caracterizează prin turația rotorului de 488,6 [rpm] și oscilații importante de cuplul electromagnetic. Prin urmare, mașina de inducție trifazată nu poate funcționa ca motor la întreruperea unei faze, cu înfășurarea statorului conectată în stea, chiar și cu nulul accesibil.

2.2.2 Analiza toleranței la pornire a MAS cu 5 faze având o fază și două faze întrerupte

În Fig. 2.15 este reprezentată pornirea motorului cu 5 faze, cu întreruperea Fazei-1. Valoarea medie a turației rotorului este de 1420,63 [rpm]. Amplitudinea celei mai importante armonice a oscilației cuplului electromagnetic este de 100 [Hz] / 15,71 [Nm]. Valorile RMS ale curenților sunt $I_1=0$ [A], $I_2=7.52$ [A], $I_3=4.7$ [A], $I_4=6.17$ [A] și $I_5=6.86$ [A]. Amplitudinea armonicii de 50 [Hz] a celor patru curenți nenuli sunt: 10,57 [A], 6,58 [A], 8,68 [A] și 9,63 [A].

În Fig. 2.16 este prezentată pornirea aceluiași motor, dar cu întreruperea Fazelor-1 și -3, valoarea medie a turației este de 478,3 [rpm] și conține oscilații importante.

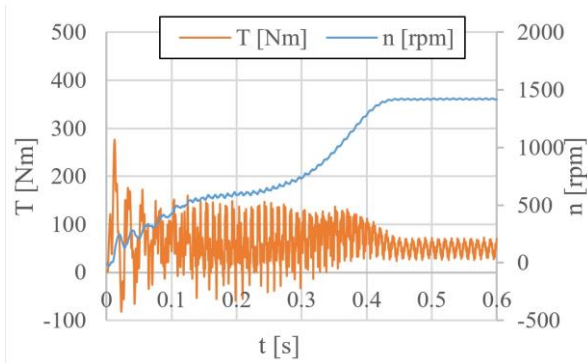


Fig. 2.15. Pornirea motorului cu 5 faze cu Fază-1 întreruptă [54]

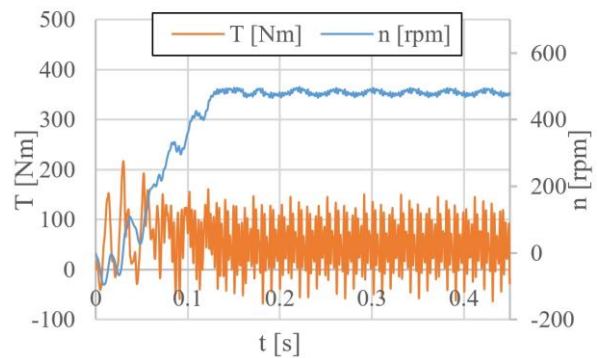


Fig. 2.16. Pornirea motorului cu 5 faze cu Fazele-1 și -3 întrerupte[54]

Observații

Comparând cazurile (a) MAS sănătoasă cu 5 faze, Fig. 2.3 și (b) pornire a motorului cu 5 faze având Faza-1 întreruptă, Fig. 2.15, se constată că:

- creșterea alunecării în regim staționar de la 4,7% la 5,3%, respectiv scăderea vitezei rotorului generată de defecțiuni ar trebui să fie acceptabilă pentru continuarea funcționării pentru un timp a motorului cu 5 faze după întreruperile corespunzătoare;
- creșterea importantă a ondulației cuplului de la 8,2 [Nm] la 47 [Nm] ar trebui să fie inacceptabilă pentru continuarea îndelungată a funcționării motorului cu 5 faze după defecțiuni;
- apariția unei noi armonici ale oscilației cuplului de 100 [Hz] se remarcă în cazul (b), cu amplitudinile de 15,71 [Nm];
- armonica fundamentală (50 [Hz]) a curenților crește de aproximativ 1,6 ori (b) în comparație cu cazul MAS sănătoasă cu 5 faze (a).

Motorul de inducție cu 5 faze poate fi considerat tolerant la pornire doar cu defecțiunea unei singure faze.

2.2.3 Analiza toleranței la pornire a MAS cu 7 faze având o fază și două faze întrerupte

Valoarea medie a vitezei rotorului în regim stabilizat este de 1425,1 [rpm], pentru MAS cu 7 faze pornit cu Faza-1 întreruptă, Fig. 2.17. Amplitudinea celei mai importante armonice a oscilației cuplului electromagnetic este de 100 [Hz] / 7,93 [Nm]. Valorile RMS ale curenților sunt $I_1=0$ [A], $I_2=3.6$ [A], $I_3=3.15$ [A], $I_4=2.97$ [A], $I_5=3.21$ [A], $I_6=3.28$ [A] și $I_7=3.73$ [A]. Amplitudinea armonicii de 50 [Hz] a celor șase curenți nenuli sunt: 5,58 [A], 4,44 [A], 4,19 [A], 4,53 [A], 4,62 [A] și 5,27 [A].

Valoarea medie în regim stabilizat a turației rotorului este de 1418,6 [rpm], pentru MAS cu 7 faze pornit cu Fazele-1 și -3 întrerupte, Fig. 2.18. Amplitudinea celei mai importante armonice a oscilației cuplului electromagnetic este de 100 [Hz] / 0,49 [Nm]. Valorile RMS ale curenților sunt $I_1=0$ [A], $I_2=5.6$ [A], $I_3=0$ [A], $I_4=4.5$ [A], $I_5=3.64$ [A], $I_6=3.4$ [A] și $I_7=4.3$ [A]. Amplitudinea armonicii de 50 [Hz] a celor cinci curenți nenuli sunt: 7,89 [A], 6,30 [A], 5,14 [A], 4,77 [A] și 6,07 [A].

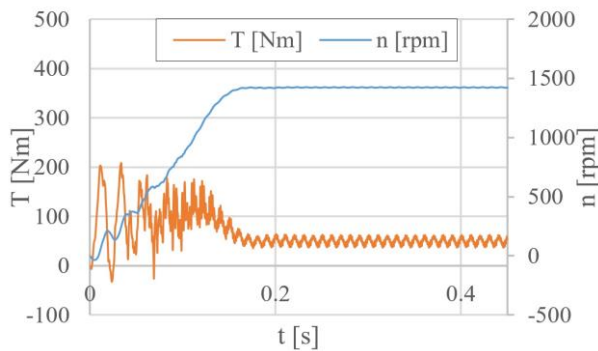


Fig. 2.17. Pornirea motorului cu 7 faze cu Fază-1 întreruptă [54]

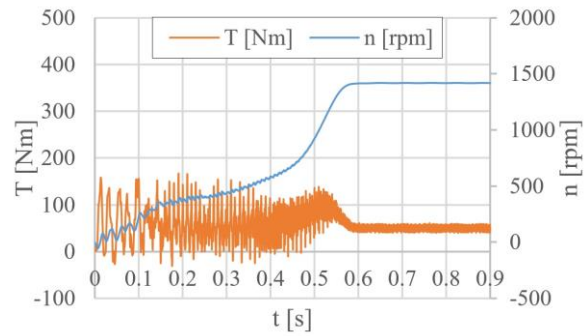


Fig. 2.18. Pornirea motorului cu 7 faze cu Fazele-1 și -3 întrerupte [54]

Au fost efectuate studii similare asupra pornirii motorului de inducție cu 7 faze. Se observă că pentru perechile de faze:

- Fazele-1 și -2 întrerupte, mașina funcționează în regim stabilizat ca frână electrică cu valoarea medie a turației-285 [rpm] și oscilații importante ale turației și cuplului rotorului;
- pentru ambele perechi: Fazele-1, -4; Fazele-1, -5, motorul se caracterizează printr-o valoare medie puțin peste 500 [rpm] și oscilații importante ale turației și cuplului rotorului.

Au fost efectuate trei studii pe motorul de inducție cu 7 faze pornind cu întreruperi a 3 sau 4 faze, rezultatele au arătat că mașina funcționează în regim staționar ca frână sau generator electric. Cazurile luate în considerare sunt:

- Fazele-1, -3 și -5 întrerupte, cu valoarea medie a vitezei de -481,3 [rpm];
- Fazele -1, -2, -3 și -4 întrerupte, cu valoarea medie a vitezei de -1568,8 [rpm];
- Fazele -1, -3, -5 și -7 întrerupte, cu valoarea medie a vitezei de -500 [rpm].

Observații

Comparând cazurile (a) MAS sănătoasă cu 7 faze, Fig. 2.7, (b) pornirea motorului cu 7 faze cu Faza-1 întreruptă, Fig. 2.17 și (c) pornirea motorului cu 7 faze cu Fazele-1 și -3 întrerupte, Fig. 2.18, se constată că:

- creșterea alunecării în regim staționar de la 4,7% la 5% și la 5,4%, respectiv scăderea vitezei rotorului generată de defecțiuni ar trebui să fie acceptabilă pentru continuarea funcționării pentru un timp a motorului cu 7 faze, după întreruperile corespondente;
- creșterea ondulației cuplului de la 6,54 [Nm] la 25,8 [Nm] și, respectiv, la 18,12 [Nm], ar trebui să fie inacceptabilă pentru continuarea îndelungată a funcționării motorului cu 7 faze după defecțiuni;
- apariția unei noi armonici ale oscilației cuplului de 100 [Hz] se remarcă în cazul (b), cu amplitudinile de 7,93 [Nm];
- amplitudinea armonicii fundamentale (50 [Hz]) a curenților crește de aproximativ 1,4 ori (b) și de 2 ori (c) în comparație cu cazul MAS sănătoase cu 7 faze (a).

Motorul cu 7 faze este considerat tolerant la pornire pentru funcționarea sa în cazul întreruperii a până la două faze neadiacente.

2.2.4 Analiza toleranței la pornire a MAS cu 7 faze având până la trei faze întrerupte

Valoarea medie în regim staționar a turației rotorului este de 1425,8 [rpm], pentru MAS cu 9 faze pornit cu Faza-1 întreruptă, Fig. 2.19. Amplitudinea celei mai importante armonice a oscilației cuplului electromagnetic este de 100 [Hz] / 5,92 [Nm]. Valorile RMS ale curenților sunt $I_1=0$ [A], $I_2=3.7$ [A], $I_3=3.18$ [A], $I_4=2.8$ [A], $I_5=2.76$ [A], $I_6=3.25$ [A], $I_7=2.9$ [A],

$I_8=3.12$ [A] și $I_9=3.28$ [A]. Amplitudinea armonicii de 50 [Hz] a curenților nenuli sunt: 4,93 [A], 4,19 [A], 3,68 [A], 3,66 [A], 4,31 [A], 3,83 [A], 4,13 [A] și 4,40 [A].

Valoarea medie în regim staționar a turației rotorului este de 1420,4 [rpm], pentru MAS cu 9 faze pornit cu Fazele-1 și -2 întrerupte, Fig. 2.20. Amplitudinea celei mai importante armonice a oscilației cuplului electromagnetic este de 100 [Hz] / 13,47 [Nm]. Valorile RMS ale curenților sunt $I_1=0$ [A], $I_2=0$ [A], $I_3=4.93$ [A], $I_4=3.67$ [A], $I_5=2.87$ [A], $I_6=3.47$ [A], $I_7=3.81$ [A], $I_8=3.67$ [A] și $I_9=4.2$ [A]. Amplitudinea armonicii de 50 [Hz] a curenților nenuli sunt: 6,64 [A], 4,78 [A], 3,77 [A], 4,64 [A], 5,02 [A], 4,84 [A] și 5,66 [A].

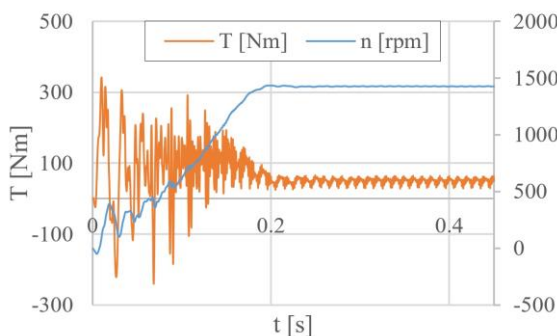


Fig. 2.19. Pornirea motorului cu 9 faze cu Fază-1 întreruptă [54]

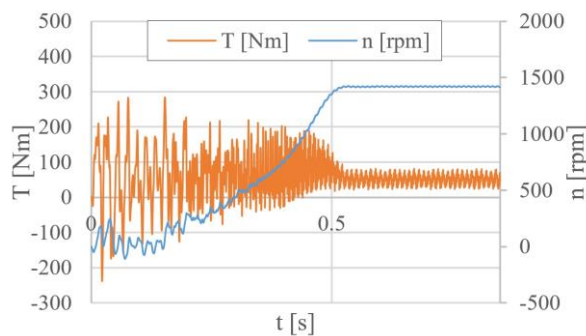


Fig. 2.20. Pornirea motorului cu 7 faze cu Fazele-1 și -2 întrerupte [54]

Comparând toate cazurile de întreruperi a două faze ale MAS cu 9 faze, cele mai mari valori ale amplitudinii armonice și ale ondulației cuplului sunt prezentate mai sus, în cazul întreruperii Fazelor-1 și -2, diferența față de alte cazuri este mai mică de 10%.

Valoarea medie în regim stabilizat a turației rotorului este puțin peste 320 [rpm] cu oscilații importante, pentru MAS cu 9 faze având Fazele-1, -4 și -7 întrerupte. Prin urmare, toleranța la defect legată de pornirea motorului cu 9 faze nu este caracterizată de întreruperi a trei faze.

Observații

Comparând cazurile (a) MAS sănătoasă cu 9 faze, Fig. 2.11, (b) pornirea motorului cu 9 faze cu Faza-1 întreruptă, Fig. 2.19 și (c) pornirea motorului cu 9 faze cu Fazele-1 și -2 întrerupte, Fig. 2.20, se constată că:

creșterea alunecării în regim staționar de la 4,76% la 4,95% și la 5,3%, respectiv scăderea vitezei rotorului generată de defecțiuni ar trebui să fie acceptabilă pentru continuarea funcționării pentru un timp a motorului cu 9 faze, după întreruperile corespondente;

creșterea importantă a ondulației cuplului de la 6,37 [Nm] la 36,34 [Nm] și la 57,74 [Nm], pentru cazul (c) ar trebui să fie inacceptabilă pentru continuarea îndelungată a funcționării motorului în 9 faze după defecțiuni;

se constată apariția unei noi armonice ale oscilației cuplului de 100 [Hz] în cazurile (b) și (c), cu amplitudinile de 5,92 [Nm], respectiv 13,47 [Nm];

amplitudinea armonice fundamentale (50 [Hz]) a curenților crește de aproximativ 1,4 ori (b) și de 1,9 ori (c) în comparație cu cazul IM sănătos cu 9 faze (a).

Motorul cu 9 faze este considerat tolerant la pornire în cazul întreruperii a până la două faze.

2.3 OBSERVAȚII

Au fost studiate două tipuri de toleranță în ceea ce privesc întreruperile fazelor de alimentare electrică - toleranța în regim staționar, asociată cu funcționarea motorului cu

încărcare în sarcină în regim permanent și toleranța de pornire asociată cu pornirea motorului cu în sarcină. MAS este considerată a fi tolerantă dacă valorile parametrilor funcționali în regim stabilizat sunt apropiate de cele în funcționare sănătoasă.

MAS trifazată nu ar trebui să fie considerat (1) tolerant la funcționarea în regim staționar în ceea ce privește întreruperea unei faze din cauza creșterii armonicilor oscilațiilor cuplului și a curenților și a ondulației importante a cuplului, prin urmare, funcționarea de lungă durată în sarcină nu trebuie acceptată. De asemenea, MAS trifazată nu trebuie considerat (2) tolerant la pornire în cazul întreruperii unei faze, chiar și cu fazele conectate în stea și nul accesibil.

Motorul de inducție cu cinci faze trebuie considerat (1) tolerant în regim staționar în ceea ce privește întreruperile a unei faze și a două faze neadiacente și (2) tolerant la pornire doar cu o fază întreruptă.

MAS cu șapte faze ar trebui să fie considerat (1) tolerant în regim staționar în ceea ce privește întreruperea a unei faze, două faze și trei faze. Toleranța la pornire (2) poate fi asociată motorului în cazul întreruperii unei faze și chiar a două faze specifice, cum ar fi Faza-1, -3; Faza-2, -4; Faza-3, -5 etc.

Motorul de inducție cu nouă faze trebuie considerat (1) tolerant în regim staționar în ceea ce privește întreruperea unei faze, a două faze, a trei faze și a patru faze neadiacente. Toleranța la pornire (2) poate fi asociată motorului în cazul întreruperii unei faze și chiar a două faze.

Pentru cazurile studiate, motorul de inducție cu șapte faze prezintă cel mai bun comportament în ceea ce privește întreruperea fazelor de alimentare cu energie electrică.

CAPITOLUL 3. CERCETĂRI PRIVIND MOTOARELE MULTIFAZATE SINCRONE CU MAGNEȚI PERMANENȚI

În acest capitol este prezentată o analiză bazată pe modele cu elemente finite (EF) ale motoarelor sincrone cu magneți permanenți multifazate (PMSM). Aceste modele au fost dezvoltate pornind de la modelele motoarelor de inducție, prezentate în capitolele precedente.

Investigarea PMSM-urilor din acest capitol se bazează pe modele cu EF magneto-stactice și pas cu pas în domeniul timp. Unele rezultate prezentate în acest capitol pot fi găsite și în lucrarea autorului [56].

3.1 MODELE 2D CU ELEMENTE FINITE ALE MOTOARELOR SINCRONE MULTIFAZATE CU MAGNEȚI PERMANENȚI

Configurațiile înfășurării statorului, geometria acestuia și distribuția nodurilor de rețea sunt identice cu cele ale motoarelor de inducție, cu aceiași parametri generali. Viteza nominală impusă a rotorului de 1500 [rpm], caracterizează toate cele patru motoare PMS. Alimentarea electrică este luată în considerare ca sursă de curent în modelele de circuite ale PMSM, care vor fi discutate în continuare în subcapitolul 3.3 și Fig. 3.3.

Rotoarele cu colivie ale MAS sunt înlocuite cu o configurație simplă a rotorului cu patru magneți permanenți interiori (PM) caracterizați prin densitatea fluxului magnetic remanent de 1,2 [T] și permeabilitatea magnetică relativă de 1,05, geometria rotorului este prezentată în Fig. 3.1. Cuplul de sarcină nominal este de 50 [Nm], momentul de inerție este de 0,05 [kg·m²].

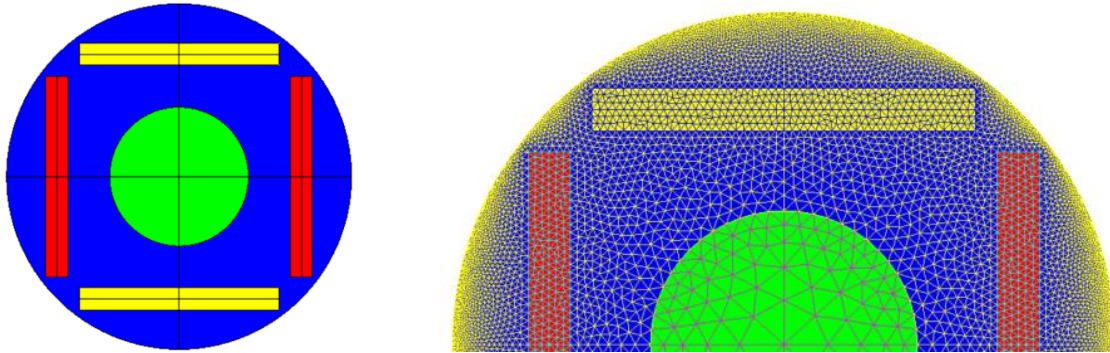


Fig. 3.1. Geometria și distribuția nodurilor de rețea a rotorului PMSM [56]

Pentru evaluarea cuplului de agățare sunt considerate modele magneto-static cu mai multe poziții cu o valoare a pasului unghiular de 0,2 [grade]. Pentru toate analizele dependente de timp sunt considerate modele cu elemente finite în domeniul timpului, luând în considerare modelele cuplate câmp - circuit - mișcare rotativă, cu o valoare a pasului de timp de 50 [μ s]. Se analizează rezultatele corespunzătoare regimului staționar al câmpului electromagnetic.

Dimensiunile geometrice ale magneților sunt importate dintr-un model Flux standard, acestea nu au fost optimizate pentru a obține o undă sinusoidală a densității fluxului magnetic, chiar dacă aceste motoare sunt alimentate de la surse de curent sinusoidal.

3.2 CUPLUL DE AGĂȚARE ȘI BACK-EMF ALE PMSM MULTIFAZATE STUDIATE

3.2.1 Analiza cuplului de agățare

Interacțiunea dintre magneții permanenți ai rotorului și creștăturile statorului generează un cuplu nedorit în mașinile electrice numit cuplu de agățare. Acest cuplu depinde de poziția relativă rotor-stator și perioada lui de rotație este dată de numărul de creștături ale statorului și numărul de poli magnetici. Cuplul de agățare a fost analizat pas cu pas în domeniul timp (TD) cu viteza constantă de 1/6 [rpm], corespunzătoare unui grad mecanic pe secundă.

Perioadele de cuplu de agățare ale fiecărei mașini sunt: 10, 9, 6,43 și, respectiv, 10 grade.

În proiectarea PMSM-urilor sunt dorite valori de vârf reduse ale cuplului de agățare. Rezultatele arată că mașinile cu 5 și 7 faze au un comportament mai bun din toate cazurile studiate. Valorile de vârf ale cuplului de agățare al fiecărui PMSM sunt: 4,58 [Nm], 0,95 [Nm], 1,68 [Nm] și, respectiv, 4,56 [Nm]. Se remarcă faptul că PMSM cu 5 faze prezintă cea mai mică valoare de vârf a cuplului de agățare. Deoarece nu există nicio diferență geometrică între motoarele cu 3 faze și cu 9 faze, cuplul de dințare al acelor motoare este similar.

3.2.2 Analiza Back-EMF

Studiul câmpului electromagnetic al inductorului și al tensiunii induse de acest câmp în fazele înfășurării statorului, denumită forță electromotoare (EMF) sau forță contra-electromotoare (CEMF sau Back EMF), a fost realizat cu modele cu EF pas cu pas în domeniul timp.

Analiza Back-EMF: (1) oferă informații despre valoarea ordinului de amplitudine a tensiunii aplicate pe motoare; (2) este necesar pentru circuitele de siguranță, de exemplu, circuitele de siguranță proiectate pentru frânarea regenerativă a vehiculelor electrice, (3) este necesară pentru sistemul de acționare electrică pentru a optimiza funcționarea acestora etc.

Mașinile PMSM studiate funcționează ca generatoare sincrone fără sarcină. Modelele de circuit sunt similare cu cele prezentate în Fig. 3.3, dar conțin doar bobina și inductanța capetelor frontale ale înfășurării statorului.

Rezultatele legate de structura spațială a câmpului magnetic în întrefier corespund ultimului pas de timp 0,05 [sec]. Dependența de timp a back-EMF se referă la un interval de timp de 20 [ms], între 0,03 [sec] și 0,05 [sec], cu pasul de timp de 50 [μs].

Hărțile densității fluxului magnetic și liniile câmpului magnetic ale mașinilor sincrone cu PM studiate sunt foarte asemănătoare. Miezul magnetic al statorului atinge nivelul obișnuit de saturație magnetică. Magneții permanenți au o lățime mai mare și astfel există zone mici ale miezului magnetic al rotorului cu saturație magnetică ridicată, la extremele magnetului.

Amplitudinea Back-EMF este direct proporțională cu amplitudinea densității fluxului magnetic, astfel, orice armonică spațială a densității fluxului magnetic influențează variația în timp a tensiunilor induse în fazele înfășurării statorului, împreună cu viteza de rotație a rotorului și numărul de spire pe fază.

Deoarece geometria miezului statoric și a miezului rotoric ale mașinilor cu 3 și 9 faze, densitatea fluxului magnetic de-a lungul cercului mijlociu al spațiului din întrefier este identică. Toate PMSM studiate au conținut similar de armonici ale densității fluxului magnetic de-a lungul cercului mijlociu al întrefierului, totuși mașina cu 7 faze are valori ale amplitudinii puțin mai mici.

Tensiunile corespunzătoare armonicii fundamentale de 50 [Hz] pentru cele patru mașini sunt: 754,45 [V]; 773,25 [V]; 762,44 [V] și, respectiv, 786,07 [V]. Distorsiunea armonică totală (THD) a fost evaluată luând în considerare toate armonicile de timp cu amplitudinea peste 1 % din amplitudinea armonicii fundamentale de 50 [Hz]. THD-ul tensiunii Back-EMF pentru cele patru mașini este de 30,14 %, 35,33 %, 33,11 % și, respectiv, 39,38 %. Mașina cu 3 faze are cel mai mic THD, de asemenea, mașina cu 9 faze prezintă cel mai mare THD datorită unui număr mai mic de creștături pe pol și fază, $q = 1$.

3.2.3 Observații

În ceea ce privește cuplul de agățare, mașinile cu 5 faze și 7 faze au amplitudini mai mici decât motoarele cu 3 faze și 9 faze, însă se remarcă faptul că PMSM- cu 5 faze prezintă cele mai scăzute valori vârf-vârf ale cuplului de agățare.

Mașina cu 7 faze are un conținut mai bun de armonici, cu valori ale amplitudinii puțin mai mici în ceea ce privește densitatea fluxului magnetic de-a lungul cercului mijlociu al întrefierului mașinii.

Mașina trifazată are cel mai mic THD al tensiunii Back-EMF de 30,14 %, de asemenea, mașina cu 9 faze are cel mai mare THD de 39,38 %, datorită unui număr mai mic de creștături pe pol și fază.

3.3 FAZA INIȚIALĂ A CURENȚILOR STATORULUI CORESPONDENTE CU VALOAREA MAXIMĂ A CUPLULUI ELECTROMAGNETIC ÎN PMSM

Pornind de la valorile curenților nominali ai motoarelor de inducție, prezentate în capitolul 1, și anume 7.923 [A], 4.682 [A], 3.254 [A] și respectiv 2.817 [A], se determină *faza inițială* optimă φ a curențului corespondentă valorii maxime a cuplului electromagnetic. Valorile nominale ale curenților PMSM-urilor sunt stabilite luând în considerare faza inițială optimă φ și cuplul nominal de sarcină de 50 [Nm].

În circuitul asociat modelelor de câmp ale PMSM-urilor sunt considerați următorii parametri, privind sursele de curent: valoarea RMS a curenților statorici I , faza inițială φ a curentului și frecvența, f , de 50 [Hz]. Formulele curenților electrici în sursele de alimentare a PMSM-ului cu 5 faze, de exemplu, sunt:

$$\begin{aligned} i_1(t) &= \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \varphi) \\ i_2(t) &= \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(2\pi f \cdot t + 2\pi/5 + \varphi) \\ i_3(t) &= \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(2\pi f \cdot t + 4\pi/5 + \varphi) \\ i_4(t) &= \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(2\pi f \cdot t - 4\pi/5 + \varphi) \\ i_5(t) &= \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(2\pi f \cdot t - 2\pi/5 + \varphi) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Introducând faza inițială ca parametru variabil, obținem dependența dintre cuplul electromagnetic și faza φ , astfel se obține valoarea optimă a fazei inițiale $\varphi_{o3} = 94$ [deg] corespunzător valorii maxime a cuplului electromagnetic, respectiv 88,934 [Nm], în cazul PMSM trifazat.

Pentru fiecare PMSM s-a efectuat investigarea fazei inițiale optime a curenților statorici de referință, obținându-se următoarele valori: $\varphi_{o5} = 104$ [deg], $\varphi_{o7} = 110$ [deg] și $\varphi_{o9} = 115$ [deg], Tabelul 3.1. Folosind aceste valori ale lui φ , valorile eficace ale surselor de curent pentru toate motoarele au fost optimizate pentru a obține valoarea nominală a cuplului electromagnetic de 50 [Nm]. Având valori mai mici ale curenților nominali, pierderile Joule în înfășurările statorice ale PMSM sunt mai mici în comparație cu mașinile asincrone.

Valoarea medie ale celei mai importante armonici spațiale a densității fluxului magnetic în întrefierul pentru toate motoarelor de inducție studiate este aproximativ 0,73 [T] - corespunzătoare funcționării nominale și reprezintă 64,6 % din valoarea medie a și a densității fluxului magnetic, dintre toate PMSM, de aproximativ 1,13 [T]. De asemenea, în general, factorul de acoperire a pasului polare, necesar în calculul fluxului magnetic, este puțin mai mare în cazul PMSM-urilor decât a MAS. Astfel, se obține diferența dintre curenții statorici a celor două tipuri de motoare electrice.

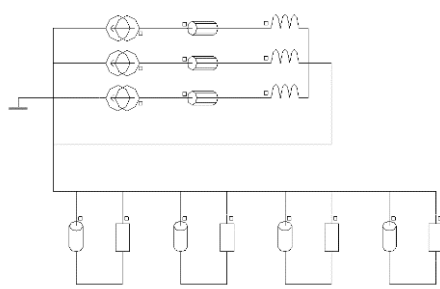
Tabelul 3.1. Faza inițială φ corespunzătoare cuplului maxim al PMSM pentru viteza nominală și curenții nominali PMSM care corespund cuplului nominal 50 [Nm]

| PMSM | 3 faze | 5 faze | 7 faze | 9 faze |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| I [A] (curentul nominal al MAS) | 7.923 | 4.682 | 3.254 | 2.817 |
| φ_{optim} [grade] | 94 | 104 | 110 | 115 |
| I [A] (curentul nominal al PMSM) | 4.60 | 2.763 | 1.991 | 1.479 |

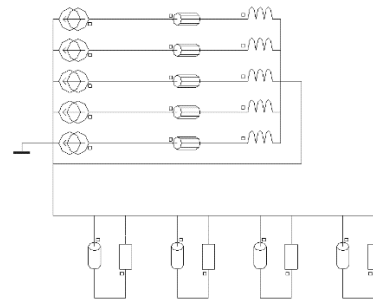
3.4 PERFORMANȚELE FUNCȚIONĂRII MOTOARELOR SINCRONE CU MAGNEȚI PERMANENȚI MULTIFAZATE

În acest subcapitol sunt descrise: hărțile densității fluxului magnetic și liniile câmpului magnetic, dependența de timp și armonicile oscilației cuplului electromagnetic, dependența de timp și armonicile tensiunii fazei statorului și se evaluează eficiența fiecărui PMSM.

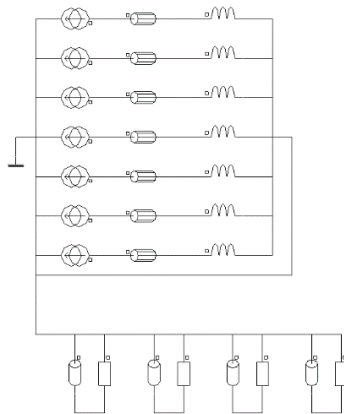
Circuitele electrice luate în considerare pentru această analiză sunt prezentate în Fig. 3.3, unde fiecare fază a motorului este reprezentată de o bobină asociată geometriei, având ca parametru de intrare rezistența electrică pe fază și un inductor reprezentând inductanța capetelor frontale a înfășurării statorului. Fiecare fază este alimentată de o sursă de curent descrisă în ecuația (3.1) și de valorile curenților nominali ai PMSM-urilor, corespunzătoare cuplului nominal de 50 [Nm], sunt considerate valorile prezentate în Tabelul 3.2. Sunt considerate pierderile în magneții permanenți, aceștia sunt reprezentați în circuitul electric printr-o legătură în paralel între un conductor solid și un rezistor cu o valoare foarte mare.



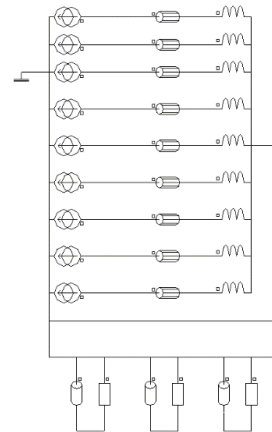
Circuitul motorului cu 3 faze



Circuitul motorului cu 5 faze



Circuitul motorului cu 7 faze



Circuitul motorului cu 9 faze

Fig. 3.3. Circuitele electrice ale PMSM

3.4.1 Câmpul magnetic la funcționarea nominală și armonicile spațiale ale câmpului magnetic în întrefier

Harta densității fluxului magnetic și liniile câmpului magnetic pentru funcționarea nominală a fiecărui PMSM este prezentată în versiunea extinsă a tezei.

3.4.2 Cuplul electromagnetic pentru funcționarea PMSM-urilor în condiții nominale

Valorile medii ale cuplului electromagnetic pentru toate PMSM-urile sunt foarte asemănătoare, sub 1% diferența și anume 49,487 [Nm], 49,451 [Nm], 49,438 [Nm] și, respectiv, 49,876 [Nm].

Armonicile oscilației cuplului motorului cu 7 faze diferă de armonicile celorlalte motoare. Prima și a doua armonică a motorului cu 7 faze au frecvențe de 1400 [Hz] și, respectiv, 2800 [Hz], care sunt semnificativ mai mari decât armonicile omoloage ale celorlalte motoare. Dar motorul cu 7 faze are o amplitudine a oscilației cuplului mai mică, ~45%, pentru prima armonică și o amplitudine mai mică, ~66%, pentru a doua armonică, comparativ cu motorul cu 9 faze care are cele mai mari amplitudini ale armonicilor oscilației cuplului. Oscilația cuplului electromagnetic pentru toate motoarele este: 20,04 [Nm], 17,73 [Nm], 9,04 [Nm] și, respectiv, 18,23 [Nm]. PMSM cu 7 faze are cel mai redus conținut de armonici ale oscilației cuplului electromagnetic și cea mai mică oscilație a cuplului.

3.4.3 Tensiunea fazelor statorice pentru funcționarea nominală a PMSM-urilor

Valorile RMS ale tensiunii fiecărui PMSM sunt: 586,089 [V], 583,27 [V], 574,671 [V] și, respectiv, 619,17 [V]. Amplitudinea armonicii de 50 [Hz] a tensiunii statorice a fiecărui motor sunt: 821,724 [V], 816,02 [V], 802,396 [V] și 854,3 [V]. Distorsiunea armonică totală a tensiunii fază-nulă este de 13,41 %, 14,7 %, 16,1 % și, respectiv, 22,56 %. Comparativ cu THD-

ul Back-EMF, se remarcă o scădere semnificativă a valorii THD, aproximativ: 55,5 %; 58,4 %; 51,37 %, respectiv 42,7 %. PMSM-ul trifazat prezintă cel mai mic THD de tensiune fază-nulă în comparație cu celelalte motoare.

3.4.4 Eficiența PMSM-urilor

Pentru evaluarea eficienței PMSM-urilor a fost luată în considerare următoarea formulă:

$$\text{Randament} [\%] = \frac{\text{Valoare medie \{Cuplu Electromagnetic\}} \cdot \text{Valoare medie \{Viteza Unghiulară\}} - \text{Pierderi Mecanice}}{\text{Valoare medie \{Puterea activă a surselor\}} + \text{Pierderi în Fier\{Stator\}} + \text{Pierderi în Fier\{Rotor\}}} \quad (3.2)$$

Parametrii din formula (3.2), unde numărătorul reprezintă puterea mecanică și numitorul reprezintă puterea electrică, sunt detaliați în Tabelul 3.2, având în vedere că turația nominală este de 1500 [rpm] și pierderile mecanice sunt impuse 5% din primul produs din ecuație. Pierderile în magneți sunt incluse în puterea activă de alimentare.

Tabelul 3.2. Parametri generali ai PMSM-urilor la funcționarea nominală

| PMSM | 3 faze | 5 faze | 7 faze | 9 faze |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Cuplu electromagnetic [Nm] | 49.487 | 49.451 | 49.438 | 49.876 |
| Putere mecanică [W] | 7384.73 | 7379.36 | 7377.42 | 7442.78 |
| Pierderi mecanice [W] | 388.67 | 388.39 | 388.29 | 391.73 |
| Puterea activă a surselor [W] | 7918.89 | 7907.17 | 7882.58 | 7970.14 |
| Pierderile în miezul statoric [W] | 227.14 | 224.23 | 229.02 | 226.721 |
| Pierderile în miezul rotoric [W] | 44.87 | 44.75 | 33.6 | 44.17 |
| Puterea electrică [W] | 8201.57 | 8183.86 | 8145.55 | 8251.62 |
| Randament [%] | 90.158 | 90.255 | 90.574 | 90.314 |

PMSM-ul cu 7 faze prezintă cea mai mare eficiență evaluată, chiar dacă cea mai mare diferență între toate cazurile este de aproximativ 0,4 %. De asemenea, PMSM-ul cu 7 faze prezintă pierderi ușor mai mici în miezul rotorului în comparație cu celelalte cazuri.

3.4.5 Adnotare

Pierderile totale în magneții PMSM-ului cu 7 faze sunt de 0,68 W, acestea sunt foarte scăzute în comparație cu celelalte cazuri, și anume 8,93 [W], 7,71 [W] și, respectiv, 8,9 [W]. PMSM-urile cu 3 și 7 faze sunt investigate în continuare, luând în considerare o densitate crescută a nodurilor de rețea în colțurile magneților pentru ambele motoare pentru o precizie mai mare a rezultatelor. Hărțile densității de curent în regiunea magnetului arată că densitatea de curent este mult mai concentrată în colțuri în cazul motorului cu 7 faze.

Utilizând un senzor în colțul din dreapta sus al unui magnet, s-a obținut modulul densității curentului în acel punct atât pentru motorul trifazat, cât și pentru cel cu 7 faze. Amplitudinile celor mai importante armonici sunt: 900 [Hz] / 844097 [A/m²] și respectiv 1400 [Hz] / 404370 [A/m²]. Valoarea medie a densității de curent a PMSM-ului cu 7 faze, 2,615e5 [A/m²], reprezintă 47,3 % din valoarea medie a valorii densității de curent a PMSM-ului trifazic, 5,53e5 [A/m²]. De asemenea, frecvențele corespunzătoare celor mai mari amplitudini a densității de curent sunt proporționale cu numărul de creștături statorice.

Valoarea medie a densității fluxului magnetic în mijlocul unui magnet în cazul PMSM-ului cu 7 faze, 1,0365 [T], reprezintă 98,08 % din valoarea medie a densității fluxului magnetic al PMSM-ului trifazat, 1,0568 [T]. De asemenea, valoarea medie a pierderilor miezului rotorului PMSM trifazic reprezintă 74,9 % din valoarea medie a pierderilor miezului rotorului PMSM trifazic.

Având în vedere afirmațiile de mai sus și influența armonicilor oscilației densității fluxului magnetic, care sunt mult mai mici în cazul modelului cu 7 faze, pierderile totale ale magnetului sunt admisibile.

3.5 OBSERVAȚII

Analizele cu elemente finite ale motoarelor sincrone cu magneți permanenți multifazice cu 3 faze, 5 faze, 7 faze și 9 faze ale înfășurării statorului, ale căror geometrii ale miezului statoric sunt identice cu cele ale motoarelor de inducție cu colivie, cu aceleași valori ale cuplului nominal și ale vitezei sincrone, reprezintă confirmări cantitative ale performanțelor mai bune ale PMSM-urilor față de MAS.

În ceea ce privește cuplul de agățare, motoarele cu 5 faze și 7 faze au un comportament mai bun decât motoarele trifazate și cu 9 faze, cu toate acestea, se observă că PMSM cu 5 faze prezintă cea mai mică valoare vârf-vârf a cuplului de agățare. Mașina cu 7 faze are un conținut mai bun de armonici spațiale, cu valori puțin mai mici ale amplitudinilor în ceea ce privește densitatea fluxului magnetic de-a lungul cercului mijlociu al întrefierului motorului.

Mașina cu 3 faze are cel mai mic THD al tensiunii Back-EMF, de asemenea, mașina cu 9 faze prezintă cel mai mare THD datorită unui număr mai mic de creștături pe pol și fază. De asemenea, PMSM-ul trifazat prezintă cel mai mic THD de tensiune fază-nulă în comparație cu celelalte motoare.

Valorile medii ale cuplului electromagnetic pentru toate PMSM-urile sunt foarte asemănătoare, sub 1% diferență. Cu toate acestea, PMSM-ul cu 7 faze se caracterizează prin conținutul cel mai redus de armonici ale oscilației cuplului electromagnetic și cel mai scăzut nivel al oscilației cuplului.

PMSM-ul cu 7 faze prezintă cea mai mare eficiență evaluată din cele patru modele analizate în ceea ce privește numărul de faze în înfășurarea statorului PMSM.

În ansamblu, PMSM-ul cu 7 faze prezintă cele mai bune performanțe din toate cazurile studiate.

CAPITOLUL 4. PROIECTAREA UNUI MOTOR DE INDUCȚIE CU COLIVIE CU 5 FAZE

În acest capitol sunt prezentate formule pentru proiectarea analitică a unui motor de inducție cu 5 faze, oferind valori cantitative ale performanțelor motorului și o analiză cu elemente finite pentru valorile calitative ale performanțelor acestuia. Obiectivul este de a proiecta miezul statorului cu datele de gabarit impuse, în vederea realizării un model fizic al unui MAS cu 5 faze.

După cum se arată în subcapitolul 2.1.2, MAS cu 5 faze ar trebui să fie considerat (1) tolerant în regim staționar la întreruperea a până la două faze neadiacente și (2) tolerant la pornire cu o fază întreruptă, prezentat în subcapitolul 2.2.2. Cazul întreruperii unei singure faze a înfășurării statorului poate acoperi majoritatea aplicațiilor în care motorul poate fi utilizat. Astfel, se propune un punct de funcționare pentru funcționare continuă cu o fază întreruptă, având în vedere criteriul valorii similare a pierderilor Joule a înfășurării statorice cu cele în funcționare sănătoasă.

În cadrul Institutului Național de Cercetare și Dezvoltare în Inginerie Electrică ICPE-CA (INCDIE ICPE – CA), obiectivele principale a două proiecte au fost proiectarea și fabricarea unui motor cu cinci faze și a unui sistem de acționare dedicat.

Unele rezultate prezentate în acest capitol pot fi găsite și în lucrarea autorului [57].

4.1 PREZUMȚII PENTRU PROIECTAREA PRELIMINARĂ A MOTORULUI

Echipa de implementare a proiectului a stabilit utilizarea unui motor electric comercial, din care miezul statorului va fi înlocuit cu unul realizat la comandă în cadrul INCDIE ICPE – CA. În urma corespondenței cu producătorul, au fost stabilite principalele dimensiuni de gabarit pe baza cărora a fost proiectat miezul statorului.

Datele cunoscute sunt datele de gabarit, fără detalii precum creștătura rotorului, astfel au fost utilizate formulele și criteriile de proiectare din [58] pentru a proiecta atât miezul statorului cât și miezul rotorului al MAS cu 5 faze.

4.2 MODELUL NUMERICAL BAZAT PE FORMULE ANALITICE ALE MAS CU 5 FAZE

Modelul numeric al motorului a fost realizat în MATLAB, folosind formulele analitice ale modelului de circuit al MAS din [58], [59] și [60]. Geometria creștăturii rotorului a fost necunoscută, astfel creștătura rotorului a fost proiectată luând în considerare criteriile din subcapitolul 4.2.1. Datele preliminare pentru motorul cu 5 faze sunt prezentate în Tabelul 4.1.

Tabelul 4.1. Date preliminare pentru MAS cu cinci faze

| Parametru | Valoare |
|--|------------------|
| Putere nominală [kW] | 5.5 |
| Tensiune de linie | 100 V – 50 Hz |
| Nr. de faze | 5 |
| Nr. de poli | 4 |
| Nr. de creștături rotorice | 28 |
| Diametrul interior al miezului statorului [mm] | 103 |
| Diametrul exterior al miezului statorului [mm] | 170.2 |
| Lungimea părților active [mm] | 180 |

4.2.1 Criterii de verificare

După mai multe iterații de calcul analitic și numeric, s-au atins principalele cote ale miezurilor statorice și rotorice, acestea fiind prezentate în **Anexa 2** și **Anexa 3**, prezentate în versiunea extinsă a tezei. În proiectarea acestora, au fost luate în considerare criteriile din [58], după cum urmează:

- numărul de creștături pe pol și fază: $q_1 \geq 2$;
- valoarea pasului dentar statoric (t_1) să fie în limitele indicate în [58];
- condiții de simetrie ale înfășurării;
- valorile densității fluxului magnetic în diferite părți ale circuitului feromagnetic să fie în limitele indicate în [58];
- valorile densității de curent în înfășurarea statorului, în bara rotorului și în inelul de scurtcircuit al acestuia să fie în limitele indicate în [58];

4.2.2 Calculul analitic al motorului cu 5 faze pentru funcționare nominală

Modelul numeric se bazează pe formulele analitice din [58] și [59]. Având în vedere informațiile din Tabelul 4.1 și dimensiunile geometrice ale creștăturilor, modelul furnizează date despre parametrii electrici (de exemplu, curent, factor de putere, rezistență), electromagnetici (de exemplu, cuplu elmag., putere, pierderi de fier) și mecanici (de exemplu, cuplul la arbore, putere mecanică) la fiecare valoare a alunecării impuse.

Dimensiunile principale ale inelului de scurtcircuit sunt: diametrul exterior de 101,5 [mm], diametrul interior de 62 [mm] și înălțimea de 12 [mm]. Folosind formulele din [61], inductanța porțiunii de inel dintre două bare adiacente este: $L_r = 9.529e - 09 [H]$.

Pentru $p = 2$ și $q_l = 2$, factorul de înfășurare crește odată cu numărul de faze ale statorului. Factorul de înfășurare al MAS cu 5 faze este 0,9836. Comparând factorul de înfășurare al unui MAS trifazat cu cel al MAS cu 5 faze, se observă o creștere cu aproximativ 3%.

Pentru a realiza o înfășurare mai simplă și simetrică, numărul de spire într-o creștătură este un număr întreg, $n_{c1} = 14$, astfel numărul de spire pe fază este: $w_1 = 56$.

Folosind șase conductoare în paralel ($a_p = 6$) cu diametrul $d_{cu} = 0.75 [mm]$, rezistența pe o fază a înfășurării statorului la 115°C este $R_{115^\circ C} = 0.318 [\Omega]$. Reactanța înfășurării statorului este $X1 = 0.537 [\Omega]$.

Densitatea fluxului magnetic în întrefier a fost calculată utilizând algoritmul din [59], valoarea de pornire a factorului de saturație al dintelui $ksd = 1.4$. Algoritmul se oprește atunci când eroarea dintre valorile $ksd(i - 1)$ și $ksd(i)$ este mai mică de 0,1 %. Valoarea finală a densității fluxului magnetic în întrefier este $B_\delta = 0.6418 [T]$ și $ksd = 1.53772$.

Pentru a compara rezultatele modelului numeric bazat pe formulele analitice cu rezultatele modelului cu EF, s-a impus aceeași valoare a turației rotorului și anume 1438,7 [rpm], corespunzătoare valorii alunecării $s = 0.040867$. Pentru această valoare de alunecare, rezistența înfășurării rotorului în raport cu înfășurarea statorului este $R'_2 = 0.2097 [\Omega]$ și reactanța înfășurării rotorului în raport cu înfășurarea statorului este $X'_2 = 0.5728 [\Omega]$. Rezultatele sunt prezentate în Tabelul 4.2.

4.3 CALCULUL CU ELEMENTE FINITE AL MAS CU 5-FAZE

În acest subcapitol sunt investigate o analiză în domeniul frecvenței cu elemente finite (FD) și o analiză pas cu pas în domeniul timp (TD) a motorului de inducție cu colivie cu cinci faze, calculate anterior cu formulele analitice. Efectul de înclinare al rotorului nu a fost luat în considerare.

Geometria completă și distribuția nodurilor de rețea a modelului 2D cu EF, în care sunt considerate $140 \cdot 10^3$ de elemente (cu observația că sunt utilizate elemente de ordinul doi), sunt prezentate în Fig. 4.1 – 4.2.

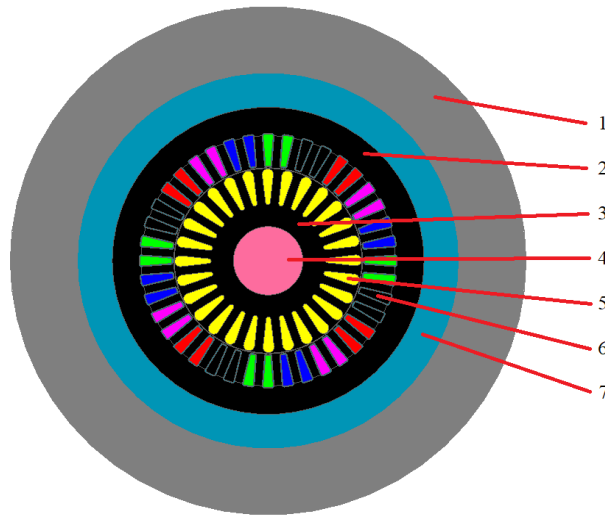


Fig. 4.1. Geometria completă a modelului 2D cu EF
(1 – infinite box; 2 – miezul statorului; 3 – miezul rotorului; 4 – arborele; 5 – creștătura rotorului; 6 – creștătura statorului; 7 – regiune neconductivă) [57]

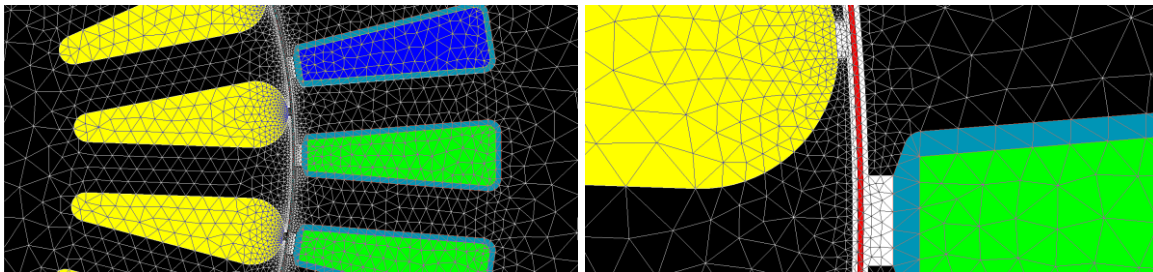


Fig. 4.2. Distribuția nodurilor de rețea a modelului [57]

Circuitul electric asociat modelului de câmp al MAS este prezentat în Figura 4.3. În formulele (4.1) sunt descrise tensiunile electrice, unde U_{ph} reprezintă valoarea RMS a tensiunii statorice pe fază și f reprezintă frecvența care este considerată constantă în acest studiu cu valoarea de 50 [Hz]:

$$\begin{aligned}
 u_1(t) &= \sqrt{2} \cdot U_{ph} \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \\
 u_2(t) &= \sqrt{2} \cdot U_{ph} \cdot \sin(2\pi f \cdot t - 2\pi/5) \\
 u_3(t) &= \sqrt{2} \cdot U_{ph} \cdot \sin(2\pi f \cdot t - 4\pi/5) \\
 u_4(t) &= \sqrt{2} \cdot U_{ph} \cdot \sin(2\pi f \cdot t - 6\pi/5) \\
 u_5(t) &= \sqrt{2} \cdot U_{ph} \cdot \sin(2\pi f \cdot t - 8\pi/5)
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

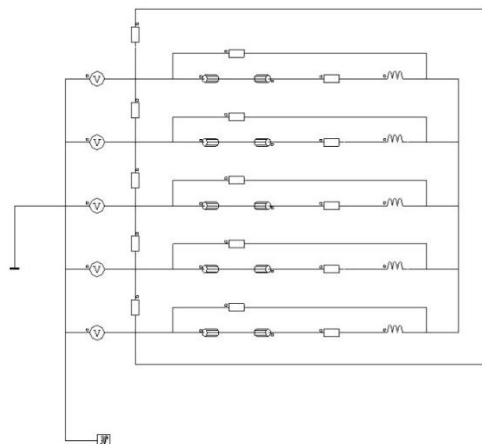


Fig. 4.3. Circuitul electric al motorului cu cinci faze

4.3.1 Funcționarea sănătoasă a MAS cu 5 faze

Mișcarea rotorului în raport cu statorul nu este luată în considerare în modelul magneto-armonic în domeniul frecvenței (Modelul FD) al mașinii de inducție, de asemenea, valoarea alunecării este impusă pentru acest tip de aplicație [62]. Folosind un model magneto-armonic parametrizat cu diferite poziții relative rotor-stator, se poate determina poziția la care valoarea instantanee a cuplului electromagnetic este egală cu valoarea medie a acestuia.

Pentru valoarea alunecării de 0,04, valoarea pasului unghiular este de 0,25 grade pentru o singură perioadă. Cuplul electromagnetic este mai aproape de valoarea sa medie la unghiul rezultat de 4,5 grade. Această valoare a poziției unghiulare este, prin urmare, utilizată în studiile ulterioare în domeniul frecvenței.

Armonicele câmpului magnetic datorate pozițiilor relative rotor-stator, de asemenea datorate creșterii statorului și a rotorului sunt analizate în modelul TD. Relația dintre viteza rotorului și cuplul electromagnetic, Fig. 4.4, a fost evaluată având în vedere următoarele:

- modelul are viteza impusă pentru a evalua cuplul electromagnetic la fiecare pas;
- se folosește un pas de 25 [rpm] pentru domeniul de turație 1500 ÷ 1000 [rpm] și un pas de 50 [rpm] se folosește pentru 1000 ÷ 0 [rpm];
- fiecare aplicație cu viteză impusă este evaluată timp de 0,4 [s], pentru o tranziție mai rapidă la starea staționară, prima jumătate a perioadei utilizează un pas de 1,5 [ms] și cealaltă jumătate utilizează un pas de 1 [ms];
- pentru fiecare aplicație, cuplul electromagnetic este evaluat pe două perioade corespunzătoare frecvenței nominale, și anume 0,04 [s].

Pentru intervalul de turații 1450 ÷ 1275 [rpm] se atinge o diferență mai mică sau egală de 3,5 %. Pentru valoarea turației de 1400 [rpm] se obține o diferență de 0,71 %, iar pentru 1375 [rpm] se obține o diferență minimă de -0,56 %.

Următoarele formule [63] au fost utilizate pentru a calcula puterea de ieșire a MAS:

$$P_{J1} = 5 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (4.2)$$

$$P_{J2} = s \cdot (P_1 - P_{J1} - P_m) \quad (4.3)$$

$$P_2 = P_1 - P_{J1} - P_{J2} - P_m - P_{mech} \quad (4.4)$$

$$T_{shaft} = \frac{60 \cdot P_2}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (4.5)$$

where, P_{J1} – Pierderi Joule în stator, P_{J2} – Pierderi Joule în rotor, R_1 – valoarea medie a rezistențelor pe fază, I_1 – valoarea medie a curenților statorici, P_1 – valoarea medie a puterii active de pe sursele de alimentare, P_2 – Puterea mecanică la ieșirea MAS, P_m – Pierderi în fier și T_{shaft} – Cuplu la ax. Pierderile mecanice au fost considerate: $P_{mech} = 0.05 \cdot P_2$.

Variația puterii de ieșire în raport cu turația rotorului, pentru ambele tipuri de modele, sunt prezentate în Fig. 4.5.

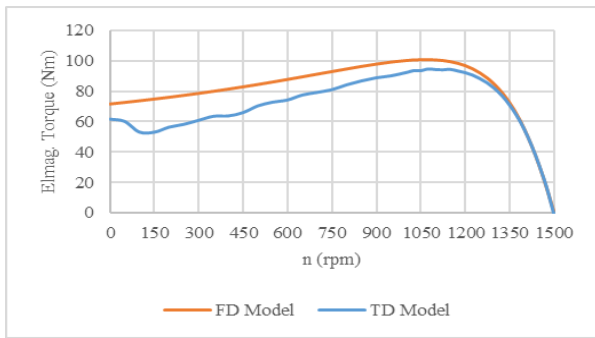


Fig. 4.4. Dependenta cuplului electromagnetic de viteza rotorului [57]

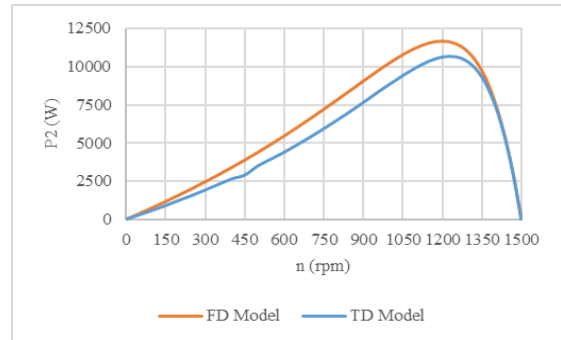


Fig. 4.5. Variația puterii de ieșire cu viteza rotorului [57]

O aplicație suplimentară cu viteză impusă cu o valoare a vitezei de 1438,7 [rpm] a fost evaluată pentru o privire mai atentă asupra funcționării nominale a MAS. Un pas de timp de 50 [μs] a fost utilizat pentru această aplicație. Dependența de timp a cuplului electromagnetic și a curenților statorici sunt prezentate în Fig. 4.6 și, respectiv, 4.7.

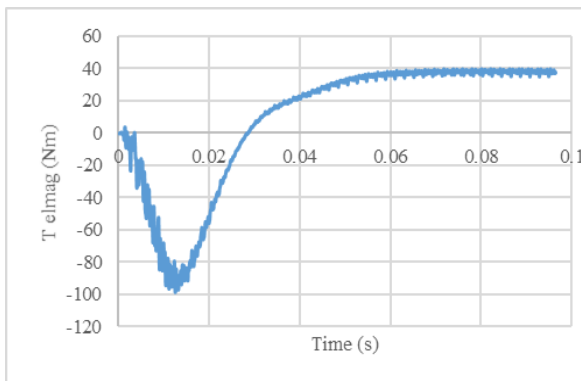


Fig. 4.6. Dependenta de timp a cuplului electromagnetic [57]

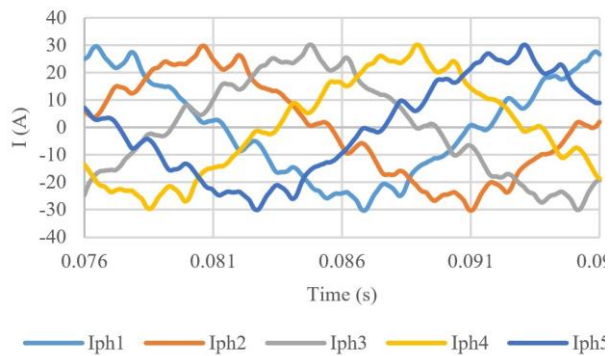


Fig. 4.7. Dependenta în timp a curenților statorici [57]

Cuplul electromagnetic are o valoare medie de 38,1 [Nm] și o ondulație a acestuia de 4,97 [Nm] (13,05 %). Cele mai semnificative armonici ale oscilației cuplului electromagnetic sunt: 1450 [Hz] / 1,062 [Nm], 950 [Hz] / 0,54 [Nm], 1000 [Hz] / 0,336 [Nm] și 90 [Hz] / 0,134 [Nm].

Curenții statici au valoarea RMS medie de 17,062 [A]. THD-ul curenților este ușor ridicat deoarece nu a fost luat în considerare efectul de înclinare al rotorului, și anume 14,02 %. Cele mai semnificative armonici ale curenților statorici sunt: 150 [Hz] / 2.05 [A], 600 [Hz] / 1.751 [A], 650 [Hz] / 1.367 [A] și 800 [Hz] / 0.89 [A].

Parametrii nominali de funcționare ai MAS studiat sunt prezentați în Tabelul 4.2. Modelul de referință în calculul diferenței rezultatelor este reprezentat de modelul TD.

Tabelul 4.2. Parametrii nominali de funcționare ai MAS cu 5 faze

| Model | n | T _{elmag} | I ₁ | P ₁ | P _{J1} |
|----------------|--------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|
| | [rpm] | [Nm] | [A] | [W] | [W] |
| (1) FD | 1438.7 | 36.731 | 17.151 | 6388.244 | 467.464 |
| (2) TD | 1438.7 | 38.1 | 17.062 | 6626.632 | 462.652 |
| (3) Analitic | 1438.7 | 38.215 | 18.587 | 6795.455 | 549.036 |
| Dif. [%] (2-1) | 0 | 3.593 | -0.522 | 3.597 | -1.04 |
| Dif. [%] (2-3) | 0 | -0.302 | -8.938 | -2.548 | -18.671 |

| Model | P_{J2} | P_{mech} | P_2 | T_{shaft} | Randament (η) |
|----------------|----------|------------|----------|-------------|----------------------|
| | [W] | [W] | [W] | [Nm] | [%] |
| (1) FD | 220.28 | 266.239 | 5324.786 | 35.343 | 83.353 |
| (2) TD | 219.28 | 276.315 | 5526.298 | 36.681 | 83.395 |
| (3) Analitic | 291.925 | 267.426 | 5190.996 | 34.455 | 82.804 |
| Dif. [%] (2-1) | -0.456 | 3.647 | 3.646 | 3.648 | 0.05 |
| Dif. [%] (2-3) | -33.129 | 3.217 | 6.067 | 6.069 | 0.709 |

Pentru această valoare a vitezei impuse, diferențele dintre modelele FD și TD sunt relativ mici, $\sim 3,6\%$, în condițiile în care modelul FD ia în considerare doar frecvența fundamentală. Deși, modelul analitic are cel mai rapid timp de calcul, diferențele dintre acest model și modelul TD sunt relativ mari. Acest model nu poate prezice cu precizie ridicată curentul de fază a statorului și pierderile Joule în rotor. Investigații ulterioare vor fi efectuate asupra parametrilor care calculează curentul de fază și pierderile Joule în colivia rotorului.

4.3.2 Funcționarea cu o fază întreruptă a MAS cu 5 faze

Există sisteme critice care necesită ca motoarele să funcționeze continuu, cum ar fi pompa de recirculare a fluidului de răcire a unui sistem sau în unele fabrici de sticlă, unde performanța producției poate încetini fără a fi ușor întreruptă.

În ceea ce privește întreruperea alimentării electrice, întreruperea unei faze, un motor de inducție multifazat are capacitatea de a funcționa în aceste condiții defectuoase. Un motor de inducție cu cinci faze poate funcționa cu o fază întreruptă în timpul funcționării și la pornire, așa cum se arată în [54] și [64].

Pentru dependența cuplului electromagnetic de turația rotorului a MAS o fază întreruptă, Fig. 4.8, au fost utilizate modelele FD.

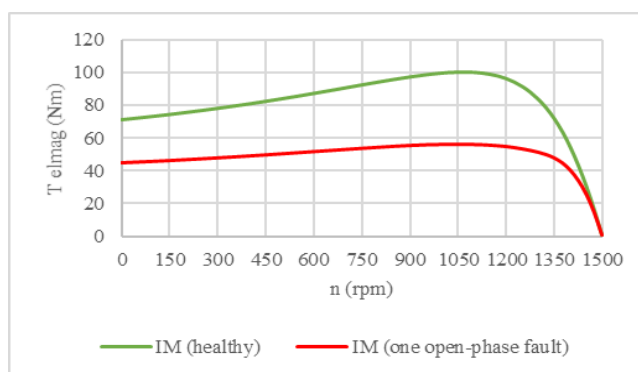


Fig. 4.8. Dependența cuplului electromagnetic de viteza rotorului pentru funcționarea sănătoasă și funcționarea cu o fază întreruptă [57]

Se remarcă o scădere semnificativă a cuplului electromagnetic, cele patru din cinci faze de alimentare ale MAS asigură până la 56,2 % din funcționarea sănătoasă, aproape de punctul maxim și până la 63,2 % din cuplul de pornire.

Se propune un punct de funcționare pentru funcționare continuă cu o fază întreruptă, luând în considerare valoarea pierderilor Joule în înfășurarea statorică similară cu valoarea acestora corespunzătoare funcționării nominale a MAS sănătoase. O distribuție cvasi-uniformă a temperaturii este asigurată de miezul de fier, acesta fiind un mediu integrator. În acest fel, tinde să se mențină o temperatură comparativă în diferite părți ale motorului, față de cel sănătos și poate menține sănătatea izolației până la întreținere.

O aplicație suplimentară cu viteză impusă cu o valoare a vitezei de 1445,5 [rpm] a fost evaluată pentru o privire mai atentă a funcționării continue cu o fază deschisă a MAS. Un pas

de timp de 50 [μ s] a fost utilizat pentru această aplicație. Dependența de timp a cuplului electromagnetic și a curenților statorici sunt prezentate în Fig. 4.9 și, respectiv, 4.10.

Cuplul electromagnetic are o valoare medie de 31,39 [Nm] și o ondulație a acestuia de 26,1 [Nm] (83,27 %). Cele patru armonici ale cuplului electromagnetic care sunt cele mai semnificative sunt: 100 [Hz] / 10,04 [Nm], 575 [Hz] / 2,38 [Nm], 775 [Hz] / 1,32 [Nm] și 875 [Hz] / 1,03 [Nm]. Curenții statici au valorile RMS de 22,682 [A], 15,752 [A], 17,176 [A] și, respectiv, 22,02 [A]. De asemenea, valorile THD sunt 9,03 %, 14,386 %, 16,76 % și 12,28 %.

Cele două cazuri studiate, funcționare sănătoasă și funcționare continuă cu o fază deschisă, aplicații în domeniul timp, sunt comparate în Tabelul 4.3. Pentru menținerea aceleiași valori a pierderilor Joule în stator se constată o creștere a valorii medii a curenților statorici cu $\sim 10\%$, a pierderilor în Joule în barele rotorului și o scădere a puterii de ieșire cu $\sim 21\%$.

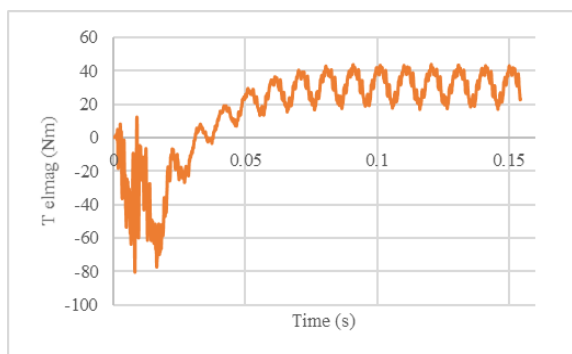


Fig. 4.9. Dependența de timp a cuplului electromagnetic pentru funcționarea cu o fază întreruptă [57]

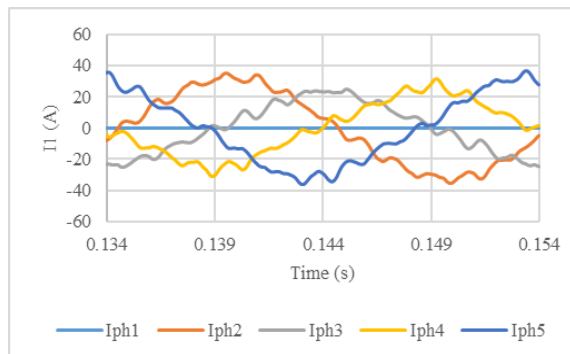


Fig. 4.10. Dependența de timp a curenților statorului pentru funcționarea cu o fază întreruptă [57]

Tabelul 4.3. Parametrii generali la funcționarea sănătoasă și la funcționarea cu o fază întreruptă a MAS cu 5 faze

| Caz | n | T_{elmag} | I_1 | P_1 | P_{J1} |
|----------------------------------|----------|-------------|----------|-------------|----------------------|
| | rpm | Nm | A | W | W |
| Funcționare sănătoasă | 1438.7 | 38.1 | 17.062 | 6626.632 | 462.652 |
| Funcționare cu o fază întreruptă | 1445.5 | 31.391 | 19.07 | 5639.077 | 462.343 |
| Dif. [%] | 0.47 | -21.372 | 10.53 | -17.513 | -0.067 |
| Caz | P_{J2} | P_{mech} | P_2 | T_{shaft} | Randament (η) |
| | W | W | W | Nm | % |
| Funcționare sănătoasă | 219.28 | 276.315 | 5526.298 | 36.681 | 83.395 |
| Funcționare cu o fază întreruptă | 245.32 | 228.412 | 4568.248 | 30.179 | 81.011 |
| Dif. [%] | 10.613 | -20.972 | -20.972 | -21.545 | -2.943 |

4.4 OBSERVAȚII

Pentru valoarea impusă a turației rotorului, diferențele dintre modelele FD și TD ale MAS cu 5 faze în funcționare sănătoasă sunt relativ mici, ~ 3,6 %, în condițiile în care modelul FD ia în considerare doar frecvența fundamentală. Deși, modelul analitic oferă cel mai rapid timp de calcul, diferențele dintre acest model și modelul TD sunt relativ mari. Acest model nu poate estima cu precizie curentul de fază a statorului și pierderile Joule în rotor. Investigații ulterioare vor fi efectuate asupra parametrilor care estimează curentul de fază și pierderile Joule în colivia rotorului.

Având în vedere valoarea similară a pierderilor Joule în înfășurarea statorului între funcționarea sănătoasă și funcționarea cu o fază deschisă a MAS cu 5 faze, se observă o scădere a puterii de ieșire de ~ 21 %, în plus, o creștere a pierderilor Joule în barele rotorului și a curenților statorici cu aproximativ 10 % și o scădere a eficienței de ~ 3 %. Un studiu similar poate fi efectuat prin înlocuirea surselor de tensiune cu surse de curent și limitarea curentului de fază la valoarea nominală, menținând astfel aceeași densitate de curent pe fază.

Ondulația cuplului a crescut de 5,25 ori pentru MAS care funcționează cu o fază deschisă și amplitudinea armonicii oscilației cuplului de 100 [Hz] a crescut semnificativ, aceasta reprezintă aproximativ ~ 30 % din valoarea medie a cuplului electromagnetic. Acest lucru se observă și la funcționarea cu o fază deschisă a MAS cu 5 faze prezentată în subcapitolele 2.1.2.2. și 2.2.2.

CAPITOLUL 5. REALIZAREA ȘI ÎNCERCAREA UNUI MOTOR DE INDUCȚIE CU COLIVIE CU 5 FAZE

În acest capitol sunt prezentate procesul de fabricație a pachetului de tole laminate a statorului, procesul de înfășurare a acestuia, bancul de testare și rezultatele măsurate pe motorul de inducție cu colivie cu 5 faze.

5.1 REALIZAREA PACHETULUI DE TOLE LAMINATE A STATORULUI

Tolele statorului au fost realizate pe baza desenului din **Anexa 2**, prezentat în varianta extinsă a tezei. Acestea au fost așezate pe un dorn de ambalare și apoi consolidate.

5.1.1 Realizarea tolelor statorice

Debitarea tolelor statorice a fost efectuată în azot gazos pentru o deformare locală minimă a materialului. Prinderea pe masa de susținere a materialului a fost realizată în șase puncte, pentru a reduce vibrațiile materialului. În Figura 5.1 sunt prezentate tolele statorice realizate.

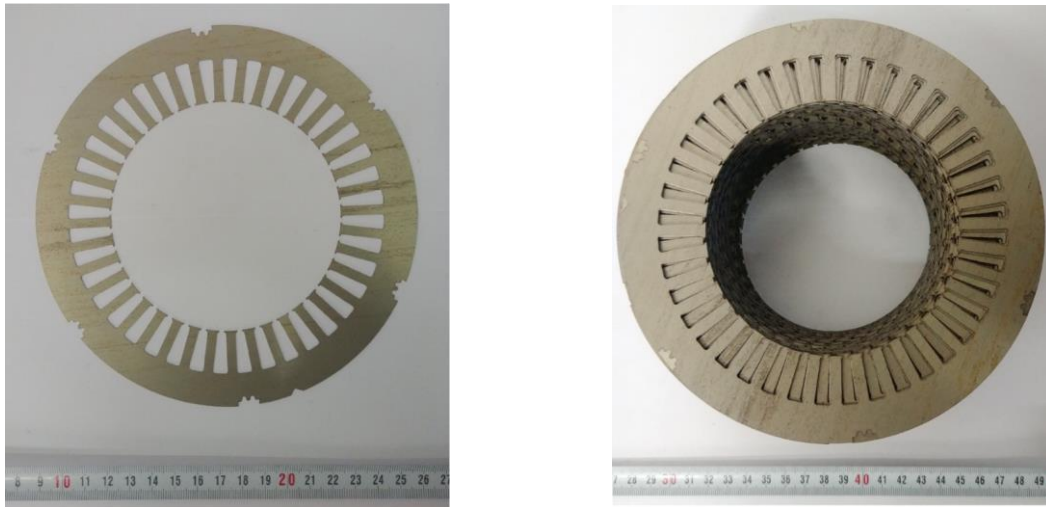


Fig. 5.1. Toile statorice realizate

5.1.2 Așezarea tolelor statorice pe dorn

Schița dornului pentru așezarea tolelor statorice este prezentată în Fig. 5.2.

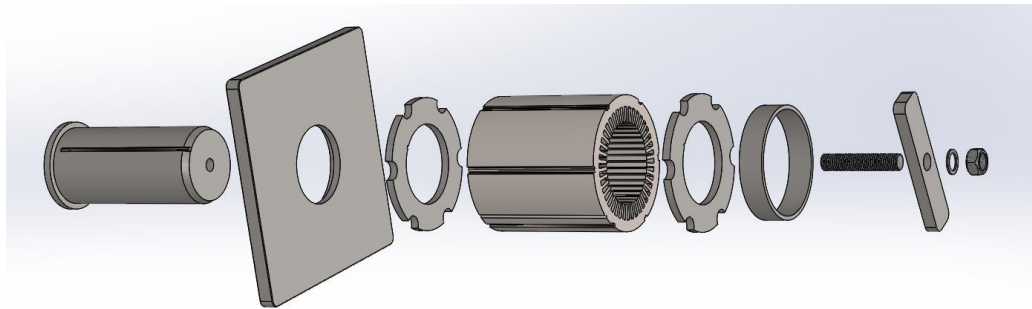


Fig. 5.2. Schița dornului pentru așezarea tolelor statorice

5.1.3 Consolidarea mecanică a pachetului de tole laminate statorice

După cum se poate observa în Figura 5.3, există o variație semnificativă a diametrului exterior al tolelor, datorită vibrației tablei în procesul de tăiere care a dus la abateri de dimensiuni. Astfel, este necesară o rectificare a pachetului de tole, astfel încât să fie introdus în carcasa unui motor comercial. O astfel de rectificare se va face pe strung, astfel pachetul trebuie să fie suficient de rigid. Soluția de rigidizare aleasă este sudarea, reprezentând un compromis între rigidizarea bună și pierderi suplimentare în fier.

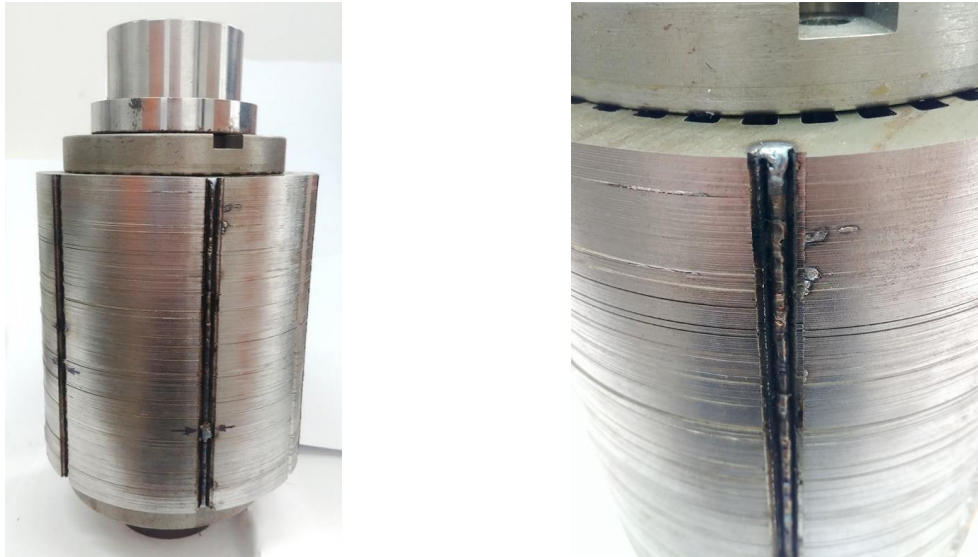


Fig. 5.3. Pachetul de tole laminate statoric

5.2 BOBINAREA MIEZULUI STATORULUI SI MONTAJUL MOTORULUI

Exteriorul pachetului de tole laminate statorice a fost rectificat de S.C. ELECTROPRECIZIA S.A. și a fost introdus în carcasa motorului. Dimensiunile creștăturii rotorului este necunoscut. Presupunând că suprafața creștăturii rotorului este mai mică decât cazul prezentat în capitolul patru, numărul de spire pe fază a fost redus de la 56 la 44. Schema de înfășurare a statorului utilizată pentru modelul fizic este prezentată în Anexa 4, regăsită în versiunea extinsă a tezei. Procesul de înfășurare a miezului statorului a început prin introducerea izolației de creștătură. În Fig. 5.4 este prezentată înfășurarea statorului realizată pe jumătate.

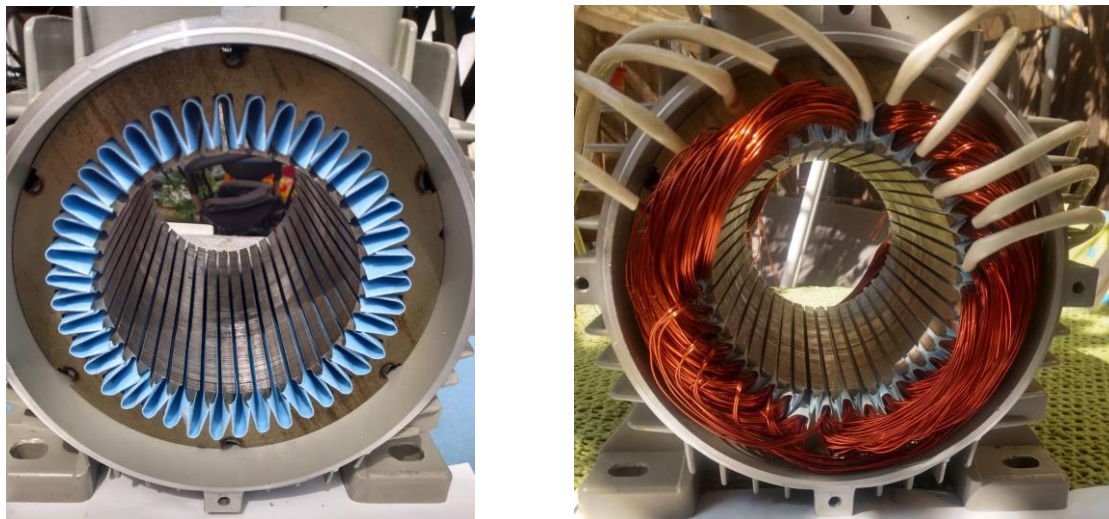


Fig. 5.4. Înfășurarea statorului realizată pe jumătate

Înfășurarea statorică a modelului fizic este prezentată în Fig. 5.5. Din cauza unor dificultăți tehnice, a fost adăugat un strat suplimentar de protecție pentru capete frontale ale bobinajului, fiind un model prototip, motorul va fi dezamblat de mai multe ori. Modelul fizic cu cinci faze complet asamblat este prezentat în Fig. 5.6.

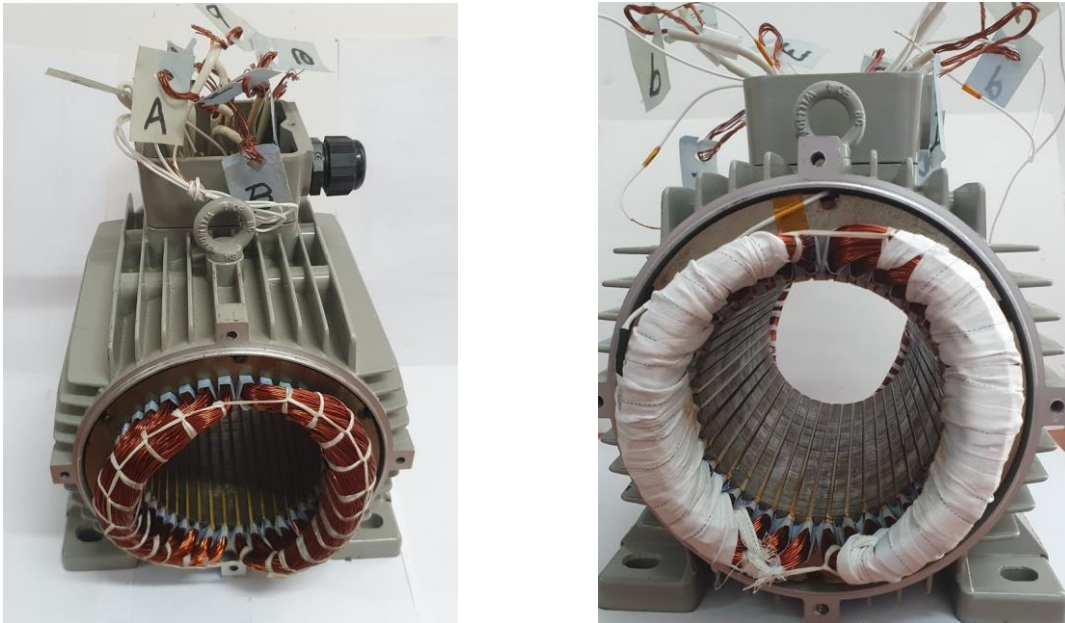


Fig. 5.5. Înfășurarea statorului realizată pe modelul fizic

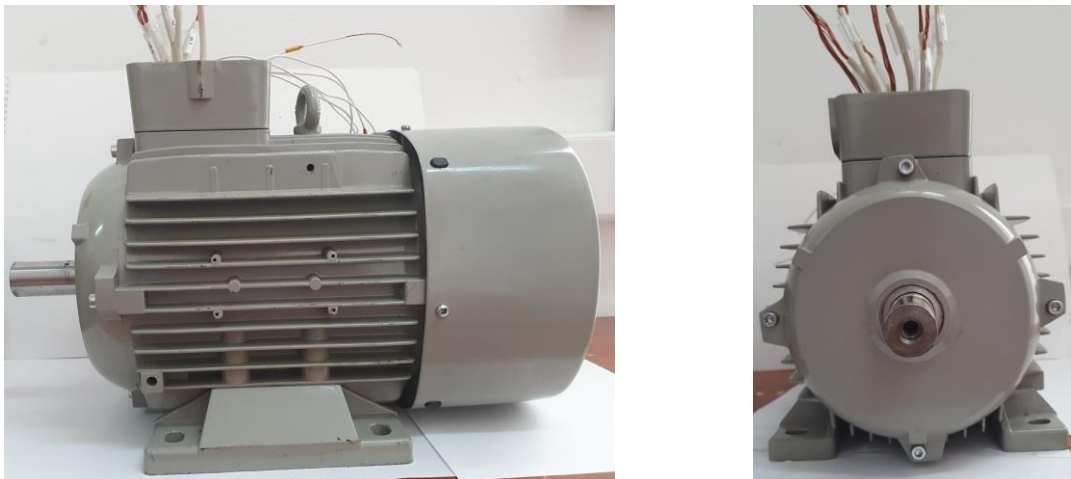


Fig. 5.6. Modelul fizic de MAS cu cinci faze complet asamblat

5.3 TESTE EXPERIMENTALE ȘI REZULTATE

5.3.1 Verificarea izolației dintre carcasă și fază

După ce modelul fizic a fost complet asamblat, s-a efectuat verificarea izolației dintre carcasă și fiecare fază la diferite valori ale tensiunii și anume 50 [Vcc]/55 [MΩ], 100 [Vcc] / 110 [MΩ], 500 [Vcc] / 500 [MΩ]. Testele au fost efectuate cu ajutorul aparatului: Sefram 9091 Insulation Multimeter.

5.3.2 Măsurarea rezistenței pe fază

Rezistența de fază a fost măsurată la temperatura camerei de $\approx 26^{\circ}\text{C}$ și cu o valoare a curentului de 1 [A]. Valoarea medie a rezistenței de fază este 0,141366 [Ω]. Diferența valorii rezistenței fiecărei faze nu depășește 1 % (0,866 %) față de valoarea medie. Testele au fost efectuate folosind aparatul: Extech Industries UM200.

5.3.3 Bancul de testare

Pentru testarea modelului fizic al motorului de inducție a fost împrumutat de la Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București un motor de curent continuu de 7 [kW]. Acesta a fost folosit ca generator, alimentând înfășurarea de excitație și furnizând putere mecanică.

În Figura 5.7 este prezentată diagrama bancului de testare, iar în Fig. 5.8 este prezentat bancul de testare fizic. Curentul alternativ de la o sursă de alimentare trifazată trece printr-un autotransformator trifazat, este rectificat și filtrat înainte de a ajunge la inverter cu 5 faze care alimentează modelul fizic al MAS cu 5 faze.

Curentul alternativ de la o sursă de alimentare monofazată trece printr-un autotransformator, este redresat și alimentează excitația generatorului de curent continuu. Împreună cu puterea de ieșire a MAS cu 5 faze, puterea de ieșire a generatorului de curent continuu trece printr-o rezistență de sarcină.

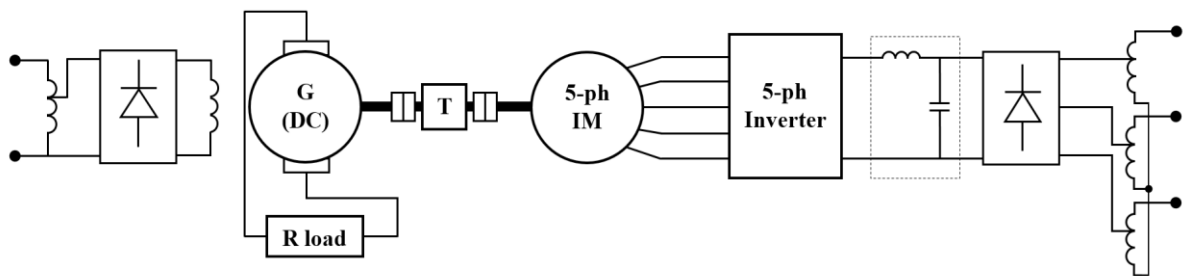


Fig. 5.7. Diagrama bancului de testare

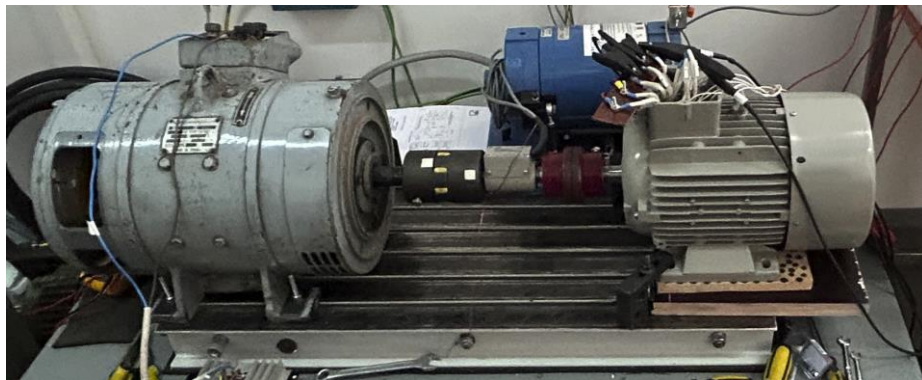
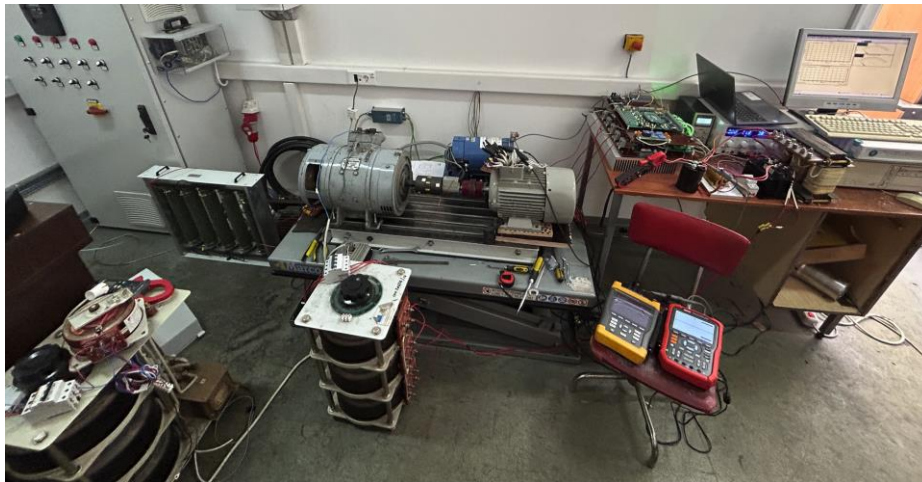


Fig. 5.8. Bancului de testare

Denumirile aparatelor de măsură utilizate este prezentate în versiunea extinsă a tezei.

5.3.4 Funcționarea sănătoasă a modelului fizic de MAS cu 5 faze

Parametrii mășurați pe modelul fizic al inverterului și al MAS cu 5 faze, lanțul complet de rezultate se regăsește în **Anexa 5** prezentată în versiunea extinsă a tezei. Eficiența sistemului cu 5 faze (inverter și MAS) a fost calculată împărțind puterea mecanică a MAS la puterea electrică de intrare a inverterului.

Cu echipamentele disponibile în acest moment, nu a fost posibilă măsurarea corectă a valorii factorului de putere, din cauza tensiunii PWM.

În Fig. 5.9 – 5.12 sunt prezentate corespondența dintre cuplul la arbore și de turație, puterea mecanică, curentul de fază și randamentul sistemului.

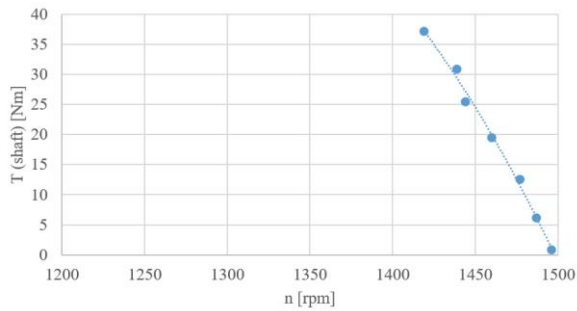


Fig. 5.9. Dependenta cuplului la ax de turație

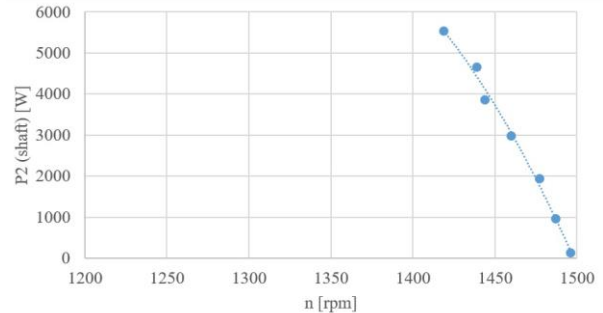


Fig. 5.10. Dependenta puterii de ieșire cu viteza

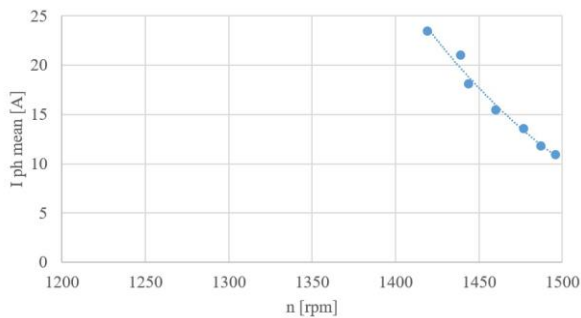


Fig. 5.11. Dependenta curentului pe fază cu viteza

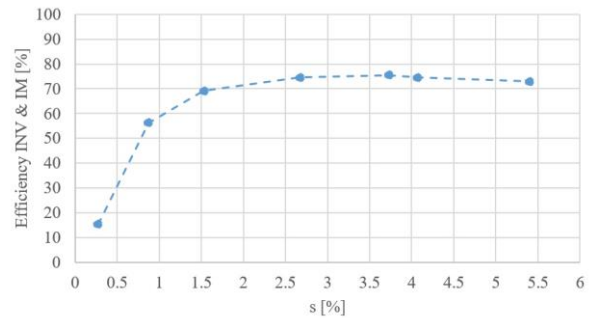


Fig. 5.12. Dependenta eficienței sistemului de alunecare

Formele de undă ale curentului pe faza A sunt prezentate în Fig. 5.13, corespunzătoare funcționării fără sarcină, cu arborele generatorului de curent continuu cuplat și fără excitație. De asemenea, la funcționarea la sarcină de 5,5 [kW], forma de undă este prezentată în Fig. 5.15.

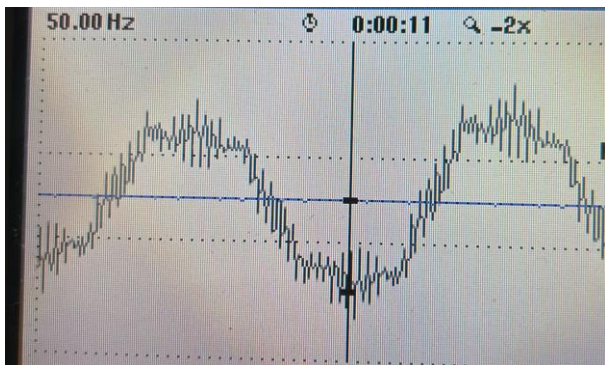


Fig. 5.13. Forma de undă a curentului pe faza A la funcționarea fără sarcină a MAS

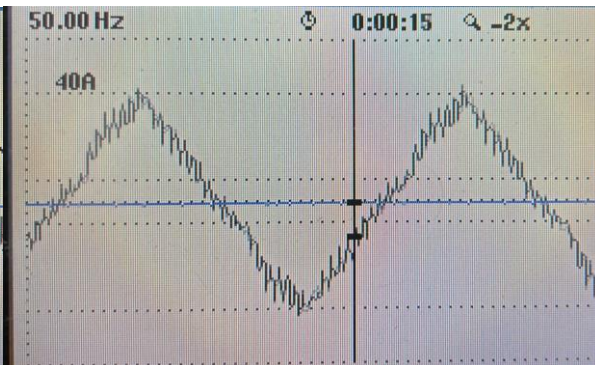


Fig. 5.15. Forma de undă a curentului pe faza A la funcționarea fără sarcină a MAS

Formele de undă ale curenților statorici ai modelului fizic vor fi îmbunătățite în primul rând prin implementarea unei comenzi îmbunătățite.

5.3.5 Funcționarea cu fază întreruptă a modelului fizic de MAS cu 5 faze

În capitolul patru (subcapitolul 4.3.2), este propus un punct de funcționare pentru funcționare continuă cu o fază deschisă luând în considerare valoarea pierderilor Joule statorice comparativă cu valoarea acestuia corespunzătoare funcționării nominale a MAS. În Tabelul 4.3 se arată că o scădere a puterii cu ~ 21 %, acest criteriu este îndeplinit.

Pentru acest test, Faza-E a fost deconectată. Înfășurarea de excitație a generatorului de curent continuu nu a fost alimentată pentru măsurarea parametrilor la funcționarea fără sarcină. Pentru măsurarea parametrilor la funcționarea în sarcină, tensiunea înfășurării de excitație a generatorului de curent continuu a fost crescută treptat până când cuplul arborelui a atins ~ 80 % din valoarea acestuia la funcționarea normală.

În Tabelul 5.5 sunt prezentați parametrii mășurați pe modelele fizice de invertor și MAS cu patru din cinci faze alimentate, acele rezultate pot fi găsite în **Anexa 5**.

Tabelul 5.5.a. Parametrii mășurați la funcționarea cu o fază deschisă a modelului fizic de MAS cu 5 faze

| Nr. crt. | U | I | P (INV) | I ph 1 | I ph 2 | I ph 3 | I ph 4 | I ph 5 | I ph med |
|----------|-------|------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| | [Vcc] | [A] | [W] | [A] | [A] | [A] | [A] | [A] | [A] |
| 1 | 204.2 | 7.17 | 1464.11 | 17.2 | 14.2 | 12.5 | 16.4 | - | 15.08 |
| 2 | 204 | 28.2 | 5752.8 | 28.5 | 22.6 | 18.5 | 28.8 | - | 24.6 |

Tabelul 5.5.b. Parametrii mășurați la funcționarea cu o fază deschisă a modelului fizic de MAS cu 5 faze

| Nr. crt. | n | s | T ax | P2 (ax) | Randament INV & MAS |
|----------|-------|------|------|---------|---------------------|
| | [rpm] | [%] | [Nm] | [W] | [%] |
| 1 | 1496 | 0.27 | 0.82 | 128.46 | 8.77 |
| 2 | 1439 | 4.07 | 29.5 | 4445.41 | 77.27 |

5.3.6 Observații

Procesul de funcționare cu o fază deschisă diferă ușor de cel prezentat în subcapitolul 2.1.2.2, unde MAS cu 5 faze funcționează la cuplul nominal și după ce se atinge regimul staționar, o fază este întreruptă. Cu toate acestea, funcționalitatea cu o fază deschisă a modelului fizic de MAS cu cinci faze este validată în acest subcapitol.

Formele de undă ale curenților statorici ai modelului fizic vor fi îmbunătățite în primul rând prin implementarea unei comenzi îmbunătățite.

5.4 SENSUL DE ROTAȚIE PENTRU UN MOTOR CU 5 FAZE

Un motor electric are avantajul de a inversa sensul de rotație, de exemplu, un motor trifazat își schimbă sensul de rotație prin inversarea oricăror două faze de alimentare ale motorului. Schimbarea sensului de rotație a unui motor cu cinci faze nu este menționată în literatură, din căutările autorului. Deoarece generatorul de curent continuu utilizat pentru testarea MAS este unidirecțional, schimbarea sensului de rotație a MAS cu 5 faze a fost necesară pentru bancul de testare. În versiunea extinsă a tezei este prezentat procesul prin care poate fi schimbat sensul de rotație al mașinii cu 5 faze.

5.5 OBSERVAȚII

Modelul fizic de MAS cu 5 faze reprezintă o dovadă a conceptului, iar rezultatele experimentale sunt o validare cantitativă a funcționalității acestuia. Prin îmbunătățirea MAS și a sistemului de acționare cu 5 faze, și a diferitelor elemente din bancul de testare (cum ar fi parametrii filtrului), se va obține o validare calitativă a sistemului cu cinci faze.

Procesul de funcționare cu o fază deschisă a MAS diferă ușor de cel prezentat în subcapitolul 2.1.2.2, unde MAS cu 5 faze funcționează la cuplul nominal și după ce se atinge regimul stabilizat, o fază este întreruptă. Totuși, funcționalitatea cu o fază deschisă a modelului fizic de MAS cu 5 faze este validată în acest capitol.

Formele de undă ale curenților statorici ai modelului fizic vor fi îmbunătățite în primul rând prin implementarea unei comenzi îmbunătățite.

Cu echipamentele disponibile în acest moment, nu a fost posibil să se calculeze valoarea factorului de putere.

În ceea ce privește schimbarea sensului de rotație, au fost testate diferite cazuri pe modelul fizic de MAS cu 5 faze. S-a observat că pentru sistemul cu cinci faze sunt necesare două interschimbări a câte două faze. Exemple de interschimbări de faze: (A – C) și (D – E); (A – E) și (D – B) etc.

CONCLUZII

Compararea parametrilor în regim staționar pentru punctul nominal de funcționare a celor patru cazuri studiate de motoare de inducție, arată că cel cu 7 faze prezintă performanțe globale mai bune. Urmează motorul cu 5 faze privind randamentul electric, conținutul de armonici ale componentei normale a densității fluxului magnetic de-a lungul unui cerc mijlociu în întrefier și cuplul de pornire relativ.

Au fost studiate două tipuri de toleranță la defecțiuni ale motoarelor de inducție multifazice - toleranța în regim staționar, asociată cu funcționarea motorului în regim staționar la cuplul nominal și toleranța la pornire asociată cu pornirea motorului la cuplul nominal. Motoarele sunt considerate tolerante la defect dacă valorile parametrilor de funcționare la sfârșitul regimului tranzitoriu sunt apropiate de cele în funcționare sănătoasă.

Motorul de inducție trifazat nu trebuie considerat tolerant în regim staționar în ceea ce privește defecțiunea unei faze din cauza creșterii armonicilor oscilației de cuplu și ale curenților și a oscilației importante ale cuplului. De asemenea, acest motor nu este tolerant la pornire pentru defecțiunea unei faze chiar și în cazul conexiunii în stea a celor trei faze cu acces la punctul de nul.

Motorul de inducție cu cinci faze este tolerant în regim staționar în ceea ce privesc defecțiunile unei faze și a două faze neadiacente, chiar dacă oscilațiile cuplului cresc. Acest motor este tolerant la pornire numai în cazul defecțiunii unei singure faze.

Motorul de inducție cu șapte faze este tolerant în regim staționar la defecțiunile unei faze, a două faze, a trei faze și chiar patru faze neadiacente. În toate cazurile de defect, oscilațiile cuplului cresc. Acest motor cu șapte faze este tolerant la pornire în cazurile defecțiunii a unei faze și a două faze specifice, cum ar fi Faza-1, -3; Faza-2, -4; Faza-3, -5 etc.

Motorul de inducție cu nouă faze este tolerant în regim staționar în ceea ce privește defecțiunile unei faze, a două faze, a trei faze și a patru faze neadiacente. Acest motor este tolerant la pornire în cazul defectării unei faze și chiar a întreruperii a două faze.

Se observă o diminuare a oscilației cuplului electromagnetic odată cu creșterea numărului de faze statorice.

Analizele cu elemente finite ale motoarelor sincrone multifazate cu magneți permanenți cu 3 faze, 5 faze, 7 faze și 9 faze ale înfășurării statorului, ale căror statoare sunt identice cu statoarele motoarelor de inducție cu colivie, cu aceleași valori ale cuplului nominal și aceeași valoare a vitezei sincrone, reprezintă confirmări cantitative ale performanțelor mai bune ale unui astfel de tip de motoare electrice față de motoarele de inducție.

În ceea ce privește cuplul de agățare, motoarele cu 5 și 7 faze au un comportament mai bun față de motoarele cu 3 și 9 faze, însă, se remarcă faptul că PMSM-ul cu 5 faze prezintă cea mai mică valoare de vârf a cuplului de agățare. Mașina cu 7 faze are cele mai mici amplitudini ale armonicilor spațiale ale densității fluxului magnetic de-a lungul cercului mijlociu al întrefierului motorului.

Mașina trifazată are cel mai scăzut conținut de armonici ale tensiunii Back-EMF. PMSM-ul trifazat prezintă cel mai mic THD al tensiunii fază-nulă în comparație cu celelalte motoare. Mașina cu 9 faze prezintă cel mai mare THD al tensiunii Back-EMF datorită unui număr mai mic de creștături pe pol și fază, $q = 1$.

Valorile medii ale cuplului electromagnetic pentru toate PMSM-urile sunt foarte apropiate, cu o diferență mai mică de 1%. Cu toate acestea, PMSM-ul cu 7 faze se caracterizează prin conținutul cel mai redus de armonici ale oscilației cuplului electromagnetic și cel mai scăzut nivel al oscilațiilor cuplului, urmat de PMSM-ul cu 5 faze. PMSM-ul cu 7 faze prezintă cea mai mare eficiență din cele patru cazuri analizate.

A fost proiectat un motor de inducție cu 5 faze și s-a efectuat o comparație a rezultatelor modelului analitic pe baza formulelor analitice și a analizei cu elemente finite, în domeniul frecvenței și în domeniul timp. Comparația dintre modelele FD și TD arată o diferență maximă de 3,65 % în ceea ce privește cuplul electromagnetic și puterea activă absorbită, ceea ce este acceptabil având în vedere că modelul FD nu evaluează armonicile anumitor parametri. De asemenea, formulele analitice prezintă o creștere de 8,9 % în cazul curenților statorici, rezultând și o diferență în pierderile statorice.

Există sisteme critice care necesită ca motoarele să funcționeze continuu, cum ar fi pompa de recirculare a fluidului de răcire a unui sistem sau în unele fabrici de sticlă, unde performanța producției poate încetini fără a fi ușor întreruptă. În ceea ce privește întreruperea alimentării electrice, întreruperea alimentării unei faze, un motor de inducție multifazat are capacitatea de a funcționa în această stare defectuoasă.

Un punct de funcționare a fost propus și analizat pentru funcționare continuă cu o fază întreruptă luând în considerare valoarea pierderilor Joule în stator similară cu valoarea sa corespunzătoare funcționării nominale a MAS. Pentru acest punct de funcționare, puterea la ieșire a scăzut cu ~ 21 %, în plus, pierderile Joule în barele rotorului și curenții statorici au crescut cu aproximativ 10%. Oscilația cuplului a crescut de 5,25 ori, iar amplitudinea armonicii oscilației de cuplu de 100 [Hz] a crescut semnificativ. Un studiu similar poate fi efectuat prin înlocuirea surselor de tensiune cu surse de curent și limitarea curentului de fază la valoarea nominală, menținând astfel aceeași densitate de curent pe fază.

Descrierea realizării unui model fizic de motor de inducție cu colivie cu 5 faze și a bancului de testare al acestui model sunt elaborate în capitolul al cincilea. Modelul fizic de MAS cu 5 faze reprezintă o dovadă de concept, iar rezultatele experimentale reprezintă o validare cantitativă a funcționalității acestuia. Prin îmbunătățirea MAS cu 5 faze și acționării sale, de asemenea, a diferitelor elemente din bancul de testare, se va obține o validare calitativă a sistemului cu cinci faze.

Spre deosebire de analiza cu elemente finite în funcționarea o fază întreruptă, care a fost efectuată la cuplul nominal atât pentru regimul staționar, cât și pentru toleranța la pornire, funcționarea modelului fizic de MAS cu 5 faze cu o fază întreruptă a fost realizată prin creșterea treptată a sarcinii generatorului. Cu toate acestea, funcționalitatea sa este validată.

Schimbarea sensului de rotație, pentru un motor trifazat, este realizabilă prin interschimbarea oricăror două faze de alimentare ale motorului. Pentru motorul cu cinci faze sunt necesare două interschimbări a câte două faze. Au fost testate diferite cazuri pe modelul fizic de MAS cu 5 faze. Exemple de interschimbări de faze: (A – C) și (D – E); (A – E) și (D – B) etc.

CONTRIBUȚII ALE TEZEI ÎN INVESTIGAREA MAȘINILOR ELECTRICE MULTIFAZATE

Această teză prezintă un studiu bibliografic asupra mașinilor multifazate, care evidențiază avantajele acestora față de mașinile trifazate. Completează și cuantifică argumentul de toleranță la defecte, atât la pornire, cât și atunci când defecțiunea apare în timpul funcționării, descris în studiul bibliografic. De asemenea, cuantifică și arată o diminuare a oscilațiilor cuplului electromagnetic odată cu creșterea numărului de faze ale statorului.

Implementarea modelelor numerice cu elemente finite, pentru analiza în domeniul frecvenței și domeniul timp, a condus la o comparație între mașinile cu 3, 5, 7 și 9 faze atât ale motoarelor de inducție, cât și ale motoarelor sincrone cu magneți permanenți. Schemele de înfășurare a statorului pentru mașinile cu 3, 5, 7 și 9 faze (Anexa 1) au fost concepute și utilizate în aceste studii.

Modelele cu elemente finite prezentate în capitolul al patrulea au întrefierul divizat în trei straturi, rezultând un număr crescut de noduri în rețeaua de distribuție a modelului și o creștere a calității rezultatelor.

Proiectarea motorului de inducție cu cinci faze a fost realizată prin implementarea modelului numeric bazat pe formule analitice și a modelelor numerice cu elemente finite.

Dimensiunile miezurilor de fier statoric și rotorice (Anexele 2 și 3) au fost proiectate iterativ astfel încât densitatea fluxului magnetic în diferite părți ale mașinii să respecte recomandările din [58]. Desenul din Anexa 2 a fost utilizat pentru fabricarea pachetului de tole laminate statoric inclus în modelul fizic. Miezul magnetic a fost introdus în carcasă, s-a executat înfășurarea statorului, astfel modelului fizic de MAS cu 5 faze a fost realizat.

Modelul fizic de MAS cu 5 faze a fost testat cu ajutorul unui invertor cu 5 faze personalizat.

Funcționalitatea MAS cu 5 faze în punctul de funcționare continuă propus cu fază deschisă, unde valoarea pierderilor Joule în stator este similară cu valoarea sa corespunzătoare funcționării nominale a MAS, a fost validată prin teste experimentale pe modelul fizic de MAS cu 5 faze.

Schimbarea sensului de rotație, pentru un motor trifazat, este realizabilă prin interschimbarea oricăror două faze de alimentare ale motorului. În cazul motorului cu cinci faze sunt necesare două interschimbări a câte două faze.

Din studiile prezentate în această teză au rezultat patru lucrări publicate în volume de conferințe și în reviste listate ISI, indexate în baze de date internaționale și locale și anume [54], [55], [56] și [57]. Acestea au strâns până acum 9 citări, dintre care 3 sunt autocitări, 2 sunt teze de doctorat și 4 sunt lucrări ISI.

În cadrul Laboratorului de Mașini și Acționări Electrice au fost depuse două cereri de brevet și anume:

- RO-BOPI 137138 A2 11/2022 (A/00255/14.05.2021): “Motor electric penta-fazat și metoda de alimentare a acestuia în curent alternativ” (“Five-phase electric motor and method of supplying it with alternating current”)
- RO-BOPI 137140 A2 11/2022 (A/00254/14.05.2021): “Convertizor static destinat alimentării motoarelor asincrone penta-fazate și metoda de comandă pentru tratarea unui defect cauzat de întreruperea unei faze” (“Static converter for powering five-phase asynchronous motors and control method for dealing with a fault caused by a phase interruption”)

PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE

Modelul fizic de MAS cu 5 faze reprezintă o dovadă de concept, iar rezultatele experimentale sunt o validare cantitativă. Prin îmbunătățirea MAS și a sistemului de acționare cu 5 faze, de asemenea, a anumitor elemente din bancul de testare, se va obține o validare calitativă a sistemului multifazat.

Modelul fizic este echipat cu senzori de temperatură în diferite părți ale mașinii. Un sistem de achiziție de date în timp real va fi utilizat în măsurătorile viitoare.

Formele de undă ale curenților statorici la funcționarea în sarcină ale modelului experimental vor fi îmbunătățite în primul rând prin implementarea unei comenzi de acționare îmbunătățită.

Îmbunătățirea performanțelor pentru punctul de funcționare cu o fază întreruptă va fi realizată prin îmbunătățirea înfășurării statorului și a sistemului de acționare.

BIBLIOGRAFIE

-
- [1] E. Ward și H. Härer, „Preliminary investigation of an inverter-fed 5-phase induction motor,” *Proc. IEE*, vol. 116, nr. 6, pp. 980-984, 1969.
- [2] E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat și S. Williamson, „Multiphase induction motor drives - a technology status review,” *IET Electric Power Applications*, vol. 1, nr. 4, pp. 489-516, 2007.
- [3] G. Singh, „Multi-phase induction machine drive research—a survey,” *Electric Power Systems Research*, vol. 61, nr. 2, pp. 139-147, 2002, DOI: 10.1016/S0378-7796(02)00007-X.
- [4] B. Kundrotas, S. Lisauskas și R. Rinkeviciene, „Model of Multiphase Induction Motor,” *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA*, vol. 111, nr. 5, pp. 111-114, 2011, <https://doi.org/10.5755/j01.eee.111.5.369>.
- [5] C. Hodge, S. Williamson și S. Smith, „Direct Drive Marine Propulsion Motors,” *International Conference on Electrical Machines (ICEM), Munchen, Germany*, p. 087, 2002.
- [6] M. Shaikh, I. Atif și M. E. Elmahdi, „Five-phase induction motor drive for weak and remote grid system,” *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 2, nr. 2, pp. 136-154, 2010.
- [7] L. Livadaru, C. Nuțescu, A. Munteanu, A. Simion și M. Cojan, „Comparative FEM-based Analysis of Multiphase Induction Motor,” *Analele Universității "Eftimie Murgu" Reșița*, nr. 2, 2014, ISSN 1453 - 7397.
- [8] M. I. Masoud, „Five phase induction motor: Phase transposition effect with different stator winding connections,” *IEEE*, pp. 1648-1655, 2016, DOI: 10.1109/IECON.2016.7793400.
- [9] M. Jones și E. Levi, „A literature survey of state-of-the-art in multi-phase ac drives,” *Proc. 36th Univ. Power Eng. Conf. UPEC, Stafford, U.K.*, pp. 587-592, 2002.
- [10] C. Kalaivani și K. Rajambal, „Modeling of an efficient high power wind energy conversion system using self-excited multi-phase machines,” *Microprocessors and Microsystems*, vol. 74, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103020>.
- [11] F. Barrero și M. J. Duran, „Recent Advances in the Design, Modeling, and Control of Multiphase Machines—Part I,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, nr. 1, pp. 449-458, 2016, DOI: 10.1109/TIE.2015.2447733.
- [12] M. J. Duran și F. Barrero, „Recent Advances in the Design, Modeling, and Control of Multiphase Machines—Part II,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, nr. 1, pp. 459-468, 2016, DOI: 10.1109/TIE.2015.2448211.
- [13] G. Renukadevi și K. Rajambal, „Field programmable gate array implementation of space-vector pulse-width modulation technique for Seven-Phase voltage source inverter,” *IET Power Electronics*, vol. 7, nr. 2, pp. 376-389, 2014, <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2013.0078>.
- [14] G. Renukadevi și K. Rajambal, „Comparison of different PWM schemes for n-phase VSI,” *IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management (ICAESM - 2012), Nagapattinam, India*, pp. 559-564, 2012.
- [15] K. Chandramohan, S. Padmanaban, R. Kalyanasundaram și F. Blaabjerg, „Modeling of Five-Phase, Self-Excited Induction Generator for Wind Mill Application,” *Electric Power Components and Systems, Taylor and Francis*, vol. 46, nr. 3, pp. 353-363, 2018.
- [16] E. Levi, S. N. Vukosavic și M. Jones, „Vector control schemes for series-connected six-phase two-motor drive systems,” *IEEE Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 152, nr. 2, 2005.

- [17] G. K. Singh, „A six-phase synchronous generator for stand-alone renewable energy generation: experimental analysis,” *Energy*, vol. 36, nr. 3, pp. 1768-1775, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.052>.
- [18] H. S. Che, E. Levi, M. Jones, M. J. Duran, W.-P. Hew și N. A. Rahim, „Operation of a Six-Phase Induction Machine Using Series-Connected Machine-Side Converters,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, nr. 1, pp. 164-176, 2014, DOI: 10.1109/TIE.2013.2248338.
- [19] G. K. Singh, K. B. Yadav și R. P. Saini, „Capacitive self-excitation in six-phase induction generator for small hydro power – an experimental investigation,” *International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems, New Delhi, India*, pp. 1-6, 2006, DOI: 10.1109/PEDES.2006.344267.
- [20] G. K. Singh, „Steady-state performance analysis of six-phase self-excited induction generator for renewable energy generation,” *International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan, China*, pp. 2255-2260, 2008.
- [21] C. Kalaivani și K. Rajambal, „Dynamic Modeling of Seven-Phase Induction Generator,” *Energy Procedia*, vol. 117, pp. 369-376, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.148>.
- [22] K. Chandramohan, S. Padmanaban, R. Kalyanasundaram, M. S. Bhaskar și L. Mihet-Popa, „Grid Synchronization of a Seven-Phase Wind Electric Generator Using d-q PLL,” *Energies*, vol. 10, p. 926, 2017, <https://doi.org/10.3390/en10070926>.
- [23] D. Casadei, M. Mengoni, G. Serra, A. Tani și L. Zarri, „Comparison of different fault-tolerant control strategies for seven-phase induction motor drives,” *13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, Spain*, pp. 1-9, 2009.
- [24] Z. Husain, R. K. Singh și S. N. Tiwari, „Multiphase (6-Phase & 12-Phase) Transmission Lines: performance Characteristics,” *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 1, nr. 2, 2007.
- [25] N. E. Hassanain și J. E. Fletcher, „Steady-state performance assessment of three- and Seven-Phase permanent magnet generators connected to a diode bridge rectifier under open-circuit faults,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 4, nr. 5, p. 420–427, 2010.
- [26] L. A. Pereira, G. Nicol, L. F. A. Pereira și M. Perin, „Induction distribution of five-phase induction machines under open-phase fault,” *ISA Transactions*, vol. 96, pp. 468-478, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.06.001>.
- [27] L. A. Pereira, L. F. Pereira, S. Haffner și G. Nicol, „Unbalanced operation of five-phase induction machines using steady state symmetrical components - part I: theoretical considerations,” *Industrial electronics society, IECON 2015-41st annual conference of the IEEE*, p. 001807–12, 2015, <http://dx.doi.org/10.1109/IECON.2015.7392363>.
- [28] L. A. Pereira, L. F. Pereira, S. Haffner și A. H. Silveira, „Unbalanced operation of five-phase induction machines using steady state symmetrical components - part II: Study of typical cases,” *Industrial electronics society, IECON 2015-41st annual conference of the IEEE*, p. 001813–8, 2015, <http://dx.doi.org/10.1109/IECON.2015.7392364>.
- [29] H. A. Toliyat, T. A. Lipo și J. C. White, „Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive applications. I. Motor analysis,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 6, nr. 4, p. 679–683, 1991.
- [30] H. A. Toliyat, T. A. Lipo și J. C. White, „Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive applications. II. Motor design and performance,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 6, nr. 4, p. 684–692, 1991.

- [31] A. S. Abdel-Khalik și S. Ahmed, „Performance evaluation of a five-phase modular winding induction machine,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, nr. 6, p. 2654–2669, 2012.
- [32] N. A. Elmalhy, M. M. Ahmed, S. Ahmed și I. ElArabawy, „Performance of a five-phase induction machine with single-tooth winding under open phase conditions,” *Proc. 4th Int. Conf. Electric Power Energy Convers. Syst.*, pp. 1-6, 2015.
- [33] G. Rezazadeh, S. Vaschetto, F. Tahami, G. A. Capolino, H. Henao și Z. Nasiri-Gheidari, „Analysis of six-phase induction motor with distributed and concentrated windings by using the winding function method,” *Proc. XXIII Int. Conf. Elect. Mach.*, p. 2423–2429, 2018.
- [34] G. Rezazadeh, F. Tahami, G. A. Capolino, S. Vaschetto, Z. Nasiri-Gheidari și H. Henao, „Improvement of Concentrated Winding Layouts for Six-Phase Squirrel Cage Induction Motors,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 35, nr. 4, pp. 1727-1735, 2020, DOI: 10.1109/TEC.2020.2995433.
- [35] S. He, X. Sui, D. Zhou și F. Blaabjerg, „Torque Ripple Minimization of Seven-Phase Induction Motor under More-than-Two-Phase Fault,” *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Gothenburg*, pp. 2222-2228, 2020.
- [36] A. Gonzalez-Prieto, J. J. Aciego, I. Gonzalez-Prieto și M. J. Duran, „Automatic Fault-Tolerant Control of Multiphase Induction Machines: A Game Changer,” *Electronics*, vol. 9, p. 938, 2020, <https://doi.org/10.3390/electronics9060938>.
- [37] W. Kong, M. Kang, D. Li, R. Qu, D. Jiang și C. Gan, „Investigation of Spatial Harmonic Magnetic Field Coupling Effect on Torque Ripple for Multiphase Induction Motor Under Open Fault Condition,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, nr. 7, pp. 6060-6071, 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2737027.
- [38] L. Schreier, J. Bendl și M. Chomat, „Operation of five-phase induction motor after loss of one phase of feeding source,” *ElectrEng*, vol. 99, pp. 9-18, 2017.
- [39] D. Casadei, M. Mengoni, G. Serra, A. Tani și L. Zarri, „Theoretical and experimental analysis of fault-tolerant control strategies for seven-phase induction motor drives,” *SPEEDAM, Pisa*, pp. 1628-1633, 2010.
- [40] I. Petrov și J. Pyrhonen, „Performance of Low-Cost Permanent Magnet Material in PM Synchronous Machines,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, nr. 6, pp. 2131-2138, 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2191757.
- [41] I. Petrov și J. Pyrhönen, „Performance comparison of an induction machine and line-start PM motor for cooling fan applications,” *21st Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC)*, pp. 122-126, 2013, DOI:10.13140/RG.2.1.2542.1922.
- [42] T. Marcic, B. Stumberger și G. Stumberger, „Comparison of Induction Motor and Line-Start IPM Synchronous Motor Performance in a Variable-Speed Drive,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, nr. 6, pp. 2341-2352, 2012, doi:10.1109/TIA.2012.2227095.
- [43] M. Melfi, S. Evon și R. McElveen, „Induction versus permanent magnet motors,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 15, nr. 6, pp. 28-35, 2009, doi:10.1109/mias.2009.934443.
- [44] O. Dobzhanskyi, E. Amiri și R. Gouws, „Comparison analysis of electric motors with two degrees of mechanical freedom: PM synchronous motor vs induction motor,” *II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), Kharkiv, Ukraine*, pp. 14-17, 2016, doi: 10.1109/YSF.2016.7753750.
- [45] A. Murray, M. Palma și A. Husain, „Performance Comparison of Permanent Magnet Synchronous Motors and Controlled Induction Motors in Washing Machine Applications Using Sensorless

- Field Oriented Control,” *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Edmonton, AB, Canada*, pp. 1-6, 2008, doi: 10.1109/08IAS.2008.11.
- [46] V. T. Buyukdegirmenci, A. M. Bazzi și P. T. Krein, „Evaluation of Induction and Permanent-Magnet Synchronous Machines Using Drive-Cycle Energy and Loss Minimization in Traction Applications,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, nr. 1, pp. 395-403, 2014, doi:10.1109/TIA.2013.2266352.
- [47] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown și M. Krishnamurthy, „Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, nr. 3, pp. 245-254, 2015, doi: 10.1109/TTE.2015.2470092.
- [48] T. -C. Jeong et al., „Current Harmonics Loss Analysis of 150-kW Traction Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Through Co-Analysis of d-q Axis Current Control and Finite Element Method,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, nr. 5, pp. 2343-2346, 2013, doi: 10.1109/TMAG.2013.2246552.
- [49] G. Pellegrino, A. Vagati, P. Guglielmi și B. Boazzo, „Performance Comparison Between Surface-Mounted and Interior PM Motor Drives for Electric Vehicle Application,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, nr. 2, pp. 803-811, 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2151825.
- [50] G. Volpe, J. Goss, I. Foley, F. Marignetti, M. Popescu și D. A. Staton, „High-Performance Electric Motor for Motor Sport Application,” *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Belfort, France*, pp. 1-5, 2017, doi: 10.1109/VPPC.2017.8330886.
- [51] J. Kim, D. Kang, T. Jeong, D. Jeong, J. Lee și S. Lee, „Optimal Rotor Design of an 150 kW-Class IPMSM by the 3-D Voltage–Inductance-Map Analysis Method,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, nr. 11, pp. 1-5, 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2707391.
- [52] Y. Yang et al., „Design and Comparison of Interior Permanent Magnet Motor Topologies for Traction Applications,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, nr. 1, pp. 86-97, 2017, doi: 10.1109/TTE.2016.2614972.
- [53] G. Pellegrino, A. Vagati, B. Boazzo și P. Guglielmi, „Comparison of Induction and PM Synchronous Motor Drives for EV Application Including Design Examples,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, nr. 6, pp. 2322-2332, 2012, doi: 10.1109/TIA.2012.2227092.
- [54] V. Fireșteanu, A. -I. Constantin și C. Dumitru, „Finite Element Analysis of the Tolerance of the Multi-Phase Induction Motors regarding Stator Winding Failures,” *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Modena, Italy*, pp. 266-271, 2021, doi: 10.1109/WEMDCD51469.2021.9425668.
- [55] V. Fireșteanu, A. -I. Constantin și C. Dumitru, „Finite Element Analysis of the Performances of the 3-Phase, 5-Phase, 7-Phase and 9-Phase Squirrel-Cage Induction Motors,” *12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania*, pp. 1-6, 2021, doi: 10.1109/ATEE52255.2021.9425068.
- [56] V. Fireșteanu și C. Dumitru, „Finite Element Analysis of Multiphase Permanent Magnet Synchronous Motors with the Same Stators of Analogue 3-phase, 5-phase, 7-phase and 9-phase Induction Motors,” *2021 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova, Romania*, pp. 1-6, 2021, doi: 10.1109/ICATE49685.2021.9465021.
- [57] C. Dumitru, „A case study for a five phase induction motor using Finite Element Analysis on healthy operation and operation with an open-phase fault,” *13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania*, pp. 1-6, 2023, doi: 10.1109/ATEE58038.2023.10108326.

- [58] I. Cioc și C. Nica, Proiectarea mașinilor electrice, București: Editura Didactică și Pedagogică, R.A. - București, 1994.
- [59] Îndrumător de proiectare a mașinii asincrone, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Catedra de Mașini electrice, 2002.
- [60] J. Pyrhönen, T. Jokinen și V. Hrabovcova, Design of Rotating Electrical Machines, First Edition, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-69516-6, 2008.
- [61] P. Lombard și F. Zidat, „Determining end ring resistance and inductance of squirrel cage for induction motor with 2D and 3D computations,” *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 266-271, 2016, doi: 10.1109/ICELMACH.2016.7732537.
- [62] „Altair Engineering Flux2D 2020 Software Documentation”.
- [63] V. Fireteanu, Analiza în element finit în studiul mașinilor electrice, Editura PRINTECH, 2010, pp 159.
- [64] T. Hussain, S. K. Moin Ahmed, A. Iqbal și M. R. Khan, „Five-phase induction motor behaviour under faulted conditions,” *Annual IEEE India Conference, Kanpur, India*, pp. 509-513, 2008, doi: 10.1109/INDCON.2008.4768776.