

CONVERTIZOR ELECTRONIC DE ALIMENTARE A UNUI MOTOR ASINCRON CU 5 FAZE

Emil TUDOR¹, Ionuț VASILE¹ și Constantin DUMITRU¹

¹ Institutul Național de Cercetare Dezvoltare pentru Inginerie Electrică ICPE-CA
emil.tudor@icpe-ca.ro, ionut.vasile@icpe-ca.ro, constantin.dumitru@icpe-ca.ro

Rezumat. Prezentarea de față se referă la realizarea și testarea unui model experimental de sistem de antrenare în curent alternativ bazat pe un motor asincron cu 5 faze, realizat în gama de puteri 3-6 kW, și pe un convertizor electronic dedicat, dezvoltate pentru a asigura acționarea unui vehicul electric ușor, cu alimentare din baterii electrice.

1. INTRODUCERE

Primul sistem de acționare pentru un motor multifazic a fost propus în 1969, de către Dr. E.E. Ward și Ing. H. Härer [1] 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.

Din 1969 până în 1990 [2], 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.

Invertoarele sunt convertoare c.c.-c.a. [3] ce au la intrare o sursă de tensiune (sau curent) continuă pe care o transformă într-o sursă de tensiune (sau curent) alternativă, ce poate avea frecvență și/sau tensiune reglabilă. De regulă, invertoarele sunt utilizate pentru acționarea motoarelor de curent alternativ cu viteză de rotație reglabilă, dar își găsesc aplicabilitate și în alte domenii, de exemplu construcția surselor de alimentare de c.a. neîntreruptibile (UPS).

Convertizoarele polifazate, sunt în principal utilizate pentru alimentarea motoarelor polifazate ce sunt folosite în aplicații cum sunt generatoarele sau ca motoare de tracțiunea electrică. Motoarele polifazate alimentate cu un număr de faze mai mare de trei au fost dezvoltate ca urmare a avantajelor față de cele convenționale trifazate [2].

Principalele avantaje sunt:

- curenți de fază mai mici decât la cele trifazate pentru aceeași sarcină;
- micșorarea curenților armonici din rotor;
- reducerea pulsației cuplului electromagnetic.

Mașinile electrice polifazate impun utilizarea unor convertizoare electrice cu un număr identic de faze, ceea ce reprezintă o constrângere în utilizare. Fiecare mașină polifazată necesită un convertizor dedicat acesteia și aplicației dezvoltate.

Funcționarea invertoarelor la curenți de fază mai mici - implică o serie de avantaje și pentru construcția invertoarelor care acționează motoarele respective, prin posibilitatea de utilizare a unor dispozitive de comutație de curenți mai mici, ceea ce duce la micșorarea pierderilor pe dispozitiv și implică dimensiuni mai mici a elementelor de disipare a căldurii cât și posibilitatea creșterii frecvenței de comutație a dispozitivelor semiconductoare în vederea creșterii preciziei reglajului [4].

Primele invertoare polifazate au apărut odată cu primele mașini electrice speciale. Spre exemplu turbinele eoliene funcționează în mare parte la viteze mici de rotație [5]. Un generator de inducție produce energie electrică atunci când rotorul său este rotit mai repede decât viteza sincronă, viteza mică de rotație a turbinei eoliene determină generarea cu randament mic a puterii alternative monofazate sau chiar trifazate ceea ce a impus dezvoltarea mașinilor polifazate deoarece au mai mulți poli, viteza de sincronism este mai mică și pot genera energie la rotații mult mai mici ale turbinei. De asemenea și necesitatea dezvoltării acționării vehiculelor electrice a impus apariția motoarelor polifazice și a convertizoarelor pentru alimentarea acestora [6].

2. MATERIALE ȘI METODE

2.1 Destinația acționării electrice cu motor cu 5 faze

Activitatea de cercetare a acționărilor electrice multifazate se desfășoară în cadrul unui proiect care are ca scop principal realizarea unui Demonstrator – ”Soluție integrată de vehicul cu propulsie electrică, cu alimentare hibridă de tip Ac/FC/Sc și stație electrică bidirecțională de stocare/alimentare de tip V2G (vehicle-to-grid)”. Soluția propusă va fi implementată pe o structură experimentală de microbuz electric ușor de tip Marshall seria DN-11 produs în China, având inițial ca propulsie un motor electric de 5kW la o rotație de 2800rot/min și alimentarea asigurată din acumulatori la tensiunea de 72V cc (fig.1).



Fig. 1 Vehiculul electric alimentat cu baterii și prototipul mașinii asincrone cu 5 faze

Datorită necesității de a căuta soluții alternative pentru vehiculele cu tracțiune convențională în orașe, autovehiculele alimentate energie regenerabilă, inclusiv cele alimentate cu hidrogen, reprezintă una dintre posibilitățile viabile de punere în practică a ipotezelor de transport durabil și a independenței față de importurile de petrol - care este una dintre prioritățile principale a Uniunii Europene. Situația actuală a dezvoltării și utilizării unor astfel de vehicule în diferite țări indică interesul care a apărut treptat pentru tehnologiile de transport ecologice și căutarea diverselor soluții care să poată susține dezvoltarea durabilă a transportului.

2.2 Realizarea mașinii asincrone cu 5 faze

Am procedat la dimensionarea mașinii asincrone analizând necesarul de cuplu și optimizând, pentru a obține o autonomie cât mai bună a vehiculului electric, obținând următoarele caracteristici.

Tabelul 1

Tema de proiectare pentru mașina asincronă cu 5 faze

Codificare	MAS5-210-5.5	
Putere nominală	5.5	kW
Tensiune nominală	85	Vc.a.
Curent nominal	23.5	Ac.a.
Conexiune faze	Y	
Numărul de perechi de poli	2	
Frecvența nominală	50	Hz
Turația de sincronism	1500	rpm
Cuplul nominal	37.2	Nm
Randament la încărcare nominală	80.3	%
Mod de răcire	Auto-ventilație	Forțată cu aer
Masa	35	kg

Pentru conectarea mașinii electrice la convertizorul de frecvență am ales următoarea schemă a înfășurării motorului asincron cu cinci faze, precum și modul de conectare al acestor faze la convertizor, anume modul de conectare cu neutru comun, inaccessibil pentru cablare exterioară.

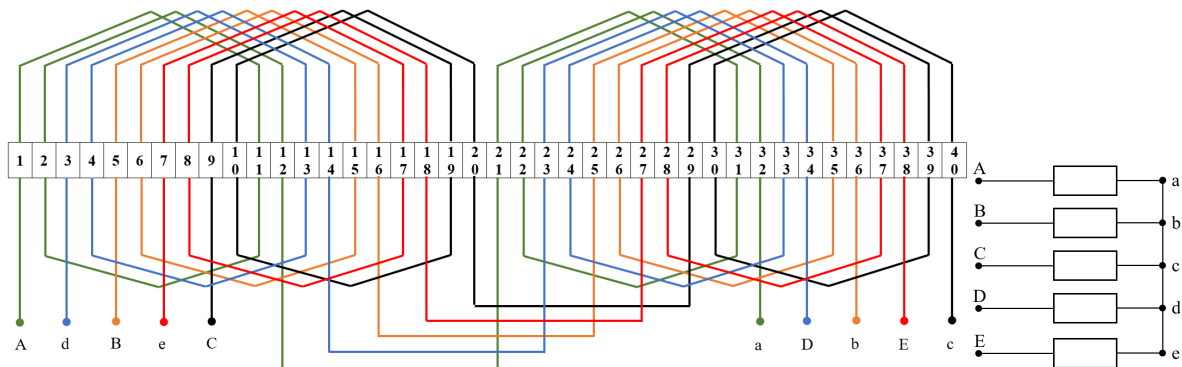


Fig. 2 Schema înfășurării motorului asincron cu cinci faze și conectarea acestora la neutru

Am optat pentru o schema de conexiuni cât mai simplă, pentru a putea analiza comparativ performanțele mașinii astfel realizate cu mărimile determinate la o mașină asincronă de serie, respectiv MAL, produsă la Săcele, Brașov.

Statorul motorului asincron cu 5 faze a fost proiectat menținând dimensiunile principale ale mașinii trifazate, Tabelul 2, astfel încât acesta să fie introdus în aceeași carcasă și, de asemenea, să se poată utiliza același rotor.

Tabelul 2

Caracteristicile prototipului de mașină asincronă cu 5 faze

Parametru	Valoare
Putere nominală	5.5 kW
Tensiune de linie	100 V _{ca} ; 50 Hz
Nr. de faze	5
Nr. de poli	4
Nr. de creștături rotorice	28
Diametrul interior al miezului statorului	103 mm
Diametrul exterior al miezului statorului	170.2 mm
Lungimea părților active	180 mm

În urma realizării a 2 modele numerice în element finit, în domeniul frecvență (DF) și în domeniul timp (DT) și a unui model numeric bazat pe formulele de circuit ale mașinii asincrone, au fost obținuți parametrii funcționali ai mașinii. În Tabelul 3 sunt detaliați parametrii principali ai modelelor pentru aceeași viteză de rotație. Se observă valori apropiate ale parametrilor, diferențele raportându-se la rezultatele modelului numeric în element finit

analizat în domeniul timp. De asemenea, cele mai mari diferențe se obțin în cazul modelului analitic, în cazul curentului nominal în stator, implicit a pierderilor Joule în înfășurarea statorului și în cazul pierderilor Joule în colivia rotorului.

Tabelul 3
Parametrii modelelor numerice ale mașinii asincrone cu 5 faze

Model	n [rpm]	M _{elmag} [Nm]	I ₁ [A]	P ₁ [W]	P _{J1} [W]	P _{J2} [W]	P _{mec} [W]	P ₂ [W]	M _{ax} [Nm]	η [%]
(1) FD	1438.7	36.731	17.151	6388.2	467.46	220.28	266.23	5324.7	35.343	83.353
(2) TD	1438.7	38.1	17.062	6626.6	462.65	219.28	276.31	5526.2	36.681	83.395
(3) Analitic	1438.7	38.215	18.587	6795.4	549.03	291.92	267.42	5190.9	34.455	82.804
Dif. 2-1 [%]	0	3.593	-0.522	3.597	-1.04	-0.456	3.647	3.646	3.648	0.05
Dif. 2-3 [%]	0	-0.302	-8.938	-2.548	-18.67	-33.12	3.217	6.067	6.069	0.709

În Fig. 3 sunt prezentate imagini reprezentând etapele de realizare a prototipului de mașină asincronă cu cinci faze.

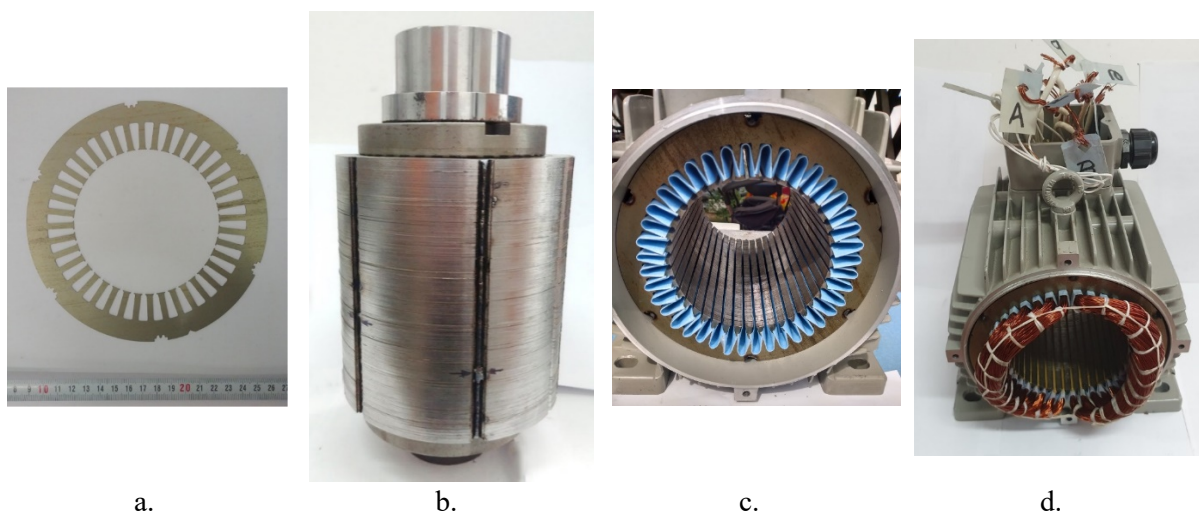


Fig. 3 Realizarea prototipului de motor asincron cu cinci faze

Pentru realizarea prototipului s-a pornit de la o mașină asincronă trifazată cu puterea de 5,5 kW de la un producător tradițional, în care circuitul electromagnetic al statorului, înfășurarea acestuia și cutia de borne au fost modificate, astfel:

- A fost reproiectată tola statorică (Figura 3.a.);
- Pachetul de tole statoric a fost asamblat în vederea prelucrării (Figura 3.b.);
- Pachetul de tole a fost introdus în carcasă și izolația în creștături (Figura 3.c.);
- Statorul a fost bobinat și s-a realizat rigidizarea capetelor de bobină (Figura 3.d.).

2.3 Convertizorul electronic cu 5 faze

Pentru realizarea convertizorului electronic a fost preferată o soluție de supradimensionare, pentru a obține un convertizor cu răcire naturală, obținând următoarele caracteristici.

Tabelul 4
Tema de proiectare pentru convertizorul cu 5 faze

Codificare	IVF5-210-5	
Tensiune alimentare nominală	210	V
Curent maxim absorbit	100	A
Tensiune ieșire nominală	5 x 85	V
Frecvența tensiunii la ieșire	0...50	Hz

Codificare	IVF5-210-5	
Putere nominală	5	kW
Putere maximă	10	kW
Dispozitive de putere IGBT	75Acc/1400Vcc	
Gabarit	500 x 350 x 200	Mm
Masa	11,5	Kg
Temperatură de funcționare	0 – 45	°C
Control cu μ P dedicat	Raport U / f constant	
Interfață de comunicare	Serială RS485	
Mod de răcire	Ventilație naturală	

Software de comandă

Placa de bază PDB-01 este echipată cu un microprocesor ARM Cortex M3 SAM3X8E, iar programul de comanda este scris in limbajul C și este organizat în fișiere sursă diferite.

Structura de fișiere a programului de comandă este următoarea:

- *a0_mem.ino* - fișier unde sunt definite toate variabilele și constantele folosite in program;
- *adc.ino* - fișier ce conține funcția de inițializare a periferiei de conversie analog-digitală și rutina de tratare a întreruperii provenite de la convertorul analog-digital;
- *conv.ino* - fișier ce conține funcții de conversie din format ASCII în format zecimal;
- *inv5_svm.ino* - acest fișier conține rutina principală de inițializare a perifericelor procesorului precum și bucle de execuție a programului;
- *protocol.ino* - fișier in care sunt definite funcțiile protocolului de comunicație dintre inverter și calculatorul extern;
- *pwm.ino* - fișier in care sunt definite funcțiile de inițializare a periferiei de pulsuri PWM, a funcției de calcul a pulsului precum și funcției ce calculează in mod optimizat sinusul unghiul tensiunii funcției de frecvență;
- *uart.ino* - fișier ce conține rutina de intimizare a periferiei de comunicație seriale, precum și rutina de tratare a întreruperii comunicație seriale.

Principala funcție a programului de comandă este de a controla valoarea tensiunii de fază aplicată motorului precum și frecvența acesteia. Pentru realizarea câmpului magnetic în întrefierul mașinii valoarea tensiunii de fază și a frecvenței sunt corelate după principiul controlului scalar. Astfel se menține valoarea raportului tensiune-frecvență la valoarea nominală. Acest mod de comandă permite controlul nivelului de saturație magnetică al motorului și astfel controlul pierderilor in miezul magnetic.

Modelul experimental de convertizor cu 5 faze dezvoltat este prezentat în Figura 4

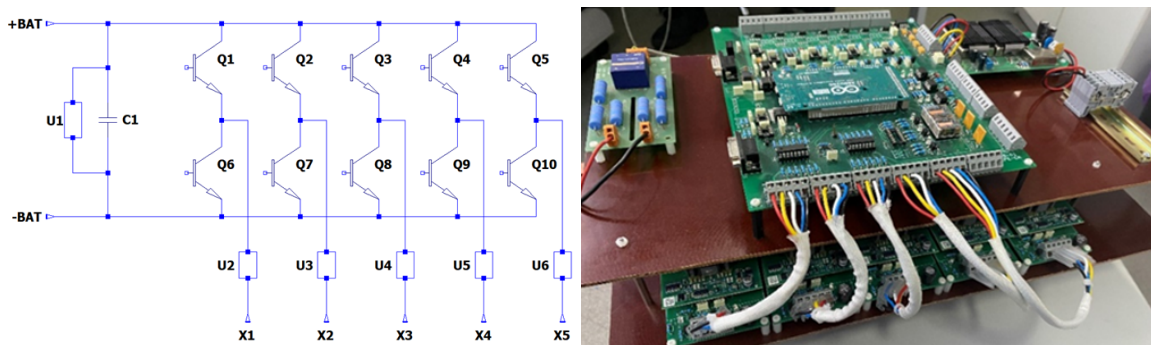


Fig. 4 Schema circuitelor de putere și prototipul de convertizor electronic cu cinci faze

Modelul experimental de convertizor cu 5 faze conține următoarele componente:

- Tranzistoarele Q1-Q10, cinci module IGBT tip 2MBI75P-140, cu cate doua tranzistoare per modul, montate pe un radiator, fiecare modul fiind echipat cu o placa electronica de adaptare a pulsurilor de comandă;

- Placa electronică de comandă tip PDB-01, cu procesor pentru realizarea logicii de comandă, de generare a pulsurilor, precum și pentru realizarea comunicației seriale de diagnoza și control;
- Traductoarele de curent U2-U6, tip CSNR161, montate pe fiecare fază;
- Traductorul de tensiune U1 tip BJHVS5-25A, pentru tensiunea continuă de alimentare;
- Condensator filtru intrare C1 cu caracteristicile Capacitate 4700 μF tensiune 500 V;
- Sursă de alimentare cu izolare galvanică, cu ieșiri stabilizate de 5V și $\pm 15\text{V}$.

3. REZULTATE EXPERIMENTALE

Rezultatele experimentale au fost obținute pe standul de testare din cadrul laboratorului de Mașini și Acționări Electrice, Fig. 5. Pentru a încărca în sarcină motorul asincron alimentat cu inverter cu cinci faze, acesta a fost cuplat la ax cu un generator de curent continuu de putere nominală 7 kW.

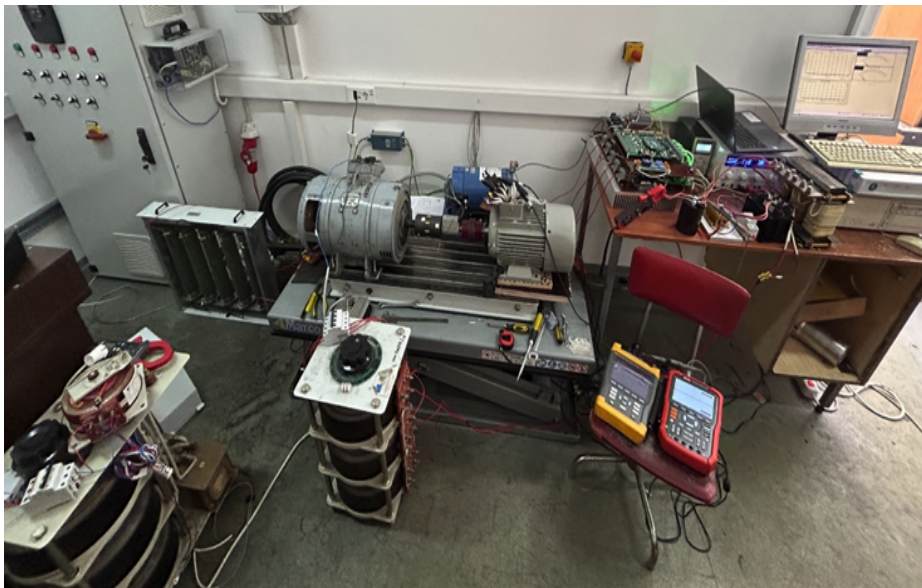


Fig. 5 Standul de testare cu motorul asincron cu cinci faze acționat cu inverter cu cinci faze

Pentru rezultatele experimentale au fost utilizate următoarele aparate de măsură:

- multimetre FLUKE 179 și BK PRECISION 2712
- clește de curent UNI-T UT204
- wattmetru EXTECH PQ2071
- traductor de cuplu HBM T4A
- traductor de turație cu laser DT-1236L
- osciloscop GWINSTEK MDO-2204EX
- osciloscop SIGLENT RSHS1102
- aparat de măsurare a rigidității dielectrice Sefram 9091 Insulation Multimeter
- ohmmetru Extech Industries UM200

3.1. Măsurători convertizor-motor în sarcină

Caracteristica naturală a fost determinată cu motorul asincron alimentat cu tensiune nominală de 85Vca și având ca sarcină un generator de curent continuu de 7 kW ce debitează pe o sarcină rezistivă de 1.35 Ω .

Tabelul 5

Măsurători realizate cu mașina asincronă și cu convertizorul cu 5 faze cu sarcină variabilă în trepte								
U_{cc}	[V _{cc}]	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0	210.0
I_{cc}	[A _{cc}]	4.3	8.7	16.4	23.6	30.0	36.5	36.7
P_{cc}	[W]	903	1817	3444	4956	6300	7665	7707
n_{ax}	[rpm]	1500	1488	1473	1456	1438	1422	1418
s	[%]	0.0	0.8	1.8	2.9	4.1	5.2	5.5
M	[Nm]	4.0	8.2	15.6	22.8	29.3	36.0	36.3
P_m	[W]	632	1272	2411	3469	4410	5366	5395
I_{ex}	[A _{cc}]	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.30
U_{gen}	[V _{cc}]	4.0	31.9	52.8	66.0	75.4	82.8	83.4
I_{gen}	[A _{cc}]	2.9	23.5	38.9	48.7	55.6	61.1	61.5
P_{gen}	[W]	12	750	2056	3212	4192	5056	5129
η	[%]	1.3	41.3	59.7	64.8	66.5	66.0	66.6

Unde avem:

- U_{cc} - Tensiunea de alimentare în curent continuu;
- I_{cc} - curentul continuu absorbit;
- P_{cc} - Puterea absorbită din circuitul de curent continuu;
- n_{ax} - Turația motorului măsurată la ax cu tahometrul;
- s - alunecarea calculată;
- M - cuplul motor măsurat cu traductorul de cuplu;
- P_m - Puterea mecanică calculată;
- I_{ex} - curentul de excitație măsurat al generatorului de c.c.;
- U_{gen} - tensiunea măsurată la bornele generatorului;
- I_{gen} - curentul debitat de generator, valori măsurate;
- P_{gen} - puterea debitată de generator, valoare calculată;
- η - randamentul global al sistemului de acționare (P_{gen}/P_{cc}).

Trasăm astfel, folosind valorile determinate în Tabelul 5 următoarele trei grafice:

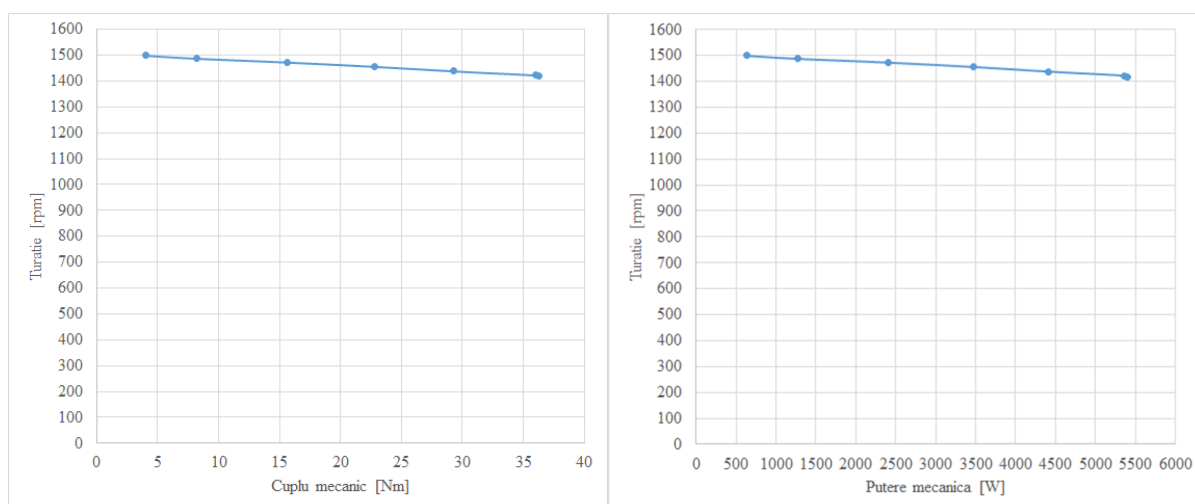


Fig. 6 Caracteristica mecanică turație – cuplu și turație – putere a motorul asincron cu cinci faze

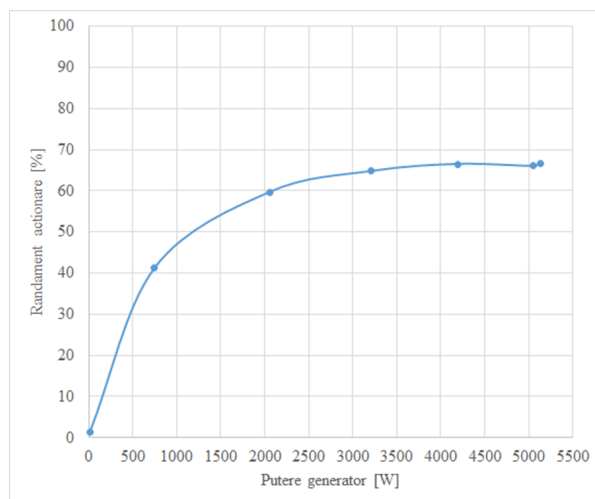


Fig. 7 Caracteristica randamentului acționării cu mașina asincronă cu cinci faze

Cele trei grafice din figurile 6 și 7 demonstrează comportamentul normal al mașinii asincrone și sugerează nevoia de optimizare a acesteia. Randamentul acționării ia în considerare pierderile însumate din convertizor, din mașina asincronă și din generatorul de curent continuu.

3.2. Măsurători convertizor-motor în sarcină, la apariția unui defect

Pentru acest test, faza E a fost deconectată. Înfașurarea de excitație a generatorului de curent continuu folosit ca sarcină nu a fost alimentată pentru măsurarea funcționării în gol. Pentru măsurarea funcționării în sarcină, tensiunea de comandă a generatorului de curent continuu a fost crescută treptat până când cuplul arborelui a atins aproximativ 80 % din valoarea nominală.

Tabelul 6

Funcționarea prototipului de mașină asincronă cu 5 faze în caz de defect de fază

Incercare	U_{cc} [V]	I_{cc} [A]	$P_{(INV)}$ [W]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	I_4 [A]	I_5 [A]	I_{med} [A]	n [rpm]	s [%]	M_{ax} [Nm]	$P_{2(ax)}$ [W]	η [%]
(1) în gol	204	7.17	1464	17.2	14.2	12.5	16.4	0	15.1	1496	0.27	0.82	128,5	8.77
(2) în sarcină	204	28.2	5752	28.5	22.6	18.5	28.8	0	24.6	1439	4.07	29.5	4445	77,27

Din Tabelul 6 se pot observa valorile curenților de fază I_1 - I_4 în condițiile întreruperii fazei 5, cu rezultat $I_5=0$ A, unde se poate observa creșterea semnificativă a curenților din fazele adiacente fazei întrerupte (Faza 1 și faza 4), pentru modelele experimentale de invertor și motor asincron cu patru din cinci faze alimentate. Constatăm că se poate obține cuplul din mașină, la încărcarea mașinii cu 80% din cuplul nominal, iar turația și randamentul total al acționării electrice rămân similare cu cele nominale, respectiv 1439 rpm și 77%, deci, mașina funcționează în regim degradat la 80% din capacitate, pentru un timp limitat de funcționare. Desigur, regimul degradat cu alimentare în 4 faze la o încărcare nominală va conduce la creșterea curenților de fază, a pierderilor în mașină, ca rezultat aceasta se va încălzi și se poate defecta.

4. CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE

Prezentul model experimental de invertor a fost folosit la verificarea considerațiilor teoretice privind realizarea practică a invertoarelor polifazate, precum și la implementarea softului de comandă scalară (fără bucla de întoarcere), la validarea filtrelor pentru tensiunea de ieșire și la verificarea în sarcină (sarcină rezistivă) a invertorului.

Prin realizarea acestor modele experimentale, în urma activităților de testare desfășurate pe acestea, am ajuns la următoarele propuneri de continuare a activităților de cercetare:

- Continuarea probelor cu mașina cu cinci faze având ca scop optimizarea acesteia;
- Dezvoltarea softului de comandă al inverterului cu cinci faze pentru a realiza controlul vectorial cu orientare după câmpul statoric, și continuarea probelelor pe stand cu sistemul de acționare cu mașină asincronă cu cinci faze pentru validarea tehnicii respective de reglaj;
- Demararea unei activități de testare comparativă a motorului cu 5 faze cu motoarele clasice, trifazate și compararea pulsațiilor de cuplu ale acestei mașini cu cele ale motorului trifazat de putere și construcție similară.

CONFIRMARE

Activitățile au fost finanțate de MCID prin PN23140102/2023 și 25PFE/2021.
 Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XIX, 2023.

BIBLIOGRAFIE

1. E. Ward și H. Härer, „*Preliminary investigation of an inverter-fed 5-phase induction motor*” Proc. IEE, **116**, 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, **4**, 1, pp. 489-516, 2007.
3. Fl. Ionescu, J.P.Six, D. Floricău, P. Delarue, S. Nițu, C. Boguș, *Electronică de putere- Convertoare statice*, Editura Tehnică, București, 1998.
4. 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.
5. 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, **46**, 3, pp. 353-363, 2018.
6. I. Vasile, E. Tudor, M. Popescu, C. Dumitru, L. Popovici And I C. Sburlan, *Electric Drives with Multiphase Motors as a Better Solution for Traction Systems*, "2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, pp. 1-5, 2019.