

CONVERTIZOR ELECTRONIC CU CINCI FAZE DEDICAT ALIMENTĂRII UNUI MOTOR ASINCRON FOLOSIT PENTRU ACȚIONAREA UNUI VEHICUL ELECTRIC

Emil TUDOR^{1,2,3}, Ionuț VASILE¹, Constantin DUMITRU¹

¹ Institutul Național de Cercetare Dezvoltare pentru Inginerie Electrică ICPE-CA

² Academia de Științe Tehnice din România;

³ IEEE-Romania Section

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 convertizor de frecvență bazat pe tranzistoare IGBT, comandat de un microcontroler, folosit pentru alimentarea unei mașini asincrone cu 5 faze, cu putere nominală de 5 kW. Sunt prezentate realizarea hardware și principalele elemente ale software-ului de comandă și de diagnoză, dezvoltate pentru a asigura comanda unui convertizor de uz general, care poate fi utilizat pentru acționarea unui vehicul electric ușor, cu alimentare din baterii. Măsurătorile cuprind și comportamentul acționării la apariția unui defect de separare de fază.

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 convertitoare 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 tracțiune 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 impus dezvoltarea mașinilor polifazate deoarece au mai mulți poli, viteza de sincronism este mai mică și pot genera energie la turații 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. MODEL EXPERIMENTAL

2.1 Model experimental cu inverter în cinci faze

A fost dezvoltat un convertor dedicat pentru a efectua teste de validare a conceptului cu un sistem în cinci faze. Activitățile anterioare au fost prezentate în [7], unde am prezentat dezvoltarea mașinii asincrone în cinci faze.

Schema electrică a sistemului de acționare-inverter este prezentată în Fig. 1.

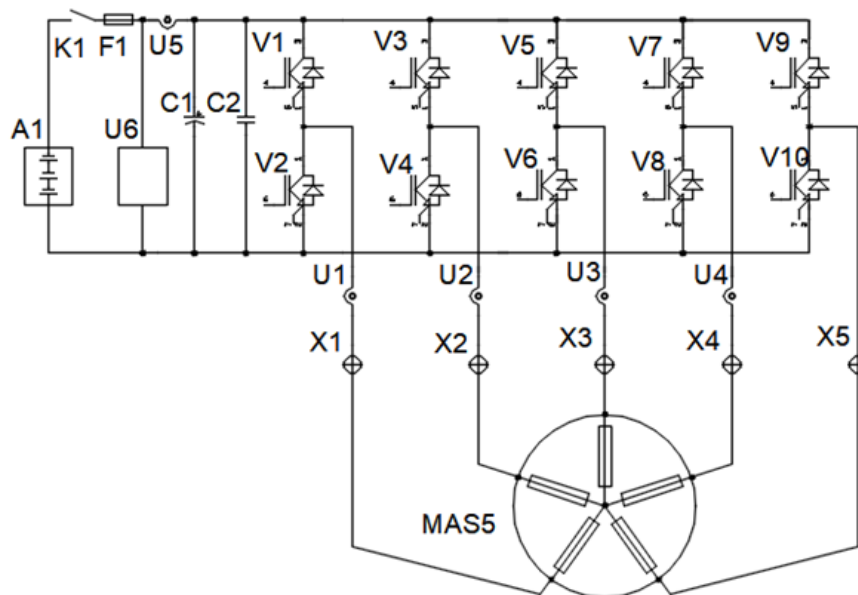


Fig. 1 Inverter pentafazat conectat la un motor asincron

Principalele componente sunt:

- cinci module cu tranzistoare de tip IGBT cu câte două tranzistoare per modul, V1-V10, montate pe un radiator, fiecare modul fiind echipat cu o placă electronică de adaptare a pulsurilor de comandă tip PCD-01;
- placă electronică de comandă cod PDB-01, cu microcontroler, pentru măsurarea tensiunii de alimentare și a curenților de fază, precum și pentru realizarea comunicației seriale de diagnostică și control;
- traductoare de curent montate pe fiecare fază, U1-U5;
- traductor de tensiune pentru măsurarea tensiunii continue de alimentare, U6;

- sursă de alimentare cu izolare galvanică.

Construcția propriu-zisă este deschisă, realizată din componente discrete disponibile, montate pe un radiator din aluminiu supradimensionat, pentru a funcționa cu răcire naturală, fără aer ventilat. O vedere a acestui convertizor este prezentată în Fig. 2.

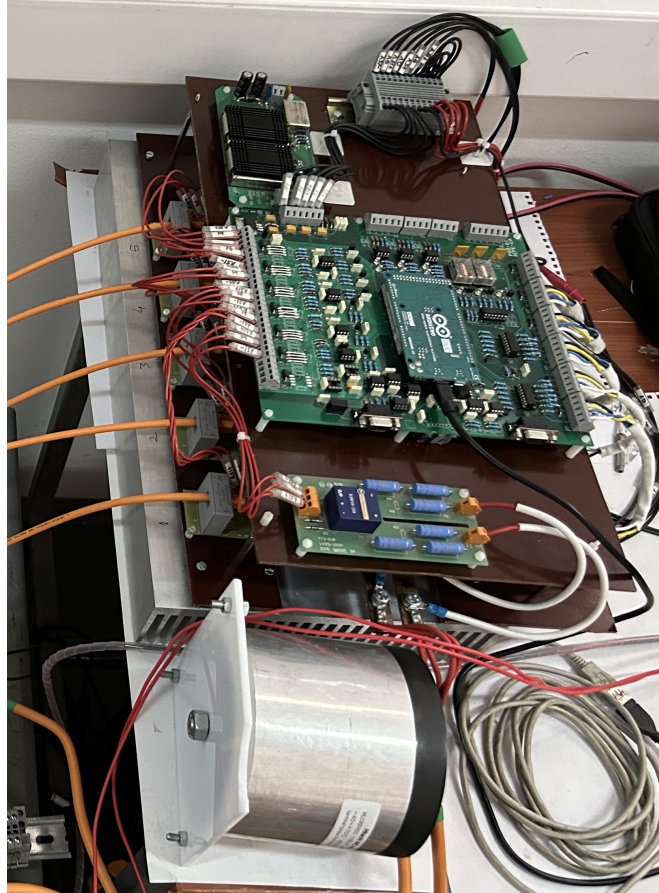


Fig. 2 Modelul experimental de convertizor cu 5 faze

Pentru a putea controla complet curenții de fază în cazul funcționării cu fază întreruptă am folosit cinci traductoare de curent, chiar dacă puteau fi folosite doar patru traductoare de curent și al cincilea curent poate fi determinat prin însumarea celorlalți patru curenți.

2.2 Caracteristici tehnice

Convertizorul realizat este timbrat astfel:

Tabelul 1

Caracteristicile tehnice ale convertizorului penta-fazat

Denumire	Simbol	Valori	U.M:
Tensiune de alimentare	U_{an}	210	V _{cc}
Gama tensiunilor de alimentare	U_a	40...300	V _{cc}
Putere nominală	P_n	6	kW
Tensiune de fază, nominală	U_{fn}	82	V _{ca}
Tensiune de fază	U_f	1..115	V _{ca}
Curent de ieșire	I_n	25	A _{ca}
Frecvența tensiunii de ieșire	f_n	50	Hz
Gama frecvențelor de ieșire	f	1..100	Hz

Controlul frecvenței și valorii tensiunii la ieșirea convertizorului polifazat este realizat cu tehnica modulației lății pulsului, tip PWM (Pulse Width Modulation). În Fig. 3, este prezentat modul de generare a pulsurilor de comandă folosind metoda PWM.

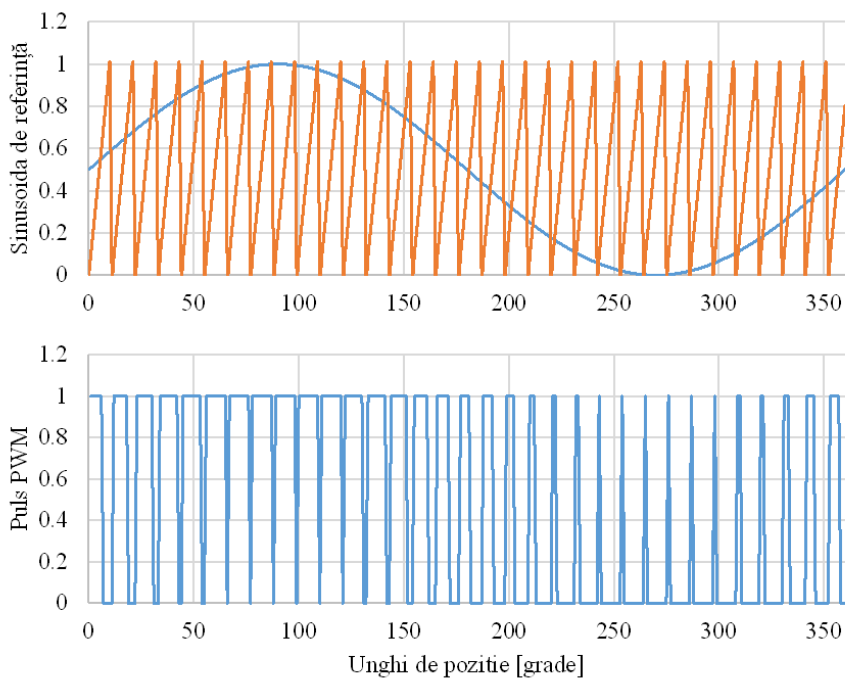


Fig. 3 Modelul experimental de convertizor cu 5 faze

În acest mod de control, sinusoida de referință este comparată cu un semnal de modulație tip dinte de fierăstrău, iar în cazul în care valoarea sinusoidii este mai mare decât valoarea semnalului de modulație, pulsului de comanda i se atribuie valoarea 1 logic, în caz contrar pulsului i se atribuie valoarea 0 logic.

2.3 Implementare software

Funcții de control implementate în software-ul de comandă al microcontrolerului sunt următoarele:

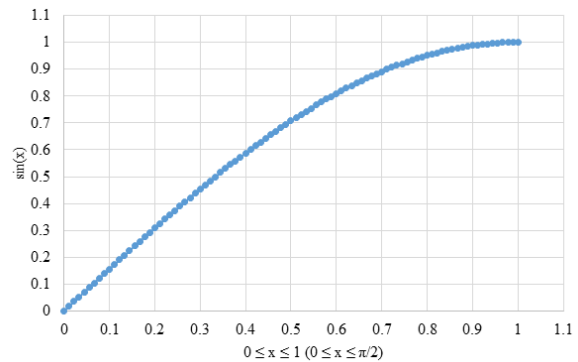
- modul ADC - funcții de realizare a conversiei analog numerice, pentru măsurarea curenților de fază și a tensiunii de alimentare. Achiziția analogică este realizată cu o rezoluție de 12 biți la o tensiune de referință de 3.3 Vcc.
- modul CONV - funcții pentru conversie ASCII și BCD. Aceste funcții realizează conversia din format ASCII în format hexazecimal conform Figura 4.a., prezentată în continuare.
- modulul CTRL - calculul valorii RMS ale curenților de fază, monitorizarea intrărilor și pentru implementare mașinii de stare ce controlează regimurile de funcționare ale convertizorului;
- modulul IO - funcții pentru configurarea porturilor microcontrolerului, setarea intrărilor și ieșirilor la nivel de bit;
- modulul MATH - funcții matematice necesare implementării legii de control pentru convertizor, funcții trigonometrice (sin, cos) și funcția radical (sqrt). Funcția $\sin(x)$ este aproximată cu un polinom de ordinul 5, descris în Figura 4.b;

- modulul PROTOCOL - funcții pentru implementarea protocolului de comunicație pentru control și diagnoză. În Fig. 4.c, este prezentată o captură de ecran cu traficul de comunicație dintre PC și convertizor;
- modulul TASK – sistemul de multi-tasking cooperativ în timp real;
- modulul UART - configurarea parametrilor comunicației seriale RS485;
- modulul PWM :
 - implementarea legii de comandă scalare tensiune-frecvență, detaliat în Fig. 4.d,
 - configurarea frecvenței de comutație a convertizorului
 - implementarea reguletoarelor;
 - definirea timpului de gardă între pulsuri top și bottom;
 - limitările date de realizarea pulsului minim și maxim;

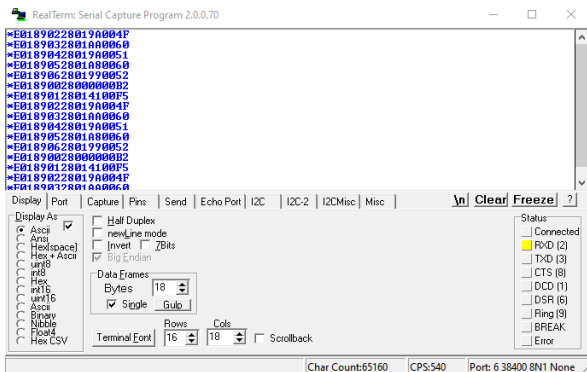
În Fig. 4 sunt prezentate diverse capturi de ecran ale programelor de dezvoltare ale software-ului de control.

Dec	Hex	Oct	Chr	Dec	Hex	Oct	HTML	Chr	Dec	Hex	Oct	HTML	Chr	Dec	Hex	Oct	HTML	Chr
0	00		NULL	32	20	040	 	Space	64	40	100	@	@	96	60	140	`	;
1	1	001	Start of Header	33	21	041	!	!	65	41	101	A	A	97	61	141	a	a
2	2	002	Start of Text	34	22	042	"	!	66	42	102	B	A	98	62	142	b	b
3	3	003	End of Text	35	23	043	#	#	67	43	103	C	C	99	63	143	c	c
4	4	004	End of Transmission	36	24	044	$	\$	68	44	104	D	D	100	64	144	d	d
5	5	005	Enquiry	37	25	045	%	%	69	45	105	E	E	101	65	145	e	e
6	6	006	Acknowledgment	38	26	046	&	&	70	46	106	F	F	102	66	146	f	f
7	7	007	Bell	39	27	047	'	'	71	47	107	G	G	103	67	147	g	g
8	8	010	Backspace	40	28	050	((72	48	110	H	H	104	68	150	h	h
9	9	011	Horizontal Tab	41	29	051))	73	49	111	I	I	105	69	151	i	i
10	A	012	Line feed	42	2A	052	*	*	74	4A	112	J	J	106	6A	152	j	j
11	B	013	Vertical Tab	43	2B	053	+	+	75	4B	113	K	K	107	6B	153	k	k
12	C	014	Form feed	44	2C	054	,	,	76	4C	114	L	L	108	6C	154	l	l
13	D	015	Carriage return	45	2D	055	-	-	77	4D	115	M	M	109	6D	155	m	m
14	E	016	Shift Out	46	2E	056	.	.	78	4E	116	N	N	110	6E	156	n	n
15	F	017	Shift In	47	2F	057	/	/	79	4F	117	O	O	111	6F	157	o	o
16	10	020	Data Link Escape	48	30	060	0	0	80	50	120	P	P	112	70	160	p	p
17	11	021	Device Control 1	49	31	061	1	1	81	51	121	Q	Q	113	71	161	q	q
18	12	022	Device Control 2	50	32	062	2	2	82	52	122	R	R	114	72	162	r	r
19	13	023	Device Control 3	51	33	063	3	3	83	53	123	S	S	115	73	163	s	s
20	14	024	Device Control 4	52	34	064	4	4	84	54	124	T	T	116	74	164	t	t
21	15	025	Negative Ack.	53	35	065	5	5	85	55	125	U	U	117	75	165	u	u
22	16	026	Synchronous idle	54	36	066	6	6	86	56	126	V	V	118	76	166	v	v
23	17	027	End of Trans. Block	55	37	067	7	7	87	57	127	W	W	119	77	167	w	w
24	18	030	Cancel	56	38	070	8	8	88	58	130	X	X	120	78	170	x	x
25	19	031	End of Medium	57	39	071	9	9	89	59	131	Y	Y	121	79	171	y	y
26	1A	032	Substitute	58	3A	072	:	:	90	5A	132	Z	Z	122	7A	172	z	z
27	1B	033	Escape	59	3B	073	;	;	91	5B	133	[[123	7B	173	{	{
28	1C	034	File Separator	60	3C	074	<	<	92	5C	134	\	\	124	7C	174	|	
29	1D	035	Group Separator	61	3D	075	=	=	93	5D	135]	^	125	7D	175	}	^
30	1E	036	Record Separator	62	3E	076	>	>	94	5E	136	^	_	126	7E	176	~	_
31	1F	037	Unit Separator	63	3F	077	?	?	95	5F	137	_	~	127	7F	177		~

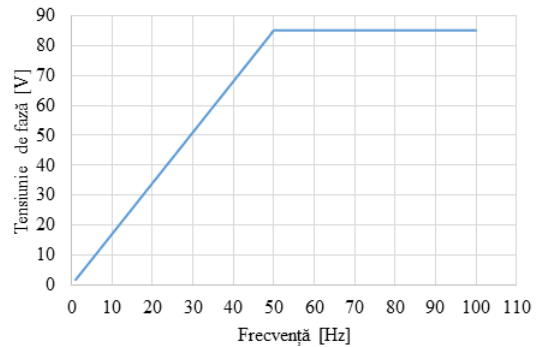
a) Valorile caracterelor ASCII standardizate



b) Funcția sin(x) aproximată prin polinom de ordin 5



c) Captura cu traficul de date dintre PC și convertizorul polifazat



d) Principiul reglării scalare cu menținerea constantă a raportului tensiune/frecvență în gama de lucru nominală

Fig. 4 Implementarea software

3. REZULTATE EXPERIMENTALE

Rezultatele experimentale au fost realizate având ca sarcină inductivă un motor asincron cu cinci faze de 5.5 kW, 1500 rpm, respectiv o sarcină rezistivă dintr-un grup de rezistori de 5 x 2 Ω/1000 W.

3.1 Funcționarea în condiții nominale

Pentru testarea funcționării inverterului cu cinci faze și a mașinii asincrone cu cinci faze am folosit standul prezentat în Fig. 5.

Pe masa de testare sunt montate mașina asincronă (dreapta), conectată prin intermediul unui traductor de cuplu la frâna electrodinamică de curent continuu din stânga.

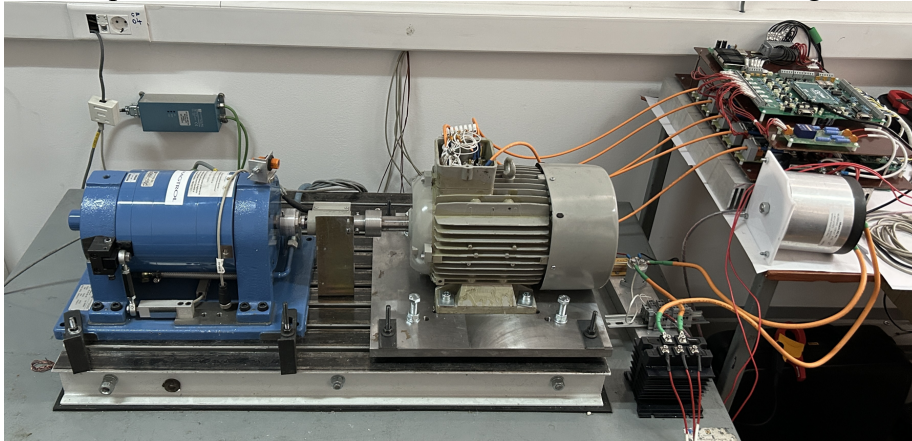


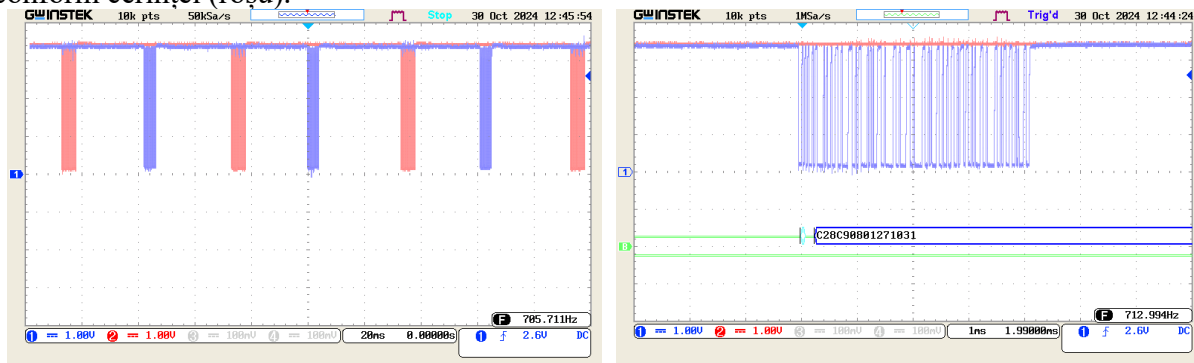
Fig. 5 Montajul inverter-motor-frână pentru experimentare

Alimentarea standului se face prin intermediul unei siguranțe tripolare, a unui contactor, a unui autotransformator, al unei punți redresoare trifazate, putând regla, în acest mod, tensiunea de alimentare a inverterului în domeniul 0...300Vcc.

Pregătirea motorului asincron cu cinci faze a presupus rebobinarea și impregnarea acestuia

Comunicația serială RS485 se realizează cu un calculator extern și este folosită pentru diagnoza convertizorului și pentru prescrierea frecvenței tensiunilor de ieșire. Comunicația este implementată în sistem master - slave, unde calculatorul extern interoghează convertizorul iar acesta răspunde în funcție de codul operației primite (comanda sau raport date).

În Fig. 6 este prezentată oscilograma comunicației seriale RS485, unde se poate observa unitatea master PC (albastru) interoghează la fiecare 60 ms convertizorul, acesta răspunzând conform cerinței (roșu).



a) Protocol master - slave; unde masterul interoghează (roșu) iar convertizorul răspunde în consecință (albastru)

b) Pachetul de date trimis de către master spre convertizor, cu reprezentarea acestuia în format ASCII

Fig. 6 Comunicația serială RS485

În Fig. 6.b este prezentată oscilograma în detaliu, a pachetului de date emise de către master. Pachetul emis are identitatea 01h, codul C9h (frecvență prescrisă) și este destinat convertizorului cu identitatea 28h.

Pulsurile de comandă ale tranzistoarelor sunt decalate între ele cu o perioadă de timp, necesară comutației corecte a tranzistoarelor, oscilograma fiind prezentată în Fig. 7.

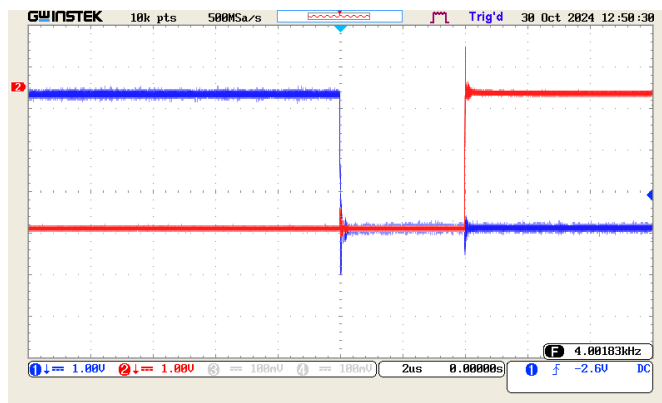
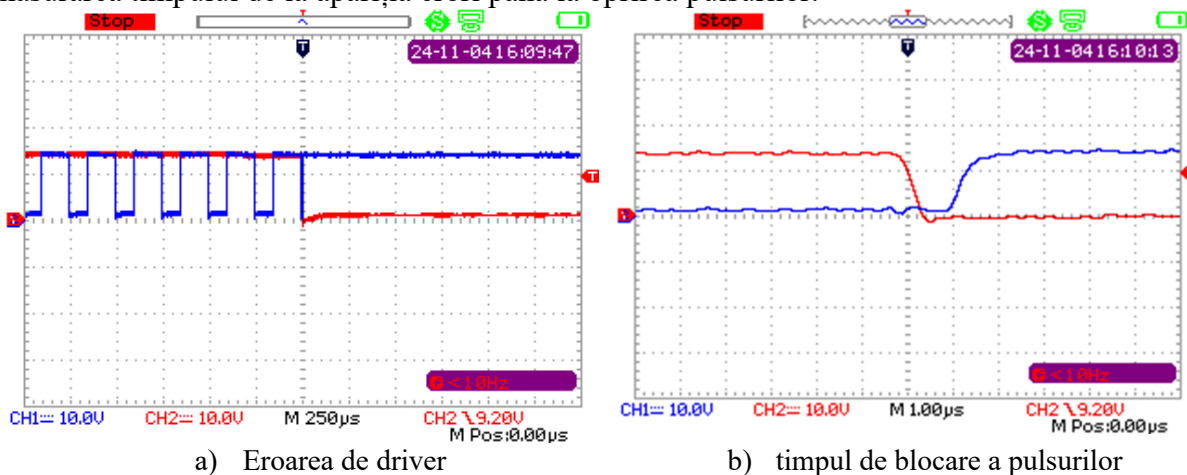


Fig. 7 Pulsurile PWM, 4 kHz, intercondiționate cu timpul de gardă t_g de 4 μ s

Acest timp de gardă previne intrarea în conducție simultană a tranzistoarelor unei faze, prevenind astfel scurtcircuitarea sursei de alimentare. Pulsurile de comandă au o frecvență de 4 kHz și un timp de gardă t_g de 4 μ s.

Semnalizarea stării de eroare detectată de circuitul de comandă pe poartă este numită și Eroare de driver (de la en: Driver error) este activată atunci când este detectat un curent de scurtcircuit prin tranzistorul de putere IGBT. Intern, circuitul din placa de comandă, PCD-01, compara o tensiune de referință setată de către utilizator, cu căderea de tensiune în conducție a tranzistorului. În momentul apariției unui scurtcircuit, căderea de tensiune pe tranzistor crește peste pragul setat, driverul blochează impulsurile de comandă și semnalizează către exterior apariția unui scurtcircuit, sub forma unui semnal logic. Placa de baza PDB-01, monitorizează permanent acest semnal și oprește pulsurile de comandă către tranzistoare.

În Fig. 8(a) și 8(b) sunt prezentate oscilogramme cu activarea erori de driver și cu măsurarea timpului de la apariția erori până la oprirea pulsurilor.



a) Eroarea de driver

b) timpul de blocare a pulsurilor

Fig. 8 Monitorizarea stării de eroare a circuitelor de comandă pe poartă - eroare (roșu) activă în zero și pulsurile de comandă pe poartă (albastru)

Se observă în Fig. 8(b) că diferența de timp dintre apariția erorii și oprirea pulsurilor este de 2 μ s, valoare mai mică decât timpul de resetare al erori intern driverului, de 9 μ s.

Am realizat comanda invertorului pentru realizarea unui raport tensiune-frecvență constant, acest mod de funcționare se mai numește și ridicarea caracteristicii scalare. A fost definit prin modificarea frecvenței de ieșire cu un increment de 4 Hz până la frecvența nominală de 50 Hz, și apoi a fost măsurată tensiunea de fază, U_{f0} . Rezultatele măsurătorilor sunt prezentate în Fig. 9.

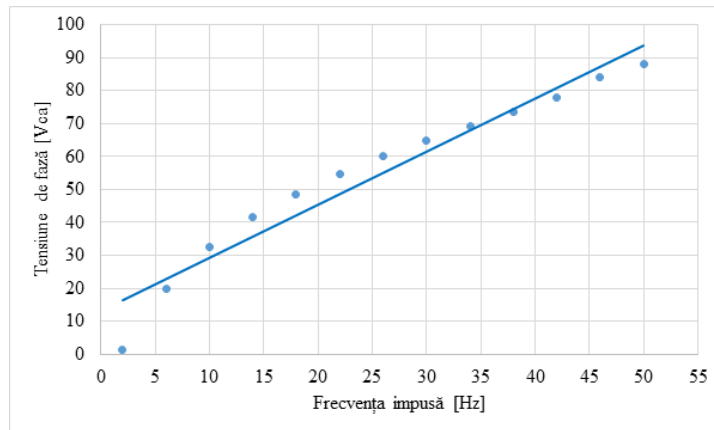
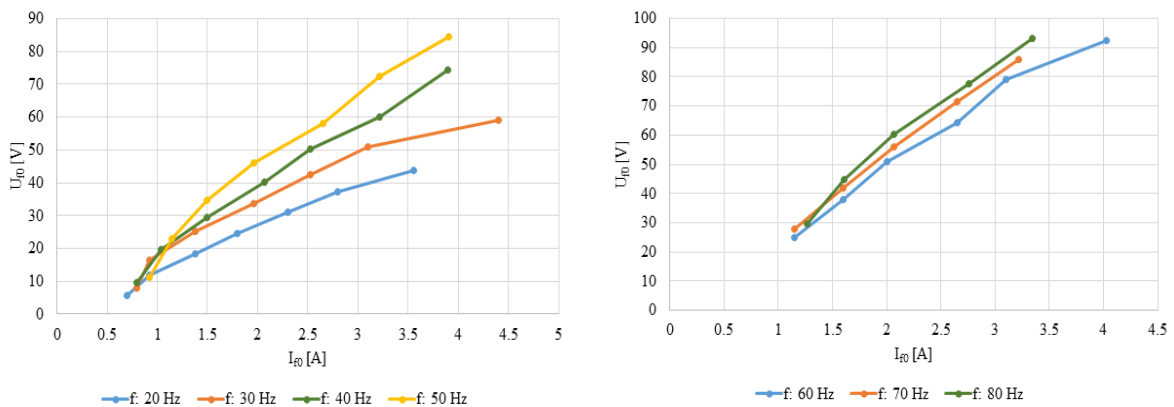


Fig. 9 Caracteristica scalară a convertizorului polifazat conectat la motorul asincron pentafazat

Se poate observa abaterea de la caracteristica ideală datorită rezoluției finite a sistemului de control. De asemenea se observa aplicarea la start a unei tensiuni diferite de zero (U_{boost}). Acest lucru este necesar pentru a compensa căderea de tensiune pe înfășurările statorice la frecvența foarte joase, sub 2 Hz.

Caracteristica de mers în gol a fost realizată prin alimentarea motorului polifazat cu menținerea constantă a frecvenței de alimentare și prin modificarea tensiunii continue de alimentare a convertizorului, implicit a tensiunii de fază. Au fost realizate încercări pentru 4 valori diferite de frecvență, respectiv 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz, 50 Hz. Tensiunea de fază a fost măsurată atât cu osciloscopul RSHS1102 cât și cu multimetru digital FLUKE 179. Curenții de fază au fost raportați de către convertizor pe magistrala de comunicație serială RS485. Rezultatele măsurătorilor sunt prezentate sub formă grafică în Figura 10.a.



a) la frecvențe inferioare frecvenței nominale

b) frecvențe superioare frecvenței nominale

Fig. 10 Caracteristica de mers în gol a motorului polifazat alimentat de la convertizorul polifazat

Funcționarea la frecvență ridicată înseamnă funcționarea la o frecvență a tensiunilor de ieșire mai mare decât frecvența nominală, în cazul acesta 50 Hz. Au fost realizate încercări la trei valori ale frecvenței de alimentare, respectiv 60 Hz, 70 Hz și 80 Hz. Similar probei de mers în gol, frecvența a fost menținută constantă și a fost variată tensiunea continuă a convertizorului. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 10.b.

Graficul din Fig. 10.b ne demonstrează că motorul polifazat nu este saturat, ceea ce va permite funcționarea la turații suprasincrone cu cupluri aproape de cuplul nominal, lucru foarte important pentru un motor destinat acționării vehiculelor electrice.

3.2 Funcționarea cu întrerupere de fază

Pentru simularea regimului de defect prin întreruperea unei faze am înseriat un separator pe conductorul de legătură dintre faza X1 a inverterului și faza A a motorului supus testării. În Fig. 11 este prezentat standul de testare.

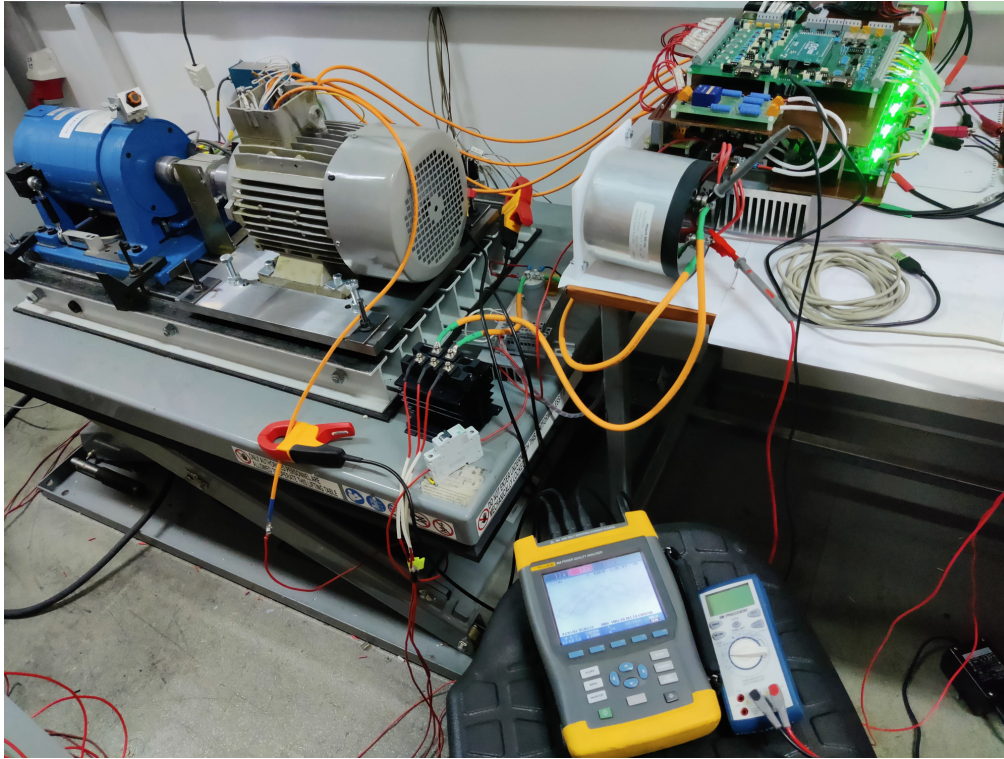


Fig. 11 Standul adaptat pentru realizarea unei întreruperi de fază în timpul funcționării

Observăm osciloscopul Fluke folosit pentru ridicarea caracteristicilor curenților de fază pentru trei faze consecutive. Oscilograma curenților de fază la mersul în gol este prezentată în Fig. 11.a, respectiv după întreruperea fazei X1, în Fig. 11.b.

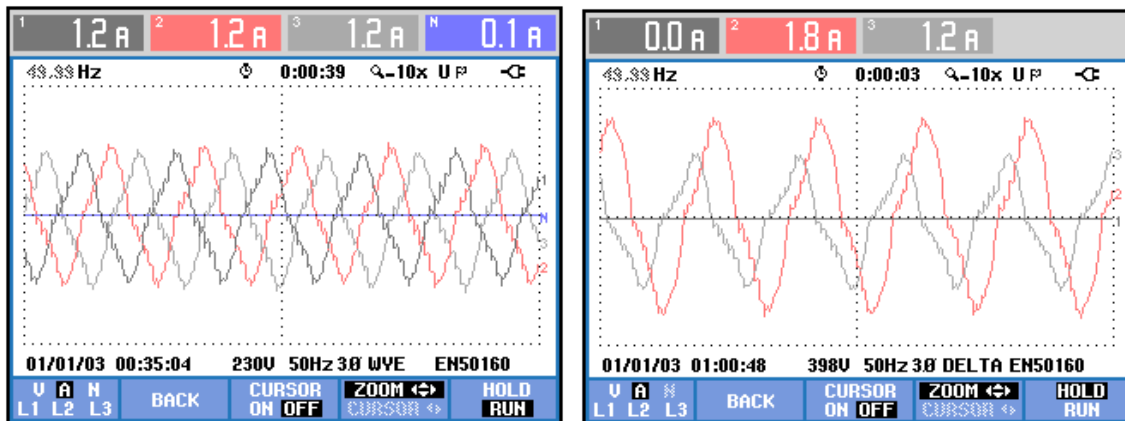


Fig. 12 Curenții de fază – Oscilogramele curenților fazelor X1, X2 și X3 ale sistemului motor-invertor cu 5 faze -cazul normal (a), respectiv (b) având faza X1 întreruptă

Se observă creșterea curenților în faza adiacentă (X2) celei întrerupte. Fază depărtată (X3) menține valoarea curentului similară alimentării normale.

3.3 Diagnoza situației de defect prin întrerupere de fază

Pentru diagnoza defectului de fază am dezvoltat o interfață software rezidentă pe PC extern pentru memorarea principalelor mărimi electrice asociate. O captură a acestei interfețe este prezentată în Fig. 13.



Fig. 13 Curenții de fază – normal și cu fază întreruptă

Pentru comanda convertizorului, interfața prezintă mai multe butoane ce îndeplinesc funcții specifice, respectiv:

- butonul Conectare - pentru activarea conexiunii seriale;
- butonul Deconectare - pentru oprirea comunicație seriale;
- butonul INC - pentru creșterea frecvenței impuse convertizorului;
- butonul DEC - pentru scăderea frecvenței impuse convertizorului;
- butonul STOP - pentru impunerea unei frecvențe nule;
- butonul RESET - pentru resetarea convertizorului în cazul apariției unei erori localizată la circuitul de comandă pe poartă al tranzistoarelor IGBT

Din punct de vedere al diagnozei, programul indică sub formă de grafic cu bară, frecvența impusă precum și valoarea tensiunii de alimentare continue. Cei cinci curenți de fază sunt indicați atât numeric cât și sub forma unor ampermetre digitale.

Pentru studierea evoluției în timp, programul dispune și de un osciloscop digital unde sunt expuse, tensiunea continuă de alimentare (culoare roșie) și cei cinci curenți de fază.

Captura de ecran din Fig. 13 surprinde funcționarea convertizorului cu defect de fază, unde se poate observa faza 1 este întreruptă la momentul 40 și 70, cu o revenire în secunda 57, curenții acesteia fiind nul, fazele 2 și 5 prezintă un curent de aproximativ 1.9 A în timp ce fazele 3 și 4 prezintă un curent de 1.15 A. Aceste grafice confirmă rezultatele măsurate și prezentate în Fig. 12.b, unde curenții prin fazele adiacente fazei întrerupte, cresc la instalarea defectului, dar curenții prin fazele opuse celei întrerupte păstrează aceeași valoare a curentului. Același lucru se poate observa și în oscilograma de la Fig. 12.b.

4. CONCLUZII

În cadrul activității de dezvoltare experimentală am realizat următoarele activități care au grad ridicat de noutate:

Am revizuit programul de comandă al invertorului, prin implementarea funcțiilor de analiză a curenților de fază (calculul valorilor RMS), implementarea funcției sinus, implementarea protecțiilor la scurtcircuit și la suprasarcină folosind informația de ”eroare de driver”, implementarea protocolului de control și de comandă serială și funcții necesare pentru diagnoza online a convertizorului.

Pentru diagnoză am realizat un program executabil prin care se pot da comenzi online invertorului pentru a evalua stabilitatea sistemului de alimentare al motorului.

Motorul pentafazat a fost rebobinat pentru optimizarea înfășurării statorice, dar, mai ales, pentru echilibrarea curenților de fază. Bobinajul statoric astfel realizat a fost impregnat cu lac electroizolant și supus polimerizării la cald.

Probele efectuate au subliniat simetria celor 5 curenți de fază, lucru obținut prin reducerea nivelului de vibrații și a oscilațiilor curentului absorbit.

Proba de întrerupere a unei faze a demonstrat că motorul funcționează în continuare alimentat în 4 faze, iar curenții prin cele două faze alăturate se majorează, iar curenții prin fazele îndepărtate rămân la valoarea din funcționarea normală.

Grupul mașină asincronă- invertor de alimentare cu 5 faze reprezintă o noutate la nivel național. Deoarece softul de comandă este realizat în cadrul colectivului nostru de cercetare, putem evidenția regimuri speciale de lucru, prin posibilitatea de control individual al pulsurilor de comandă și a defazajelor dintre acestea, acest lucru constituie noutate la nivel mondial.

Astfel de acționări au aplicabilitate în domeniile unde siguranța funcționării în caz de defect este foarte importantă, cum ar fi sisteme de transport, de deplasare, vane de acționare de mare putere, pompe, ș.a..

CONFIRMARE

Activitățile prezentate sunt finanțate de către MCID prin proiectul PN23145102
Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XX, ediția 2024.

BIBLIOGRAFIE

1. E. Ward, 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, S. Williamson, *Multiphase induction motor drives - a E technology status review*, IET Electric Power Applications, **1**, 4, pp. 489-516, 2007.
3. Fl. Ionescu, J.P.Six, D. Floricău, P. Delarue, S. Nițu, C. Boguș, *Electronică de putere- Conversoare statice*, Editura Tehnică, București, 1998.
4. M. Jones, 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, 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, I.C. Sburlan, *Electric Drives with Multiphase Motors as a Better Solution for Traction Systems*, 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, pp. 1-5, 2019.
7. E. Tudor, I. Vasile, C. Dumitru, *Convertizor Electronic de Alimentare a unui Motor Asincron cu 5 Faze*, Actualități și Perspective în Domeniul Mașinilor Electrice, **19**, 1, pp. 58-66, 2024.