

TENDINȚELE UTILIZĂRII MOTOARELOR HEXAFAZATE

Ghenadie TERTEA

Departamentul Inginerie Electrică, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, RM

Autorul corespondent: Ghenadie Terteza, ghenadie.tertea@bte.utm.md

Îndrumătorul/coordonatorul științific **Petru TODOS**, prof. univ., dr.ing. UTM

Rezumat. În ultimii ani unitățile de acționare electrică multifazată (UMF), multiphase drives (MPDs) au devenit obiectul cercetării și au atras o atenție sporită în industrie și mediul academic ca fiind una dintre opțiunile preferate ale sistemelor de conversie a puterii. Datorită creșterii cererii de vehicule electrice la nivel global, crește interesul față de acționările multifazice MF. Necitând la faptul că este un domeniu relativ nou și în permanentă dezvoltare, există un număr semnificativ de studii de cercetare și articole publicate la acest subiect. În această lucrare sunt scoase în evidență avantajele și dezavantajele a unităților multifazate printre care cea mai importantă fiind toleranța la erori. Datorită gradului înalt de toleranță la erori unitățile multifazate au căpătat interes pentru acționările în care toleranța la erori este primordială, cum ar fi: industria aerospațială, transport maritim, subacvatic, vehicule electrice, transport de pasageri, generarea de energie eoliană. În articol este efectuată o revizuire a contribuțiilor recente și un studiu comparativ în domeniul unităților multifazice. Revizuirea contribuțiilor recente va oferi o viziune cuprinzătoare privind elaborările pe această temă și tendințele tehnologice pe viitor.

Cuvinte cheie: acționări multifazice, înfășurare simetrică, toleranță la erori.

Introducere

Mașinile electrice cu mai mult de trei faze statorice, adică mașinile multifazate (MMF), oferă câteva avantaje substanțiale în comparație cu cele trifazate convenționale [1, 2]. Datorită faptului că puterea totală este împărțită pe un număr mai mare de faze are loc micșorarea curentului nominal pe faze fără majorarea tensiunii nominale de alimentare [2]. O altă caracteristică evaluată pozitiv este cantitatea mai mică de ondulații a cuplului [2]. Totodată un alt criteriu pozitiv este că utilizarea a mai multor faze face posibilă reducerea capacității condensatorului dc-link [3]. Cele mai apreciate avantaje a MMF în prezent provin din gradele lor de libertate suplimentare, degrees of freedom (DOFs), față de cele tradiționale trifazate [2], [4]. Diversitatea gradelor de libertate poate fi explorată pentru a obține alte scopuri cum ar fi: creșterea densității cuplului [5,6,7], estimarea parametrilor mașinii [8, 9], acționări multimotor [2,10], încărcătoare integrate de baterii [11, 12], sau pentru sporirea toleranței la erori [13-18]. Excitația statorului într-o mașină multifazată produce o forță magnetomotivă (FMM) îmbunătățită, rezultând armonici spațiale mai mici, ondulații mai mici ale cuplului și eficiență mai mare decât în cazul transmisiilor trifazate tradiționale.

Cel mai important și cel mai discutat avantaj a MMF îl constituie toleranța la erori a acestora, demonstrat prin volumul mare de literatură care abordează detectarea defecțiunilor și toleranța la erori în acționările multifazice [13-16]. Toleranța la erori a mașinilor multifazate crește odată cu creșterea numărului de faze independente și permite funcționarea mașinii în regim de defect a unei sau câtorva faze, ceea ce este imposibil în cazul unei mașini trifazate. Este știut faptul că mașina trifazată comparativ cu mașinile multifazate nu poate porni cu o fază defect fără dispozitive suplimentare și poate funcționa cu două faze sănătoase doar la un cuplu de sarcină redus și un interval de timp limitat. În cazul mașinii cu cinci și mai multe faze mașina va dezvolta un cuplu de pornire suficient de mare și va funcționa o perioadă îndelungată cu mici deprecieri ai parametrilor.

Totodată exemple industriale cu acționări multifazate sunt relativ puține, iar unitățile trifazate clasice continuă să domine datorită simplității și rentabilității lor.

Până în prezent un număr mare de lucrări științifice discută despre funcționarea mașinilor de curent alternativ multifazate, dar totodată există o lipsă de informație cuprinzătoare în ceea ce privește compararea parametrilor energetici și funcționarea în regim de defect a mașinilor multifazate și a mașinilor trifazate precum și testările acestor mașini în diverse regimuri de funcționare.

1 Clasificarea mașinilor multifazate

Mașinile multifazate se consideră mașinile cu un număr de faze mai mare decât 3. Până în prezent sunt articole în care sunt analizate mașini cu 5, 6, 7, 9, 11, 12, 15, 21 faze și mai mult. Dar un număr semnificativ de lucrări sunt dedicate motoarelor cu 5 faze 6 faze.

Există diferite tipuri de mașini electrice de curent alternativ multifazate disponibile, dar principalele tipuri de mașini care sunt utilizate în mod frecvent pentru aplicațiile de tracțiune ale vehiculelor electrice sunt mașinile cu inducție *induction machines* (IM) și mașinile sincrone cu magnet permanent *Permanent Magnet Synchronous Machines* (PMSM). Motorul cu inducție este utilizat mai frecvent în unitățile industriale, deoarece este un motor bine cunoscut, ieftin și nu necesită implementarea unui senzor de poziție care va mări prețul dispozitivelor de comandă și control. PMSM apare ca un candidat potrivit pentru a fi utilizat în aplicații auto datorită densității sale de mare putere. Spre deosebire de motoarele cu inducție, nu este nevoie să se inducă curenți rotorului pentru a crea câmpul magnetic al rotorului; Astfel, se pot atinge niveluri mai ridicate de eficiență. În plus, PMSM-urile oferă strategii ușoare de control.

Sunt bine cunoscute avantajele motoarelor multifazate față de cele trifazate tradiționale cum ar fi: mai puțin curent sau tensiune pe fază, excitația statorului într-o mașină multifazată produce o forță magnetomotivă îmbunătățită (MMF), rezultând armonici spațiale mai mici, ondulații mai mici ale cuplului și eficiență mai mare decât în cazul transmisiilor trifazate, astfel de excitație produce cupluri pulsatorii la multipli pari ai frecvenței fundamentale de excitație, utilizarea MPD-urilor reduce armonicile dc-link, scade capacitatea necesară dc-link, îmbunătățește funcționarea tolerantă la erori, deoarece gradele de libertate cresc odată cu creșterea numărului de faze independente.

Cu alte cuvinte, dacă o fază a unei mașini trifazate devine cu circuit deschis, mașina devine bifazică. Acesta poate continua să funcționeze, dar necesită anumite mijloace externe pentru pornire și trebuie să fie operat într-un mod foarte reglementat. Pentru a ilustra, dacă o fază a unei mașini cu 15 faze devine cu circuit deschis, aceasta va porni în continuare și va funcționa doar cu o declasificare minimă. Aceste caracteristici ale MMF-urilor sunt deosebit de importante pentru aplicațiile vehicule electrice EV.

Dezavantaj: În ciuda atenției crescânde acordate avantajelor MMF-urilor în lucrările academice publicate, exemplele industriale sunt încă relativ limitate, iar unitățile clasice trifazate continuă să domine industria de acționare a motoarelor datorită simplității și rentabilității lor.

Foarte puține lucrări din mulțimea de lucrări existente pe domeniul mașinilor multifazate sunt cu confirmări experimentale care ar aduce dovezi și rezultate concrete referitor la aceste unități.

Pentru cercetare și confirmarea avantajelor nenumărate mai sus a fost rebobinate câteva mostre experimentale și creat un stand de cercetare.

2 Descrierea instalației de testare

Instalația experimentală de testare este un stand clasic Fig. 1. cu un dispozitiv de fixare a motorului testat, dispozitive de cuplare cu generatorul de curent continuu cu sarcină reglabilă, dispozitiv pentru măsurarea cuplului și a vitezei de rotație a arborelui, instrumente pentru măsurarea și înregistrarea tensiunilor, curenților și puterii pe fază. Termocuplurile sunt implementate pentru a măsura temperatura în cele mai fierbinți zone ale motorului.

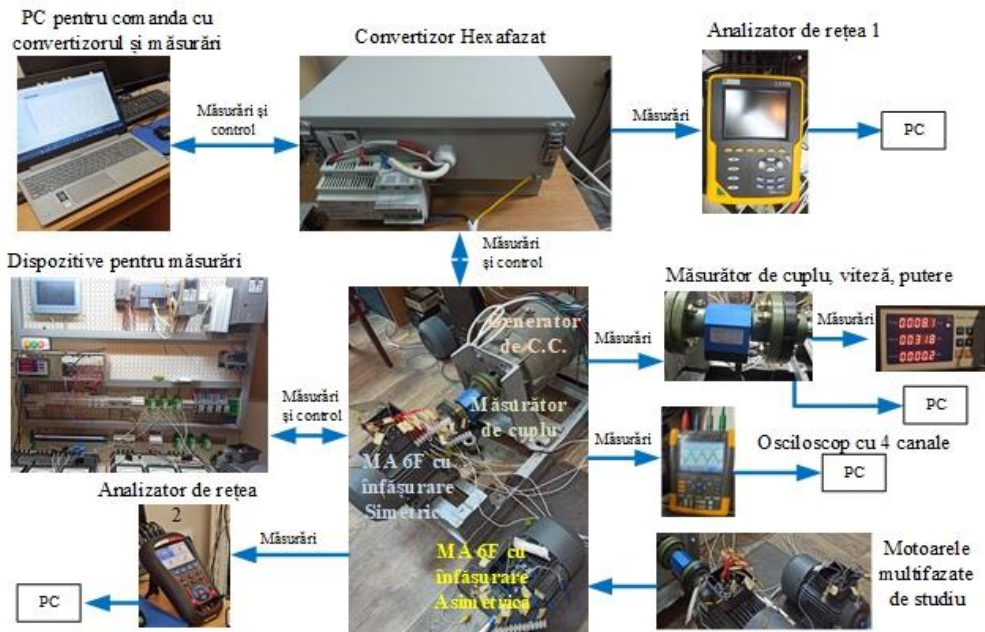


Figura 1. Instalația de testare

Pentru studiul experimental au fost realizate două motoare asincrone identice cu aceiași parametri și date nominale $P_n=0,75$ [kW], $2p=6$, $n_N=930$ [rpm], $M_N=8$ [Nm], dar cu o configurație diferită de înfășurare a statorului: primul MA 6F- SIM- un motor asincron cu șase faze cu înfășurare simetrică, al doilea MA 6F-ASIM- un motor asincron cu șase faze cu înfășurare asimetrică. Înfășurarea simetrică este aranjată în două straturi cu $q = 2$, iar cel asimetric - într-un strat cu $q = 1$. Decalajul dintre sisteme în primul caz este de 60 de grade electrice, iar în al doilea - 30 de grade electrice Fig. 2a și 2b. Ambele înfășurări au pasul polar $y = \tau$.

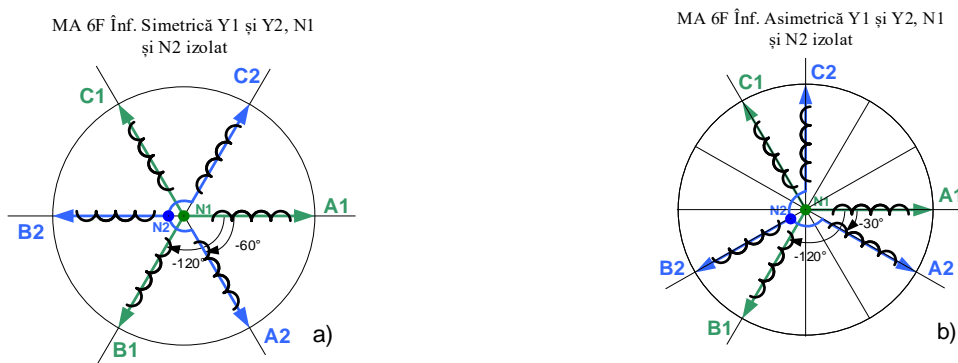


Figura 2. Prezentarea schematică a înfășurării statorului mașinii asincrone cu șase faze simetrice (a), asimetrice (b). Liniile săgeată indică axele magnetice ale înfășurărilor de fază

Ca sursă de alimentare au fost utilizate: - sisteme de auto-transformatoare cu diferite grupe de timp de conectare pentru a obține schimbarea de fază de 60 și, respectiv, 30 de grade, prescrise pentru motoare cu înfășurări simetrice (MA6F-SIM) sau asimetrice (MA6F-ASIM); - convertizor de frecvență trifazat standard (tip PI9000) și un convertizor de frecvență hexafazat fabricat în cadrul unui proiect de cercetare menționat în lucrare. În cazul alimentării motorului hexafazat de la o sursă trifazată sinusoidală sau de la un convertor de frecvență trifazat steaua Y2 a motorului cu înfășurarea simetrică a fost inversată (refăcută la grupul de conectare 6) - cu noduri de alimentare: A1-Y2; B1-Z2, C1-X2 și nodul comun X1-Y1-Z1-A2-B2-C2.

3 Metodologia cercetărilor

Înfășurările motorului cu șase faze formează două seturi trifazate identice (stele) cu înfășurările de fază deplasate la 120° în interiorul fiecărei stele și la 60° între stele (figura 2. a.). A treia mașină este un motor asincron trifazat standard cu aceiași parametri, denumit în continuare MA3F.

FMM sau (magnetomotive force MMF) a mașinii hexafazate cu înfășurarea simetrică

În aceste condiții, (în baza relațiilor) solenațiile, create de înfășurările de fază A1, B1, C1 (consecutivitate directă a fazelor) vor fi:

$$F_{A1} = F_{mA1} \sin(\omega t + 0) \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x + 0\right) = 0,5 F_{mA1} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x\right) \right] = F'_{A1} + F''_{A1} \quad (1)$$

$$F_{B1} = F_{mB1} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\frac{\pi x}{\tau} - \frac{2\pi}{3}\right) = 0,5 F_{mB1} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{4\pi}{3}\right) \right] = F'_{B1} + F''_{B1} \quad (2)$$

$$F_{C1} = F_{mC1} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cos\left(\frac{\pi x}{\tau} - \frac{4\pi}{3}\right) = 0,5 F_{mC1} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{2\pi}{3}\right) \right] = F'_{C1} + F''_{C1} \quad (3)$$

Dacă înfășurarea mașinii este simetrică atunci fazele A2, B2, C2 au un decalaj de $\lambda=60$ grade electrice și un defazaj $\phi=60$ grade temporale față de fazele respective A1, B1, C1. Deci:

$$F_{A2} = F_{mA2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right) \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{\pi}{3}\right) = 0,5 F_{mA2} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{2\pi}{3}\right) \right] = F'_{A2} + F''_{A2} \quad (4)$$

$$F_{B2} = F_{mB2} \sin\left(\omega t - \frac{3\pi}{3}\right) \cos\left(\frac{\pi x}{\tau} - \frac{3\pi}{3}\right) = 0,5 F_{mB2} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x - 2\pi\right) \right] = 0,5 F_{mB2} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x\right) \right] = F'_{B2} + F''_{B2} \quad (5)$$

$$F_{C2} = F_{mC2} \sin\left(\omega t - \frac{5\pi}{3}\right) \cos\left(\frac{\pi x}{\tau} - \frac{5\pi}{3}\right) = 0,5 F_{mC2} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{10\pi}{3}\right) \right] = 0,5 F_{mC2} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{4\pi}{3}\right) \right] = F'_{C2} + F''_{C2} \quad (6)$$

Solenația rezultantă în întrefierul mașinii se constituie din suma FMM create de șase înfășurări de fază. Dacă

$$F_{mA1} = F_{mB1} = F_{mC1} = F_{mA2} = F_{mB2} = F_{mC2} = F_{mf}, \quad (7)$$

atunci rezultă următoarele relațiile pentru unda directă și cea indirectă:

$$F'_s = F'_{A1} + F'_{B1} + F'_{C1} + F'_{A2} + F'_{B2} + F'_{C2} = 6 \cdot 0,5 F_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) \quad (8)$$

Unde: $F_{mf} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_f W_f k_w$ - valoarea medie a solenației de fază, I_f - valoarea efectivă a curentului de fază, W_f - numărul de spire în înfășurarea de fază, k_w factorul de înfășurare.

$$F''_s = F''_{A1} + F''_{B1} + F''_{C1} + F''_{A2} + F''_{B2} + F''_{C2} = 0,5 F_m \left[\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{4\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - 0\right) + \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{4\pi}{3}\right) \right] = 0 \quad (9)$$

Astfel, solenația în întrefierul unei mașini hexafazate cu înfășurarea simetrică se reprezintă doar cu o undă învârtitoare cu amplitudinea constantă F_{mf}

Generalizând cazurile particulare examinate, se poate constata că un sistem de înfășurări hexafazat (simetric sau asimetric) creează în întrefierul mașinii solenație a cărei armonică fundamentală reprezintă o undă care se învâртеște cu viteza unghiulară sincronă ($\Omega_0 = 2\pi \frac{f}{p}$), are amplitudinea constantă (în timp) și se descrie matematic cu relația (8).

Tabelul 1

Modificarea curenților de fază în regim post-defect la căderea unei faze

Curenți	I _{A1}	I _{B1}	I _{C1}	I _{A2}	I _{B2}	I _{C2}	Suma I
6F	0.65	0.65	0.6	0.65	0.65	0.62	3.82
5F (test)	0	0.625	0.65	0.7	1.3	0.61	3.885
5F (calcul)	0	0.63	0.63	0.64	1.28	0.64	3.82

Relațiile (8) și (9) sunt valabile doar pentru armonica fundamentală, pentru armonicile superioare ale FMM vor fi alte relații. Rezultatele calculului și măsurărilor efectuate pentru diferite cazuri cu defect de tip rupere de fază sunt introduse în Tab. 1 și Tab. 2

Tabelul 2

Date calculate pentru caracteristica mecanică a motorului hexafazat cu înfășurare simetrică cu nul comun în regimuri de funcționare cu faze defectate

ALUNECAREA		Viteza	6 Faze	5 Faze	4 Faze, rupturi necoaxiale	4 Faze, rupturi coaxiale	3 Faze, rupturi o stea
s	1-s	n2	M	M	M	M	M
		rpm	Nm	Nm	Nm	Nm	Nm
0	1	1000	0,799	0,42	0,505	-4,679	0,266
0,01	0,99	990	1,71	1,01	1,07	-3,94	0,665
0,02	0,98	980	3,45	2,42	2,16	-2,88	1,43
0,03	0,97	970	5,07	3,73	3,18	-1,89	2,15
0,04	0,96	960	6,58	4,94	4,13	-0,963	2,82
0,05	0,95	950	7,97	6,07	5,01	-0,109	3,45
0,06	0,94	940	9,25	7,095	5,825	0,676	4,024
0,07	0,93	930	10,42	8,04	6,57	1,396	4,56
0,08	0,92	920	11,48	8,89	7,25	2,05	5,05
0,09	0,91	910	12,45	9,66	7,88	2,65	5,5
0,1	0,9	900	13,32	10,36	8,44	3,18	5,9
0,2	0,8	800	18,08	14,02	11,57	6,027	8,21
0,3	0,7	700	18,66	14,21	12,01	6,14	8,57
0,4	0,6	600	17,64	13	11,4	5,15	8,14
0,5	0,5	500	16,08	11,247	10,42	3,7001	7,41
0,99	0,01	10	12,01	9,881	7,803	0,05	5,61
1	0	0	11,92	9,82	7,745	-0,05	5,58

Diagramele momentane a curenților din fazele motorului sunt reprezentate în Fig. 4.

Caracteristicile mecanice comparative calculate pentru motorul asincron hexafazat cu înfășurare simetrică pentru diverse tipuri de rupturi sunt reprezentate în Fig. 5.

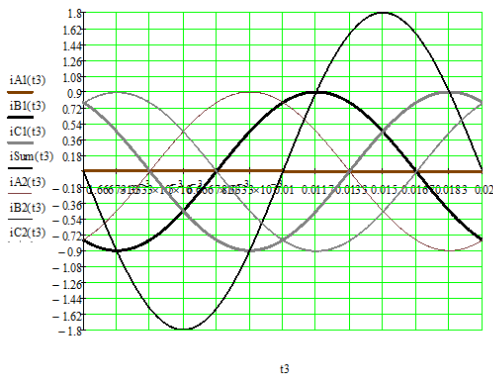


Figura 4. Diagrama momentană a curenților pentru motorul MA6F simetric, funcționare 5F, ruperea fazei A1, cu nulul comun (N1 conectat cu N2)

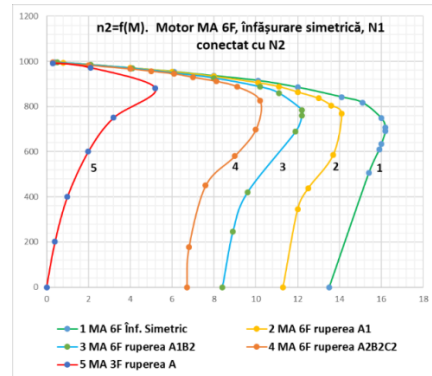


Figura 5. Caracteristicile mecanice măsurate și calculate pentru motorul asincron hexafazat cu înfășurare simetrică MA 6F SIM pentru diverse tipuri de rupături

Concluzii:

- În cadrul studiului privind modul de tratare a nulului seturilor componente trifazate: N1, N2 s-a constatat: În regim de șase faze atât caracteristicile mecanice cât și cele energetice sunt practic identice.
- Repartizarea sarcinii între faze este mai uniformă în cazul nulurilor izolate. Repartizarea cuplului de-a lungul întrefierului va fi mai uniformă, ceea ce duce la reducerea armonicilor generatoare de vibrații și zgomot;
- Mașina hexafazată simetrică cu un nul comun are o toleranță sporită la defecțiuni care se manifestă prin asigurarea cuplurilor de pornire și de funcționare cu sarcină la căderea până la trei faze în orice consecutivitate
- În cazul ruperii a două faze din stele diferite ce se află pe aceeași axă (rupere coaxială), cu nulurile separate toleranța la erori este mai bună decât la mașina trifazată dar mai rea decât în cazul funcționării cu nulurile comune.
- La ruperea a două faze coaxiale caracteristicile sunt asemănătoare cu cele a motorului trifazat cu o fază ruptă. Nu se creează cuplu de pornire și motorul nu va porni fără dispozitive suplimentare. Motorul poate funcționa în acest regim un interval scurt de timp sau cu un cuplu de sarcină redus.
- La ruperea unei faze crește curentul aproximativ de două ori în faza sănătoasă poziționată pe aceeași axă, în cazul funcționării cu nul comun.
- Se observă o creștere a sumei curenților de fază la aceeași sarcină la arbore, iar în unele faze la apariția defecțiunilor curentul sporește mai mult decât dublu, apar pierderi sporite care limitează cu mult durata admisă a timpului de funcționare în acest regim.

Referințe

- [1] Levi, E.; Bojoi, R.; Profumo, F.; Toliyat, H.A.; Williamson, S. Multiphase induction motor drives—A technology status review. *IET Electric Power Appl.* 2007, *1*, 489–516. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
- [2] Levi, E. Multiphase electric machines for variable-speed applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008, *55*, 1893–1909. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [3] Tahaa, W.; Azerb, P.; Callegaro, A.D.; Emadi, A. Multiphase traction inverters: State-of-the-art review and future trends. *IEEE Access* 2022, *10*, 4580–4599. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

- [4] Levi, E. Advances in converter control and innovative exploitation of additional degrees of freedom for multiphase machines. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2016, 63, 433–448. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
- [5] Abdel-Khalik, A.S.; Masoud, M.I.; Ahmed, S.; Massoud, A.M. Effect of current harmonic injection on constant rotor volume multiphase induction machine stators: A comparative study. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2012, 48, 2002–2013. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [6] Abdel-Khalik, A.S.; Masoud, M.I.; Williams, B.W. Improved flux pattern with third harmonic injection for multiphase induction machines. *IEEE Trans. Power Electron.* 2012, 27, 1563–1578. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [7] Mengoni, M.; Zarri, L.; Tani, A.; Parsa, L.; Serra, G.; Casadei, D. High-torque-density control of multiphase induction motor drives operating over a wide speed range. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2015, 62, 814–825. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [8] Yepes, A.G.; Riveros, J.A.; Doval-Gandoy, J.; Barrero, F.; Lopez, O.; Bogado, B.; Jones, M.; Levi, E. Parameter identification of multiphase induction machines with distributed windings—Part 1: Sinusoidal excitation methods. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2012, 27, 1056–1066. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [9] TODOS P., NUCA I., TERTEA G., CAZAC V., "Identification of Parameters and Power Losses of Six-Phase Asynchronous Machines by Induction Regenerative Method," 2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania, 2023, pp. 1-6, DOI: [10.1109/MPS58874.2023.10187447](https://doi.org/10.1109/MPS58874.2023.10187447)
- [10] Liu, Z.; Li, Y.; Zheng, Z. A review of drive techniques for multiphase machines. *CES Trans. Electr. Mach. Syst.* 2018, 2, 243–251. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [11] Subotic, I.; Bodo, N.; Levi, E.; Dumnic, B.; Milicevic, D.; Katic, V. Overview of fast on-board integrated battery chargers for electric vehicles based on multiphase machines and power electronics. *IET Electr. Power Appl.* 2016, 10, 217–229. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [12] Subotic, I.; Bodo, N.; Levi, E.; Jones, M.; Levi, V. Isolated chargers for EVs incorporating six-phase machines. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2016, 63, 653–664. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Green Version](#)]
- [13] Yao, G.; Pang, S.; Ying, T.; Benbouzid, M.; Ait-Ahmed, M.; Benkhoris, M.F. VPSO-SVM-based open-circuit faults diagnosis of five-phase marine current generator sets. *Energies* 2020, 13, 6004. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [14] Wang, X.; Wang, Z.; Xu, Z.; Cheng, M.; Wang, W.; Hu, Y. Comprehensive diagnosis and tolerance strategies for electrical faults and sensor faults in dual three-phase PMSM drives. *IEEE Trans. Power Electron.* 2019, 34, 6669–6684. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [15] Farag, K.; Shawier, A.; Abdel-Khalik, A.S.; Ahmed, M.M.; Ahmed, S. Applicability analysis of indices-based fault detection technique of six-phase induction motor. *Energies* 2021, 14, 5905. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [16] TODOS Petru, TERTEA Ghenadie, NUCĂ Ilie, CAZAC Vadim, BURDUNIC Marcel. Acceptance Testing of the Six-Phase Asynchronous Machines. Published in: [2021 International Conference on Electromechanical and Energy Systems \(SIELMEN\)](#). Date of Conference: 06-08 October 2021. Date Added to IEEE Xplore: 17 November 2021: INSPEC Accession Number: 21438273. Conference Location: Iasi, Romania. ID 125 .DOI: [10.1109/SIELMEN53755.2021.9600412](https://doi.org/10.1109/SIELMEN53755.2021.9600412).
- [17] P. Todos, G. Terteia, I. Nuca and V. Cazac. "Test-Based Analysis of Fault Tolerance Capability of Six-Phase Asynchronous Motors", Published in: 14th International Conference and Exhibition on Electromechanical and Energy Systems, October 2023, DOI: [10.1109/SIELMEN59038.2023.10290801](https://doi.org/10.1109/SIELMEN59038.2023.10290801)