

doi:10.15199/48.2023.11.09

Analiza właściwości dwukanałowego trójfazowego silnika indukcyjnego z uwzględnieniem stanów pracy niesymetrycznej

Streszczenie. Artykuł porusza problematykę poprawy niezawodności pracy trójfazowego silnika indukcyjnego. Efekt ten uzyskano dzięki zastosowaniu trójfazowego silnika indukcyjnego przystosowanego do zasilania dwukanałowego (Dual Channel Induction Machine – DCIM). W przypadku maszyn elektrycznych niezawodność działania jest istotnym aspektem, który wpływa na bezpieczeństwo pracy pojazdu elektrycznego lub procesu produkcyjnego. Jedną z metod poprawienia niezawodności działania jest zastosowanie układów nadmiarowych (redundantnych). Zabieg ten polega na powieleniu pewnej części maszyny bądź układu elektrycznego, w celu zapewnienia ciągłości pracy podczas uszkodzenia. Zastosowanie podwójnego zasilania częściowo uodparnia DCIM na typowe przypadłości klasycznego rozwiązania trójfazowego. W pracy przedstawiono prototypową konstrukcję DCIM. Zamieszczono wyniki analizy numerycznej wybranych przypadków stanów pracy niesymetrycznej. Zostały one zweryfikowane laboratoryjnie.

Abstract. This article deals with the problem of improving the operational reliability of a three-phase induction machine. This effect was achieved thanks to the use of a Dual Channel induction Machine (DCIM). In the case of electric machines operational reliability is an important aspect that affects the safety of the electric vehicle or production process. One of the methods of improving operational reliability is the use of redundant systems. This procedure consists in duplicating a certain part of the machine or electrical in order to ensure continuity of operation during a failure. The use of a dual power supply partially immunizes DCIM to typical ailments of the classic three-phase solution. This paper presents a prototype DCIM structure. The results of numerical analysis of selected cases of asymmetric work states are presented. They have been laboratory verified (**Analysis of the properties of a dual-channel three-phase induction machine with regard state of unsymmetrical work**).

Słowa kluczowe: nadmiarowość; silnik indukcyjny; zasilania dwukanałowe; asymetria wewnętrzna.

Keywords: redundancy; induction machine; dual-channel supply; winding asymmetry.

Wstęp

Bezpieczeństwo i niezawodność działania maszyn elektrycznych jest ważnym elementem działania dzisiejszego przemysłu. Są to cechy szczególnie ważne w przypadku obszarów, w których awaria napędu może doprowadzić do narażenia zdrowia i życia człowieka. Dziedziny przemysłu, w których takie zagrożenia występują nazywamy systemami krytycznymi, a wykorzystywane w nich maszyny elektryczne, napędami krytycznymi.

Zwiększone zapotrzebowanie przemysłu na napędy krytyczne spowodowało rozwój tematyki maszyn odpornych na zakłócenia. Pierwsze propozycje takich maszyn zostały przedstawione w publikacjach [1,2,3]. Zapoczątkowały one okres duże popularności tej tematyki i prowadziły do wielu badań naukowych. Realizowane badania skupiały się w szczególności na trzech sposobach poprawy bezpieczeństwa: zwiększenie liczby faz zasilających [4], polepszeniu dokładności detekcji uszkodzeń [5], lub zastosowaniu elementów nadmiarowych [6-10] (tzw. redundantnych).

Redundancja maszyn elektrycznych polega na powieleniu pewnej części układu w celu zapewnienia bezpieczeństwa pracy. Powielony element układu pełni rolę części zapasowej, która przejmuje obowiązki części aktywnej w przypadku wystąpienia awarii. Redundancje układu maszynowego możemy podzielić ze względu na miejsce zastosowania na: redundancje obwodu zasilania i redundancje maszyny elektrycznej.

W przypadku maszyn indukcyjnych jednym ze sposobów wprowadzenia redundancji jest powielenie kanałów zasilających. Polega to na odpowiednim nawinięciu uzwojeń stojana, w taki sposób, żeby umożliwić pracę urządzenia podczas zasilania jednego z kanałów (praca jednokanałowa) lub przy jednoczesnej pracy obydwu kanałów (praca dwukanałowa). Zabieg ten umożliwia pracę maszyny w przypadku wystąpienia awarii jednego z kanałów zasilających.

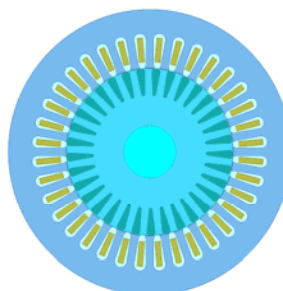
W artykule zostały zaprezentowane wyniki badań prototypowej konstrukcji dwukanałowej maszyny indukcyjnej (DCIM). W odróżnieniu od większości artykułów

naukowych opisujących dwukanałowe maszyny indukcyjne [11-15], w analizowanym przypadku nie zastosowano przesunięcia pomiędzy kanałami zasilającymi. Podczas wstępnych testów analizowano wybrane stany pracy DCIM tj. asymetrię wewnętrzną w jednym z uzwojeń kanału, utratę jednej fazy zasilającej, pracę przy zasilaniu jednokanałowym. Dla wybranych przypadków przeprowadzono obliczenia numeryczne oraz dokonano weryfikacji laboratoryjnej. Testy laboratoryjne potwierdziły wzrost odporności dwukanałowego silnika indukcyjnego na tolerancję wybranych przypadków stanów pracy awaryjnej.

Model maszyny

Rysunek 1 przedstawia geometrię i wykonany prototyp badanej maszyny indukcyjnej przystosowanej do zasilania dwukanałowego. Do jego wykonania został wykorzystany seryjnie produkowany silnik trójfazowy, w którym uzwojenia stojana zostały nawinięte tak, aby umożliwić pracę dwukanałową oraz badanie wpływu asymetrii uzwojeń jednego z kanałów. Założenia projektowe uwzględniały pracę maszyny przy prędkości równej 1465 obr/min oraz mocy 0,75 kW podczas ciągłej pracy jednokanałowej.

a)

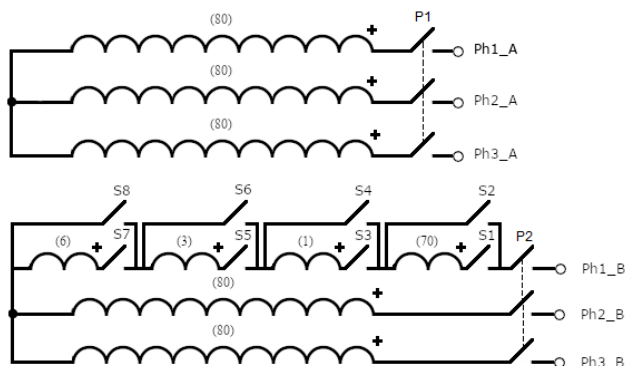


b)



Rys.1. Geometria (a) i prototypowa maszyna indukcyjna przystosowana do zasilania dwukanałowego (b)

Na rysunku 2 został przedstawiony schemat uzwojeń stojana. Składa się on z dwóch kanałów trójfazowych, w których każde z uzwojeń składa się z trzech zezwojów po 80 zwojów. Aby umożliwić badanie wpływu asymetrii uzwojeń na pracę silnika, jedno z uzwojeń umownego kanału B, zostało wykonane w sposób specjalny. Każdy zezwój jednej z faz uzwojenia jednego z kanałów został podzielony na dwie sekcje.



Rys.2. Schemat uzwojeń stojana silnika indukcyjnego przystosowanego do zasilania dwukanałowego

Początki i końce każdej z sekcji zostały wyprowadzone na zewnętrzną tablicę zaciskową. Umożliwia to wprowadzanie różnych kombinacji asymetrii wewnętrznej (AW) silnika. Przykładowe kombinacje połączeń uzwojeń stojana od AW0 do AW10 zostały zaprezentowane w tabeli 1.

Tabela 1. Przykładowe asymetrie uzwojenia stojana

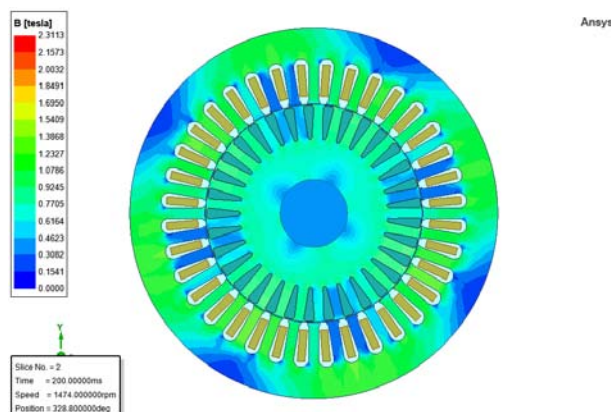
Stan pracy/stany kluczy	Kombinacje kluczy									
	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8	P 1	P 2
AW000	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0
AW00	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
AW0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1
AW1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1
AW4	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1
AW7	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1
AW9	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1
AW10	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1

W analizie zagadnienie ujęto jeszcze dwa dodatkowe przypadki tj. brak zasilania jednej z faz kanału B oznaczony jako AW00 oraz przypadek pracy jednokanałowej oznaczony jako AW000.

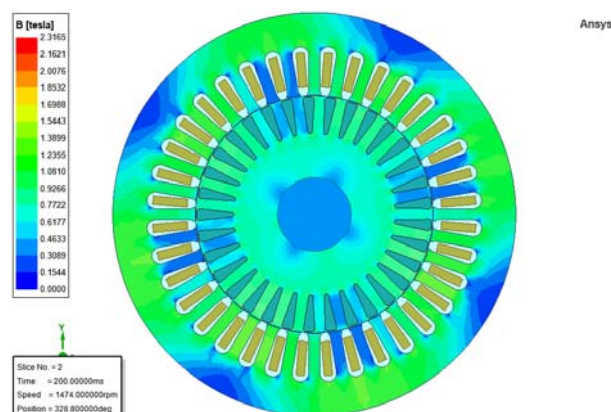
Badania numeryczne – gęstość strumienia magnetycznego

Model numeryczny dwukanałowego trójfazowego silnika indukcyjnego został zbudowany w komercyjnym programie do obliczeń metodą elementów skończonych. Testy numeryczne przeprowadzono w stanie ustalonym pracy przy prędkości 1474 obr/min. Odpowiada to warunkom zasilania dwukanałowego i mocy wyjściowej 0,75 kW. W testach numerycznych jako wymuszenie przyjęto układ dwóch niezależnych, trójfazowych napięć zasilających. Na rysunku 3-4 pokazano przykładowy rozkład gęstości strumienia dla przypadku AW0 (rys.3) i AW10 (rys.4).

Rozkład gęstości strumienia magnetycznego w stanie niesymetrii (AW10) nie wykazuje istotnych zmian. Jednak nawet niewielkie zmiany rozkładu pola magnetycznego mają wpływ na przebiegi czasowe prądów a w konsekwencji na wytwarzany moment elektromagnetyczny.



Rys.3. Rozkład gęstości strumienia magnetycznego dla przypadku AW0



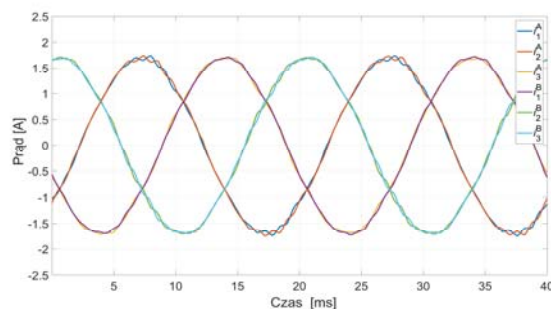
Rys.4. Rozkład gęstości strumienia magnetycznego dla przypadku AW10

Badania numeryczne – przebiegi czasowe prądów i momentu elektromagnetycznego

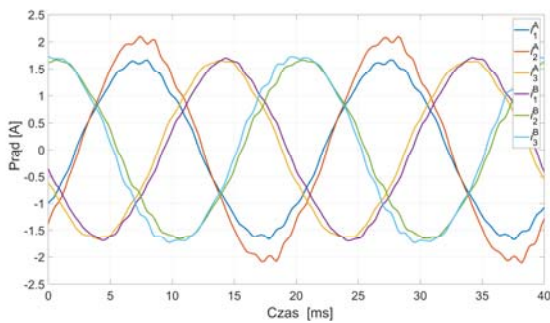
Przebiegi czasowe prądów obu kanałów silnika zostały wyznaczone w tych samych warunkach jak w poprzednim punkcie tj. przy prędkości 1474 obr/min. Jedynie dla pracy jednokanałowej wyznaczono nowy punkt pracy dla którego silnik wytwarza tą samą wartość momentu elektromagnetycznego. Na rysunkach 5-6 pokazano przebiegi czasowe prądów fazowych uzyskane dla wybranych przypadków AW0 (rys.5) i AW10 (rys.6).

Relatywnie nawet niewielka niesymetria wewnętrzna uzwojenia stojana wpływa na przebiegi czasowe prądów. W kanałach gdzie nastąpiła asymetria występuje wzrost wartości prądu (mniejsza impedancja). Dodatkowo powoduje to zmianę przesunięcia fazowego pomiędzy kanałami.

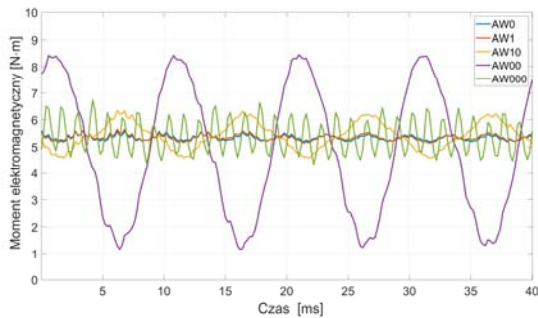
Przebieg momentu elektromagnetycznego uzyskanego w analizowanych warunkach pracy silnika pokazano na rysunku 7. Dodatkowo zamieszczono przypadki AW1, AW00 i AW000.



Rys.5. Przebiegi czasowe prądów fazowych dla przypadku AW0



Rys.6. Przebiegi czasowe prądów fazowych dla przypadku AW10



Rys.7. Przebiegi czasowe momentu elektromagnetycznego dla przypadków AW0, AW1, AW10, AW00, AW000

Asymetria wewnętrzna jednego z uzwojeń fazowych kanału silnika wpływa na wzrost tętnień wytwarzanego momentu elektromagnetycznego. Jej negatywne skutki minimalizuje drugi sprawny kanał silnika. W przypadku wystąpienia braku zasilania jednej z faz kanału B (AW00) początkowe skutki tego stanu pracy minimalizuje sprawny kanał A silnika. Silnik może kontynuować pracę w takim stanie pracy, ale objawia się on istotnie zwiększonymi tętnieniami momentu elektromagnetycznego bez istotnego wzrostu obciążenia termicznego pozostałych uzwojeń.

W tabeli 2 zestawiono wybrane wyniki obliczeń numerycznych dla analizowanych przypadków asymetrii wewnętrznej dwukanałowego trójfazowego silnika indukcyjnego.

Tabela 2. Wybrane wyniki obliczeń numerycznych analizowanych stanów pracy asynchronicznej

Parametr/Awaria	AW0	AW1	AW10	AW00	AW000
T_{eav} [N·m]	5,35	5,35	5,42	4,87	5,35
T_{emax} [N·m]	5,63	5,67	6,34	8,44	6,74
T_{emin} [N·m]	5,19	5,13	4,57	1,16	4,34
I_1^A [A]	1,20	1,19	1,15	1,47	-
I_2^A [A]	1,20	1,20	1,17	1,67	-
I_3^A [A]	1,20	1,20	1,17	1,51	-
I_1^B [A]	1,20	1,23	1,44	-	2,45
I_2^B [A]	1,20	1,20	1,16	1,31	2,45
I_3^B [A]	1,20	1,20	1,25	1,32	2,45

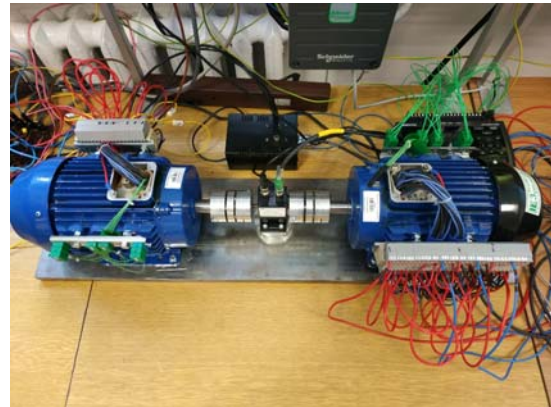
Jak można zauważyć niewielkie niesymetrie wewnętrzne, utrata zasilania jednej fazy kanału czy też utrata zasilania całego kanału pozwalają na dalszą pracę układu napędowego przy pogorszonych parametrach elektromagnetycznych silnika.

Stanowisko do badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne prototypowego dwukanałowego trójfazowego silnika indukcyjnego zostały przeprowadzone na stanowisku testowym pokazanym na rysunku 8.

Stanowisko składa się z dwóch maszyn tj. badanej maszyny DCIM oraz generatora z magnesami trwałymi. Do pomiaru momentu obciążenia zastosowano momentomierz.

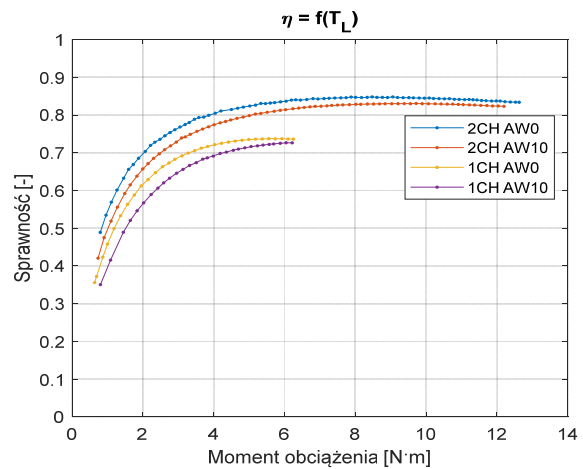
Pomiary parametrów elektrycznych obu kanałów tj. napięć i prądów oraz mechanicznych tj. momentu obciążenia oraz prędkości obrotowej rejestrowano sześciokanałowym analizatorem mocy, wyposażonym w moduł silnikowy.



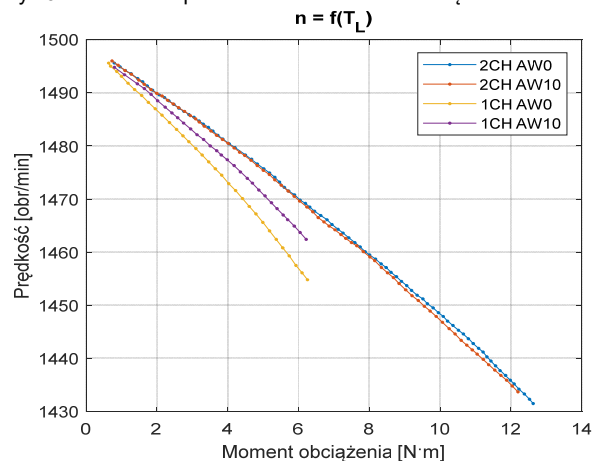
Rys.8. Stanowisko badawcze

Charakterystyki mechaniczne oraz sprawności

W celu wyznaczenia charakterystyk statycznych zostały zmierzone wartości prędkości, sprawności i momentu obciążenia. Badania zostały przeprowadzone w dwóch stanach pracy, jednokanałowej (1CH) i dwukanałowej (2CH), w których rozpatrzone zostały dwa skrajne przypadki asymetrii wewnętrznej, symetria (AW0) i utrata 10 zwojów (AW10). Uzyskane wyniki pomiarów zostały wykreślone na charakterystykach sprawności (rys.9.) i mechanicznych (rys.10.).

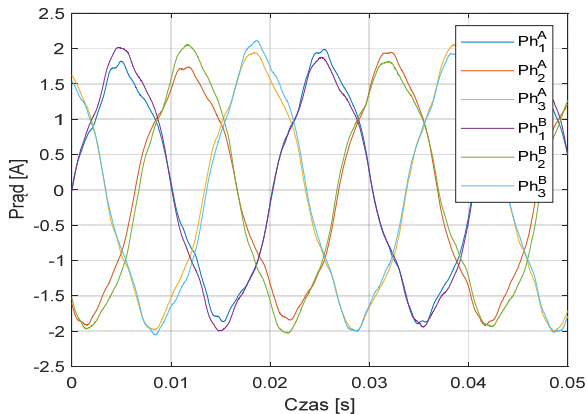


Rys.9. Zależność sprawności od momentu obciążenia

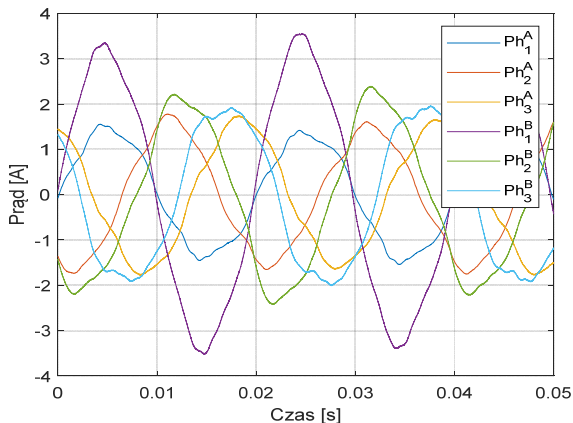


Rys.10. Charakterystyka mechaniczna

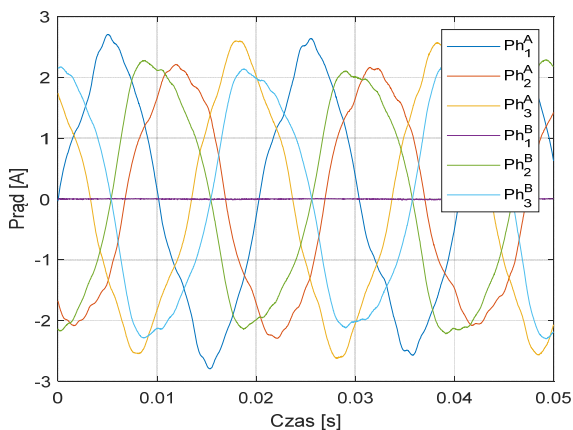
Na wyznaczonych charakterystykach możemy zaobserwować różnicę pomiędzy pracą układu w stanie pracy jednokanałowej i dwukanałowej oraz wpływ wzrostu asymetrii na parametr sprawności i prędkości obrotowej. Wprowadzona asymetria działa negatywnie na pracę maszyny z uwagi na pojawienie się składowej przeciwnej pola wirującego. Powoduje to zmniejszenie wytwarzanego momentu elektromagnetycznego a w konsekwencji zmniejszenie sprawności silnika. Niewielka niesymetria jest lepiej tolerowana w układzie zasilania dwukanałowego niż jednokanałowego. W przypadku wystąpienia stanu pracy niesymetrycznej w jednym z kanałów z punktu widzenia samej sprawności przetwarzania energii korzystniejsza jest praca przy zasilaniu dwukanałowym niż przejście na pracę jednokanałową z brakiem uszkodzenia.



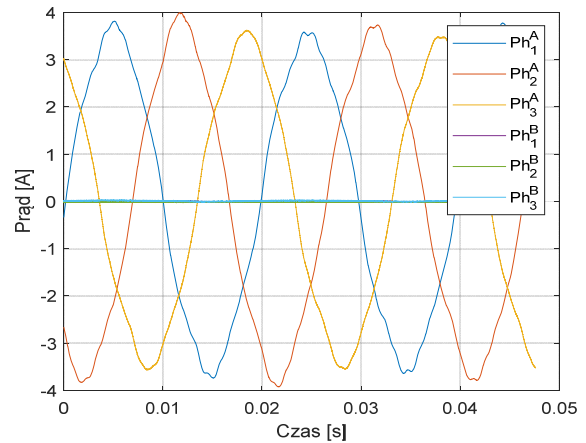
Rys. 11. Przebiegi prądów fazowych podczas symetrii (2CH AW0)



Rys. 12. Przebiegi prądów fazowych podczas asymetrii 10 zwojów (2CH AW10)



Rys. 13. Przebiegi prądów fazowych podczas braku zasilania jednej z faz kanału B (2CH AW00)



Rys. 14. Przebiegi prądów fazowych podczas pracy jednokanałowej (AW000)

Przebiegi czasowe prądów kanałowych stojana

Zaprezentowane przebiegi czasowe przedstawiają fazowe prądy kanału A (PhA1, PhA2, PhA3) i kanału B (PhB1, PhB2, PhB3), podczas pracy układu w konfiguracji: AW0 (rys.11.), AW10 (rys.12.), AW00 (rys.13.) oraz AW000 (rys.14.). Przebiegi zostały wykonane przy obciążeniu układu momentem równym 5 N·m.

Analizując przebiegi czasowe można zauważyć, że w układzie rzeczywistym nawet w przypadku zakładanej symetrii wewnętrznej silnika i tak występują różnice w przebiegach czasowych prądów fazowych poszczególnych kanałów (rys.11) czy też pracy tylko jednego kanału (rys.14). Jest to częściowo spowodowane wprowadzeniem podziału zezwojów w jednej z faz kanału. To powoduje, że w przypadku stosowania systemu do diagnostyki pracy układu przystosowanego do zasilania wielokanałowego należy uwzględnić istnienie różnic pomiędzy oboma kanałami silnika. W przypadku AA10 (rys.13) uzyskane przebiegi czasowe prądów pokazują, że w warunkach rzeczywistych wprowadzenie kontrolowanej asymetrii powoduje znacznie większy niż uzyskano to w warunkach numerycznych (rys.6). W warunkach numerycznych w kanale z barkiem niesymetrii praktycznie nie zaobserwowano większych różnic w przebiegach czasowych prądów fazowych. W badaniach laboratoryjnych stwierdzono, że asymetria wewnętrzna jednego z kanałów wpływa w większym stopniu na przebiegi czasowe prądów drugiego kanału. Pomimo tego podwyższonego wpływu taki rodzaj asymetrii wewnątrz jednego kanału nie niesie za sobą szczególnie negatywnych skutków na pracę dwukanałową (istotny wzrost drgań czy też wzrost temperatury w kanale z asymetrią).

Wnioski

W pracy zaprezentowano wyniki badań prototypowego trójfazowego silnika indukcyjnego przystosowanego do zasilania dwukanałowego. Zaprojektowana dwukanałowa konstrukcja trójfazowego silnika indukcyjnego umożliwia realizację testów wybranych stanów pracy awaryjnej. W pracy przeprowadzono analizę wpływu asymetrii wewnętrznej na pracę układu. Wystąpienie stanu pracy asymetrycznej ma różne przyczyny, ale efektem tego jest wzrost obciążeń termicznych wybranych uzwojeń szczególnie uszkodzonego kanału oraz utrata wytworzonego momentu elektromagnetycznego ze wzrostem jego tętnień. Niekoniecznie jednak stan awaryjny powoduje skutki termiczne, jednak może skutkować istotnym wzrostem generowanych drgań. Dla minimalizacji problemu uszkodzony kanał należy odłączyć i kontynuować

pracę przy zasilaniu jednocanalowym (AW000). Następuje wówczas utrata sprawności przetwarzania energii, ale poziom generowanych drgań ulega istotnemu ograniczeniu. Nie rejestrowano poziomu generowanych drgań, ale subiektywnie w trakcie badań laboratoryjnych takie odniesiono wrażenie. Ma to uzasadnienie w postaci eliminacji składowej przeciwnej pola wirującego poprzez wyłączenie uszkodzonego kanału. Problematyka diagnostyki detekcji uszkodzeń systemu wielokanalowej maszyny indukcyjnej czy też efekty zwarć zwojowych będą tematem dalszych badań.

Dziękuję Panu Profesorowi Mariuszowi Korzkowski za udzielone pomocy podczas tworzenia powyższego artykułu.

Finansowanie: Projekt finansowany w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019 – 2023 nr projektu 027/RID/2018/19 kwota finansowania 11 999 900 zł.

Artykuł jest publikacją pokonferencyjną Selected Issues in Power Engineering, Electrical Engineering and Industry 4.0 – Conference 30 November, 2022 Rzeszów.

Autorzy: mgr inż. Mateusz Suliga, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, e-mail: m.suliga@prz.edu.pl

LITERATURA

- [1] Jahns T. M., "Improved Reliability in Solid-State AC Drives by Means of Multiple Independent Phase Drive Units," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-16, no. 3, pp. 321-331, May 1980, doi: 10.1109/TIA.1980.4503793.
- [2] Salmon J. C. and Williams B. W., "A split-wound induction motor design to improve the reliability of PWM inverter drives," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 26, no. 1, pp. 143-150, Jan.-Feb. 1990, doi: 10.1109/28.52686.
- [3] Mecrow B. C., Jack A. G., Haylock J. A. and Coles J., "Fault tolerant permanent magnet machine drives," 1995 Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 412), 1995, pp. 433-437, doi: 10.1049/cp:19950909.
- [4] Jack A. G., Mecrow B. C. and Haylock J. A., "A comparative study of permanent magnet and switched reluctance motors for high-performance fault-tolerant applications," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 4, pp. 889-895, July-Aug. 1996, doi: 10.1109/28.511646.
- [5] Kumar, R.R.; Andriollo, M.; Cirrincione, G.; Cirrincione, M.; Tortella, A. A Comprehensive Review of Conventional and Intelligence-Based Approaches for the Fault Diagnosis and Condition Monitoring of Induction Motors. *Energies* 2022, 15, 8938. <https://doi.org/10.3390/en15238938>
- [6] Bogusz P., Korzkosz M., Pakla B. and Prokop J., "Comparative Study of the Performance of Brushless DC Motor with Permanent Magnets Under Classic and Dual-Channel Operation," 2018 International Symposium on Electrical Machines (SME), 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISEM.2018.8442672.
- [7] Alberti L. and Bianchi N., "Impact of winding arrangement in dual 3-phase induction motor for fault tolerant applications," *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010*, Rome, Italy, 2010, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5607941.
- [8] Alberti L. and Bianchi N., "Experimental Tests of Dual Three-Phase Induction Motor Under Faulty Operating Condition," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 5, pp. 2041-2048, May 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2171175.
- [9] Ertugrul N., Soong W., Dostal G. and Saxon D., "Fault tolerant motor drive system with redundancy for critical applications," *2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No.02CH37289)*, Cairns, QLD, Australia, 2002, pp. 1457-1462 vol.3, doi: 10.1109/PSEC.2002.1022381.
- [10] Munoz A. R. and Lipo T. A., "Dual stator winding induction machine drive," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 5, pp. 1369-1379, Sept.-Oct. 2000, doi: 10.1109/28.871286.
- [11] Patkar F. and Jones M., "Performance of an asymmetrical six-phase induction machine in single-and two-neutral point configurations," 2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Dublin, Ireland, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC.2013.6715009.
- [12] Che H. S., Duran M. J., Levi E., Jones M., Hew W. -P. and Rahim N. A., "Postfault Operation of an Asymmetrical Six-Phase Induction Machine With Single and Two Isolated Neutral Points," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 10, pp. 5406-5416, Oct. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2293195.
- [13] Diab M. S., Elserougi A., Abdel-khalik A. S., Massoud A. M. and Ahmed S., "A reduced switch-count SEPIC-based inverter for asymmetrical dual three-phase induction machines," *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Yokohama, Japan, 2015, pp. 000990-000995, doi: 10.1109/IECON.2015.7392228.
- [14] Abdel-Khalik A. S., Hamdy R. A., Massoud A. M. and Ahmed S., "Postfault Control of Scalar (V/f) Controlled Asymmetrical Six-Phase Induction Machines," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 59211-59220, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2874133.
- [15] Accetta A., Luna M. and Pucci M., "Space-Vector Dynamic Model of Dual-Three Phase Induction Motors with Balanced and Unbalanced Structures in State Form," 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2022, pp. 1-8, doi: 10.1109/ECCE50734.2022.9948212.