

Marcin Wolkiewicz, Czesław T. Kowalski
Politechnika Wroclawska

NIEINWAZYJNE METODY WCZESNEGO WYKRYWANIA ZWARĆ ZWOJOWYCH W SILNIKU INDUKCYJNYM ZASILANYM Z PRZEMIENNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI, CZ. I

NON-INVASIVE EARLY DETECTION METHODS OF SHORTED TURNS IN CONVERTER-FED INDUCTION MOTOR, PART I

Abstract: This paper deals with the problem of the early stator faults (the short-circuits) detection and localization of the induction motors supplied from the frequency converter. A stator fault detection method based on monitoring of RMS stator current value, the phase shift between the line currents, the spectral analysis of the line current and negative current symmetrical component analysis are presented. Tests were realized for different load torque and supply frequencies, what enabled the evaluating of the usefulness of the proposed analysis in the diagnostics of the stator faults in the converter-fed induction motor drives.

1. Wstęp

Uszkodzenia uzwojeń stojana są jednym z najczęściej występujących uszkodzeń elektrycznych w silnikach indukcyjnych, stanowią one około 40% wszystkich uszkodzeń [1]. Związane są one zwykle z uszkodzeniem izolacji międzyzwojowej, międzyfazowej lub głównej, spowodowanej przez wpływ różnych czynników degradacji [2]-[4]. Uszkodzenia uzwojeń stojana zaczynają się jako niezauważalne zwarcie zwojowe, które w końcu rozprzestrzenia się na całe uzwojenie powodując zwarcie główne. Przyjmuje się, że zwarcia zwojowe są pierwotną przyczyną występowania innych rodzajów zwarć w uzwojeniach stojana. W większości przypadków ten typ uszkodzeń postępuje ze zwoju do zwoju, fazy do fazy lub fazy do ziemi powodując w konsekwencji trwałe uszkodzenia silnika.

Stosowane obecnie układy zabezpieczeń nie reagują na zwarcia małej liczby zwojów w uzwojeniu jednej fazy, gdyż powodują one zbyt małe zmiany ilościowe w prądach fazowych. Natomiast prąd powstający w zwartym obwodzie, o wartości niekiedy kilkadziesiąt razy większej od prądu znamionowego, powoduje szybki wzrost temperatury, zniszczenie izolacji i rozprzestrzenienie się efektów zwarcia na całe uzwojenie. Dlatego też, diagnozowanie tego typu uszkodzeń ma sens tylko w początkowej fazie powstawania uszkodzenia.

Obecnie w praktyce przemysłowej najczęściej stosuje się drogie metody diagnozowania oparte o badanie stanu izolacji uzwojeń stojana, które wymagają odłączenia maszyny od zasilania i

podłączenia do specjalnego źródła zasilania i aparatury pomiarowej [1]-[4]. Są to więc najczęściej metody diagnostyczne inwazyjne i nie nadają się do realizacji on-line. Jednocześnie trwają poszukiwania innych rozwiązań opartych o pomiar i cyfrowe przetwarzanie sygnałów diagnostycznych, pozwalające na prowadzenie monitorowania stanu maszyny na bieżąco i alarmowanie użytkownika w początkowej fazie powstawania zwarcia [5]. Zasilanie silników z przemienników częstotliwości wprowadziło dodatkowo szereg problemów eksploatacyjnych związanych z narażaniem izolacji uzwojeń na przebiecie ze względu na impulsowy charakter napięcia oraz trudności związane z monitorowaniem ze względu na odkształcenie sygnałów. Na podstawie [1]-[5] można zauważyć, że w badaniach naukowych i praktyce eksploatacyjnej napędów z silnikami indukcyjnymi stosuje się wiele metod monitorowania uzwojeń stojana, m.in. metody oparte o analizę częstotliwościową sygnałów, dostępnych bezpośrednio w maszynie elektrycznej, np.: prąd stojana, strumień magnetyczny, drgania mechaniczne lub sygnałów dostępnych po wstępnym przetwarzaniu (np. moc elektryczna, moment elektromagnetyczny).

W artykule przedstawiono analizę możliwości wykorzystania sygnału prądu fazowego stojana do wykrywania zwarć zwojowych we wstępnej fazie ich powstawania, przy zasilaniu silnika z przekształtnika częstotliwości. Uwaga została zwrócona na zmiany jakie powoduje zwarcie kilku zwojów uzwojenia w jednej fazie na prąd stojana, m.in. wartość skuteczną, przesunięcie

kątowe, oraz widmo częstotliwościowe. Przedstawiono również zastosowanie składowych symetrycznych prądu stojana do wykrywania zwarc

2. Metodyka badań eksperymentalnych

Badania laboratoryjne przeprowadzono na silniku indukcyjnym małej mocy typu STg 80x-4c (1.1kW, liczba zwojów w jednej fazie stojana $N_s=312$) zasilanego z przekształtnika częstotliwości w zakresie częstotliwości $f_s=10 \div 50\text{Hz}$, pracującego w układzie otwartym (sterowanie skalarnie). Przeprowadzono badania dla silnika obciążonego różnymi wartościami momentu obciążenia. W badanym silniku istniała możliwość modelowania zwarc zwojowych stojana w jednej fazie C. Badania eksperymentalne przeprowadzono tylko do 10 zwartych zwojów, czyli około 3% całego uzwojenia. Prąd zwarcowy nie był ograniczany dodatkową rezystancją. Do pomiarów i analizy prądów fazowych stojana wykorzystano komputer przemysłowy NI PXI 8186 z kartą pomiarową NI PXI – 4472.

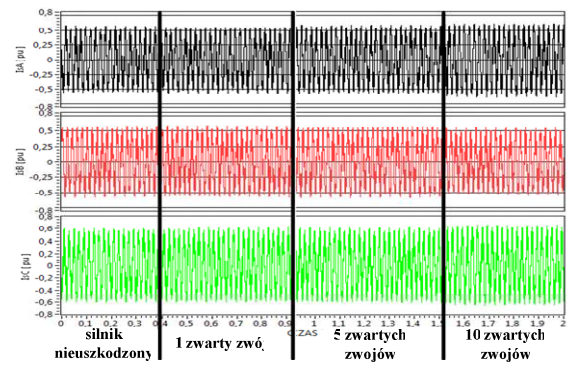
3. Nieinwazyjne metody monitorowania stanu uzwojeń

3.1. Analiza prądu fazowego stojana

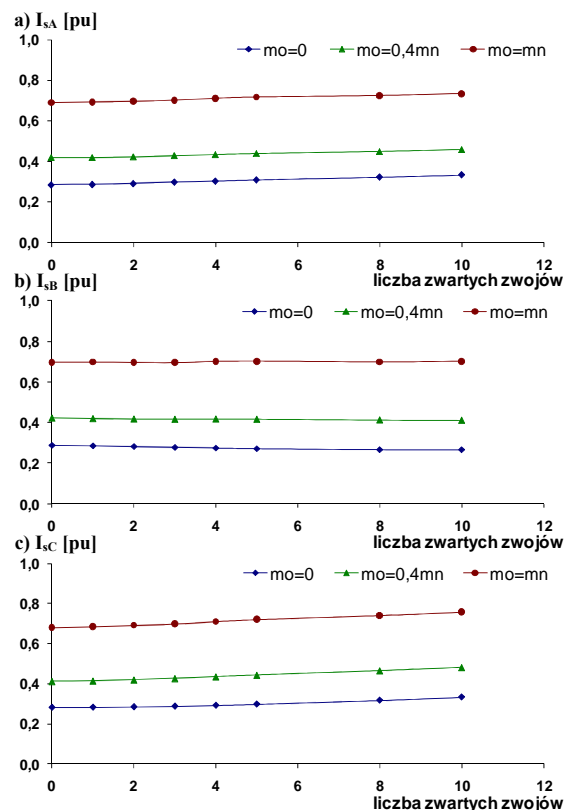
Ze względu na łatwy, tani i bezinwazyjny pomiar prąd fazowy stojana jest podstawowym sygnałem diagnostycznym. W przypadku diagnostyki uzwojeń stojana silnika indukcyjnego pomiar prądów fazowych nie jest wystarczający ze względu na zbyt małe zmiany ilościowe wartości skutecznej prądów fazowych jakie powodują zwarcia kilku zwojów w uzwojeniu stojana.

Na rys.1 przedstawiono przebiegi czasowe prądów fazowych stojana w poszczególnych fazach. Zauważalne zmiany w przebiegach czasowych prądów widoczne są dopiero przy zwarcu 10 zwojów w jednej fazie.

Rys.2 przedstawia zmiany wartości skutecznej prądów w poszczególnych fazach w zależności od liczby zwartych zwojów dla różnych wartości momentu obciążenia. Największe zmiany widoczne są w fazie C, w której modelowane są zwarcia zwojowe. Zwarcie 10 zwojów powoduje zmianę wartości skutecznej prądu w fazie C o około 15%, podczas gdy w obwodzie zwarcowym płynie prąd przekraczający dziesięciokrotną wartość prądu znamionowego silnika. Dodatkowo zmiany te są silnie zależne od obciążenia silnika. Wraz ze wzrostem obciążenia wzrasta wartość skuteczna prądów fazowych,



Rys.1. Przebiegi czasowe prądów fazowych stojana dla silnika nieobciążonego w przypadku braku uszkodzenia oraz 1, 5 i 10 zwartych zwojów.



Rys.2. Zależność wartości skutecznej prądów fazowych stojana od liczby zwartych zwojów dla różnych obciążeń silnika przy częstotliwości zasilania $f_s=50\text{Hz}$

natomiast zmniejsza się wpływ asymetrii spowodowanej zwarcem. Jak wykazano w [6],[7], oprócz zmian amplitudy prądów fazowych, zmianie ulegają również wartości przesunięć fazowych pomiędzy prądem a napięciem w każdej z faz. Zmiany te są na tyle istotne, że pozwalają nie tylko ocenić stopień uszkodzenia, ale również dostarczyć informację o miejscu jego wystąpienia. W przypadku pomiarów wyłącznie prądów fazowych stojana możliwe jest

wyznaczenie przesunięć kątowych pomiędzy prądami w poszczególnych fazach. Dla silnika symetrycznego i nieuszkodzonego przesunięcie kątowe pomiędzy prądami fazowymi jest równe 120° . Do celów diagnostyki zwarców zwojowych, zdefiniowano wielkość określającą stopień uszkodzenia uzwojenia stojana silnika indukcyjnego, oznaczoną w następujący sposób:

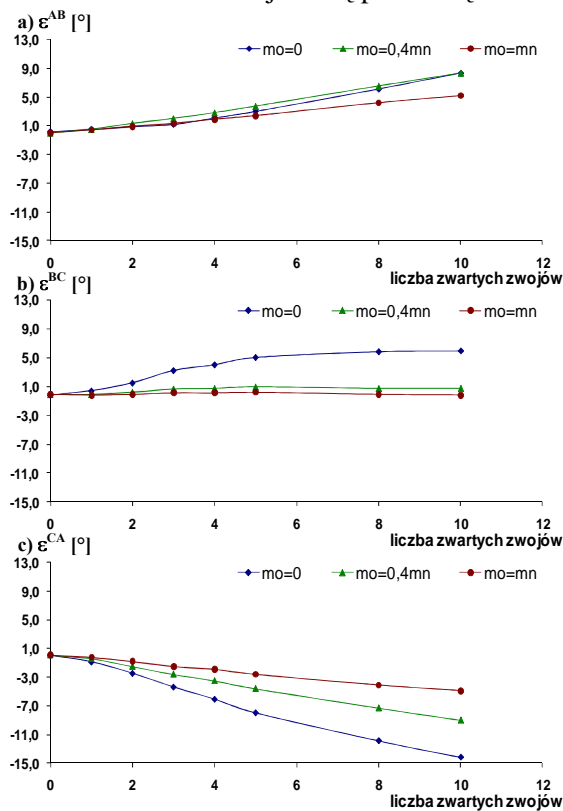
$$\varepsilon_i^{AB} = 120^\circ - \phi_i^{AB}, \quad \varepsilon_i^{BC} = 120^\circ - \phi_i^{BC}, \quad \varepsilon_i^{CA} = 120^\circ - \phi_i^{CA} \quad (1)$$

gdzie:

$i=0, 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10$ – liczba zwojów zwartych,

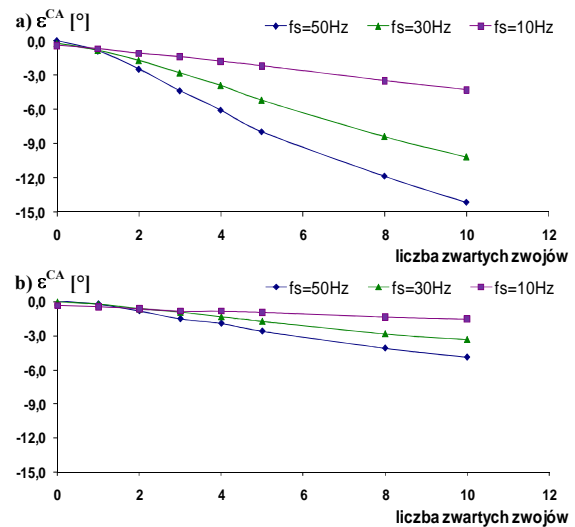
$\varepsilon^{AB}, \varepsilon^{BC}, \varepsilon^{CA}$ – zmiana przesunięcia kątowego pomiędzy poszczególnymi prądami fazowymi, $\phi^{AB}, \phi^{BC}, \phi^{CA}$ – przesunięcie kątowe pomiędzy poszczególnymi prądami fazowymi.

Zmiany przesunięcia kątowego przedstawiono na rys.3 (rys.3a pomiędzy fazami AB, rys.3b pomiędzy fazami BC, rys.3c pomiędzy fazami CA). Wraz ze zwiększaniem się stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana zmienia się przesunięcie kątowe między odpowiednimi fazami. Największa zmiana przesunięcia widoczna jest pomiędzy fazami CA. Wraz ze wzrostem stopnia uszkodzenia zmniejsza się przesunięcie



Rys.3. Zależność zmiany przesunięcia kątowego pomiędzy poszczególnymi fazami prądu stojana od liczby zwartych zwojów dla różnych wartości obciążenia silnika przy $f_s=50\text{Hz}$

kątowe pomiędzy fazami C i A nawet o 15° dla 10 zwartych zwojów (rys.3c), natomiast w pozostałych przypadkach zakres zmian jest dużo mniejszy (rys.3a i b). Charakter tych zmian umożliwia, oprócz badania stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana również dokładne określenie jego lokalizacji. Jednakże intensywność zmian maleje wraz ze wzrostem obciążenia silnika oraz przy zmniejszaniu częstotliwości zasilania. Rys.4 przedstawia zależność przesunięcia kątowego pomiędzy fazami C i A od liczby zwartych zwojów dla różnych wartości częstotliwości zasilania silnika w zakresie $f_s=10 \div 50\text{Hz}$.



Rys.4. Zależność zmiany przesunięcia kątowego pomiędzy fazami C i A prądu stojana od liczby zwartych zwojów dla różnych wartości częstotliwości zasilania silnika przy obciążeniu: a) $m_o=0$, b) $m_o=m_n$

Najczęściej spotykaną metodą wykorzystującą sygnały prądu fazowego stojana w diagnostyce silników indukcyjnych jest analiza widmowa prądu stojana, często określana skrótem MCSA (ang. *Motor Current Signature Analysis*) [3], [8]. W MCSA poszukuje się charakterystycznych częstotliwości, które są symptomami uszkodzenia, a wartość amplitudy tych harmonicznych są cechami służącymi do oceny stopnia uszkodzenia. Problem ten w przypadku napędów przekształtnikowych jest dodatkowo utrudniony ze względu na odkształcenie sygnałów prądów oraz zmienne warunki pracy (regulowana częstotliwość i amplituda napięcia zasilającego). W [8], [9] do monitorowania stanu uzwojeń stojana zaproponowano analizę amplitudy częstotliwości $3f_s$ oraz innych harmonicznych w zakresie niskich (2) oraz średnich (3) częstotliwości obliczanych według zależności:

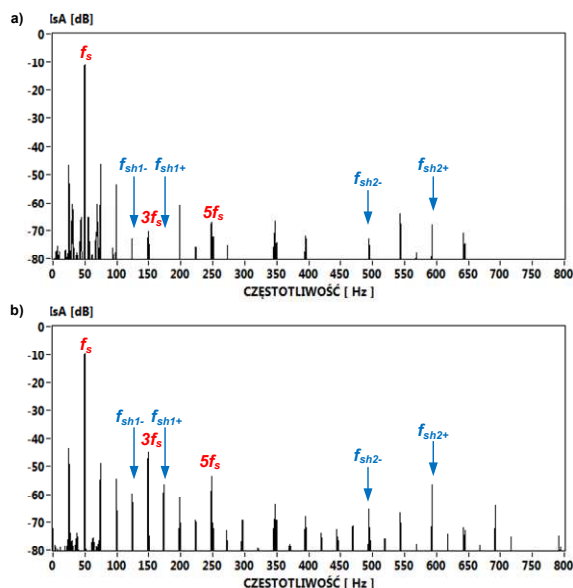
$$f_{sh1} = f_s \left(k \left(\frac{1-s}{p_b} \right) \pm m \right) \quad (2)$$

$$f_{sh2} = f_s \left(k N_r \left(\frac{1-s}{p_b} \right) \pm m \right) \quad (3)$$

gdzie:

s - poślizg, p_b - liczba par biegunów, $k=1,2,3,\dots$, $m=1,3,5,\dots$, N_r - liczba żłobków wirnika.

Rys.5 przedstawia widma prądu stojana w fazie A dla silnika nieobciążonego zasilanego częstotliwością $f_s=50\text{Hz}$ w przypadku braku uszkodzenia (rys.5a) oraz 10 zwartych zwojów (rys.5b). Widoczny jest wzrost nieparzystych krotności częstotliwości sieciowej oraz wzrost harmonicznych wynikających z (1) dla $k=1$ i $m=3$ oraz z (2) dla $k=1$ i $m=1$. Niestety harmoniczne te występują także podczas normalnej pracy silnika nieuszkodzonego i pokrywają się z częstotliwościami pochodzącymi od zmian momentu obciążenia, czy też ekscentryczności silnika. Dlatego też klasyczna metoda analizy widmowej prądów fazowych stojana nie rozwiązuje w pełni problemu oszacowania stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana na podstawie wartości amplitud określonych harmonicznych.



Rys.5. Widmo prądu stojana dla silnika nieobciążonego przy $f_s=50\text{Hz}$ oraz a) braku uszkodzenia, b) 10 zwartych zwojów

3.2. Analiza składowych symetrycznych prądu stojana

Brak równowagi w trójfazowych systemach może być oceniany również po przetransformowaniu trójfazowych napięć i prądów silnika do układu współrzędnych składowych syme-

trycznych [1]-[5], [11]. Jedną z metod wykorzystania składowych symetrycznych w monitorowaniu i diagnostyce silników indukcyjnych opiera się na badaniu zmienności amplitudy składowej kolejności przeciwnej prądu stojana [10]. Ogólna zależność przekształcenia prądów fazowych i_{sA} , i_{sB} , i_{sC} z układu współrzędnych ABC na składowe symetryczne 012 ma postać:

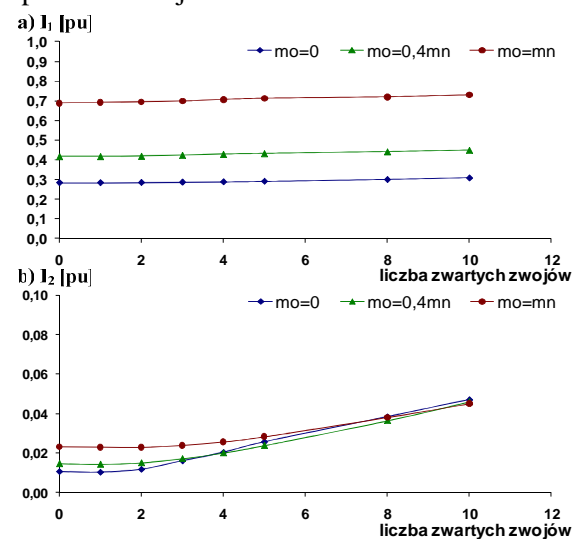
$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \\ i_{sC} \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdzie:

i_0 , i_1 , i_2 – odpowiednio składowa zerowa, zgodna i przeciwna prądu stojana,

a - zespolony operator obrotu o kąt $2\pi/3$

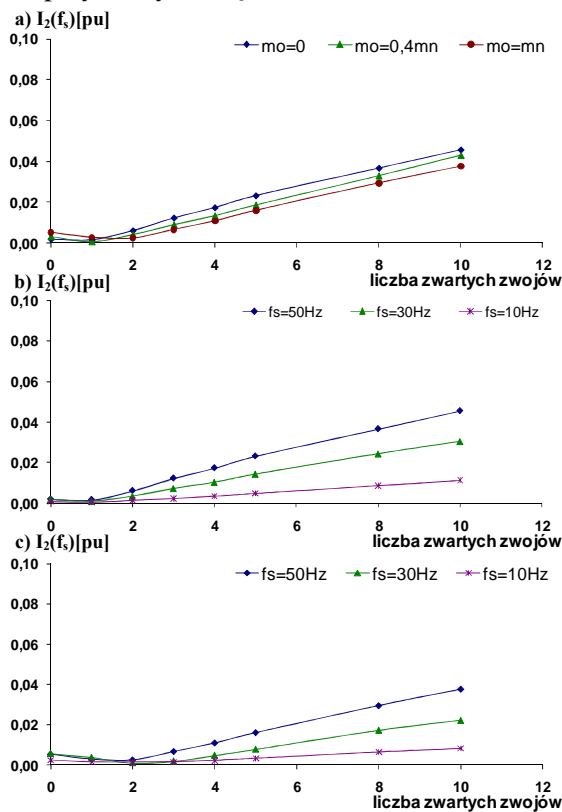
W trójfazowych silnikach indukcyjnych składowa zerowa prądu i_0 nie występuje, dlatego obliczenia składowych symetrycznych sprowadzają się do wyznaczenia składowych i_1 , i_2 . Na rys.6 przedstawiono zmiany wartości skutecznej składowych symetrycznych prądu stojana w zależności od momentu obciążenia silnika przy częstotliwości zasilania $f_s=50\text{Hz}$. Z badań wynika, że wartość skuteczna składowej zgodnej prądu stojana, podobnie jak wartości skutecznej prądów fazowych ABC w nieznacznym stopniu zwiększają swoją wartość po zaistnieniu uszkodzenia (rys.6a). Dodatkowo zmiany te są silnie zależne od obciążenia silnika. Wraz ze wzrostem obciążenia wzrasta wartość skuteczna prądu I_1 , natomiast zmniejsza się wpływ asymetrii spowodowanej zwarciami.



Rys.6. Zależność wartości skutecznej prądów stojana a) składowej kolejności zgodnej, b) składowej kolejności przeciwnej, od liczby zwartych zwojów dla różnych wartości obciążenia silnika przy $f_s=50\text{Hz}$

W przypadku analizy wartości skutecznej prądu składowej przeciwnej (rys.6b) zauważalny jest wzrost wartości I_2 , ale dopiero od pewnej ilości zwartych zwojów (2-5 zwojów) w zależności od momentu obciążenia silnika. Wynika to z faktu występowania w sygnałach fazowych prądu dodatkowych harmonicznym wprowadzanych przez przemiennik częstotliwości zasilający silnik.

Obecnie, ze względu na rozwój szybkich procesorów sygnałowych i malejącą ich cenę, coraz częściej proponuje się nowe procedury do obliczania składowych symetrycznych, oparte o przekształcenie DFT i FFT, umożliwiające odfiltrowanie harmonicznym zakłócających procedurę obliczania składowej przeciwnej prądu stojana [10], [11]. Na podstawie przedstawionych na rys.7 wyników badań można stwierdzić, że amplituda składowej przeciwnej prądu stojana w ograniczonym stopniu zależy od obciążenia silnika (rys.7a), a jej zmiany pod wpływem wzrostu stopnia uszkodzenia są znaczące. Dzięki temu można z powodzeniem wykręcić początkową fazę powstawania uszkodzenia przy różnych częstotliwościach zasilania.



Rys.7. Zależność składowej kolejności przeciwnej prądu stojana I_2 od liczby zwartych zwojów: a) dla różnego obciążenia silnika przy $f_s=50\text{Hz}$, b), c) dla różnych częstotliwości zasilania silnika przy $m_o=0$, $m_o=m_n$ odpowiednio

4. Wnioski końcowe

Na podstawie powyższych rozważań i przytoczonych wyników badań laboratoryjnych można sformułować następujące uwagi i wnioski:

- przesunięcia kątowe pomiędzy prądami fazowymi stojana w układzie współrzędnych ABC silnika indukcyjnego są dobrymi symptomami diagnostycznymi do wykrywania zwarc zwojowych, pozwalającymi na określenie zarówno stopnia uszkodzenia oraz jego lokalizację;
- nieskomplikowany i szybki proces obliczania przesunięć kątowych jest alternatywą dla stosowanych obecnie metod diagnostycznych wykorzystujących analizę widmową prądów fazowych stojana;
- amplituda składowej przeciwnej prądu stojana i_2 w ograniczonym stopniu zależy od obciążenia silnika, a zmiany jej wartości w miarę wzrostu stopnia uszkodzenia uzwojeń stojana są bardzo korzystne z punktu widzenia monitorowania uszkodzenia;
- klasyczna analiza widmowa jest dobrym sposobem do oceny ilości zwartych zwojów w silniku indukcyjnym zasilanym z przemiennika częstotliwości, przy zapewnieniu odpowiednio wysokiej dokładności i rozdzielczości aparatury pomiarowo-przetwarzającej.

Głównym problemem w zastosowaniu prezentowanych metod jest fakt, że brak symetrii napięć zasilania oraz wrodzone asymetrie silnika dają takie same objawy jak zwarcia zwojowe. Możliwe jest jednak zmniejszenie wpływu tych zakłóceń przez zastosowanie odpowiednich technik opisanych m.in. w [12]. Autorzy w dalszych pracach zamierzają zastosować neuronowy lub rozmyty detektor wykorzystujące zaproponowane wskaźniki oceny stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana. Pozwoli to na zbudowanie systemu diagnostycznego do diagnostyki stanu uzwojenia stojana silnika indukcyjnego.

Literatura

- [1] Siddique A., Yadava G.S., Singh B.: *A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors*. IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol.20, No.1, March 2005, pp. 106-114.
- [2] Grubic, S., Aller J.M., Lu B., Habetler T.G.: *A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems*. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol.55, No.12, December 2008, pp. 4127-4136.

- [3] Kowalski Cz.T.: *Monitorowanie i diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych z wykorzystaniem sieci neuronowych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych P.Wr., seria Monografie nr 18, zeszyt 57, 2005r.
- [4] Zhang P., Du Y., Habetler T.G., Lu B.: *A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium Voltage Induction Motors*. Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE, pp.3165-3174
- [5] Behbahani H., Karshenas H., Sadough A.: *Non-invasive On-line Detection of Winding Faults in Induction Motors –A Review*. 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, China, 2008, pp. 188-191
- [6] Bouzid M.B.K., Champenois G., Bellaaj N.M., Signac L., Jelassi K.: *An Effective Neural Approach for the Automatic Location of Stator Interturn Faults in Induction Motor*. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol.55, No.12, December 2008, pp. 4277–4289
- [7] Kowalski Cz.T., Wierzbicki R., Wolkiewicz M.: *Analiza wpływu uszkodzenia uzwojenia stojana silnika indukcyjnego na kąt przesunięcia fazowego pomiędzy prądem i napięciem*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały. 2009, nr 29, s. 252-265
- [8] Thomson W.T.: *On-line MCSA to diagnose shorted turns in low voltage stator windings of 3-phase induction motors prior to failure*. Electric Machines and Drives Conference, 2001. IEMDC 2001. IEEE International, pp. 891-898
- [9] Joksimovic G.M., Penman J.: *The Detection of Inter-Turn Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors*. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol.47, No.5, October 2000, pp. 1078–1084
- [10] Kowalski Cz.T., Wolkiewicz M.: *Stator faults diagnosis of the converter-fed induction motor using symmetrical components and neural network*. 13th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE '09, 2009
- [11] Henao H., Assaf T., Capolino G.A.: *The discrete Fourier transform for computation of symmetrical components harmonics*. Power Tech Conference Proceedings, Vol. 4, 2003
- [12] Arkan M., Perovic D.K., Unsworth P.: *Online stator fault diagnosis in induction motors*, Proc. Inst. Elect. Eng., Elect. Power Appl., vol. 148, no. 6, 2001, pp. 537–547

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010 jako projekt badaczy rozwojowy Nr R0101403

Autorzy

dr hab. inż. Czesław T. Kowalski, prof. P.Wr.
E-mail: czeslaw.t.kowalski@pwr.wroc.pl
mgr inż. Marcin Wolkiewicz
E-mail: marcin.wolkiewicz@pwr.wroc.pl
Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław

Recenzent

Dr hab. inż. Sławomir Szymaniec, prof. P.O.