Mateusz DYBKOWSKI¹, Kamila JANKOWSKA²

Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych (1,2) ORCID: 1. 0000-0002-9477-4079; 2. 0000-0003-0727-4816

doi:10.15199/48.2023.03.03

Detekcja uszkodzeń czujników prądu stojana w układach napędowych z silnikami PMSM

Streszczenie. W artykule opisano detektor uszkodzeń czujników prądu stojana w układzie napędowym z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi (PMSM). Rozwiązanie to zostało wcześniej opisane dla silników indukcyjnych. Mechanizm detekcji opiera się na tzw. markerach prądowych. Zastosowanie markerów umożliwia zarówno detekcję uszkodzenia jak i lokalizację uszkodzonej fazy. Działanie systemu opiera się wyłącznie na analizie pomiarów z czujników prądu i nie wymaga dodatkowych informacji o napędzie. W pracy skupiono się na analizie badań eksperymentalnych dla opracowanego detektora uszkodzeń czujnika prądu dla różnych warunków pracy napędu PMSM sterowanego metodą DFOC.

Abstract. The article describes a fault detector of stator current sensors in a drive system with a permanent magnet synchronous motor (PMSM). This solution was previously described for induction motors. The detection mechanism is based on the so-called current markers. The use of markers enables both damage detection and the location of the damaged phase. The operation of the system is based solely on the analysis of measurements from current sensors and does not require additional information about the drive. The work focuses on the analysis of experimental studies for the developed current sensor fault detector for various operating conditions of vector controlled PMSM drive. (Stator current sensor fault detection in the PMSM drive system).

Słowa kluczowe: czujnik prądu, detekcja uszkodzeń, PMSM, Napęd odporny, FOC. **Keywords**: current sensors, fault detection, PMSM, FTC, FOC

Wstęp

Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (ang. Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM) są stosowane w zaawansowanych systemach napędowych, dlatego też wymagają struktur sterowania o zwiększonym poziomie bezpieczeństwa. Wykorzystywane są tam między innymi układy sterowania odpornego na uszkodzenia (ang. Fault Tolerant Control - FTC), które odpowiedzialne są za detekcję, lokalizację a następnie kompensację awarii [1]. W literaturze opisywane są trzy główne typy awarii: uszkodzenia samego silnika, przekształtnika mocy oraz czujników pomiarowych [2]. Uszkodzenia czujników prądu moga istotnie wpływać na pracę całego układu napędowego. Awaria takiego czujnika może spowodować pogorszenie właściwości układu sterowania lub całkowitą utratę stabilności [3]. Nieodpowiednie sprzężenie zwrotne z czujnika prądu może spowodować uszkodzenie innych komponentów układu napędowego, w tym samego silnika. Dodatkowo wiele systemów diagnostycznych (np. diagnostyka stojana, wirnika, łożysk) opiera się głównie na pomiarze prądu [4]. Najczęstsze uszkodzenia występujące w czujnikach prądu to szumy pomiarowe, zanik sygnału pomiarowego, przerywanie sygnału, ograniczenia sygnału i zmienne wzmocnienie. Niektóre z wyżej wymienionych awarii mogą być częściowo skompensowane przez strukturę sterowania, m.in. zmienne wzmocnienie lub szumy pomiarowe [5]. Metody wykrywania uszkodzeń czujników prądu są w literaturze podzielone na dwa główne typy: bazujące na modelu matematycznym obiektu [6], [7] oraz sygnałach pomiarowych [8]. Głównymi wadami metod bazujących na modelach są: silna zależność od parametrów silnika oraz skomplikowana implementacja na procesorze sygnałowym. Dodatkowo modele silników PMSM są zwykle znacznie upraszczane, co również może wpływać na działanie algorytmów detekcji. Metody oparte na sygnałach pomiarowych charakteryzują się przede wszystkim prostą strukturą i łatwą implementacją praktyczną. Przykładem może być praca [9]. Wykrywanie uszkodzeń czujnika prądu opiera się na pomiarze napięcia w obwodzie pośredniczącym. W literaturze istnieją również przykłady, w których detekcja wykorzystuje pomiar innych wielkości, takich jak prąd [10], czy położenie wirnika.

Istnieją również prace, w których pomiar kilku sygnałów służy do wykrywania uszkodzeń czujników prądu [11].

W artykule przedstawiono wyniki symulacyjne oraz eksperymentalne detektora uszkodzeń czujników prądu opartego na znacznikach Cri w układzie napędowym z silnikiem PMSM, który szerzej był opisany w [12], [13], [16]. W celu wykrycia awarii i jej lokalizacji metoda wymaga prądu. z trzech czujników Badania informacji przeprowadzono w strukturze sterowania polowo zorientowanego (ang. Field Oriented Control) dla różnych wartości obciążenia i prędkości. Przedstawione wyniki potwierdzają skuteczność wykrywania podstawowych uszkodzeń.

Struktura sterowania

Zarówno w badaniach symulacyjnych jak i eksperymentalnych wykorzystano strukturę sterowania polowo zorientowanego. Jest to powszechnie stosowana metoda sterowania układu napędowego, która wykorzystuje czujniki prądu, w celu zapewnienia pracy układu o wysokiej jakości. Rys. 1 przedstawia schemat blokowy zastosowanej struktury sterowania wraz z układem symulacji oraz detekcji awarii.

Do prawidłowej pracy układu niezbędne są informacje o aktualnej wartości prędkości kątowej, położeniu wirnika oraz o prądzie stojana. W związku z tym, że zarówno w badaniach symulacyjnych jak i badaniach eksperymentalnych wykorzystano model symetryczny, do prawidłowej pracy wystarczą dwa czujniki prądu.

Do pomiaru prędkości wykorzystano sygnał prędkości z modelu silnika (badania symulacyjne) oraz sygnał z enkodera inkrementalnego o rozdzielczości 36000 imp./obr (badania eksperymentalne). Wykorzystano klasyczne regulatory PI z ograniczeniem sygnałów wyjściowych. Parametry regulatorów nie ulegały zmianom w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych. Wykorzystano dwupoziomowy przekształtnik częstotliwości, kluczowany z częstotliwością 10kHz.

W opisanych badaniach uszkodzenia symulowano w sposób programowy.



Rys.1. Schemat blokowy struktury sterowania zastosowanej w badaniach wraz z układem detekcji oraz symulacji awarii

Detektor uszkodzeń czujników prądu stojana

Artykuł przedstawia detekcję uszkodzeń najczęściej stosowanych w układach napędowych czujników prądu bazujących na efekcie Halla. Zasada działania takiego przetwornika opisana został między innymi w pracy [14]. Schemat czujnika przedstawiono na Rys. 1. Układy tego typu są podatne na wielokrotne awarie. Uszkodzenia mogą być spowodowane między innymi korozją rdzenia, zmianami właściwości magnetycznych rdzenia ferrytowego pod wpływem temperatury lub np. zmiany orientacji pola magnetycznego indukowanego w czujniku [15]. Awarie te mogą prowadzić do całkowitego uszkodzenia czujnika i utraty sygnału pomiarowego lub przesunięcia fazy, szumów pomiarowych i zmiennego wzmocnienia.



Rys.2. Schemat przetwornika prądu wykorzystującego efekt Halla

Jak już wspomniano, do poprawnej pracy układu napędowego z silnikiem PMSM wymagane są co najmniej dwa czujniki prądu stojana. Trzeci czujnik w przedstawionych badaniach służy do ceków diagnostycznych.

Podstawą algorytmu detekcji jest fakt, że składowe prądu stojana $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ stosowane w strukturze sterowania można wyznaczyć za pomocą różnych równań w zależności od faz, w których wykonywany jest pomiar:

(1)
$$i_{s\alpha 1} = \frac{2}{3}(i_{sA} - \frac{1}{2}(i_{sB} + i_{sC})), i_{s\beta 1} = \frac{\sqrt{3}}{3}(i_{sB} - i_{sC})$$

(2)
$$i_{s\alpha3} = -(i_{sB} + i_{sC}), i_{s\beta3} = -\frac{\sqrt{3}}{3}(i_{sA} - i_{sC})$$

(3)
$$i_{s\alpha 2} = i_{sA}, i_{s\beta 2} = \frac{\sqrt{3}}{3}(i_{sA} + 2i_{sB})$$

Na podstawie równań (1)-(3) można wyznaczyć znaczniki (markery) prądu niewrażliwe na pomiar jednej z faz:

(4)
$$C_{ri1} = (i_{sa3}^2 + i_{s\beta1}^2), C_{ri2} = (i_{sa2}^2 + i_{s\beta3}^2), C_{ri3} = (i_{sa2}^2 + i_{s\beta2}^2)$$

Po odpowiednich przekształceniach można otrzymać:

(5)
$$C_{ri1} = (-(i_{sB} + i_{sC}))^2 + (\frac{\sqrt{3}}{3}(i_{sB} - i_{sC}))^2$$

(6)
$$C_{ri2} = (i_{sA})^2 + (-\frac{\sqrt{3}}{3}(i_{sA} + 2i_{sC}))^2$$

(7)
$$C_{ri3} = (i_{sA})^2 + (\frac{\sqrt{3}}{3}(i_{sA} + 2i_{sB}))^2$$

Należy jednak zaznaczyć, że na podstawie wartości samych znaczników lokalizacja uszkodzonej fazy nie zawsze byłaby możliwa, w związku z tym algorytm opisywany w niniejszej pracy wykorzystuje różnicę wartości znaczników z bieżącej i poprzedniej próbki – tzw. błędy znaczników. Zapewnia to stabilną detekcję:

(8)
$$\Delta C_{rij} = |C_{rij}(k) - C_{rij}(k-1)|$$

W badaniach wykorzystano również dodatkowy warunek - *Delta* odnoszący się do składowych $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ wyznaczonych na podstawie informacji z różnych czujników pomiarowych w fazach a, b, c:

(9)
$$(i_{s\alpha 1} = i_{s\alpha 2} = i_{s\alpha 3}) \wedge (i_{s\beta 1} = i_{s\beta 2} = i_{s\beta 3})$$

Pozwala to na poprawę stabilności detekcji i uniknięcie fałszywych alarmów.

Relacje pomiędzy wartościami znaczników w zależności od umiejscowienia uszkodzenia (faza A lub faza B) są powtarzalne. Na tej podstawie detektor nie tylko pozwala na wykrycie uszkodzenia czujnika prądu, ale także umożliwia lokalizację fazy, w której uszkodzony został czujnik pomiarowy.

Na rysunkach 3,4 pokazano zmiany wartość błędów markerów i reakcje detektora w czasie różnych awarii w fazach A i B w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych. Detektor posiada dwa wyjścia. Pierwsze wyjście D1 dotyczy fazy A, a drugie D2 fazy B. Wartość 0 na wyjściu detektora oznacza brak awarii, a 1 na wyjściu oznacza awarię odpowiedniej fazy. Rysunku 3,4 pokazują, że różnice pomiędzy błędami markerów są tym większe, im występuje poważniejsza awaria. Tabela 1 pokazuje zależności pomiędzy błędami markerów, jakie pojawiają się po wystąpieniu awarii w poszczególnych fazach.

Tabela 1. Zależności pomiędzy błędami markerów po wystąpieniu awarii

Rodzaj uszkodzenia	ΔC _{rij}
Brak	$\Delta C_{ri1} = \Delta C_{ri2} = \Delta C_{ri3}$
Faza A	$\Delta C_{ri2} < \Delta C_{ri3} < \Delta C_{ri1}$
Faza B	$\Delta C_{ri1} < \Delta C_{ri3} < \Delta C_{ri2}$



Rys.3. Reakcje detektora i przebiegi błędów znaczników w badaniach symulacyjnych przy braku sygnału (a), zmiennym wzmocnieniu (b) oraz badaniach eksperymentalnych – zanik sygnału (c), zmienne wzmocnienie (d) w fazie A





Rys.4. Reakcje detektora i przebiegi błędów znaczników w badaniach symulacyjnych przy braku sygnału (a), szumach pomiarowych (b) i badaniach eksperymentalnych – zanik sygnału (c), szumy pomiarowe (d) w fazie B



Rys.5. Przebiegi prędkości, prądu stojana oraz odpowiedź detektora podczas różnego typu uszkodzeń w fazie A (a) oraz B (b)

Wyniki symulacyjne

Badania symulacyjne przeprowadzono w środowisku Matlab/Simulink z krokiem całkowania 10⁻⁵. Struktura sterowania przedstawiona została na Rys. 1. Wyniki uzyskane w badaniach symulacyjnych stanowią analizę pracy detektora w bardzo szerokim zakresie zmian prędkości. Wszystkie wyniki prezentowane są w systemie per-unit [p.u.].

Rysunek 5 przedstawia działanie detektora podczas 5 typów awarii: zanik sygnału, okresowe przerywanie sygnału, szumy pomiarowe, zmienne wzmocnienie oraz ograniczenia sygnału.

Detektor z wysoką skutecznością rozpoznaje 4 z 5 badanych typów awarii również w stanach dynamicznych. Ograniczenie sygnału pomiarowego wiąże się z wykryciem stanu uszkodzenia jednak nie jest ono poprawnie lokalizowane. Niektóre z uszkodzeń nie są natychmiastowo wykrywane. Dotyczy to głównie szumów pomiarowych. Jednak nie jest to awaria, która wpływa istotnie na pracę układu od momentu wystąpienia. Uszkodzenie powodujące zagrożenie – zanik sygnału - jest wykrywane najszybciej. Badania symulacyjne pokazują również jak istotny wpływ na strukturę sterowania mogą mieć poszczególne uszkodzenia. W przypadku zaniku sygnału wartość prądu stojana przekracza kilkukrotnie wartość znamionową.

Wyniki eksperymentalne

Badania eksperymentalne przeprowadzono na silniku PMSM o mocy 0,75 kW firmy Moog (G403-2007A). Parametry silnika przedstawiono w Tabeli 2. W badaniach wykorzystano sterownik dSpace DS1103 wraz z oprogramowaniem Control Desk, pozycję wału mierzono enkoderem inkrementalnym (36000 imp./obr.), natomiast pomiar prądu wykonano za pomocą przetworników pradowych Lem.

Jako obciążenie zastosowano inny silnik sterowany serwonapędem Moog (G404-2009A). Zdjęcia stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rys. 6. Zastosowano przemiennik częstotliwości z możliwością sterowania tranzystorami. Częstotliwość kluczowania wynosiła 10 kHz. Badania eksperymentalne przeprowadzono dla zakresu wartości prędkości (-0,15 ω N - 0,3 ω N) oraz dwóch wartości obciążenia (0,1TN i 0,2TN). Sprawdzono reakcje detektora na brak sygnału, przerwanie sygnału, szum pomiarowy i zmienne wzmocnienie. Uszkodzenia symulowano w sposób programowy.

Tabela 2. Parametry badanego silnika

P _N	P _p	n _N	T _N	Ι _Ν	J	Rs
[kW]	[-]	[rpm]	[Nm]	[Α]	[ka∙m2]	[Ω]
0.894	4	6200	1.4	1.9	0.000039	4.6615

Obciążenie	Przetwo	rniki prądu LEM
Badany silnik	Moog	dSpace 1103

Rys.6. Zdjęcia elementów stanowiska badawczego



Rys.7. Przebiegi prędkości oraz odpowiedź detektora podczas różnego typu uszkodzeń w fazie A (a) oraz B (b) w badaniach eksperymentalnych

Badania eksperymentalne ze względu na możliwość uszkodzenia silnika podczas symulacji awarii przy wysokich prędkościach przeprowadzono w znacznie mniejszym zakresie prędkości niż badania symulacyjne. Rysunek 7 przedstawia działanie detektora podczas badania różnych awarii w fazie A i B. W badaniach skuteczności detekcji w fazie A zastosowano obciążenie 0.1TN, natomiast w fazie B 0.2TN.

Rysunek 8 pokazuje analizę przebiegu markerów dla przykładowych uszkodzeń w fazie A i B dla układu bez obciążenia.





Przedstawiony algorytm detekcji uszkodzeń, dzięki możliwości lokalizacji fazy może być zastosowany w układzie sterowania odpornego z kompensacją uszkodzeń. W strukturze sterowania czujnik w fazie C wykorzystywany jest wyłącznie w celach diagnostycznych i może służyć również jako czujnik redundantny w przypadku wystąpienia uszkodzenia. Na podstawie prądów fazowych wyznaczane są składowe prądu stojana i_{sa} , $i_{s\beta}$. Składowe te można

wyznaczać za pomocą różnych równań w zależności od tego w jakich fazach wykorzystujemy czujniki (równania 1-3). W proponowanym systemie FTC przypadku pojawienia się uszkodzenia w danej fazie, składowe wyznaczane są na podstawie czujnika w fazie C oraz fazie bez uszkodzenia. Umożliwia to kompensację awarii i pozwala na zachowanie stabilnej pracy. Rysunek 9 przedstawia przebiegi prądów fazowych podczas uszkodzenia oraz składowych i_{sa} , $i_{s\beta}$, które wyznaczane są poprawnie pomimo awarii czujnika, poprzez zastosowanie mechanizmu kompensacji.







Rys.10. Przebiegi prędkości markerów oraz odpowiedzi detektora podczas różnych uszkodzeń w fazie A (a) oraz w fazie B (b) w układzie z mechanizmem kompensacji awarii [16]

Na rysunku 10 pokazano skuteczność mechanizmu dla różnego typu awarii w fazie A i B. Można zauważyć, że w przebiegach prędkości nie pojawiają się istotne oscylacje.

Podsumowanie

Przedstawione wyniki potwierdzają skuteczność działania detektora uszkodzeń czujników prądu opartego wyłącznie o pomiar prądów stojana. Uszkodzenia są wykrywane i lokalizowane poprawnie zarówno w symulacjach jak i eksperymencie. Badania symulacyjne pokazują skuteczność działania algorytmu nawet dla wysokich prędkości. Dodatkowo, opracowane rozwiązanie może być z powodzeniem wykorzystane w układzie z systemem kompensacji awarii, co również potwierdzono w badaniach eksperymentalnych. Stany dynamiczne i obciążenie silnika nie wpływają istotnie na skuteczność działania algorytmu detekcji.

Autorzy: mgr inż. Kamila Jankowska, dr hab. inż. Mateusz Dybkowski, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław, E-mail: kamila.jankowska@pwr.edu.pl, mateusz.dybkowski@pwr.edu.pl;

LITERATURA

 X. Wang, Z. Wang, Z. Xu, M. Cheng, W. Wang and Y. Hu, "Comprehensive Diagnosis and Tolerance Strategies for Electrical Faults and Sensor Faults in Dual Three-Phase PMSM Drives," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 7, pp. 6669-6684, July 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2876400.

- [2] C. Wu, C. Guo, Z. Xie, F. Ni and H. Liu, "A Signal-Based Fault Detection and Tolerance Control Method of Current Sensor for PMSM Drive," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 12, pp. 9646-9657, Dec. 2018, doi: 10.1109/TIE.2018.2813991.
- [3] G. Huang, J. She, E. F. Fukushima, C. Zhang and J. He, "Robust Reconstruction of Current Sensor Faults for PMSM Drives in the Presence of Disturbances," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 24, no. 6, pp. 2919-2930, Dec. 2019, doi: 10.1109/TMECH.2019.2942520.
- [4] F. Meinguet and J. Gyselinck, "Fault detection, isolation and reconfiguration of three-phase AC drive with current sensor fault," 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011, pp. 200-205, doi: 10.1109/IEMDC.2011.5994846.
- [5] M. Adamczyk and T. Orlowska-Kowalska, "Current Sensors Fault Detection and Tolerant Control for Induction Motor Drive," 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 2021, pp. 888-892, doi: 10.1109/PEMC48073.2021.9432575.
- [6] Gao, Y.; Wu, Y.; Wang, X.; Chen, Q. Characteristic modelbased adaptive fault-tolerant control for four-PMSM synchronization system. Proc. Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control Eng. 2021, 235, 680–691.
- [7] Gao, Z.; Cecati, C.; Ding, S.X. A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques—Part I: Fault diagnosis with modelbased and signal-based approaches. IEEE Trans. Ind. Electron. 2015, 62, 3757–3767.
- [8] Beddek, K.; Merabet, A.; Kesraoui, M.; Tanvir, A.A.; Beguenane, R. Signal-Based Sensor Fault Detection and Isolation for PMSG in Wind Energy Conversion Systems. IEEE Trans. Instrum. Meas. 2017, 66, 2403–2412.
- [9] H. Li, Y. Qian, S. Asgarpoor and H. Sharif, "PMSM Current Sensor FDI Based on DC Link Current Estimation," 2018 IEEE

88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCFall.2018.8690585.

- [10] S. K. E. Khil, I. Jlassi, J. O. Estima, N. Mrabet-Bellaaj and A. J. M. Cardoso, "Detection and isolation of open-switch and current sensor faults in PMSM drives, through stator current analysis," 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), 2017, pp. 373-379, doi: 10.1109/DEMPED.2017.8062382.
- [11] I. Jlassi and A. J. Marques Cardoso, "A single fault diagnostics approach for power switches, speed sensors and current sensors in regenerative PMSM drives," 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), 2017, pp. 366-372, doi: 10.1109/DEMPED.2017.8062381.
- [12] Dybkowski, M.; Klimkowski, K. Stator current sensor fault detection and isolation for vector controlled induction motor drive. In Proceedings of the IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Varna, Bulgaria, 25–28 September 2016; pp. 1097–1102.
- [13] Jankowska, K.; Dybkowski, M. A Current Sensor Fault Tolerant Control Strategy for PMSM Drive Systems Based on Cri Markers. Energies 2021, 14, 3443. https://doi.org/10.3390/en14123443
- [14] Rudnicki, T. Measurement of the PMSM Current with a Current Transducer with DSP and FPGA. Energies 2020, 13, 209. https://doi.org/10.3390/en13010209
- [15] H. Mehta, U. Thakar, V. Joshi, K. Rathod and P. Kurulkar, "Hall sensor fault detection and fault tolerant control of PMSM drive system," 2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC), 2015, pp. 624-629, doi: 10.1109/IIC.2015.7150817.
- [16]K. Jankowska, M. Dybkowski, Experimental analysis of the current sensor fault detector in the PMSM drive system, conference PEMC 2022 (in print)