

Krzysztof SIEMBAB*

MODEL SILNIKA PMSM DO BADAŃ SYMULACYJNYCH STEROWANIA TOLERUJĄCEGO USZKODZENIA

W artykule przedstawiono model matematyczny silnika PMSM wykorzystany do badań sterowania tolerującego uszkodzenia, uwzględniający zarówno asymetrię obwodu magnetycznego, jak i dowolny rozkład indukcji magnetycznej oraz jego implementację w środowisku Matlab/Simulink z wykorzystaniem biblioteki simpowersys. W podsumowaniu przeprowadzono analizę wyników badań symulacyjnych dla najczęściej występujących uszkodzeń przekształtnika i silnika. Opracowany model symulacyjny oraz otrzymane wyniki stanowią bazę do dalszych prac nad algorytmami sterowania odpornego na awarie.

1. WPROWADZENIE

Wzrost wymagań dotyczących niezawodności sterowania układów napędowych w systemach, w których bezpieczeństwo jest najważniejsze, wybiega poza zakres możliwości wielu tradycyjnych rozwiązań. W związku z powyższym aktualnym tematem wielu prac badawczych na całym świecie jest sterowanie odporne na uszkodzenia (ang. *Fault Tolerant Control – FTC*). Sterowanie to wymaga zmiany topologii przekształtnika oraz dostosowania algorytmów sterowania do nowej struktury. Ze względu na asymetrię zasilania, występującą podczas uszkodzenia, konieczne staje się zastąpienie prostego modelu silnika PMSM we współrzędnych dq złożonym modelem we współrzędnych naturalnych abc .

2. MODEL MATEMATYCZNY SILNIKA PMSM

Do badań symulacyjnych wykorzystano model matematyczny silnika PMSM, uwzględniający zarówno asymetrię obwodu magnetycznego, jak i dowolny rozkład indukcji magnetycznej [1]. W rozważaniach przyjęto kilka założeń dotyczących silnika PMSM:

- rozważane są tylko silniki trójfazowe połączone w gwiazdę (Y);
- silnik nie wykazuje efektów nasycenia lub rozmagnesowania;
- wszystkie trzy fazy posiadają identyczny kształt siły elektromotorycznej przesunięty względem siebie o 120 stopni elektrycznych;

* Politechnika Poznańska.

- rezystancja i indukcyjność uzwojeń jest taka sama dla trzech faz;
- pomija się straty w żelazie stojana i wirnika.

Uwzględniając powyższe założenia można zapisać równanie napięciowe dla silnika PMSM w postaci:

$$[V_{abc}] = [R][I_{abc}] + \frac{d[\Psi_{abc}]}{dt} \quad (1)$$

gdzie R – macierz rezystancji uzwojeń, V_{abc} i I_{abc} – wektory napięć i prądów, Ψ_{abc} – strumień skojarzony stojana, który można przedstawić jako:

$$[\Psi_{abc}] = [L_{abc}][I_{abc}] + \Psi_f \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_{2n-1} \begin{bmatrix} \cos[(2n-1)\theta] \\ \cos[(2n-1)(\theta - \frac{2\pi}{3})] \\ \cos[(2n-1)(\theta + \frac{2\pi}{3})] \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie Ψ_f jest amplitudą strumienia pochodzącego od magnesów trwałych, θ – kąt położenia wirnika, λ_n – współczynnik wzmocnienia n -tej harmonicznej strumienia od magnesów trwałych. Współczynniki te są znormalizowane względem podstawowej składowej tak, że $\lambda_1 = 1$.

Macierz indukcyjności stojana L_{abc} jest symetryczna i ma postać:

$$[L_{abc}] = \begin{bmatrix} L_a(\theta) & M_{ab}(\theta) & M_{ac}(\theta) \\ M_{ba}(\theta) & L_b(\theta) & M_{bc}(\theta) \\ M_{ca}(\theta) & M_{cb}(\theta) & L_c(\theta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Indukcyjność własna uzwojeń i wzajemna między odpowiednimi uzwojeniami stojana dla silnika z asymetrią obwodu magnetycznego jest funkcją kąta położenia wirnika θ i opisana jest równaniami:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_a(\theta) = L_{s0} + \sum_{k=1}^{\infty} L_{s2k} \cos[2k\theta] \\ L_b(\theta) = L_{s0} + \sum_{k=1}^{\infty} L_{s2k} \cos[2k(\theta - \frac{2\pi}{3})] \\ L_c(\theta) = L_{s0} + \sum_{k=1}^{\infty} L_{s2k} \cos[2k(\theta + \frac{2\pi}{3})] \\ M_{ab}(\theta) = M_{ba}(\theta) = M_{s0} + \sum_{k=1}^{\infty} M_{s2k} \cos[2k(\theta + \frac{2\pi}{3})] \\ M_{ac}(\theta) = M_{ca}(\theta) = M_{s0} + \sum_{k=1}^{\infty} M_{s2k} \cos[2k(\theta - \frac{2\pi}{3})] \\ M_{bc}(\theta) = M_{cb}(\theta) = M_{s0} + \sum_{k=1}^{\infty} M_{s2k} \cos[2k\theta] \end{array} \right. \quad (4)$$

gdzie L_{s0} i M_{s0} – odpowiednio indukcyjność własna i wzajemna uzwojeń stojana przy symetrii obwodu magnetycznego, L_{s2k} i M_{s2k} – odpowiednio amplitudy składowych zmiennych indukcyjności własnej i wzajemnej wywołane k -tą harmoniczną rozkładu pola przy asymetrii magnetycznej.

Równania na moment elektromagnetyczny (T_e) silnika PMSM oraz równanie równowagi mechanicznej wyrażają się wzorem:

$$T_e = \frac{(i_a e_a + i_b e_b + i_c e_c)}{\omega_m} \quad (5)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (6)$$

gdzie: i_a, i_b, i_c – prądy w fazach A,B,C silnika, ω_m – prędkość obrotowa silnika, J – moment bezwładności, B – współczynnik tarcia, T_L – moment obciążenia, e_a, e_b, e_c – indukowane siły elektromotoryczne opisane równaniami:

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = -\Psi_f \omega_e \sum_{n=1}^{\infty} (2n-1) \lambda_{2n-1} \begin{bmatrix} \sin[(2n-1)\theta] \\ \sin[(2n-1)(\theta - \frac{2\pi}{3})] \\ \sin[(2n-1)(\theta + \frac{2\pi}{3})] \end{bmatrix} \quad (7)$$

Model silnika PMSM musi uwzględniać także możliwość podłączenia punktu neutralnego silnika do przekształtnika, aby móc wprowadzić algorytmy sterowania odporne na uszkodzenia [2]. Wiąże się to z wprowadzeniem do modelu poniższych równań:

$$[V_{abc}] = \begin{bmatrix} v_a - v_n \\ v_b - v_n \\ v_c - v_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$i_n = -(i_a + i_b + i_c) \quad (9)$$

gdzie v_n – napięcie przyłożone do punktu neutralnego silnika, i_n – prąd w przewodzie neutralnym.

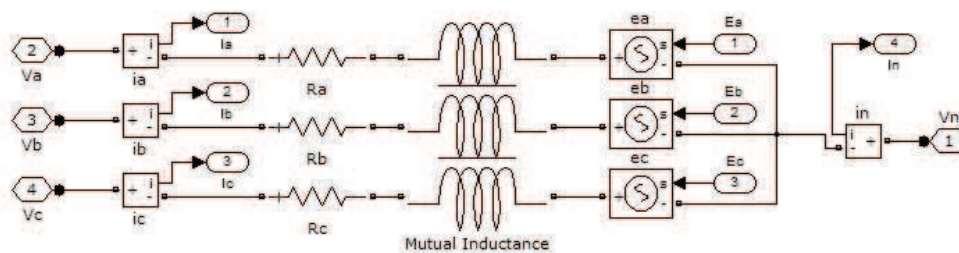
3. BADANIA SYMULACYJNE

3.1. Model symulacyjny

Badania symulacyjne algorytmów sterowania odpornych na awarię zdecydowano się przeprowadzić w środowisku Matlab/Simulink. Dostępne modele silnika PMSM z biblioteki simpowersys nie pozwalają na wprowadzenie dowolnych modyfikacji równań opisujących silnik PMSM i uwzględniają tylko symetryczną naturę uzwojeń stojana, co sprowadza model matematyczny do prostego modelu we współrzędnych dq . Z tego powodu w prowadzonych

badaniach nie można skorzystać z gotowych rozwiązań proponowanych w programie Matlab.

W związku z powyższym przygotowano model symulacyjny silnika PMSM składający się z dwóch części. Część mechaniczną modelu silnika utworzono jako model sygnałowy z wykorzystaniem Simulinka, podczas gdy część elektryczną modelu przygotowano z wykorzystaniem komponentów z biblioteki simpowersys (rys. 1). W modelu części elektrycznej każda z faz silnika PMSM reprezentowana jest przez rezystor, cewkę z uwzględnieniem indukcyjności wzajemnej między odpowiednimi fazami stojana i sterowalne źródło napięcia. Sterowalne źródło napięcia, reprezentujące siłę elektromotoryczną każdej z faz, opisane jest odpowiednio równaniem (7). Część sygnałowa przygotowana z wykorzystaniem komponentów Simulinka opisana jest równaniami (5) i (6). W tej części obliczana jest również wartość siły elektromotorycznej odpowiedniej fazy, która następnie przekazywana jest do sterowalnego źródła napięcia. Tak przygotowany model umożliwia niesymetryczne zasilanie faz stojana oraz wprowadzenie do modelu podłączenia przewodu do punktu neutralnego silnika zgodnie z równaniami (8) i (9).



Rys. 1. Część elektryczna modelu silnika PMSM

Biblioteka simpowersys pozwala na bezproblemowe zamodelowanie przekształtnika w strukturze odpornej na uszkodzenia z wykorzystaniem elementów gotowych kluczy tranzystorowych. Tak zrealizowany model napędu umożliwia łatwą i szybką symulację wszystkich uszkodzeń, zarówno przerw w obwodach gałęzi tranzystorowych i faz silnika, a także zwarcie kluczy tranzystorowych.

3.2. Badania stanów awaryjnych

Dla opracowanego modelu przeprowadzono analizę wyników symulacji dla różnych stanów awaryjnych przekształtnika i silnika. Opracowany model symulacyjny oraz otrzymane wyniki badań uszkodzeń stanowią bazę wiedzy do dalszych prac nad opracowaniem algorytmów sterowania odpornych na awarie

oraz metod detekcji i lokalizacji uszkodzeń. Wyniki badań najczęstszych uszkodzeń przedstawiono poniżej [3].

– Przerwa w jednej fazie silnika PMSM

Przerwa w obwodzie pojedynczej fazy silnika lub przerwanie obwodu gałęzi przekształtnika całkowicie uniemożliwia zasilanie jednej fazy silnika. Sprawia to, że prąd w obwodzie uzwojeń stojana może płynąć tylko w dwóch fazach silnika. Na rysunku 2 (z lewej) pokazano przebiegi podstawowych wielkości silnika PMSM po wystąpieniu uszkodzenia w chwili $t = 0.15$ s. Po awarii prąd w fazie A spada do zera, natomiast zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa dla punktu wspólnego silnika, prąd w działających fazach B i C jest równy $i_b = -i_c$. Amplituda zmian prądów w fazach B i C jest równa co do wartości ograniczeniu wynikającemu z ustawień regulatora. Uszkodzenie fazy powoduje spadek i oscylacje prędkości obrotowej oraz duże i gwałtowne zmiany momentu obrotowego silnika. Po przeliczeniu prądów fazowych do współrzędnych dq0 widać duże i szybkie zmiany prądu w osi q oraz spore oscylacje wokół zera prądu w osi d. Brak szybkiej reakcji na uszkodzenie może prowadzić do dalszych uszkodzeń silnika lub przekształtnika, a nawet awarii napędzanej maszyny ze względu na duże amplitudy prądów oraz gwałtowne zmiany momentu.

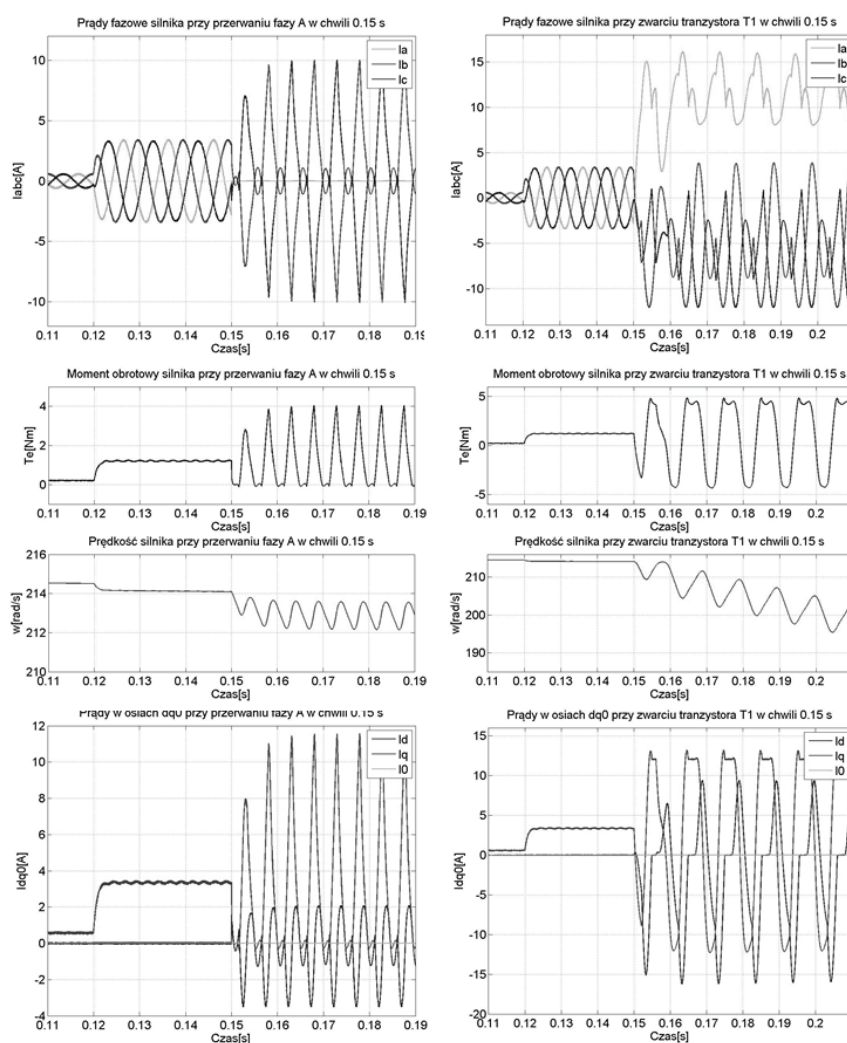
– Zwarcie w górnej gałęzi przekształtnika

Najgroźniejszymi uszkodzeniami dla przekształtnika i silnika są powstające zwarcia. Na rysunku 2 (z prawej) pokazano przebiegi przy zwarcie tranzystora T1 w fazie A. Zwarcie to powoduje przepływ bardzo dużych prądów przez wszystkie fazy silnika. Najgroźniejsze skutki niesie to dla fazy A, w której nastąpiło uszkodzenie, ponieważ płynący w niej prąd jest zawsze dodatni o bardzo dużej wartości ograniczanej tylko przez regulator. Dzięki regulatorowi prądy fazowych prądy stojana osiągają duże wartości, ale jednak nie większe niż ustawione ograniczenie. Natomiast podczas wysterowania dolnego tranzystora w uszkodzonej gałęzi przekształtnika występują zwarcia powodujące przepływ niszczących prądów o wartości kilku kiloamperów, co w większości przypadków prowadzi do przerwania obwodu uszkodzonej gałęzi oraz dalszych uszkodzeń przekształtnika. Awaria ta powoduje także duże oscylacje i nagły spadek prędkości obrotowej silnika oraz szybkie i gwałtowne zmiany momentu silnika. Brak natychmiastowej reakcji na uszkodzenia zwarciove prowadzi zwykle do całkowitego uszkodzenia przekształtnika.

– Przerwa w górnej gałęzi przekształtnika

Przerwanie tranzystora T1 (górny tranzystor fazy A) w przekształtniku uniemożliwia podanie napięcia zasilania do fazy A silnika, co sprawia, że prąd w tej fazie może płynąć tylko w jednym kierunku. Jak widać na rysunku 3 (z lewej) prąd w fazie A płynie tylko przez połowę okresu, gdy przewodzi dolny tranzystor, co nie wpływa znacząco na zmiany momentu obrotowego i prędkości silnika. Natomiast przez drugą połowę okresu, gdy powinien przewodzić górny

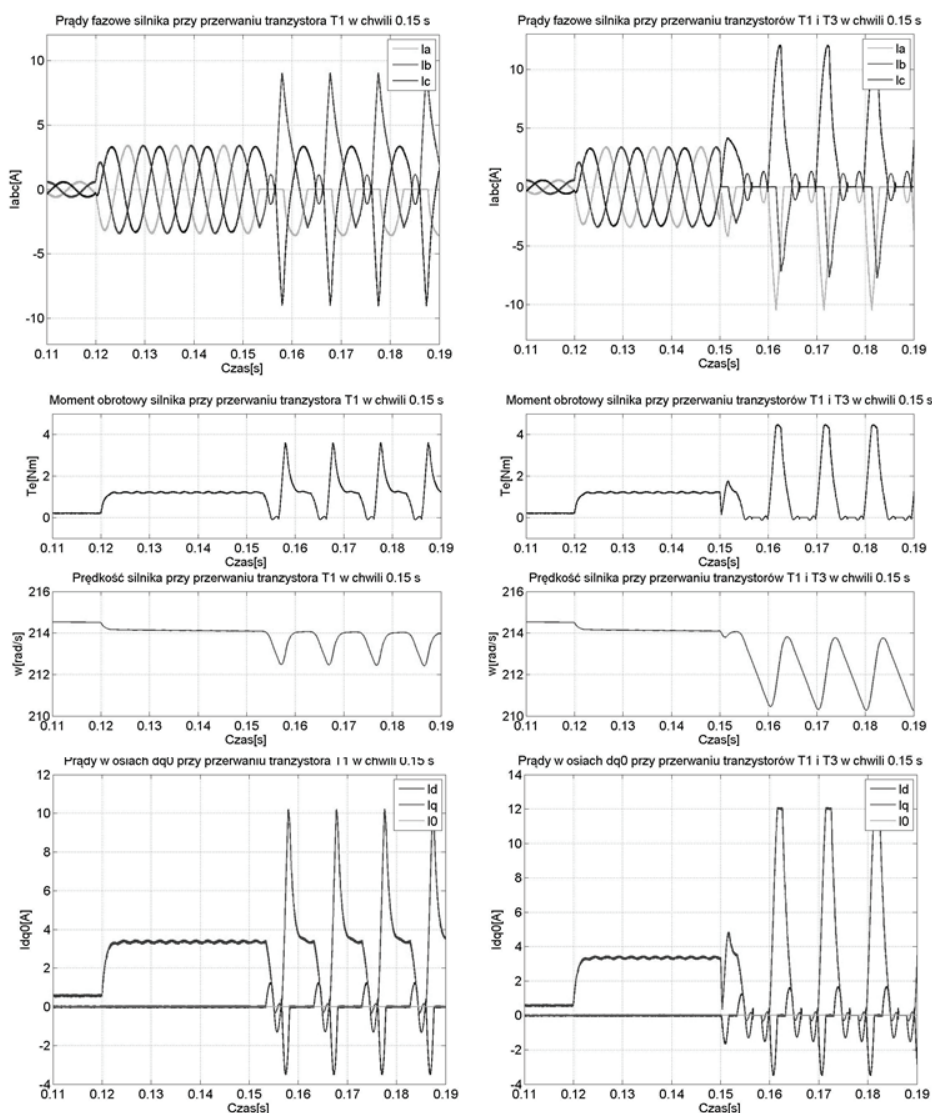
(uszkodzony) tranzystor, prąd w fazie A spada do zera, a prądy w fazach B i C mają równą wartość tj. $i_b = -i_c$, co wynika z pierwszego prawa Kirchhoffa. Powoduje to spadek prędkości obrotowej i duże skoki momentu obrotowego. Pojawia się także prąd w osi d, a w osi q obserwujemy gwałtowne skoki prądu od wartości 0 do kilku krotności prądu znamionowego przy zadanym momencie obciążenia. Dalsza praca napędu może doprowadzić do eskalacji uszkodzeń w przekształtniku lub silniku. Takie same wyniki uzyskano przy symulacji awarii dolnego tranzystora w fazie A (przerwa w dolnej gałęzi przekształtnika).



Rys. 2. Przerwa w jednej fazie silnika (z lewej) i zwarcie w górnej gałęzi przekształtnika (z prawej)

– Przerwa w dwóch gałęziach przekształtnika

Uszkodzenie tranzystorów T1 i T3 (górne tranzystory odpowiednio fazy A i B w przekształtniku), podobnie jak w poprzednim przypadku, powoduje pojawienie się prądów fazowych o bardzo dużej wartości, szybkich i dużych zmian momentu obrotowego oraz spadku i oscylacji prędkości obrotowej (rys. 3 (z prawej)). Awaria ta na pewno doprowadzi do dalszych uszkodzeń przekształtnika i napędu.



Rys. 3. Przerwa w górnej gałęzi (z lewej) i przerwa w dwóch gałęziach przekształtnika (z prawej)

4. PODSUMOWANIE

Zaprezentowane wyniki badań symulacyjnych najczęstszych uszkodzeń przekształtnika i silnika wykonano z wykorzystaniem układu sterowania z kaskadowym regulatorem prędkości typu PI oraz histerezowymi regulatorami prądów fazowych. Zastąpienie regulatorów histerezowych regulatorami typu PI prądów we współrzędnych $dq0$ powoduje, że otrzymane przebiegi przy tym samym uszkodzeniu różnią się od siebie. Różnice te są widoczne i wynikają z różnych zasad działania obu regulatorów, co przekłada się na odmienne reakcje na dane uszkodzenie. Analiza otrzymanych wyników pokazała jednak, że zachodzące zjawiska dla obu rodzajów regulacji są identyczne, a regulatory wpływają tylko na maksymalne wartości przebiegów [4].

W artykule zaprezentowano wykorzystywany model matematyczny i symulacyjny silnika PMSM do badań napędów z uszkodzeniami. Przeprowadzona analiza wyników badań symulacyjnych dla najczęściej występujących uszkodzeń przekształtnika i silnika oraz wyciągnięte wnioski stanowią bazę do dalszych prac nad algorytmami sterowania odpornego na awarie.

LITERATURA

- [1] Zeng, J., Degobert, P., Hautier, J., Minimum torque ripple control of permanent magnet synchronous motor in the stationary reference frame, in Proc. 2005 IEEE Int. Conf. Electric Machines and Drives, p. 667–673, 2005.
- [2] Gajanayake, C.J., Bhangu, B., Nadarajan, S., Jayasinghe, G., Fault tolerant control method to improve the torque and speed response in PMSM drive with winding faults, in Proc. 2011 IEEE Int. Conf. Power Electronics and Drive Systems (PEDS), p. 956-961, 2011.
- [3] Doc, C., Lanfranchi, V., Friedrich, G., Inverter topology comparison for remedial solution in transistor faulty case, in Proc. Eur. Power Electron. Appl., p. 1–8, 2007.
- [4] Errabelli, R., Mutschler, P., Fault-tolerant voltage source inverter for permanent magnet drives, IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 2, p. 500–508, 2012.

PMSM MODEL FOR SIMULATION RESEARCH ON FAULT TOLERANT CONTROL

This paper presents a mathematical model of PMSM motor, used for research of fault tolerant control, which takes into account both, asymmetry of the magnetic circuit, as well as any distribution of magnetic induction, and its implementation in Matlab/Simulink environment with the use of simpowersys library. In the summary, an analysis of simulation research results, for the most common failures of the inverter and motor was conducted. The developed simulation model and obtained results form the basis for further works on fault tolerant control algorithms.