

Piotr Błaszczuk, Sławomir Barański
Politechnika Łódzka, Łódź

ANALIZA PRACY SILNIKA ASYNCHRONICZNEGO W ASPEKCIE STEROWANIA WEKTOROWEGO

ANALYSIS OF ASYNCHRONOUS MOTOR IN VECTOR CONTROL ASPECT

Streszczenie: W pracy przedstawiono obliczenia symulacyjne pracy silnika asynchronicznego korzystając z środowiska obliczeniowego PSIM. Programem ten dedykowany jest dla analizy stanów przejściowych układów energoelektronicznych oraz układów napędowych. Przedstawiono w pracy analizę symulacyjną układu napędowego ze zmiennym obciążeniem, przy sterowaniu analogowym oraz cyfrowym IFOC. Pokazano krótką analizę zjawisk magnetycznych silnika asynchronicznego oraz jego dynamikę. Zastosowany program SIMVIEW wykorzystano do końcowego przetwarzania danych z programu PSIM oraz wykreślenia na podstawie symulacji przebiegów czasowych.

Abstract: This paper presents an asynchronous motor simulation calculations PSIM in the environment, which is a simulation program designed specifically for power electronics and drive systems. It provides a wide range of high-speed simulation analyzes these systems and their analog or digital control, the analysis of magnetic phenomena, electrical machines and their dynamics. Applied SIMVIEW program used in the final processing of the PSIM and struck on the basis of timing simulation. The application allows the user to directly analyze the results and compare them with the results of other analyzes motors.

Słowa kluczowe: silnik asynchroniczny, sterowanie wektorowe, układy napędowe
Keywords: asynchronous motor, vector control, drive systems

1. Wstęp

Współczesny przemysł to nowoczesne napędy elektryczne, które odgrywają dominującą rolę w odbiorze energii elektrycznej. W obecnie stosowanych napędach stosuje się silniki elektryczne w bardzo szerokim zakresie mocy. Kraje wysoko rozwinięte 65% całej energii elektrycznej zużywają na zasilanie napędów elektrycznych. Znaczna część tej energii jest wykorzystywana przez silniki prądu przemiennego. Współczesne układy napędowe umożliwiają znaczne podwyższenie energooszczędności poprzez stosowanie falownikowych układów napędowych, [1]. Rozwój tego typu układów zasilania i napędowych jest silnie powiązany z wymaganiami przemysłu, a także postępem w dziedzinie automatyzacji procesów produkcji. Nowoczesne urządzenia napędowe muszą spełniać szereg wymagań dotyczących zarówno mocy zastosowanych silników, jak i procesów technologicznych, co przekłada się na:

- maksymalizację sprawności przetwarzania energii elektrycznej na mechaniczną;
- bezstopniową regulację parametrów pracy tj. prędkości kątowej, współczynnika mocy i innych;
- minimalizację uchybu regulacji i czasu trwania stanów nieustalonych układu;

- maksymalne wykorzystanie mocy silnika przy optymalizacji wielkości takich, jak napięcie zasilania, prąd czy też sprawność;
- prostota obsługi i niezawodność całego układu napędowego, [2].

W pracy przedstawiono obliczenia symulacyjne silnika asynchronicznego w środowisku PSIM, który jest programem symulacyjnym przeznaczonym szczególnie do układów energoelektronicznych oraz układów napędowych. Udostępnia on szerokie spektrum szybkich analiz symulacyjnych wyżej wymienionych układów wraz z ich sterowaniem analogowym lub cyfrowym, analizę zjawisk magnetycznych, maszyn elektrycznych oraz ich dynamiki. Zastosowany program SIMVIEW wykorzystano do końcowego przetwarzania danych z programu PSIM i wykreślenia na podstawie symulacji przebiegów czasowych, [3]. Aplikacja umożliwia użytkownikowi bezpośrednią analizę uzyskanych wyników, a także porównywanie ich z wynikami innych analiz.

Estymacja sygnału aktualnego położenia wirnika odbywa się poprzez sumowanie sygnału napięciowego czujnika prędkości oraz sygnału obliczonego z użyciem bloku dzielącego i członów proporcjonalnych. Sygnały V_d_cmd oraz V_q_cmd trafiają na wejścia bloków transformacji dq/abc.

Wyjścia bloku transformacji są poddawane ograniczeniu elementami LIM6, LIM7, LIM8 i trafiają na wejścia komparatorów COMP6, COMP2, COMP3, gdzie są porównywane z пилоkształtnym sygnałem napięciowym o częstotliwości 10 kHz. Sygnały wyjściowe komparatorów sterują tranzystorami IGBT falownika.

3. Metoda kształtowania struktury sterowania silników indukcyjnych w środowisku PSIM

Dla silnika asynchronicznego trójfazowego o mocy 11kW, zaproponowano rozwiązanie sterowania polowego, z uwzględnieniem pracy przy zmiennym obciążeniu oraz dwóch zakresach prędkości roboczej.

Tab. 1. Zestawienie parametrów symulacji w PSIM

L.p.	n_{zad}	M_{obc}
-	obr/min	Nm
1.	970	108,3
2.	970	54,15
3.	650	108,3
4.	1	108,3

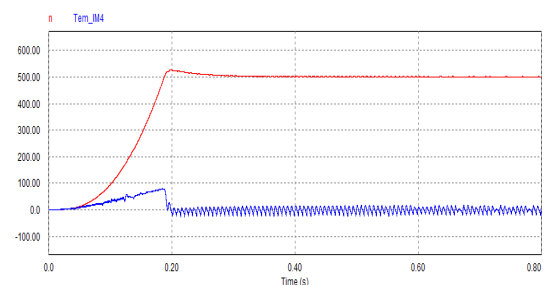
Tabela pierwsza zawiera założenia dla sterowania wektorem pola, poprzez zadawanie momentu obciążającego silnik oraz regulację prędkości obrotowej w układzie napędowym. Otrzymane z wyników symulacji przebiegi czasowe momentu obrotowego i prędkości obrotowej silnika uwzględniają rozruch bez obciążenia, a następnie pracę na biegu jałowym, rysunek drugi.

Kolejna tabela przedstawia parametry jakościowe sterowania przy rozruchu silnika, takie jak: wartości maksymalnego momentu rozruchowego uzyskanego przez silnik M_r , czas rozruchu t_r , oraz procentową wartość przeregulowania prędkości obrotowej e .

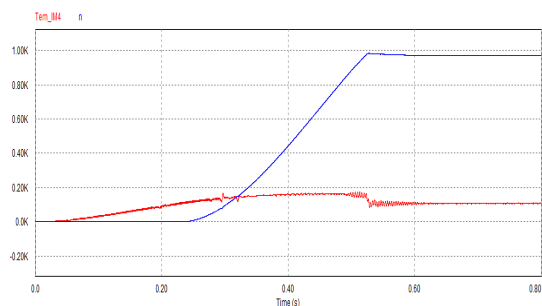
W tabeli drugiej przedstawiono zestawienie parametrów silnika, potrzebnych do parametryzacji układu napędowego symulowanego w PSIM.

Tab. 2. Zestawienie parametrów badanego silnika asynchronicznego trójfazowego

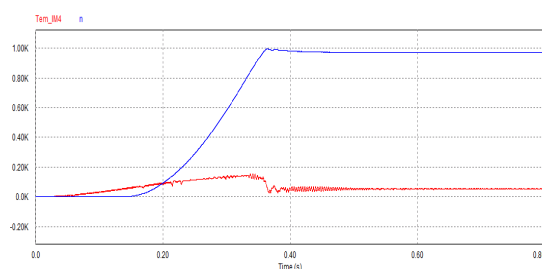
Parametry znamionowe	Wartość	Jednostki
moc P_N	11000	W
napięcie U_N	400	V
prąd I_N	22,87	A
częstotliwość f_N	50	Hz
współczynnik mocy $\cos\varphi_N$	0,78	-
sprawność η_N	0,89	-
obroty n_N	970	obr/min
moment M_N	108,3	Nm
przeciążalność momentem M_{KN}/M_N	2,1	-
rezystancja stojana R_S	0,857	Ω
indukcyjność stojana L_S	0,0139	H
rezystancja wirnika R_R	0,478	Ω
indukcyjność wirnika L_R	0,0074	H
indukcyjność magnesuująca L_M	0,81	H
moment bezwładności wirnika J	0,116	kg*m ²
liczba par biegunów	3	-



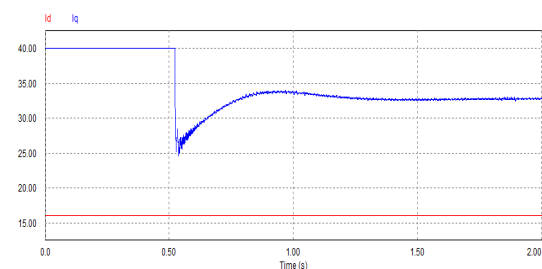
Rys. 2. Przebieg momentu obrotowego i prędkości obrotowej silnika dla biegu jałowego o zadanej prędkości $n_{zad} = 500$ obr/min



Rys. 3. Przebieg momentu obrotowego i prędkości obrotowej dla $n_{zad} = 970$ obr/min oraz $M_{obc} = 108,3$ Nm



Rys. 4. Przebieg momentu obrotowego i prędkości obrotowej dla $n_{zad} = 970$ obr/min oraz $M_{obc} = 54,15$ Nm



Rys. 5. Przebieg prądów I_d oraz I_q dla $n_{zad} = 970$ obr/min oraz $M_{obc} = 108,3$ Nm

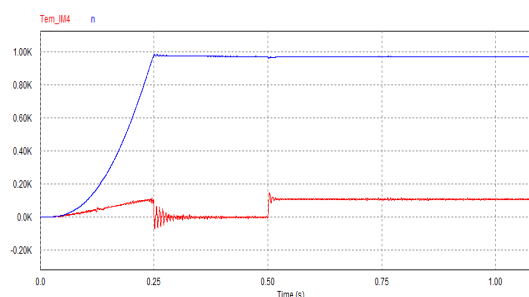
Tab. 3. Zestawienie parametrów wyznaczonych w procesie symulacji, dla $n_{zad} = 500$ obr/min

L.p.	M_{max}	t_r	n_{max}	e
-	Nm	ms	obr/min	%
1.	79,69	198	527	5,4

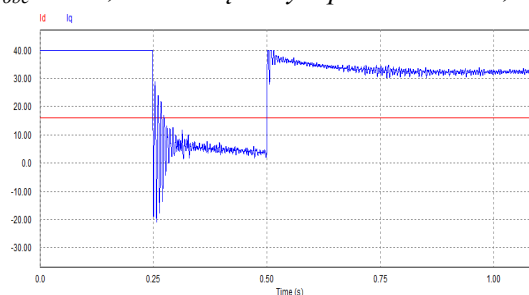
4. Sterowanie silnikiem przy skokowej zmianie obciążenia

Kolejne symulacje pozwoliły na przedstawienie przebiegów czasowych, które uwzględniają zmiany momentu obrotowego, prędkości obrotowej, prądów stojana oraz prądów w osiach rzeczywistej i urojonej układu połowo zorientowanego. Analiza obejmuje załączenie pracy

układu napędowego bez obciążenia, a następnie załączenie momentu obciążającego z określoną zwłoką czasową, $t = 0,5$ s.



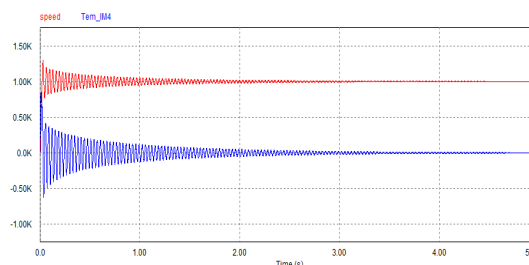
Rys. 6. Przebieg momentu obrotowego i prędkości obrotowej dla $n_{zad} = 970$ obr/min oraz $M_{obc} = 108,3$ Nm załączonym po czasie $t = 0,5$ s



Rys. 7. Przebieg prądów I_d oraz I_q dla $n_{zad} = 970$ obr/min oraz $M_{obc} = 108,3$ Nm załączonym po czasie $t = 0,5$ s

5. Analiza pracy przy bezpośrednim włączeniu silnika asynchronicznego do sieci trójfazowej

Dla porównania właściwości dynamicznych pracy silnika przy sterowaniu polowym i bezpośrednim włączeniu silnika asynchronicznego 11kW do sieci trójfazowej jest analiza przebiegów momentu obrotowego, przedstawiona na rysunku ósmym przy $U_N = 400$ V.



Rys. 8. Przebieg momentu obrotowego i prędkości obrotowej dla silnika bezpośrednio załączonego do sieci

6. Podsumowanie

Uwzględniając przedstawione wyniki dla sterowania silnikiem asynchronicznym można za-

obserwować następujące właściwości dla układów napędowych:

- zastosowanie układu sterowania wektorowego umożliwia pełną kontrolę momentu obrotowego silnika i jego prędkości obrotowej,
- parametry prędkości obrotowej są odtwarzane z wysoką dokładnością, a wartości uchybu regulacji są niewielkie,
- wysoką jakość sterowania osiąga się dla stałej wartości składowej rzeczywistej prądu odpowiedzialnej za strumień oraz regulowanej składowej urojonej prądu stojana proporcjonalnej do momentu. Stałą wartość amplitudy strumienia wirnika uzyskano poprzez zastosowanie regulatora prądu PI,
- wadą wybranej metody sterowania jest konieczność stosowania układów przekształcających współrzędne, co niestety wpływa na niezawodność i koszt takiego układu,
- otrzymane przebiegi prędkości obrotowej oraz przebiegi momentu obrotowego po krótkim czasie osiągają stan ustalony bez zbędnych oscylacji,
- rozruch silnika dla wybranych obciążeń i przejście do stanu ustalonego odbywa się w krótkim czasie, dla biegu jałowego silnika osiągnięto zadaną prędkość w czasie $t < 0,2$ s,
- układ sterowania znacząco ogranicza prądy rozruchowe silnika, co przekłada się na zmniejszoną wartość momentu obrotowego w początkowej fazie biegu silnika, ale zwiększa trwałość jego uzwojeń. Zmniejszona wartość momentu rozruchowego nie pozwala na pokonanie oporów masy wirnika, przez co silnik pozostaje nieruchomy w początkowej fazie rozruchu,
- kształt prądów fazowych uzyskiwanych w układzie sterowania jest bliski sinusoidalnemu i ulega niewielkim odkształceniom, co stanowi istotną zaletę sterowania IFOC;
- porównując przebiegi czasowe dla silnika sterowanego i zasilanego bezpośrednio z sieci, widać szczególną potrzebę stosowania układów sterowania,
- reakcja układu sterowania na skokową zmianę obciążenia jest zadowalająca, a czas przejścia do stanu ustalonego jest rzędu kilku ms,
- układ sterowania połowo zorientowanego umożliwia osiągnięcie maksymalnego momentu przy bardzo niskich wartościach prędkości obrotowej,
- w prezentowanym układzie istnieje możliwość sterowania prędkością na biegu jałowym, na co nie pozwalają skalarne metody sterowania.

7. Literatura

- [1]. Janaszek M.: Optymalizacja statyczna sterowania silnika synchronicznego o magnesach trwałych, Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 12, 2002.
 - [2]. Krishnan R.: Electric motor drives. Modeling, analysis and control. Upper Saddle River, Prentice Hall 2001.
 - [3]. Warzyński M.: Projekt zintegrowanego sterowania silnikiem asynchronicznym wykonawczym, Praca Inżynierska pod kierunkiem P. Błaszczyk, Politechnika Łódzka, 2013.
- Autorzy:** dr inż. Piotr Błaszczyk, Zakład Transportu i Przetwarzania Energii, Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej,
dr inż. Sławomir Barański, Zakład Transportu i Przetwarzania Energii, Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej.