

Andrzej Wnuk

DANFOSS Sp. z o.o. Napędy Elektryczne, Grodzisk Mazowiecki

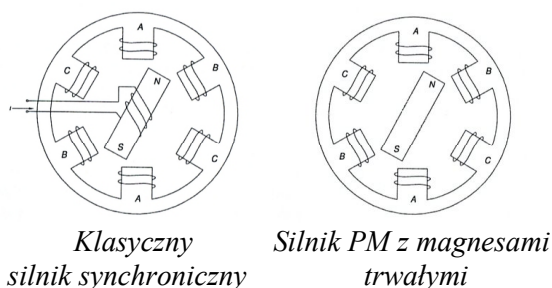
PRZETWORNICE CZĘSTOTLIWOŚCI DO NAPĘDU SILNIKÓW Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

FREQUENCY CONVERTERS FOR DRIVING OF THE BRUSHLESS PERMA- NENT MAGNET MOTORS

Abstract: The Brushless Permanent Magnet motors (PM motors) have been developing very dynamically over the last few years due to technological development. Thanks to their high dynamic performances PM motors tend to be used in many applications where the fast torque response is a key issue. In order to take full advantage of the potential of PM motors we need a drive which is able to offer a suitable control algorithm. This article presents fundamentals of PM motors and shows that some new converters offer control methods which makes use of the special features of Permanent Magnet motors.

1. Budowa i rodzaje silników z magnesami trwałymi

Zasada działania silnika AC z magnesami trwałymi PM (skrót od Permanent Magnet motor) w swojej istocie nie różni się od zasady działania silnika synchronicznego. Główna różnica między tymi typami silników polega na tym, że w silniku PM pole magnetyczne wirnika wytwarzają magnesy trwałe. Takie rozwiązanie wyeliminowało konieczność stosowania na wirniku uzwojenia wzbudzenia i pierścieni ślizgowych, które istniały w klasycznym silniku synchronicznym.



Rys. 1. Budowa klasycznego silnika synchronicznego ze oraz silnika ze wzbudzeniem magnesami trwałymi

Dlatego też powstały w ten sposób silnik nazywa się bezszczotkową maszyną prądu przemiennego (a Brushless Motor). Wirujące pole magnetyczne wytwarzane przez magnesy trwałe, wzbudza w uzwojeniu stojana siłę elektromotoryczną SEM. Ze względu na jej przebieg czasowy rozróżniamy następujące rodzaje silników z magnesami trwałymi:

- bezszczotkowe silniki synchroniczne o trapezoidalnym kształcie siły SEM
- bezszczotkowe silniki synchroniczne o sinusoidalnym kształcie siły SEM, zwane w literaturze sinusoidalnymi silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi PM (Permanent Magnet Synchronous Motor)

Cechą charakterystyczną **silników o trapezoidalnym kształcie siły SEM** jest duża szczelina powietrzna. Uzwojenia stojana posiadają dzięki temu bardzo małą indukcyjność. Niska indukcyjność uzwojeń twornika to mała stała elektromechaniczna, co powoduje, że prądy twornika mogą się zmieniać szybko. Magnesy są zazwyczaj przyklejone do powierzchni wirnika oraz posiadają małą masę, co znacząco obniża moment bezwładności wirnika.

Silniki z sinusoidalną siłą SEM posiadają małą szczelinę powietrzną. Uzwojenia stojana otoczone są żelazem, przez co ich indukcyjność jest dużo większa niż w przypadku silników o trapezoidalnym przebiegu SEM. Również moment bezwładności wirnika tych silników jest większy niż silników o trapezoidalnym kształcie siły SEM.

Zalety silników z magnesami trwałymi:

- wysoka sprawność silnika – brak uzwojenia wzbudzenia na wirniku, a dzięki temu brak strat w miedzi w tym uzwojeniu
- brak komutatora mechanicznego a tym samym problemów związanych z jego konserwacją

- wysokie parametry dynamiczne – mały moment bezwładności wirnika i mała indukcyjność uzwojeń stojana
- liniowa charakterystyka mechaniczna - liniowa zależność momentu od prądu stojana
- duża przeciążalność momentem

Silniki PM obarczone są też wadami:

- wysoki koszt wykonania
- wrażliwość materiałów magnetycznych na wpływ temperatury
- prądy stojana działają rozmagnesowująco na magnesy umieszczone na wirniku. Po przekroczeniu maksymalnego prądu stojana może dojść do trwałego rozmagnesowania wirnika
- magnesy przyklejone do wirnika narażone są na działanie dużych sił odrywających

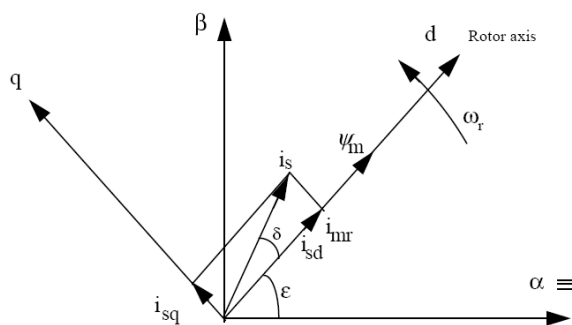
Oba opisane rodzaje silników wymagają innych koncepcji sterowania.

Niektóre przetwornice częstotliwości nowej generacji dedykowane do silników klatkowych współpracują z silnikami synchronicznym PM z sinusoidalną siłą SEM, gdyż do ich sterowania jest wykorzystywany bardzo podobny algorytm jak do silników klatkowych – sterowanie polowo-zorientowane.

2. Zasada sterowania silnikiem PM

Optymalną metodą sterowania silników PM jest metoda polowo – zorientowana. Podstawą algorytmu takiego sterowania jest reprezentacja wektora prądu stojana w układzie współrzędnych d-q związanych z wirującym wektorem strumienia Ψ_m (układ współrzędnych d-q wiruje synchronicznie z wektorem Ψ_m). Wektor prądu rozkłada się wówczas na dwie składowe:

- I_{sd} – składowa prądu oddziaływująca na wypadkowy strumień w silniku PM
- I_{sq} – składowa prostopadła do strumienia, tworząca moment w silniku PM



Rys. 2. Wzajemne położenie wektora prądu I_s , jego składowych I_{sd} , I_{sq} oraz wektora strumienia w układzie współrzędnych d-q związanych z wirnikiem

Kąt δ pomiędzy wektorem prądu stojana, a wektorem strumienia jest nazywanym kątem obciążenia. Od jego wartości zależy wielkość momentu, który rozwija silnik – im większy kąt δ tym większa składowa I_{sq} i tym samym silnik wytwarza większy moment przy danym prądzie stojana. Podczas biegu jałowego kąt obciążenia $\delta=0$. Układ współrzędnych d-q jest związany z wirującym wektorem strumienia Ψ_m , a tym samym z wirującym wirnikiem, gdyż w silniku PM strumień jest wytwarzany przez magnesy trwałe znajdujące się na wirniku. Układ współrzędnych d-q wiruje z prędkością ω_r względem nieruchomego układu współrzędnych α - β związanego ze stojanem. Kąt ϵ jest kątem położenia wirnika w układzie współrzędnych α - β . Strumień w silniku PM pochodzi od magnesów trwałych umieszczonych na wirniku, na który oddziałuje prąd stojana. Oddziaływanie wektora prądu stojana może mieć charakter domagnesowujący lub rozmagnesowujący, zależnie od wielkości kąta obciążenia δ . Moment obciążenia we współrzędnych d-q związanych ze stojanem wyraża się wzorem

$$M = \Psi_m * I_{sq} \quad (1)$$

Optymalne sterowanie silnika otrzymujemy wówczas, gdy kąt obciążenia $\delta = \pi/2$. Wówczas prąd stojana jest wykorzystany optymalnie – otrzymujemy największy możliwy moment przy danym prądzie stojana. Składowa I_{sd} jest wówczas równa 0, czyli brak jest oddziaływania prądu stojana na pole wirnika. Realizując sterowanie z zachowaniem kąta obciążenia $\delta = \pi/2$ ($I_{sd} = 0$), otrzymujemy w wyniku silnik o właściwościach zbliżonych do obcowzbudnej maszyny prądu stałego – moment silnika PM jest wówczas wprost proporcjonalny do prądu stojana. Ważnym pojęciem związanym z silnikami synchronicznymi PM jest wspomniana już siła elektromotoryczna SEM indukowana w uzwojeniu stojana przez pole wirnika. Jest ona wprost proporcjonalna do wielkości strumienia Ψ_m oraz do prędkości kątowej ω i wyraża się wzorem

$$U_{sem} = j\omega * \Psi_m \quad (2)$$

Podczas pracy ustalonej w zakresie do prędkości znamionowej, strumień Ψ_m jest utrzymywany na stałym poziomie, wymaganym do wytworzenia nominalnego momentu.

Obniżenie wartości strumienia jest konieczne jedynie wówczas, gdy zamierzamy pracować z

prędkościami powyżej prędkości nominalnej. Należy wówczas zwiększyć kąt obciążenia δ powyżej $\Pi/2$. Pojawia się wtedy ujemna składowa I_{sd} , osłabiająca pole Ψ_m od magnesów trwałych. W zakresie powyżej prędkości nominalnej silnik pracuje w zakresie obniżonego strumienia, a U_{sem} zachowuje stałą wartość.

3. Praktyczna realizacja sterowania silnikiem PM

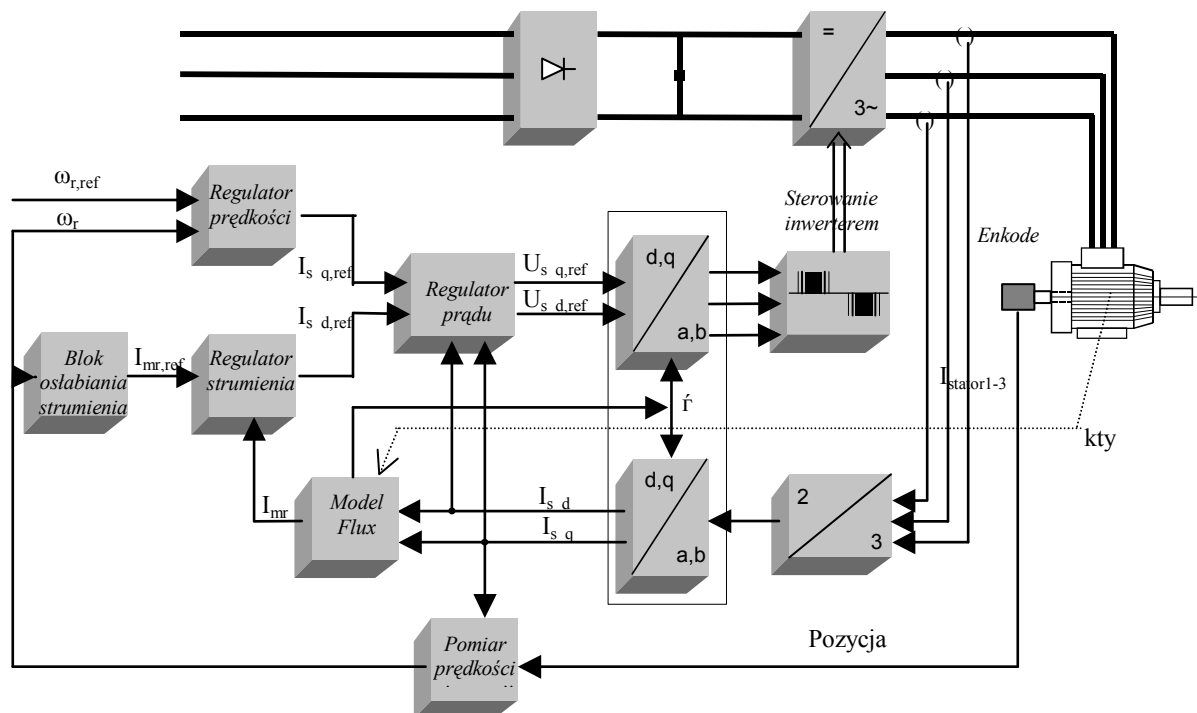
Niektóre współczesne przetwornice częstotliwości mają zaimplementowaną strukturę sterowania dla silników z magnesami trwałymi PM przedstawioną na Rys. 3. Bazuje ona na przedstawionej poprzednio koncepcji sterowania polowo – zorientowanego Pomiar pozycji wału silnika następuje dzięki czujnikowi prędkości (encoder, rewolwer), zainstalowanemu bezpośrednio na wale silnika. Możliwa jest też metoda sterowania bezczujnikowa, zrealizowana w otwartej pętli sterowania prędkością. Ponadto mierzone są trzy prądy wyjściowe przetwornicy. Na podstawie tych pomiarów blok transformacji współrzędnych a-b/d-q wylicza składowe prądu I_d i I_q (w układzie współrzędnych d-q związanych z wirującym wektorem pola) konieczne do realizacji omówionej poprzednio metody polowo-zorientowanej.

Nad wektorem strumienia w silniku (kontrola modułu i fazy) czuwa zawansowany algorytm polowo-zorientowany oznaczony na rysunku blokiem *Model Flux*, skąd pochodzi nazwa tego algorytmu – algorytm FLUX. Sterowanie tranzystorami IGBT w falowniku jest zrealizowane na bazie modulacji wektora przestrzennego, która jest o wiele korzystniejsza niż stosowana wcześniej modulacja PWM (większa sprawność falownika oraz większa maks. Wartość pierwszej harmonicznej napięcia na silniku możliwa do uzyskania z napięcia obwodu DC przetwornicy). Istota modulacji wektorowej jest przedstawiona w literaturze [3].

4. Zasady parametryzacji przetwornic do współpracy z silnikiem z magnesami trwałymi PM

Przed rozpoczęciem parametryzacji musimy zapoznać się ze szczegółowymi danymi silnika PM, takimi jak:

- prąd nominalny
- częstotliwość nominalna
- moment znamionowy silnika
- rezystancja stojana
- indukcyjność stojana w osi d
- liczba biegunów silnika
- wartość siły SEM indukowanej w stojanie przez wirujące pole przy prędkości 1000rpm,



Rys. 3. Przykładowa struktura sterowania zastosowana w badanej przetwornicy częstotliwości

- maksymalna wartość prądu silnika
- maksymalny moment silnika

Po wpisaniu do parametrów przetwornicy w/w danych silnika, specyfikujemy dodatkowo, jaki rodzaj czujnika został wybrany do pomiaru prędkości/położenia wału silnika, jeżeli zdecydowaliśmy się na zamkniętą pętlę regulacji ze sprzężeniem prędkościowym. Zazwyczaj istnieje możliwość współpracy z następującymi czujnikami:

- enkoder 5V
- enkoder SinCos z protokołem HIPERFACE
- enkoder SinCos z protokołem Endat
- enkoder SinCos z protokołem SSI
- resolver

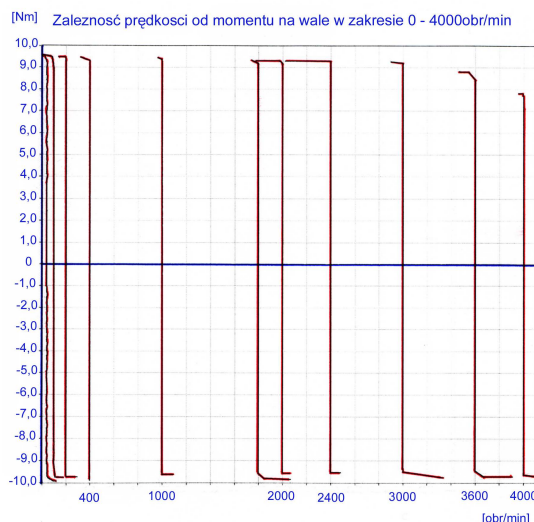
Najważniejszym krokiem przy parametryzacji przetwornicy jest kalibracja położenia wirnika, polegająca na zdefiniowaniu tzw. kąta położenia zerowego. Czujnik położenia wału dostarcza informacji o jego bezwzględnym kącie położenia. Dla algorytmu sterowania jest istotne, aby czujnik podawał wartość kąta położenia wirnika równą 0, gdy wirnik przyjmie pozycję zgodną z pozycją pola wytworzonego przez uzwojenie stojana zasilone napięciem DC. Wymuszenie DC możemy uzyskać bezpośrednio z przetwornicy lub z zewnętrznego zasilacza DC dołączonego do faz silnika. Po wymuszeniu stałego pola magnetycznego wirnik może obrócić się lekko i ustawić w położenie zgodne z kierunkiem pola wytworzonego przez uzwojenia stojana. Bez takiej kalibracji nie jest możliwa poprawna współpraca przetwornicy z silnikiem PM.

5. Wyniki prób obciążania silnika synchronicznego PM w stanach statycznych i dynamicznych

Badaną przetwornicę częstotliwości wyposażono w opcję sprzężenia zwrotnego, aby była możliwa praca napędu w pętli zamkniętej z prędkościowym sprzężeniem zwrotnym za pośrednictwem enkodera typu sin/cos. Następnie dokonano parametryzacji przetwornicy, podając dane znamionowe silnika oraz wykonano wszystkie kroki, opisane w pkt. 4. Próby statyczne wykonano na silniku z magnesami trwałymi o mocy 3,0kW, o prędkości znamionowej 3000obr/min i prądzie nominalnym 10,7A.

5.1. Obciążanie silnika momentem statycznym

Próby przeprowadzono dla kilku prędkości obrotowych silnika, zaczynając od 40rpm a kończąc na 4000rpm, jak przedstawia poniższy wykres. Dla każdej prędkości zwiększano moment obciążenia aż do wartości prędkości nominalnej (3000obr/min). Przy prędkościach obrotowych poniżej prędkości nominalnej było możliwe obciążenie silnika aż do momentu znamionowego – 9,6Nm w zakresie zarówno pracy silnikowej jak i generatorowej. Powyżej prędkości nominalnej silnik pracuje w zakresie osłabionego strumienia, dlatego też nie było możliwe obciążanie silnika pełnym momentem znamionowym. Widoczne na rysunku maksymalne wartości momentu w tym zakresie są niższe od wartości nominalnej.



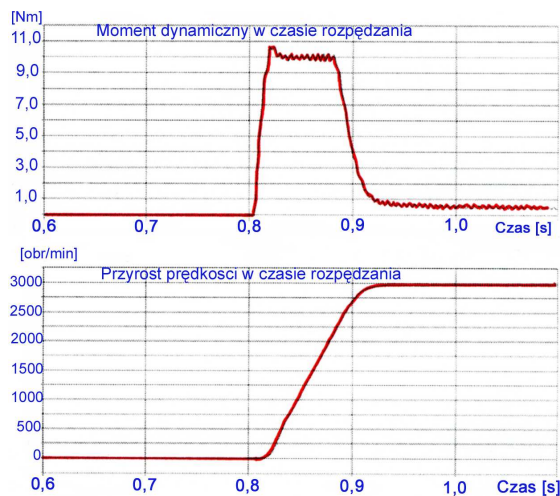
Rys. 4. Obciążanie silnika 3,0kW momentem statycznym przy różnych prędkościach wirnika

Wykres pokazuje wyraźnie, że wirnik zachowuje zadaną prędkość przy zmieniającym się momencie obciążenia.

5.2. Wymuszanie momentu dynamicznego podczas rozpędzania i hamowania

Silnik o mocy 3,6kW został obciążony momentem bezwładności 0,0036586kgm. Badana przetwornica została wyposażona w moduł hamulca (choper + rezystor), aby było możliwe zatrzymanie silnika w krótkim czasie (w odniesieniu do istniejącego na wale momentu bezwładności). Test dynamiczny polegał na rozpędzeniu do prędkości nominalnej (3000obr/min) silnika obciążonego jedynie w/w momentem bezwładności oraz na wyhamowaniu silnika do

prędkości 0rpm. Czas rozpędzania jak i hamowania wynosił 0,11sec.



Rys. 5. Moment dynamiczny podczas rozpędzania silnika PM o mocy 3,6kW sterowanego z badanej przetwornicy. Czas rozpędzania od prędkości 0 – 3000rpm wynosił 0,11s.

Ponieważ przetwornica dysponowała odpowiednią wydajnością prądową, silnik rozwinął moment dynamiczny (ok. 10Nm) wystarczający, aby rozpędzić się od 0rpm do 3000rpm w czasie zgodnym z ustawionym czasem ramp-up, czyli w ciągu 0,11sec, co świadczy o wysokiej dynamice silnika PM sterowanego badaną przetwornicą. Potwierdzeniem szybkiej w/w przetwornicy jest też zarejestrowany bardzo krótki czas wytworzenia momentu przez przetwornicę – moment narastał od wartości 0Nm do wartości nominalnej w czasie do 15ms.

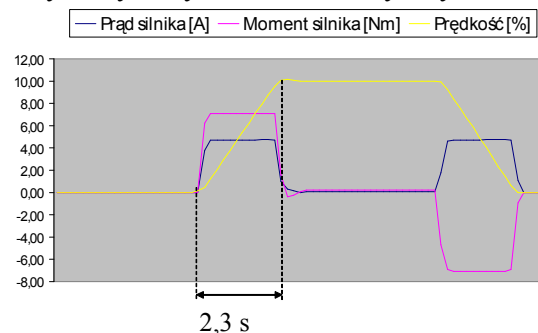
Rys. 6. przedstawia próbę dynamiczną przeprowadzoną z silnikiem obciążonym okrągłym dyskiem o momencie bezwładności 0,052kgm. Masa dysku 7kg, średnica ok. 24,5cm. Silnik rozpędzono również do 3000obr/min.

Próbie przeprowadzono tym razem z silnikiem PM o mocy 503W o następujących danych:

Type	stall torque	Rated speed	Output at nominal speed	Rated torque	Peak torque	PHYSICAL DATA			THERMAL DATA		ELECTRICAL DATA							
						Maximum speed	Moment of inertia	Peak torque acceleration	Thermal time constant	Thermal protection threshold	Voltage constant	Torque constant	Winding line to line resistance (20°C)	Winding line to line inductance	B.E.M.F. at rated speed	Stall current	Rated current	Peak current
	M ₀	n	P _n	M _n	M _{pk}	n _{max}	J	a _{pk}	T _{th}	θ _{max}	k _e	k _t	R _{ww}	L _w	E _n	I ₀	I _n	I _{pk}
	Nm	rpm	W	Nm	Nm	rpm	10 ⁻⁴ Kg·m ²	rad/sec ²	min	°C	Vs	NmA	Ω	mH	Vrms	Arms	Arms	Arms
SS6 01/3	1,0	3000	251	0,80	3,5	6000	0,73	47945	32	140	0,85	1,48	38,1	6,45	268	0,68	0,54	2,37
SS6 02/3	2,0	3000	503	1,60	7,1	6000	1,40	50714	35	140	0,85	1,48	13,5	22,8	268	1,35	1,08	4,81
SS6 03/3	3,2	3000	817	2,60	10,0	6000	1,84	54348	38	140	0,85	1,48	9,7	18,3	268	2,17	1,76	6,77
SS6 04/3	4,2	3000	1068	3,40	14,0	6000	2,28	61404	40	140	0,85	1,48	6,7	13,1	268	2,84	2,30	9,48
SS6 05/3	5,3	3000	1351	4,30	18,0	6000	2,72	66176	40	140	0,85	1,48	4,8	9,4	268	3,59	2,91	12,18

Ustawiony w parametrach przetwornicy czas rozpędzania (ramp-up) i hamowania (ramp-down) wynosił również 0,11s. Ponieważ moment bezwładności dysku (0,052kgm) był ponad 2 rzędy większy od momentu bezwładności wirnika, (0,00014 kgm), dlatego też cykl rozpędzania przebiegał z ograniczeniem momentu o wartości zgodnej z nastawami w przetwornicy częstotliwości, w tym przypadku 440% momentu nominalnego silnika, co wynosiło 1,6Nm*4,4=7,1Nm. Podczas hamowania wystąpił moment ujemny (praca generatorowa silnika), lecz jego wartość bezwzględna pozostała taka sama jak podczas cyklu rozpędzania. W czasie prób rozpędzania i hamowania realny czas rozruchu jak i hamowania wydłużył się ze względu na wspomniane ograniczenie mo-

mentu, do 2,3 sec, co przedstawia Rys. 6. Rejestracji dokonano programem narzędziowym, który umożliwia parametryzację przetwornicy częstotliwości oraz rejestrację przebiegów czasowych wybranych wielkości fizycznych.



Rys. 6. Rozpędzanie i hamowanie silnika PM obciążonego dużym momentem bezwładności

Powyższy test pokazuje wysoką dynamikę silnika PM, gdy współpracuje on z badaną przetwornicą. Ponadto wynika z niego wyraźnie, że silnik z magnesami trwałymi współpracując z w/w przetwornicą częstotliwości może wykonać poprawny rozruch, nawet w sytuacji, gdy moment oraz prąd silnika osiągają wartość ograniczenia podczas całego cyklu rozpędzania czy hamowania.

6. Wnioski końcowe

W artykule zostały omówione podstawy budowy i optymalnego sterowania silnikami z magnesami trwałymi oraz jedno z rozwiązań, wprowadzające algorytm FLUX, umożliwiający współpracę z silnikami PM. Przetwornice te wykorzystują w pełni potencjał dynamiki, jaki istnieje w silnikach PM, gdyż w sposób efektywny oddziałują na moment wytwarzany w silniku, wpływając bezpośrednio na procesy elektromagnetyczne w nim zachodzące.

Analizując charakterystyki statyczne oraz dynamiczne możemy potwierdzić pełną przydatność tej rodziny przetwornic do współpracy z silnikami PM.

7. Literatura

- [1]. Materiały wewnętrzne firmy Danfoss.
- [2]. Texas Instruments: *Digital Signal Processing Solution for Permanent Magnet Synchronous Motor, Application Note BPRA044.*
- [3]. Texas Instruments: *Field Oriented Control of 3-phase AC Motors, Application Note BPRA073.*
- [4]. J. Łastowiecki: *Elementy i podzespoły półprzewodnikowych układów napędowych.*