

Dariusz Świerczyński, Wiktor Książek, Artur J. Moradewicz
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Elektrotechniki, Warszawa

NAPĘD SZEŚCIOFAZOWY Z SILNIKIEM PMSM DLA POJAZDÓW HYBRYDOWYCH

SIX-PHASE DRIVE WITH PMSM MOTOR FOR HYBRID VEHICLES

Streszczenie: Artykuł przedstawia budowę i badania układów sterowania sześciofazowego silnika synchronicznego o magnesach trwałych (ang. PMSM) o mocy 200kW dla napędów do pojazdów elektrycznych. Napędy wielofazowe charakteryzują się większą gęstością mocy i momentu elektromagnetycznego, wyższą niezawodnością oraz niższą wagą i gabarytami w porównaniu z ich trójfazowymi kontrpartnarami. Dlatego są ostatnio intensywnie rozwijane pod kątem zastosowań w elektromobilności. Wymagają jednak do zasilania rozbudowanych przekształtników tranzystorowych i dostosowania układów sterowania w szczególności dla zapewnienia podwyższonej niezawodności np. praca przy uszkodzeniu jednej z faz przekształtnika. W artykule podano podstawowe parametry napędu sześciofazowego z silnikiem synchronicznym PMSM oraz eksperymentalnym przekształtnikiem zbudowanym w technologii IGBT. Układ sterowania napędu bazuje na metodzie wektorowej FOC (ang. Field Oriented Control) z podwójną transformacją Parka. Przedstawiono opracowane modele symulacyjne w programie PSIM oraz wstępne wyniki badań.

Abstract: The article presents the construction and research of the control of a six-phase permanent magnet synchronous motor (PMSM) of 200kW power for electric vehicle drives. Multiphase drives are characterized by higher power and electromagnetic torque density, higher reliability, and lower weight and dimensions compared to their three-phase counterparts. That is why they have been intensively developed recently in terms of application in electromobility. However, they require that the power supply of extensive transistor converters and further control in the specification for the assessment of reliability quality, e.g. operation with failure of one of the converters. The article presents the basic parameters of a six-phase drive with a PMSM synchronous motor and an experimental converter built in the IGBT technology. The drive control system is based on the FOC (Field Oriented Control) vector method with double Park transformation. The developed simulation models in the PSIM program and preliminary research results were presented.

Słowa kluczowe: napędy elektryczne, silniki wielofazowe, sterowanie FOC

Keywords: electric drives, multiphase motors, FOC control

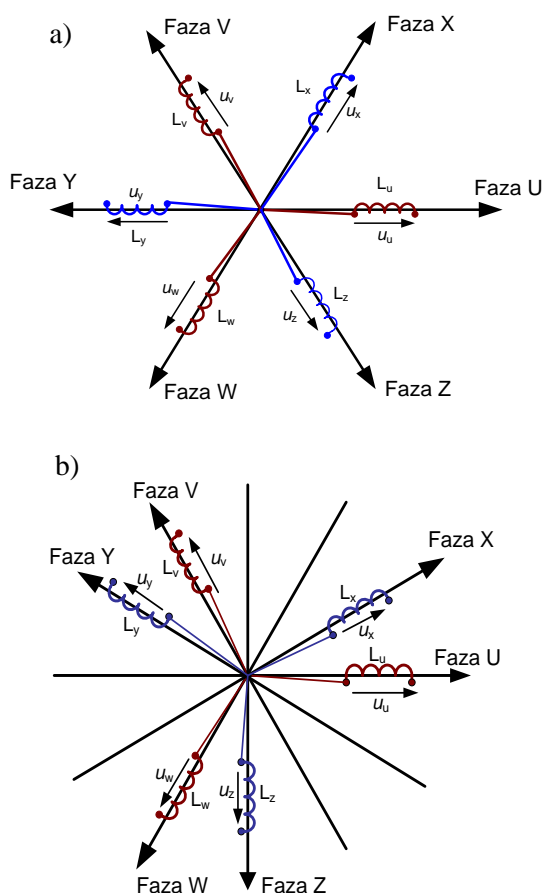
1. Wstęp

Silniki wielofazowe stosowane są w napędach dużej mocy w trakcji, hutnictwie, transporcie górnictwym, w napędzie pomp, wentylatorów i kompresorów dużej mocy, a ostatnio także w energetyce odnawialnej i elektromobilności [1]. Do ich istotnych zalet należą: mniejsze wartości znamionowe prądów fazowych (dla danej mocy i napięcia); w przekształtniku zasilającym można stosować elementy o mniejszej dopuszczalnej wartości prądu; mniejsze amplitudy wahań momentu elektromagnetycznego, wyższa niezawodność - możliwa jest praca napędu przy uszkodzonej jednej fazie silnika lub gałęzi przekształtnika. Jednocześnie silniki wielofazowe w porównaniu z 3-fazowymi charakteryzują się: większą złożonością konstrukcji mechanicznej; zasilanie z przekształtników energoelektrycznych wielofazowych, przy czym liczba faz silnika i przekształtnika są takie

same; nie mogą być zasilane z sieci trójfazowej, w szczególności silniki 5-fazowe, natomiast silniki 6-fazowe i dualne 3-fazowe mogą być zasilane z sieci połową faz.

1.1 Podział układów sześciofazowych

Zarówno silniki 6-fazowe jak i przekształtniki mogą pracować w różnych konfiguracjach połączeń. Na rys. 1 pokazano uproszczone schematy połączeń sekcji trójfazowych dla uzwojeń silnika sześciofazowego o wspólnym punkcie neutralnym (a) symetrycznego, (b) niesymetrycznego. Można wykazać [4], że w szczelinie silnika z uzwojeniem niesymetrycznym, (rys. 1b), znikają harmoniczne przestrzenne $h = 6n \pm 1$ dla h nieparzystych, w tym harmoniczne 5 oraz 7 o największej amplitudzie, natomiast rozkład symetryczny (rys. 1a) nie eliminuje żadnej harmonicznej układu 3-fazowego.



Rys. 1. Połączenia sekcji 3-fazowych dla układu 6-fazowego o wspólnym punkcie neutralnym: a) symetryczny b) niesymetryczny [2]

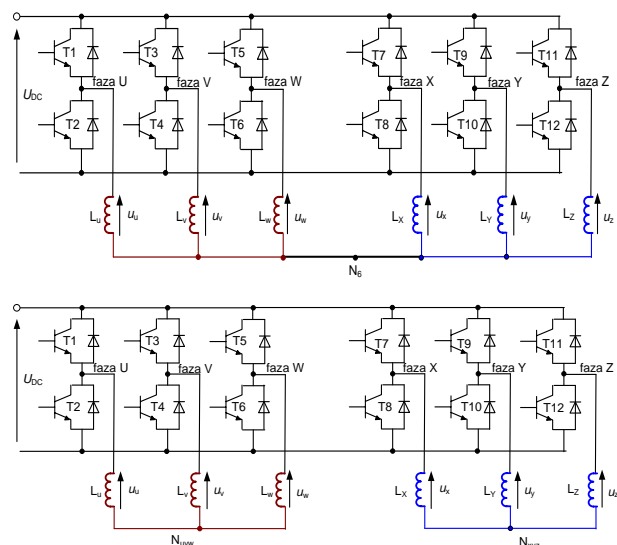
Natomiast na rys. 2 pokazano schemat obwodu mocy przekształtnika dla układu sześciofazowego o wspólnym punkcie neutralnym (a) oraz (b) o rozdzielonych punktach neutralnych.

2. Silnik 6-fazowy PMSM

Podstawowe parametry silnika 6-fazowego synchronicznego o magnesach trwałych (ang. PMSM) zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Parametry badanego silnika PMSM

Budowa	Silnik PMSM 6-fazowy asymetryczny
Zasilanie	Falownik 6-fazowy
Moc znamionowa	200kW
Stała K_e	318,2
Liczba biegunów	10
Rezystancja stojana	8.8m Ω
Indukcyjności L_d	0.6mH
Indukcyjności L_q	0.89mH
Moment bezwładności	2kgm ²



Rys. 2. Obwód mocy przekształtnika 6-faz dla układu (od góry): o wspólnym punkcie neutralnym, oraz rozdzielonych punktach neutralnych

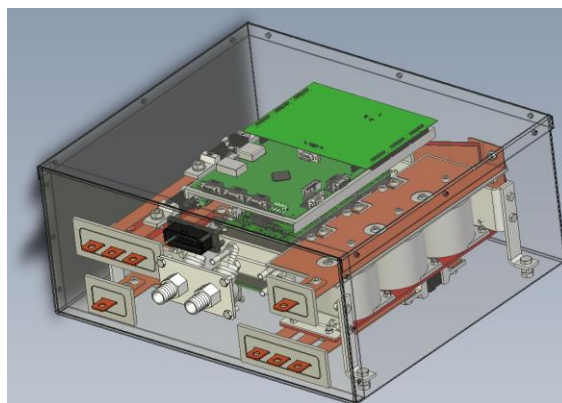
3. Falownik 6-faz na tranzystorach IGBT

Dwie wersje schematów obwodów mocy przekształtnika 6-fazowego pokazano na rys. 2. Podstawowe parametry eksperymentalnego przekształtnika 6-fazowego zaprojektowanego i wykonanego w Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki zestawiono w poniższej Tabeli.

Tabela 2. Parametry falownika 6-fazowego

Nazwa	Wartość
Max częstotliwość	Fmax = 250Hz
Moc znamionowa	Pn = 250kW
Moc maksymalna	Pmax = 450kW (30s)
Częstotliwość łączeń	Fs = 10kHz
Napięcie znamionowe	Udc = 700V

Widok modelu 3D budowy mechanicznej falownika pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Model 3D falownika 250kW

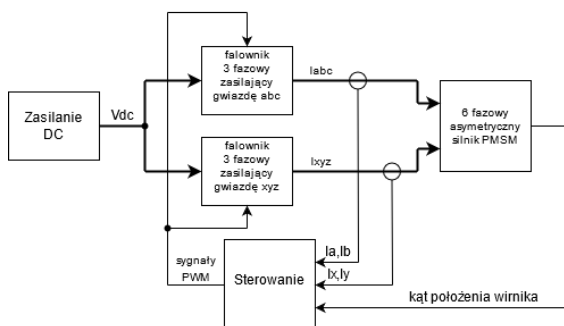


Rys. 4. Eksperymentalny falownik 250kW

Jak widać, falownik mimo dużej mocy ciągłej i przeciążalności (420/250kW) posiada kompaktową budowę i wymiary.

4. Układ sterowania napędu

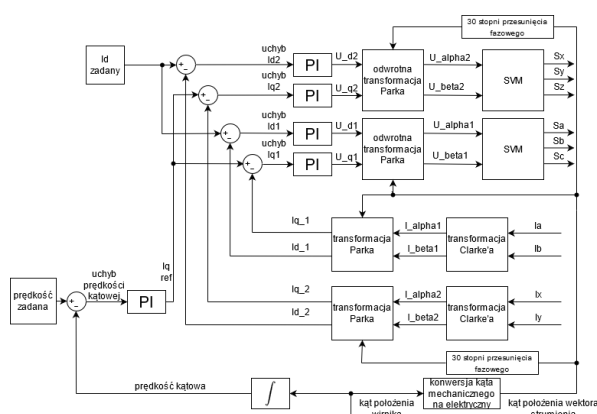
Schemat blokowy połączeń obwodu głównego napędu pokazano na Rys. 5. System zawiera dwa falowniki 3-fazowe dołączone do silnika 6-fazowego PMSM. Pozwala to na wariantowy wybór połączeń silnika z falownikami.



Rys. 5. Schemat blokowy połączeń badanego napędu 6-fazowego z silnikiem PMSM

Z kolei Rys. 6 przedstawia schemat blokowy systemu sterowania FOC [3] napędu dostosowanego do silnika 6-fazowego (podwójna transformacja Parka i regulatory prądów w osi *d* i *q*). Silnik wyposażony jest w resolver, z którego sygnał położenia wału wykorzystywany jest zarówno w obu transformacjach Parka jak też do wyznaczania prędkości silnika dostarczanej do regulatora prędkości typu PI. Regulator ten zadaje - proporcjonalne do momentu - jednakowe składowe *i*_{q1} oraz *i*_{q2} do regulatorów PI gdzie porównywane są z odpowiednimi prądami mierzonymi. Regulatory prądów *i*_d oraz *i*_q generują napięcia stojana *u*_d, *u*_q, które po odwrotnej

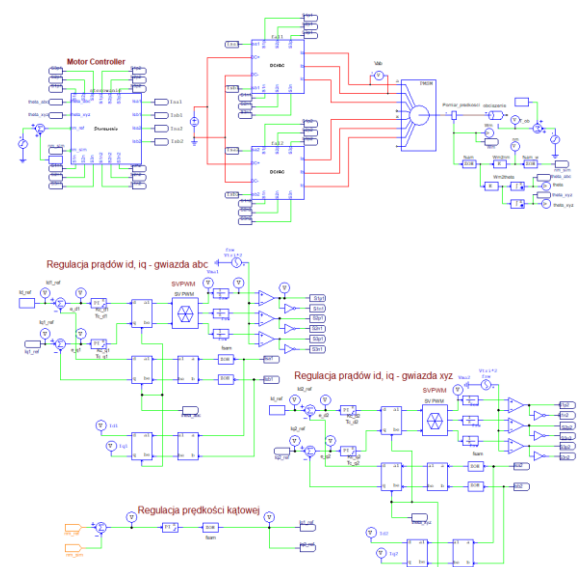
transformacji Parka *u*_{alfa}, *u*_{beta} sterują modulatorami SVM obu falowników.



Rys. 6. Schemat blokowy układu sterowania FOC 6-fazowego napędu PMSM z podwójną transformacją Parka

5. Model symulacyjny i wyniki badań napędu

Dla wykonania badań wstępnych całego systemu sterowania napędem: silnik + przekształtnik + układ sterowania wektorowego FOC opracowano model symulacyjny w programie PSIM pokazany na Rys. 7.

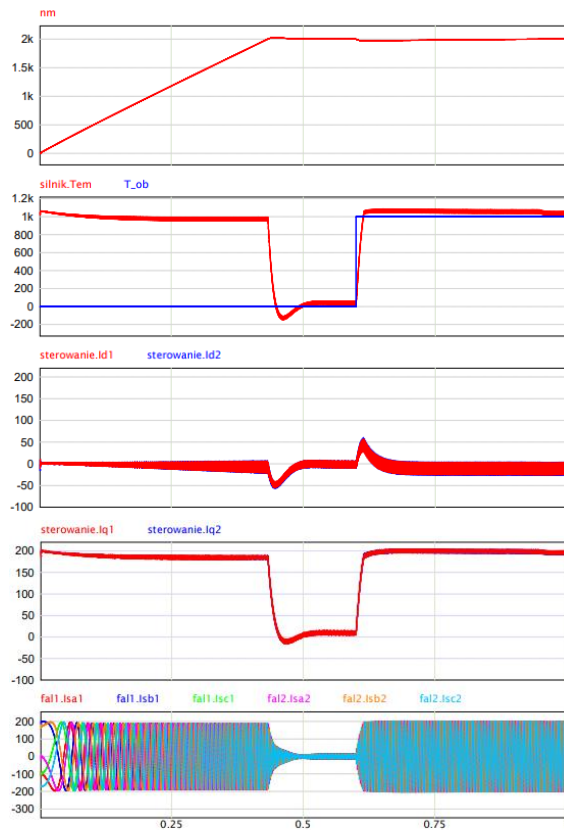


Rys. 7. Schemat modelu symulacyjnego napędu 6-fazowego PMSM ze sterowaniem FOC w programie symulacyjnym PSIM

W symulowanym układzie przyjęto asymetryczne połączenie uzwojeń maszyny (Rys. 1b), co zapewnia redukcję nieparzystych harmonicznych przestrzennych pola magnetycznego [4] i przekłada się także na redukcję harmo-

nicznych generowanego przez silnik momentu elektromagnetycznego.

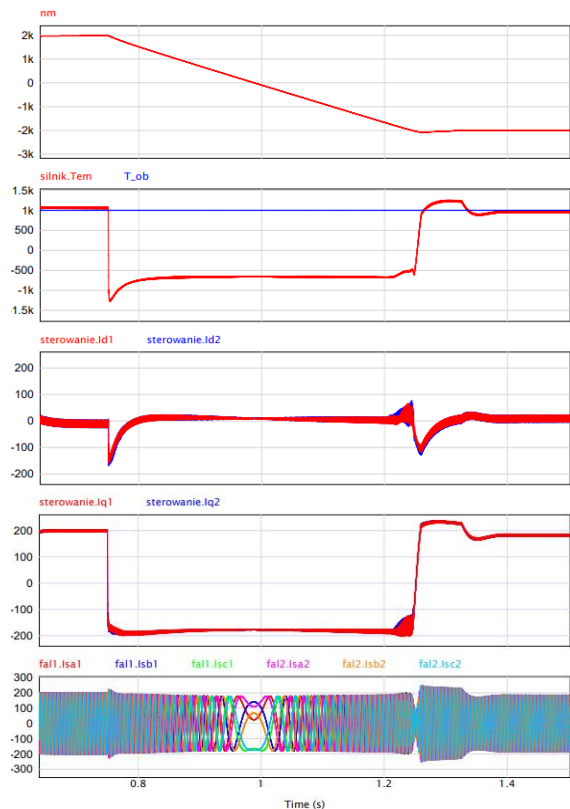
Przykładowe oscylogramy podczas rozruchu napędu, nawrotu prędkości kątowej oraz skokowego załączenia momentu obciążenia przy stałej prędkości kątowej pokazano odpowiednio na rys. 8 – 10.



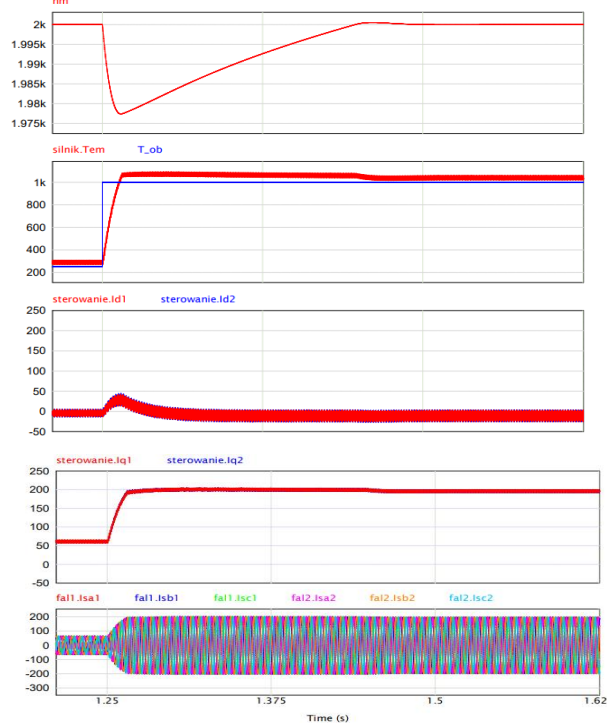
Rys. 8. Rozruch przy biegu jałowym napędu
Od góry: prędkość w obr/min; moment elektromagnetyczny (kolor czerwony) i obciążenia (kolor niebieski) w Nm; prądy i_{d2} , i_{d1} w A; prądy i_{q1} , i_{q2} w A; prądy fazowe w A

W rozważanym napędzie moment elektromagnetyczny generowany jest przez dwie składowe prądu i_{q1} oraz i_{q2} regulowanych osobno przez dwa falowniki. Przy czym należy zwrócić uwagę na zachowanie w stanach dynamicznych prawidłowej symetrii obciążeń prądów i_d oraz i_q obu falowników. W stanach dynamicznych silnik 6-fazowy rozwija moment 1000Nm wykazując przy tym wysoką dynamikę.

Na rys. 10 należy zwrócić uwagę, że prędkość obrotowa pokazana jest w zmniejszonej skali w stosunku do oscylogramów na rys. 8 i rys. 9.

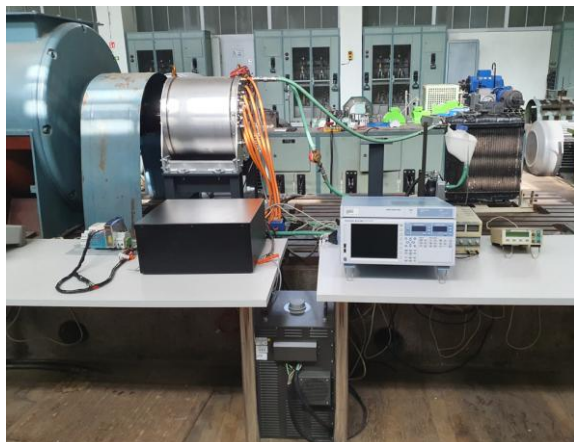


Rys. 9. Nawrót prędkości przy biegu jałowym
Od góry: prędkość w obr/min; moment w Nm; prądy i_{d2} , i_{d1} w A; prądy i_{q1} , i_{q2} w A; prądy fazowe w A



Rys. 10. Skokowa zmiana momentu obciążenia
Od góry: prędkość w obr/min; moment w Nm; prądy i_{d2} , i_{d1} w A; prądy i_{q1} , i_{q2} w A; prądy fazowe w A

Widok całego stanowiska badawczego napędu z silnikiem 6-fazowym PMSM oraz falownikiem przedstawiony jest na rys. 11



Rys. 11. Widok stanowiska badawczego napędu z silnikiem 6-fazowym PMSM oraz falownikiem (w czarnej obudowie)

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Artykuł przedstawia napęd z silnikiem 6-fazowym PMSM oraz eksperymentalnym falownikiem wykonanym w technologii IGBT. Falownik został opracowany i zbudowany w Łukasiewicz - Instytut Elektrotechniki dla układów napędowych w zastosowaniu do napędów autobusowych, samochodów osobowych i ciężarowych oraz innych pojazdów użytkowych oraz przemysłowych. Opracowany napęd charakteryzuje się następującymi zaletami:

- duża moc ciągła i chwilowa,
- kompaktowe wymiary i gabaryty,
- wysoka dynamika dzięki sterowaniu FOC z podwójną transformacją Parka
- prawidłowy rozdział prądów pomiędzy oba falowniki zarówno w stanach ustalonych jak też dynamicznych.

Dalsze prace obejmą uruchomienie i badania laboratoryjne opracowanego napędu na stanowisku badawczym z silnikiem opracowanym

przez Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL.

6. Literatura

- [1]. K. Dąbała, M.P. Kaźmierkowski, Converter-Fed Electric Vehicle (Car) Drives – A Critical Review, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 9/2019, s. 1-12.
- [2]. M. Janaszek, Dwusilnikowy napęd bezpośredni dla pojazdów turystycznych, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 3, str. 185 -190, 2014.
- [3]. M. Stasiak, „Opracowanie, budowa i badania falownikowego napędu z silnikiem PMSM dla pojazdów elektrycznych”, Praca dyplomowa magisterska, *Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej – Łukasiewicz-Instytut Elektrotechniki (Ł-IEL)*, 2019.
- [4]. J. Bernatt, T. Glinka, „Maszyny elektryczne z uzwojeniem 6-fazowym”, *Wiadomości Elektrotechniczne*, str. 14-19, nr 12, 2008.

Autorzy

Dr inż. Artur Moradewicz zatrudniony na stanowisku lidera obszaru w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki w Warszawie.

Dr inż. Dariusz Świerczyński zatrudniony na stanowisku głównego specjalisty w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki w Warszawie.

Inż. Wiktor Książek zatrudniony na stanowisku młodszego specjalisty w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki w Warszawie.

Informacje dodatkowe

Projekt realizowany jest w ramach wewnętrznego projektu w Sieci Badawczej Łukasiewicz, pod tytułem „Polska generacja układów napędowych w zastosowaniu do napędów autobusowych, samochodów osobowych i ciężarowych oraz innych pojazdów użytkowych oraz przemysłowych”. (akronim POLNAPEL).