

Radosław Machlarz
Politechnika Lubelska

PRZEGLĄD STRATEGII STEROWANIA SYNCHRONICZNEGO SILNIKA RELUKTANCYJNEGO Z WIRNIKIEM ANIZOTROPOWYM PAKIETOWANYM POOSIOWO

CONTROL STRATEGY FOR SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR WITH AXIALLY LAMINATED ANISOTROPIC ROTOR - REVIEW

Streszczenie. W artykule dokonano przeglądu istniejących obecnie strategii optymalnego sterowania synchronicznego silnika reluktancyjnego z wirnikiem o rozłożonej anizotropii magnetycznej pakietowanego poosiowo oraz przeprowadzono analizę możliwości wykorzystania wybranych odmian i modyfikacji metody DTC (*direct torque control*) do realizacji określonych strategii sterowania. W konkluzji wskazano na te struktury sterowania DTC, które najlepiej nadają się do wykorzystania w układach optymalnego sterowania silnika SynRM.

Abstract. In the paper a review of currently used optimal control strategies of axially laminated anisotropic synchronous reluctance motor was presented. The analysis of potential use of selected variants and modifications of direct torque and flux control techniques (DTC) for the realization of chosen control strategies was also performed. In the conclusion, the method best suited for the realization of optimal control strategy of synchronous reluctance motor was pointed out.

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny reluktancyjny, sterowanie optymalne, bezpośrednie sterowanie momentem i strumieniem.

Keywords: synchronous reluctance motor, optimal control, direct torque and flux control.

1. Wstęp

Synchroniczne silniki reluktancyjne (SynRM) stają się obecnie coraz bardziej konkurencyjne w stosunku do silników indukcyjnych klatkowych. Wielu producentów oferuje silniki z wirnikiem pakietowanym poprzecznie, wyposażonym w klatkę rozruchową. Ich zalety to prosta i tania konstrukcja oraz niezależność prędkości obrotowej od momentu obciążenia. Poważną wadą tego rozwiązania jest jednak niski współczynnik mocy oraz niezbyt duży moment.

Znaczącą poprawę parametrów silnika SynRM osiąga się dzięki zastosowaniu wirnika typu ALA (*axially laminated anisotropic*), tj. wirnika o rozłożonej anizotropii magnetycznej, pakietowanego poosiowo. Konstrukcja wirnika typu ALA uniemożliwia umieszczenie na nim klatki rozruchowej, co oczywiście wyklucza bezpośredni rozruch oraz znacznie pogarsza stabilność pracy w stanach dynamicznych przy sterowaniu skalarnym. Pełne wykorzystanie możliwości, jakie daje anizotropowy wirnik o dużym współczynniku asymetrii, jest możliwe

tylko w zamkniętym układzie sterowania wektorowego przy zastosowaniu odpowiedniej strategii optymalizacyjnej [1].

Poszukując odpowiedniej strategii sterowania dla synchronicznego silnika reluktancyjnego z wirnikiem anizotropowym pakietowanym poosiowo, brano pod uwagę sterowanie połowo-zorientowane FOC (*field oriented control*) oraz bezpośrednie sterowanie momentem DTC (*direct torque control*). Porównania właściwości dynamicznych silnika reluktancyjnego sterowanego metodą FOC oraz metodą DTC z klasyczną tablicą przełączeń dokonano w pracy [2].

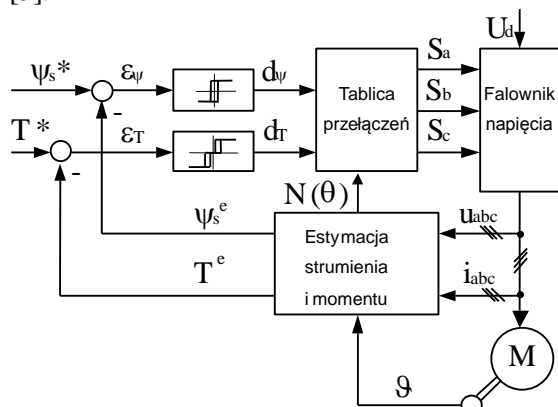
W ostatnich latach pojawiło się wiele opracowań dotyczących wprowadzenia modyfikacji i udoskonalień w stosunku do klasycznej metody DTC. W większości prace te dotyczą układów wykorzystywanych do sterowania silników indukcyjnych, rzadziej silników synchronicznych z magnesami trwałymi. Sytuacja ta zrodziła potrzebę dokonania przeglądu istniejących obecnie odmian i modyfikacji metody sterowania DTC

oraz przeanalizowania możliwości ich wykorzystania w układzie sterowania synchronicznego silnika reluktancyjnego.

W niniejszym artykule przedstawiono przegląd istniejących obecnie strategii optymalnego sterowania silnika SynRM oraz przeprowadzono analizę możliwości wykorzystania wybranych odmian i modyfikacji metody DTC do realizacji określonych strategii sterowania.

2. Klasyczna struktura sterowania DTC

W klasycznej metodzie DTC (rys. 1), sterowanie momentem i strumieniem stojana odbywa w dwóch niezależnych pętlach regulacji histerezy, bez konieczności kontroli prądu stojana. Zadane wartości momentu i strumienia porównywane są z wartościami estymowanymi a uchyby podawane są na regulatory histerezy. Wartości dyskretne wyjść regulatorów oraz wskaźnik aktualnego położenia wektora strumienia są podstawą do wyboru odpowiedniej kombinacji stanów kluczy półprzewodnikowych falownika napięcia na podstawie predefiniowanej tablicy przełączeń [3].



Rys.1. Klasyczna struktura sterowania DTC

Powyższa, podstawowa struktura sterowania DTC, zastosowana w układzie sterowania synchronicznego silnika reluktancyjnego, charakteryzuje się dobrymi właściwościami dynamicznymi i małym uchybem statycznym regulacji prędkości. Niestety, przy niewielkich prędkościach a w szczególności podczas rozruchu, występują duże pulsacje momentu i strumienia, oraz znaczne odkształcenie od przebiegu sinusoidalnego prądów fazowych [2].

2.1. Możliwości modyfikacji klasycznej struktury sterowania DTC

Wśród możliwych sposobów niwelowania mankamentów klasycznej metody DTC z tablicą przełączeń, można wyodrębnić trzy główne kierunki jej modyfikacji:

- wprowadzenie innych typów regulatorów, np. liniowych, predykcyjnych lub regulatorów o zmiennej strukturze, w miejsce regulatorów histerezy momentu i strumienia [4,5,6],

- zmiana sposobu kształtowania wektora napięcia stojana, np. zwielokrotnienie liczby wektorów aktywnych, wprowadzenie modulatora wektorowego lub modulacji PWM w miejsce klasycznej tablicy przełączeń wektorów aktywnych i zerowych [7,8,9],

- użycie alternatywnych metod odwarzania strumienia i momentu oraz określania położenia wektora strumienia względem osi podłużnej wirnika [10,11].

Sposobem na zmniejszenie pulsacji momentu podczas rozruchu i przy niskich prędkościach jest modyfikacja tablicy przełączeń [8]. Sposób ten polega najczęściej na takiej zmianie algorytmu przełączeń, aby zminimalizować konieczność częstego załączania kluczy tworzących wektor zerowy napięcia poprzez wprowadzenie odpowiedniej kombinacji wektorów aktywnych.

Podobny efekt osiąga się w wyniku zastosowania algorytmu predykcyjnego [7]. Podejście takie polega na każdorazowym obliczaniu czasu załączania wektora aktywnego oraz wektora zerowego w ramach jednego okresu próbkowania tak, aby pod koniec tego okresu moment osiągnął wartość równą wartości zadanej. Brane są pod uwagę tylko dwa z sześciu wektorów aktywnych, zapewniające pożądaną zmianę strumienia (zwiększenie lub zmniejszenie) [6].

Największy wpływ na właściwości dynamiczne układu sterowania ma rodzaj zastosowanego regulatora w połączeniu z trybem pracy inwertera [1]. Załączanie określonych wektorów napięcia na podstawie stanów wyjść odpowiednich komparatorów histerezy przy niewielkich prędkościach obrotowych nieuchronnie prowadzi do powstawania dużych pulsacji momentu i silnych odkształceń przebiegu prądu. Poza tym, implementacja regulatorów histerezy w technice cyfrowej zmusza do stosowania bardzo dużych częstotliwości próbkowania procesorów

sygnałowych [6]. Problemów związanych z powstawaniem pulsacji momentu przy niewielkich prędkościach obrotowych można uniknąć przez zastosowanie modulatora wektora napięcia, który umożliwia otrzymanie dowolnego wektora napięcia za pomocą odpowiedniej sekwencji załączania kluczy odpowiadających dwóm sąsiednim wektorom aktywnym i wektorowi zerowemu. Strategia ta, określana jako SVM (*space-vector modulation*), jest korzystna w stanach ustalonych oraz przy małych prędkościach obrotowych [8]. W stanach dynamicznych natomiast najlepiej sprawdza się klasyczna strategia DTC. Wybór odpowiedniej strategii dokonuje się on-line, w oparciu o wartość uchybu regulacji momentu i strumienia, z wykorzystaniem regulatora liniowego [8].

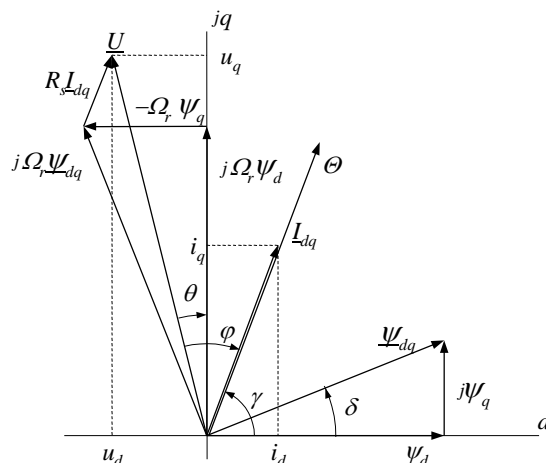
Modulator wektora napięcia może być również zrealizowany w technice PWM. Stała i odpowiednio dobrana częstotliwość kluczowania zapewnia małą zawartość wyższych harmonicznych w prądzie stojana i ogranicza pulsacje momentu nawet przy bardzo małych prędkościach. Metody sterowania oparte na tej zasadzie, w pętłach regulacji momentu i strumienia zwykle zawierają regulatory liniowe typu PI, mogą zawierać także regulatory predykcyjne, regulatory o zmiennej strukturze a nawet regulatory oparte na sztucznych sieciach neuronowych i logice rozmytej [11].

3. Strategie sterowania wektorowego SynRM

Synchroniczny silnik reluktancyjny z wirnikiem o dużej anizotropii magnetycznej nie może pracować w układzie otwartym z uwagi na brak klatki rozruchowo-tłumiącej, musi być zatem zasilany w zamkniętym układzie sterowania wektorowego z czujnikiem położenia wirnika. Znane są dwa podstawowe rodzaje strategii sterowania wektorowego synchronicznego silnika reluktancyjnego: sterowanie przy stałym oraz przy zmiennym kącie wymuszenia γ (rys.2) [1].

Spośród strategii sterowania optymalnego przy stałym kącie wymuszenia $\gamma = const.$ można wyróżnić [1]:

- sterowanie z maksymalizacją momentu przy danym prądzie (*MTA – max. torque per ampere*),
- sterowanie z maksymalizacją sprawności (*ME – max. efficiency*),



Rys.2. Wykres fazorowy napięć, prądów i wymuszeń magnetycznych dla silnika SynRM

- sterowanie z maksymalizacją współczynnika mocy (*MPF – max. power factor*),
- sterowanie z maksymalizacją szybkości zmian momentu (*MRCT – max. rate of change of torque*).

Wykorzystując zależności na moment i strumień:

$$T_e = \frac{3}{2} p (L_d - L_q) i_d i_q = \frac{3}{2} p (L_d - L_q) \frac{I_{dq}^2}{2} \sin 2\gamma, \quad (1)$$

$$\Psi_{dq} = \sqrt{(L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2}, \quad (2)$$

można wykazać, że dla sterowania *MTA* i *ME* optymalna wartość kąta wymuszenia spełnia warunek [2]:

$$\tan \gamma = \frac{i_q}{i_d} = 1, \quad \gamma = \frac{\pi}{4}. \quad (3)$$

Pomijając straty w żelazie i straty w uzwojeniu można również wykazać, że dla sterowania *MPF* optymalna wartość kąta wymuszenia spełnia warunek [2]:

$$\tan \gamma = \frac{i_q}{i_d} = \sqrt{\frac{L_d}{L_q}}. \quad (4)$$

Powyższe strategie sterowania zapewniają optymalne wykorzystanie silnika pod względem energetycznym, nie pozwalają jednak na uzyskanie maksymalnej dynamiki napędu [1]. Sterowanie *MRCT*, które realizuje maksymalizację szybkości zmian momentu, jest szczególnie korzystne w stanach dynamicznych. Optymalna wartość kąta wymuszenia w tym przypadku spełnia warunek:

5. Wnioski

W artykule dokonano przeglądu strategii optymalnego sterowania synchronicznego silnika reluktancyjnego z wirnikiem o rozłożonej anizotropii magnetycznej pakietowanego poosiowo oraz przedstawiono analizę możliwości wykorzystania metody DTC do ich realizacji. Z porównania metod sterowania wektorowego oraz przedstawionego schematu blokowego zmodyfikowanej struktury sterowania DTC wynikają następujące wnioski.

Klasyczna struktura sterowania DTC z regulatorami histerezowymi i prostą tablicą przełączeń uniemożliwia zastosowanie strategii sterowania optymalnego synchronicznego silnika reluktancyjnego, realizując jedynie sterowanie przy zadanej wartości strumienia.

Realizacja zaawansowanych strategii sterowania optymalnego wymaga wprowadzenia torów regulacji składowych prądu w osi d i q oraz modulatora SVM do kształtowania wektora napięcia.

Zaproponowana struktura sterowania DTC-SVM z modulatorem wektora napięcia, zawierająca niezależne tory regulacji składowych prądu, zapewnia najkorzystniejsze właściwości napędu, zarówno w stanach dynamicznych jak i przy niewielkich prędkościach obrotowych.

6. Literatura

- [1] Betz R., Modeling and Control of Synchronous Reluctance Machines, in: *Control in power electronics. Selected problems*. Elsevier Science, (2002)
- [2] Machlarz R., Analiza symulacyjna sterowania wektorowego przy zmiennym kącie wymuszenia oraz bezpośredniego sterowania momentem i strumieniem synchronicznego silnika

- reluktancyjnego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 11b, vol. 88 (2012), 326-327
- [3] Boldea I., Direct Torque and Flux Control (DTFC) of AC Drives, in: *Control in power electronics. Selected problems*. Elsevier Science, (2002)
- [4] Sun S., Guo X., Lu H., Meng Y., Direct torque control for permanent magnet synchronous motors based on novel control strategy, *LSMS/ICSEE, Part II*, (2010), pp 433-441
- [5] Morales R., Pacas M., Predictive torque and flux control for the synchronous reluctance machine, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*, Vol. 54, No. 3, 2006, pp271-277
- [6] Boldea I., Janosi L., Blaabjerg F., A modified direct torque control (DTC) of reluctance synchronous motor sensorless drive, *Electric Machines and Power systems*, Nr. 28/2000, pp. 115-128
- [7] Liu T.-H., Hsu H.-H., Adaptive controller design for a synchronous reluctance motor drive system with direct torque control. *IET Electric Power Applications.*, 2007, 1, (5), pp. 815-824.
- [8] Wang H., Xu W., Yang G., Li J., Variable-structure torque control of induction motors using space vector modulation, *Electrical Engineering*, Nr 80 (2005), pp 93-102
- [9] Adam A.A., Gulez K., A new sensorless hysteresis direct torque control algorithm for PMSM with minimum torque ripples, *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 28, No. 2, (2009), pp. 437-453
- [10] Abootorabi Zarhi H., Arab Markadeh Gh.R., Soltani J.: Direct torque and flux regulation of synchronous reluctance motor drives based on input-output feedback linearization, *Energy Conversion and Management*, Nr. 51, 2010, pp. 71-80
- [11] Buja G. S., Kazmierkowski M.P., Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors - a survey, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 4 (2004) 744-757