

Krzysztof Bieńkowski, Politechnika Warszawska, Warszawa
Krzysztof Tomczuk, Instytut Elektrotechniki, Warszawa

KSZTAŁTOWANIE CHARAKTERYSTYK MECHANICZNYCH RELUKTANCYJNEGO SILNIKA PRZEŁĄCZALNEGO

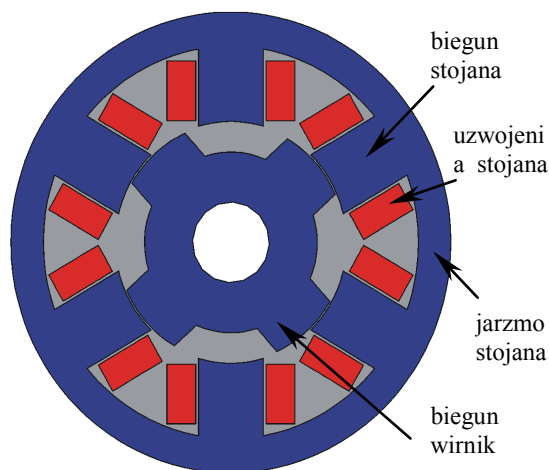
MECHANICAL CHARACTERISTICS SHAPING OF THE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Abstract: The mechanical characteristics of three phase switched reluctance motor were presented in this paper. The Fractional horsepower motor was supplied from C-dump power converter. The shape of motor characteristics heavily depends of control parameters – the switching angles of phase to voltage source. The selection of suitable control parameters makes possible to realise the desirable course of mechanical characteristics. It is possible to obtain the stiff shape characteristics or yielding adapted to needs of driven device. Also the efficiency of engine depends from switching angles. The executed researches allows to conclude, that for each point of mechanical characteristics exists switching angles, to have effect of maximum efficiency of the engine. The control unit for switched reluctance motors, should to realize the algorithms, which could select control parameters to rotational speed and load of the motor.

1. Wstęp

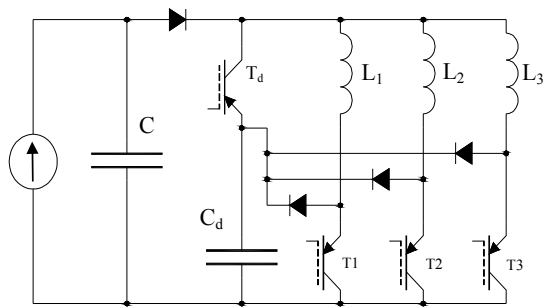
Silniki reluktancyjne komutowane elektronicznie znajdują coraz szersze zastosowania w napędach o regulowanej prędkości obrotowej. Reluktancyjne silniki przełączalne (ang.: Switched Reluctance Motor – SRM) odznaczają się prostą budową (rys.1.). Stojan i wirnik zbudowane są z pakietów blach elektrotechnicznych z równomiernie rozłożonymi na obwodzie biegunami wydawnymi. Liczba biegunów, zarówno stojana jak i wirnika musi być parzysta a ponadto liczba biegunów stojana musi się różnić od liczby biegunów wirnika [1,2,3,6].

Na biegunach stojana umieszczone są koncentryczne cewki. Cewki leżące na przeciwnych biegunach łączone są szeregowo tworząc pasma fazowe. Poszczególne pasma fazowe załączane są w odpowiedniej sekwencji do źródła napięcia za pośrednictwem energoelektronicznego konwertera energii. Moment obrotowy w silniku reluktancyjnym powstaje na skutek zmiany przewodności magnetycznej, na drodze strumienia magnetycznego, wzbudzonego prądami płynącymi w pasmach uzwojenia stojana. Istnieje wiele odmian konwerterów energii stosowanych do zasilania silników SRM różniących się ilością elementów łączeniowych, układem połączeń oraz zastosowaniem elementów dodatkowych [2,3,4]. Jako elementy przełączające w konwerterach najczęściej stosowane są tranzystory IGBT lub MOS.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny trójfazowego silnika SRM

Na rysunku 2. przedstawiono schemat konwertera z kondensatorem tłumiącym (ang.: C-dump converter) dla silnika o trzech pasmach fazowych. Poszczególne pasma ($L_1 - L_3$) załączane są kolejno do źródła napięcia poprzez tranzystory T1-T3. Po wyłączeniu tranzystora T1 prąd pasma fazowego nie może zaniknąć natychmiast ze względu na indukcyjność L_1 , lecz poprzez diodę ładuje kondensator tłumiący C_d .



Rys. 2. Schemat konwertera mocy z kondensatorem tłumiącym

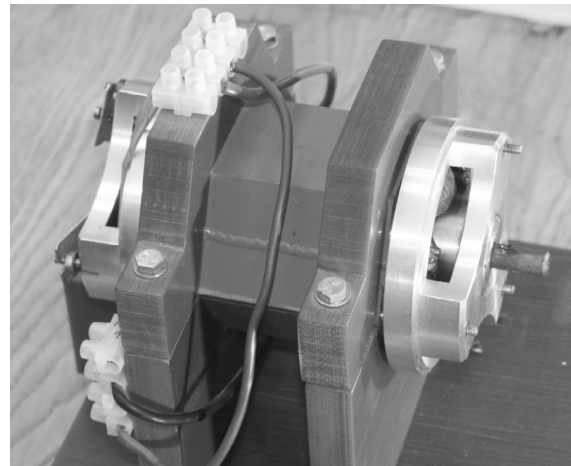
Napięcie na kondensatorze tłumiącym jest kontrolowane i po przekroczeniu zadanej wartości załączany jest tranzystor T_d rozładowujący kondensator tłumiący. Energia zgromadzona w kondensatorze tłumiącym jest wykorzystywana do wzbudzenia kolejnego pasma fazowego lub w pewnych typach konwerterów może być zwracana do źródła napięcia. Charakterystyki statyczne momentu oraz sposób sterowania mają decydujący wpływ na właściwości eksploatacyjne napędu z silnikiem SRM. Charakterystyki statyczne momentu są ustalone dla danej konstrukcji silnika. Można je kształtować przez odpowiedni dobór parametrów geometrycznych rdzeni stojana i wirnika oraz dobór materiałów magnetycznych [7]. Charakterystyki ruchowe napędu zależą od właściwości danego silnika oraz od struktury konwertera energii i metod sterowania jego pracą. Tryb pracy silnika i jego parametry eksploatacyjne takie jak moment, moc i prąd zależą od tego, w jakim położeniu wirnika pasmo uzwojenia jest dołączane do źródła, i w jakim położeniu jest od źródła odłączane. Do określenia położenia wirnika, w których pasma są dołączane i odłączane od źródła wygodnie jest wprowadzić pojęcia kąta załączenia δ i kąta przyłączenia β . Kąt załączenia δ określa położenie kątowe wirnika w chwili dołączenia pasma do źródła. W zakresie pracy silnikowej jest to kąt pomiędzy osią biegunów zasilanego pasma, a najbliższą względem niej położoną osią biegunów wirnika. Zatem kąt załączenia jest równy zero w położeniu podłużnym wirnika, któremu odpowiada najmniejsza reluktancja obwodu magnetycznego. Kąt przyłączenia β określa przedział kątowy obrotu wirnika, który wyznacza przedział czasu, w którym pasmo jest przyłączone do źródła napięcia.

2. Wpływ parametrów sterowania na charakterystyki mechaniczne silnika

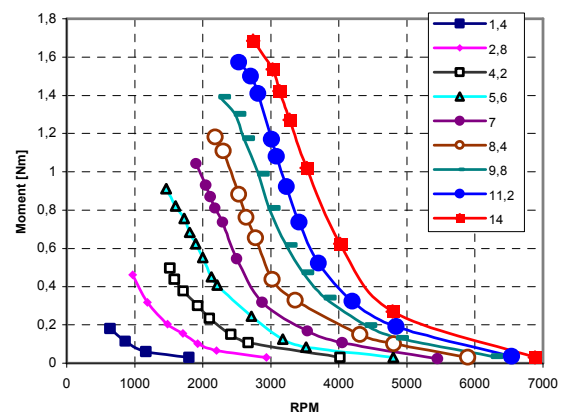
Przeprowadzono szereg prób obciążenia trójfazowego silnika reluktancyjnego przedstawionego na rysunku 3. o następujących parametrach:

- średnica zewnętrzna stojana 80 mm,
- długość pakietu stojana 100 mm,
- prąd maksymalny pasma fazowego 10 A,
- maksymalny moment statyczny 2 Nm,
- moc maksymalna 600 W

Silnik zasilano ze źródła napięcia stałego 320V za pośrednictwem konwertera typu C-dump. Na rysunku 4. przedstawiono rodzinę charakterystyk mechanicznych dla kątów przyłączenia od 1,4 do 14 stopni.



Rys. 3. Widok modelu silnika reluktancyjnego przelączalnego wykorzystywanego do badań



Rys. 4. Rodzina charakterystyk mechanicznych dla kątów przyłączenia $\beta = 1,4 - 14^\circ$

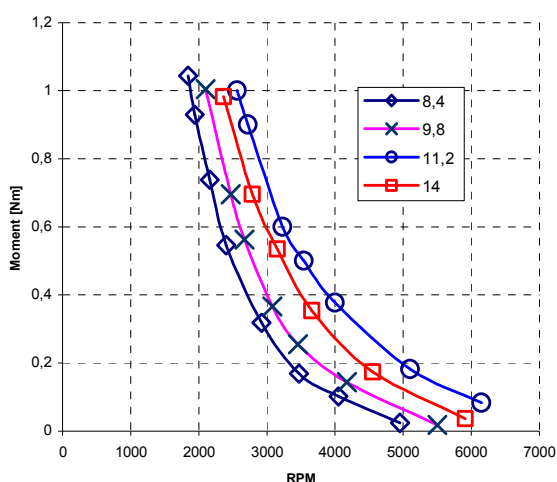
Kąt załączenia określony jest zależnością:

$$\delta = \beta + 1,4^\circ \quad (1)$$

Zwiększanie kąta przyłączenia skutkuje zwiększeniem mocy dostarczanej do silnika i w rezultacie zwiększeniem momentu obrotowego dla danej prędkości obrotowej. W silniku trójfazowym duże pulsacje momentu obrotowego utrudniają stabilną pracę przy małych prędkościach obrotowych. Rysunek 5. przedstawia rodzinę charakterystyk mechanicznych dla stałego kąta przyłączenia $\beta = 7^\circ$ i czterech wartości kąta $\delta = 8,4; 9,8; 11,2; 14^\circ$

Zwiększanie kąta załączenia przy stałym kącie przyłączenia wydłuża przedział kątowy demagnetyzacji danego pasma, a zatem osiągnięta prędkość kątowa może być większa.

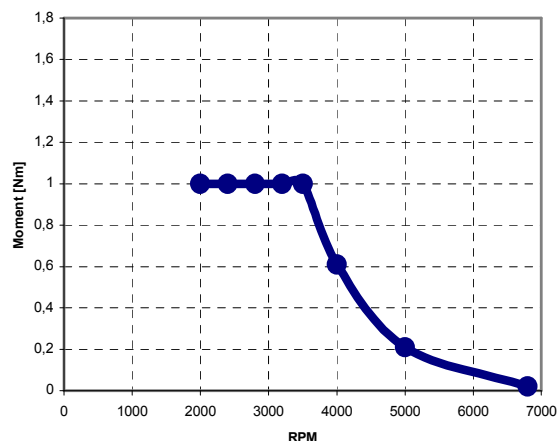
Przedstawione charakterystyki mechaniczne można określić mianem naturalnych, gdyż każdy punkt danej charakterystyki uzyskano przy stałych wartościach parametrów sterowania.



Rys. 5. Rodzina charakterystyk mechanicznych dla kąta przyłączenia $\beta = 7^\circ$ i katów załączenia $\delta = 8,4; 9,8; 11,2; 14^\circ$

Na rysunku 6. przedstawiono charakterystykę mechaniczną uzyskaną przy zmiennych wartościach kąta przyłączenia β w zakresie $7 - 14^\circ$ i odpowiednio zmieniających się kątach załączenia δ zgodnie z zależnością (1). W zakresie prędkości od 2000 min^{-1} do 3500 min^{-1} możliwa jest praca silnika przy stałym momencie obrotowym. Powyżej prędkości 3500 min^{-1} silnik pracuje z mocą ograniczoną ze względów cieplnych. Poniżej prędkości 2000 min^{-1} przy obciążeniu momentem 1 Nm zanotowano duże pulsacje momentu utrudniające pomiary momentu i będące przyczyną nadmiernych drgań. Przy rozruchu oraz w zakresie małych prędkości obrotowych należy stosować specjalne pro-

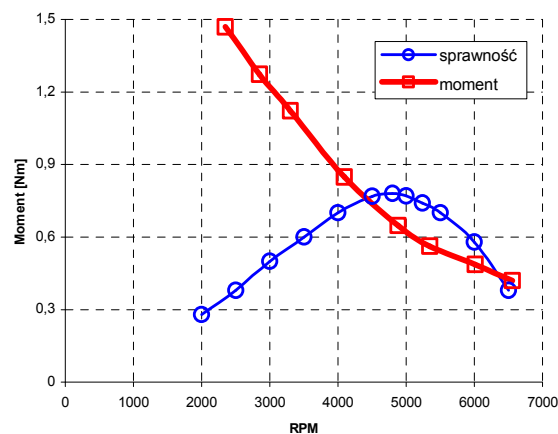
cedury sterowania ukierunkowane na zmniejszenie pulsacji momentu obrotowego.



Rys. 6. Charakterystyka mechaniczna przy zmiennych wartościach katów δ i β

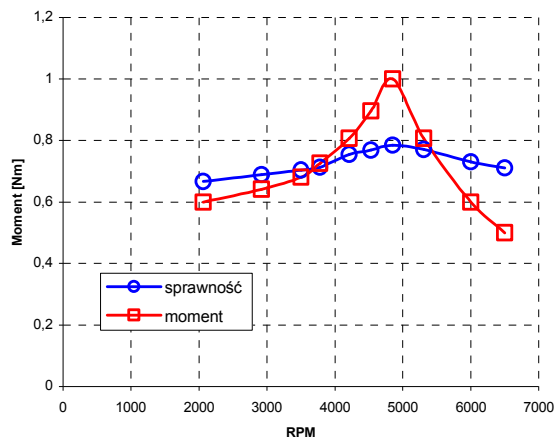
3. Zależność sprawności silnika od parametrów sterowania

Sterowanie naturalne ze stałymi wartościami katów δ i β nie jest efektywną metodą w przypadku napędów o regulowanej prędkości obrotowej. Sprawność silnika osiąga wysokie wartości jedynie w wąskim przedziale prędkości obrotowej (rys. 7.). Praca silnika przy obniżonej lub podwyższonej prędkości wymaga dobrania innych wartości katów sterujących.



Rys. 7. Charakterystyka mechaniczna i sprawność silnika dla stałych wartości katów δ i β

Dla każdej prędkości obrotowej i obciążenia silnika momentem obrotowym można znaleźć wartości katów sterujących, dla których sprawność silnika jest największa. Zależność maksymalnej sprawności od prędkości obrotowej badanego silnika przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Charakterystyka $M=f(n)$ oraz $\eta=f(n)$ dla parametrów sterowania zapewniających maksymalną sprawność silnika

4. Podsumowanie

Z przedstawionych wyników badań wynika, że naturalne charakterystyki mechaniczne silników reluktancyjnych przełączalnych są bardzo ustepliwe, zbliżone w swym przebiegu do charakterystyk szeregowego silnika komutatorowego. Przebieg charakterystyk można zmieniać w szerokich granicach poprzez zmianę kątów, w których pasma fazowe stojana są przyłączane i odłączane do źródła zasilania. Zmiany te realizowane przez układ sterujący mogą odbywać się płynnie w czasie pracy silnika. Silniki reluktancyjne przełączalne oprócz prostej konstrukcji dogodnej do małoseryjnej produkcji nawet przez drobnych producentów, odznaczają się wysoką odpornością na uszkodzenia i dużymi możliwościami kształtowania charakterystyk eksploatacyjnych drogą doboru parametrów sterujących. Do prostych napędów projektowanych dla stałej prędkości obrotowej (pompy, wentylatory) wystarczające będą nieskomplikowane sterowniki oparte o mikroprocesory powszechnego użytku. Osiągalne sprawności i jednostkowe moce tego typu napędów pozwalają na stwierdzenie, że silniki reluktancyjne mogą być interesującą alternatywą dla jednofazowych silników indukcyjnych małej mocy lub silników komutatorowych. W przypadku napędów o regulowanej prędkości obrotowej sterowniki silników reluktancyjnych muszą być odpowiednio bardziej skomplikowane. Jednostkę sterującą należy skonstruować w oparciu o procesor sygnałowy DSP, który będzie realizował algorytmy sterujące. Algorytm musi dokonać analizy stanu obciążenia maszyny i dobrać odpowiednie parametry ste-

rujące według założonego kryterium, którym może być maksymalna sprawność lub minimalne pulsacje momentu obrotowego.

5. Literatura

- [1]. Byrne et al.: *Electrodynamic system comprising a variable reluctance machine*. US Patent 3956678.
- [2]. Miller T. J. E.: *Switched reluctance motors and their control*. Magna Physics Publishing Clarendon Press, Oxford, 1993.
- [3]. Krishan R.: *Switched Reluctance Motor Drives*. CRC Press London, 2001.
- [4]. Vukosavic, S. and V.R. Stefanovic: *SRM inverter topologies: a comparative evaluation*. IEEE, 1034–1047, 1991.
- [5]. Pollock C., Williams B.W.: *Power converter circuits for switched reluctance with the minimum number of switches*. IEE Proc., Vol. 137, Pt. B, No. 6, 373–384, 1990.
- [6]. Henneberger, G., I.A. Viorel: *Variable Reluctance Electrical Machines*. Shaker Verlag, Aachen, 2001
- [7]. Bieńkowski K., Szypior J., Bucki B., Biernat A., Rogalski A.: *Influence of Geometrical Parameters of Switched Reluctance Motor on Electromagnetic Torque*. Proceedings of XVI International Conference of Electrical Machines - Kraków, 5-8 września 2004,

Autorzy

dr inż. Krzysztof Bieńkowski
Instytut Maszyn Elektrycznych Politechniki
Warszawskiej.
Pl. Politechniki 1 00-661 Warszawa
k.bienkowski@ime.pw.edu.pl

mgr inż. Krzysztof Tomczuk
Instytut Elektrotechniki
ul. Pożaryskiego 28. 04-703 Warszawa
k.tomczuk@iel.waw.pl

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2003-2006 jako projekt badawczy.