Damian KRAWCZYK Zakład Mechatroniki

MODELOWANIE WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH PRZEŁĄCZALNYCH SILNIKÓW RELUKTANCYJNYCH SRM

Streszczenie. Przedstawiono model matematyczny przełączalnego silnika reluktancyjnego SRM oraz zbudowany na jego podstawie model symulacyjny w programie komputerowym Matlab-Simulink. Zaproponowano uproszczoną metodę wyznaczania przebiegu indukcyjności własnych uzwojeń fazowych w funkcji położenia wirnika względem stojana. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych silnika typu SRM przy zasilaniu jednopulsowym. Przedstawiono wpływ wartości kąta wyłączenia na przebiegi prądu fazowego i momentu elektromagnetycznego.

MODELLING OF DYNAMIC PROPERTIES OF SWITCHED RELUCTANCE MOTORS

Summary. The mathematical model of a switched reluctance motor is presented in the paper. There is also given the simulation model of the SRM motor with application of Matlab-Simulink. The simplified method of calculating the phase self inductances is proposed. The results of computer simulations of a real 3 phase 6/4 SRM motor are presented as well.

1. WPROWADZENIE

Silniki reluktancyjne są silnikami elektrycznymi, w których do przemiany energii elektrycznej w energię mechaniczną wykorzystuje się elektromagnetyczny moment reluktancyjny. Moment reluktancyjny powstaje wskutek tendencji części ruchomych silnika (wirnik) do zajęcia takiego położenia, w którym reluktancja będzie najmniejsza, a tym samym indukcyjność wzbudzonego uzwojenia będzie największa. Aby moment reluktancyjny mógł powstać, element ruchomy (wirnik) musi być niesymetryczny magnetycznie. Asymetrię magnetyczną najczęściej uzyskuje się poprzez odpowiednie użłobkowanie wirnika. Silniki reluktancyjne stanowią najprostszą odmianę silników elektrycznych, posiadających uzwojenia tylko w części nieruchomej (stojan). W grupie silników reluktancyjnych wyróżnić można dwie podgrupy: synchroniczne silniki reluktancyjne oraz skokowe silniki reluktancyjne. Przełączalne silniki reluktancyjne SRM (ang. Switched Reluctance Motor) pod względem konstrukcyjnym należą do podgrupy skokowych silników reluktancyjnych. Od silników skokowych silniki typu SRM różnia się tym, że pracują zawsze w zamkniętym układzie regulacji ze sprzeżeniem zwrotnym od położenia wirnika. Ponadto silniki typu SRM projektuje się pod kątem uzyskania największej możliwej sprawności, podczas gdy w silnikach skokowych zabiega się o jak najbardziej precyzyjne przekształcanie impulsów elektrycznych w przemieszczenie kątowe lub liniowe.

Przełączalne silniki reluktancyjne posiadają obustronnie użłobkowaną strukturę obwodu magnetycznego. Uzwojenia są umieszczone tylko na stojanie i wykonane są w postaci skupionych cewek umieszczonych na zębach stojana. Uzwojenie jednej fazy najczęściej stanowią 2 cewki umieszczone na przeciwległych biegunach, połączone szeregowo lub równolegle. W praktyce spotykanych jest wiele odmian przełączalnych silników reluktancyjnych począwszy od jedno– do siedmiofazowych. Rysunek 1 przedstawia przykładową konstrukcję silnika trójfazowego o 6 zębach stojana i 4 zębach wirnika.



Rys.1. Trójfazowy przełączalny silnik reluktancyjny Fig.1. A three-phase switched reluctance motor

Obok odmiany czterofazowej o konfiguracji 8/6 (8 zębów stojana, 6 zębów wirnika) jest to obecnie najpopularniejsza odmiana takiego silnika. Silnik typu SRM wymaga zastosowania specjalnego przekształtnika zasilającego, którego działanie polega na cyklicznym przełączaniu napięcia stałego na kolejne fazy. Przykładowe rozwiązania praktyczne takich sterowników przedstawia rysunek 2. W przypadku silników SRM możliwe jest zbudowanie przekształtnika zasilającego o zmniejszonej liczbie tranzystorów, tzn. o liczbie tranzystorów mniejszej niż 2 tranzystory na jedną fazę. Przykład takiego sterownika przedstawia rysunek 2b. Chwile załączeń i wyłączeń poszczególnych tranzystorów przekształtnika zasilającego muszą być ściśle zsynchronizowane z położeniem wirnika. Informację o położeniu wirnika można uzyskać za pośrednictwem przetworników położenia, takich jak enkoder czy resolwer. Jednakże stosowanie dodatkowych przetworników położenia zmniejsza niezawodność układu napędowego z silnikiem SRM. W chwili obecnej można zauważyć tendencję zastępowania układów napędowych z silnikami SRM wyposażonych w czujniki położenia układami bezczujnikowymi (ang. sensorless).



Rys.2. Sterowniki trójfazowych przełączalnych silników reluktancyjnych Fig.2. Controllers of three-phase switched reluctance motors

Znanych jest wiele metod bezczujnikowego odtwarzania położenia wirnika silnika SRM. Podstawowe zalety silników typu SRM to:

- prosta budowa i związana z tym duża niezawodność pracy,
- niskie koszty wytwarzania,
- wysoka sprawność wynikająca z braku uzwojeń w wirniku i strat tam występujących,
- mała wrażliwość na zmiany temperatury,
- mała bezwładność wirnika.

Do najważniejszych wad silników SRM można z kolei zaliczyć:

- stosunkowo wysoki poziom hałasu,
- pulsacje momentu.

Obszar zastosowań silników typu SRM ulega ciągłemu rozszerzaniu i należy się spodziewać, że coraz częściej napędy z silnikami SRM będą zajmowały miejsce napędów z silnikami konwencjonalnymi, tzn. silnikami prądu stałego i silnikami indukcyjnymi.

2. MODEL MATEMATYCZNY PRZEŁĄCZALNEGO SILNIKA RELUKTANCYJNEGO

Poniższy model matematyczny odnosi się do trójfazowego przełączalnego silnika reluktancyjnego, przedstawionego na rysunku 1, jednakże może być on uogólniony na silnik SRM o dowolnej liczbie faz. Dla każdego uzwojenia fazowego spełnione jest następujące równanie napięciowe:

$$u_k(t) = R_k i_k(t) + \frac{d\Psi_k(t)}{dt}$$
(1)

gdzie:

t	- czas,
u _k (t)	 napięcie zasilające uzwojenie fazy k,
R _k	 rezystancja uzwojenia fazy k,
i _k (t)	- prąd fazy k,
$\Psi_{k}(t)$	 strumień magnetyczny sprzężony uzwojenia fazy k,
k≃A,B,C.	

Strumień sprzężony $\Psi_k(t)$ może być wyrażony poprzez indukcyjność własną oraz prąd fazowy następująco:

$$\Psi_k(t) = L_k(\vartheta(t))i_k(t) \tag{2}$$

gdzie:

 $\vartheta(t)$ - kąt położenia wirnika względem stojana, L_k($\vartheta(t)$) - indukcyjność własna uzwojenia fazy k.

Po wstawieniu równania (2) do (1) oraz uwzględnieniu, że indukcyjność własna $L_k(\vartheta(t))$ każdego uzwojenia fazowego jest zależna od kąta położenia wirnika względem stojana, otrzymuje się:

$$u_{k}(t) = R_{k}i_{k}(t) + \frac{\partial L_{k}}{\partial \vartheta} \frac{d\vartheta}{dt}i_{k}(t) + L_{k}(\vartheta(t))\frac{di_{k}(t)}{dt}$$
(3)

Chwilowe położenie wirnika względem stojana 9(t) opisuje równanie ruchu:

$$I\frac{d^2\mathcal{G}(t)}{dt^2} = T_e - T_L \tag{4}$$

gdzie:

J	-	moment bezwładności wirnika,
T _e	-	wypadkowy elektromagnetyczny moment reluktancyjny,
TL	-	moment obciążenia.

Wypadkowy moment reluktancyjny T_e jest sumą momentów składowych wytwarzanych przez prąd płynący w uzwojeniach każdej z faz z osobna.

$$T_{e} = \frac{1}{2} \sum_{k=A,B,C} i_{k}^{2}(t) \frac{\partial L_{k}(\theta)}{\partial \theta}$$
⁽⁵⁾

Układ równań (1)-(5) stanowi model matematyczny trójfazowego przełączalnego silnika reluktancyjnego. Model ten można uogólnić na silnik SRM o dowolnej liczbie faz poprzez uwzględnienie, że k=1..N, gdzie N oznacza liczbę faz.

Aby możliwe było rozwiązanie powyższych równań, konieczna jest znajomość współczynników występujących w tych równaniach. Współczynnikami tymi są moment bezwładności J, rezystancje fazowe R_k oraz wartości indukcyjności uzwojeń fazowych L_k(9) dla dowolnego położenia wirnika względem stojana. Najbardziej istotna jest znajomość przebiegu indukcyjności własnych w funkcji położenia wirnika. Przebiegi te uzyskać można na drodze pomiarowej lub obliczeniowej. W niniejszej pracy zależność współczynników indukcyjności własnej od położenia wirnika oblicza się na bazie uproszczonego modelu maszyny z obustronnie użłobkowanym obwodem magnetycznym. W modelu tym przyjmuje się założenie, że $\mu_{Fe} = \infty$ oraz że linie pola magnetycznego w szczelinie powietrznej posiadają tylko składową promieniową. Indukcyjność własną uzwojenia można wyznaczyć na podstawie znajomości energii zgromadzonej w polu magnetycznym zgodnie z zależnością:

$$L_k(\mathcal{G}) = \frac{W_m}{0.5 \cdot i_k^2} \tag{6}$$

gdzie:

W_m - całkowita energia zgromadzona w polu magnetycznym przy wzbudzonym uzwojeniu fazy k.

Aby wyznaczyć całkowitą energię zgromadzoną w polu magnetycznym, konieczna jest znajomość rozkładu pola magnetycznego wzdłuż rozwiniętego obwodu maszyny. Rozkład natężenia pola magnetycznego wzdłuż obwodu maszyny opisuje zależność:

$$H(\alpha, \mathcal{G}) = \frac{\Theta(\alpha)}{\delta(\alpha, \mathcal{G})} + H(0, \mathcal{G}) \cdot \frac{\delta(0, \mathcal{G})}{\delta(\alpha, \mathcal{G})}$$
(7)

gdzie:

α	-	współrzędna kątowa wzdłuż rozwiniętego obwodu maszyny,						
$\Theta(\alpha)$	-	rozkład przepływu wzdłuż obwodu maszyny,						
δ (α,θ)	-	rozkład grubości szczeliny powietrznej wzdłuż obwodu ma-						
		szyny,						
δ(0,θ)	-	grubość szczeliny powietrznej dla α=0,						
Η (0,θ)	-	natężenie pola magnetycznego dla α=0,						
	1.							

Rozkład grubości szczeliny powietrznej $\delta(\alpha, \theta)$ wyznacza się na podstawie wymiarów geometrycznych maszyny (liczba zębów, szerokość i wysokość zębów stojana i wirnika). Rozkład przepływu $\Theta(\alpha)$ wynika z rozmieszczenia uzwojenia danej fazy na obwodzie maszyny. Wielkość H(0, θ) wyznacza się korzystając z warunku bezźródłowości pola magnetycznego z zależności:

$$H(0,\vartheta) = -\frac{\int_{0}^{2\pi} \frac{\Theta(\alpha)}{\delta(\alpha,\vartheta)} d\alpha}{\int_{0}^{2\pi} \frac{\delta(0,\vartheta)}{\delta(\alpha,\vartheta)} d\alpha}$$
(8)

3. BADANIA SYMULACYJNE

Badaniom symulacyjnym został poddany trójfazowy przełączalny silnik reluktancyjny SRM o sześciu zębach stojana i czterech zębach wirnika typu RRA 90L szwedzkiej firmy Emotron, którego parametry zestawiono w tabeli 1. Silnik ten posiada konstrukcję jak silnik przedstawiony na rysunku 1. W oparciu o dane zawarte w tabeli 1, zgodnie z równaniami (6), (7) i (8), wyznaczone zostały przebiegi indukcyjności poszczególnych uzwojeń fazowych w funkcji położenia wirnika względem stojana. Przebiegi te są przedstawione na rysunku 3. Jako początek układu współrzędnych (α =0) przyjęto oś fazy A licząc od lewego zeba A, a kierunek wzrostu współrzędnej a jest zgodny z kierunkiem ruchu wskazówek zegara. Kąt położenia wirnika 0 jest mierzony między osią fazy A a osią dwóch przeciwległych zębów wirnika. Sytuacja przedstawiona na rysunku 1 odpowiada θ=0. Przebiegi indukcyjności własnej uzwojeń fazowych powtarzają się co kąt 0=90°. Znając wartości indukcyjności własnych, można zbudować model symulacyjny będący odwzorowaniem równań (1) - (5). Model taki został stworzony w oparciu o program komputerowy Matlab-Simulink. Model ten jest przedstawiony na rysunku 4. Parametrami wejściowymi modelu są napięcia zasilające poszczególne fazy oraz moment obciążenia, natomiast parametrami wyjściowymi są prądy wszystkich faz, wypadkowy moment reluktancyjny rozwijany w silniku, położenie wirnika oraz prędkość katowa wirnika.

Tabela 1

1.	Moc znamionowa	P _N	1.5	[kW]
2.	Napięcie znamionowe		230	[V]
3.	Prąd znamionowy		14	[A]
4.	Liczba zwojów jednej cewki		126	[-]
5.	Rezystancja jednej fazy	R _k	1.5	[Ω]
6.	Moment bezwładności	J	0.0012	[kg.m ²]
7.	Liczba zębów stojana	N _s	6	[-]
8.	Liczba zębów wirnika	Nr	4	[-]
9.	Szerokość kątowa zęba stojana	βσ	29.6	[°]
10.	Szerokość kątowa zęba wirnika	βρ	33.7	[°]
11.	Wysokość zęba stojana	a,	18.6	[mm]
12.	Wysokość zęba wirnika	a,	11.9	[mm]
13.	Grubość (minimalna) szczeliny powietrznej	δ₀	0.3	[mm]
14.	Srednica wirnika	D,	72.5	[mm]
15.	Długość osiowa	1	110	[mm]

Parametry i wymiary silnika Emotron RRA 90L



Rys.3. Przebieg indukcyjności własnych uzwojeń fazowych w funkcji kąta obrotu wirnika względem stojana Fig.3. Self inductances of the phase windings vs. the rotor position

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi prądu i momentu będące wynikiem symulacji zasilenia fazy C napięciem znamionowym. Po podaniu napięcia na fazę C wirnik wykonuje skok do położenia, w którym indukcyjność fazy C będzie największa. Wartość tego skoku wynosi 30° . Zarówno prąd, jak i proporcjonalny do niego moment początkowo szybko rosną, co jest wynikiem małej indukcyjności fazy C w położeniu początkowym wirnika. Następnie, wskutek tego iż napięcie indukowane w uzwojeniu przekracza napięcie zasilające, prąd i moment zaczynają maleć. Tuż przed osiągnięciem pozycji ustalonej (θ =30°) moment osiąga wartość równą 0, pomimo że prąd jest różny od zera. Związane jest to z tym, że tuż przed osiągnięciem pozycji ustalonej ząb wirnika znajduje się już w całości w obrębie zęba stojana, na którym jest umieszczona wzbudzona cewka, co powoduje, że w tym zakresie zmian położenia wirnika względem stojana indukcyjność już się nie zmienia, a tym samym nie powstaje moment elektromagnetyczny.



Rys.4. Model symulacyjny przełączalnego silnika reluktancyjnego SRM w programie Matlab-Simulink Fig. 4. The simulation model of a three-phase switched reluctance motor with application of Matlab-Simulink



Rys.5. Moment i prąd fazowy przy zasileniu jednej fazy silnika pojedynczym impulsem napięciowym, w funkcji czasu (a) i kąta położenia wirnika (b)

Fig.5. The torque and phase current at single-pulse supply as a function of time (a) and rotor position (b)

Wskutek bezwładności mechanicznej, po osiągnięciu przez wirnik położenia ustalonego nie zatrzymuje się on w tym położeniu. Sytuację tę przedstawiają rysunki 6 i 7. Rysunek 6 przedstawia przebieg prądu, a rysunek 7 przebieg momentu.



Rys.6. Prąd fazowy w funkcji czasu (a) i kąta położenia wirnika (b) Fig.6. The phase current vs. time (a) and rotor position (b)



Rys.7. Moment reluktancyjny w funkcji czasu (a) i kąta położenia wirnika (b) Fig.7. The reluctance torque time (a) and to rotor position (b)

Po przekroczeniu pozycji ustalonej moment rozwijany przez silnik zmienia znak i staje się momentem hamującym (rys. 7b). Jest to spowodowane tym, że indukcyjność własna jest malejąca w tym zakresie położenia wirnika. Aby ruch wirnika mógł być kontynuowany w zadanym kierunku, wypadkowy moment reluktancyjny powinien mieć stały kierunek działania. W związku z tym faza C powinna zostać odwzbudzona, zanim moment wytwarzany przez prąd fazy C zmieni kierunek działania, po czym należy wzbudzić kolejną fazę, w której indukcyjność jest rosnąca. Dla przypadku jak na rysunku l i dla kierunku wirowania w prawo kolejną wzbudzaną fazą powinna być faza B. Przebiegi prądu i momentu w tej fazie będą analogiczne do rysunków 6 i 7.

W celu zapewnienia jak najmniejszych pulsacji momentu wypadkowego konieczne jest odwzbudzanie poszczególnych faz w odpowiednim położeniu wirnika względem stojana. Położenie to jest nazywane kątem wyłączenia. Rysunek 8 przedstawia przebiegi napięcia fazowego, prądu i momentu dla dwóch różnych kątów wyłączenia: $\vartheta_z = 5^\circ$ (rys. 8a) i $\vartheta_z = 10^\circ$ (rys. 8b).



Rys.8. Moment reluktancyjny w funkcji czasu i kąta położenia wirnika dla kąta załączenia $\vartheta_w=5^\circ$ (a) $i\vartheta_w=10^\circ$ (b) Fig.8. The reluctance torque vs. time and rotor position for the switch on angle $\vartheta_w=5^\circ$ (a) and $\vartheta_w=10^\circ$ (b)

Dla prawidłowej pracy silnika SRM istotny jest również dobór kąta załączenia, określającego położenie wirnika, przy którym następuje wzbudzenie danej fazy. Właściwe wartości kątów załączenia i wyłączenia zmieniają się wraz z prędkością wirowania oraz momentem obciążenia. Właściwy dobór wartości tych kątów ma decydujący wpływ na własności układu napędowego z silnikami SRM.

4. PODSUMOWANIE

Zaprezentowany powyżej model matematyczny i symulacyjny silnika SRM umożliwia analizowanie własności dynamicznych przełączalnych silników reluktancyjnych. Zaproponowana metoda wyznaczania współczynników indukcyjności jest metodą uproszczoną, która umożliwia jednak analizę jakościową przebiegów wartości indukcyjności w funkcji kąta położenia wirnika względem stojana. W przypadku konieczności dokonania bardziej dokładnej analizy ilościowej wartości indukcyjności dla różnych położeń wirnika należałoby wyznaczyć pomiarowo lub za pomocą numerycznych metod polowych, np. metody elementów skończonych, uwzględniających nieliniowość obwodu magnetycznego.

LITERATURA

- 1. Miller T.J.E.: Switched reluctance motors and their control. Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford 1993.
- 2. Krause P.C.: Analysis of electric machinery. McGraw-Hill, 1986.
- Johr M., Kluszczyński K.: Simplified representation of doubly-slotted varying air-gap of electrical machine. ICEM Vigo, Spain, 1996.
- Koziej E.: Przełączalne silniki reluktancyjne efektywna alternatywa napędu regulowanego. XXXV Sympozjum Maszyn Elektrycznych – Maszyny Elektryczne w Energetyce, Kazimierz Dolny 1999.
- 5. Krawczyk D., Książek J.: Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych silników reluktancyjnych. VIII Sympozjum Środowiskowe PTZE, Węgierska Górka 1998.
- Krawczyk D.: Analysis of dynamic properties of doubly slotted machine as machine with variable geometry of the rotor. Proceedings of XII Seminar on Electrical Engineering, Istebna-Pietraszonka 1998.
- Krawczyk D., Kluszczyński K.: Badanie własności dynamicznych obustronnie użłobkowanej maszyny jako maszyny o zmiennej geometrii wirnika. VII Sympozjum Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektromechaniki PPEE'99, Wisła 1999.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Piotr Wach

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 kwietna 2000 r.

Abstract

The equations (3), (4) and (5) present the mathematical model of the switched reluctance motor. Those equations can be used to create the numerical simulation model of the SRM motor. The simulation model by the use Matlab-Simulink is shown in figure 4. The inputs of the model are all phase voltages and the load torque and the outputs are all the phase currents, torque, rotor position and angular velocity. Before starting simulation all the parameters of the equations must be known. The parameters are the rotor inertia J, phase resistances R_k and phase winding self inductances $L_k(\vartheta)$. The inductances are a function of the rotor position. Figure 3 shows all the phase inductances for any rotor position in reference to the stator. The inductances were obtained by using equations (6), (7) and (8) under the assumptions of infinite permeability of the stator and rotor steel and the magnetic field intensity and the flux density having a component only in the radial direction. Figures 5, 6, and 7 show the phase current and reluctance torque in reference to time and rotor position for the motor supplied by a single voltage pulse. Figure 8 shows the influence of the switch on angle on the phase current and torque.