

Wpływ temperatury na charakterystyki statyczne silnika reluktancyjnego przełączalnego

Streszczenie. Pracy silników elektrycznych nieodłącznie towarzyszy zjawisko wydzielania się ciepła. Związane z tym straty energii elektrycznej nie tylko zmniejszają sprawność maszyny, ale wywołują także szereg zjawisk zmniejszających pewność pracy. Należą do nich głównie procesy starzeniowe układu elektroizolacyjnego silnika. Zmieniają się także charakterystyki statyczne i ruchowe silnika. Zagadnienia te są, w odniesieniu do silników SRM, niezbyt często analizowane. W referacie pokazano wpływ temperatury na wyznaczone w warunkach laboratoryjnych charakterystyki statyczne projektowanego wysokoobrotowego silnika SRM 4/2. Zamieszczono wnioski.

Abstract. The work of electric machine is inseparably connected with emitting of heat. Power losses connected with heat emitting decrease not only efficiency of machine but also generate many effects which decrease reliability. The primary effect is ageing process of machine insulating. Motor characteristics also change. These problems aren't often analyzed in relation to SRM motors. Source of losses in windings are motor currents which have impulse character and there are many problems with calculating them because of complex shape of saturating magnetic circuit. In paper was shown temperature influence on static characteristics determined in laboratory conditions of designed high-speed 4/2 SRM motor. Conclusions were also placed. (**Temperature influence on static characteristics of switched reluctance motor**).

Słowa kluczowe: silnik reluktancyjny przełączalny, SRM, charakterystyki statyczne, temperatura.

Keywords: switched reluctance motor, SRM, static characteristics, temperature.

doi:10.12915/pe.2014.02.20

Wstęp

Silniki reluktancyjne przełączalne zaliczane są do maszyn z komutacją elektroniczną. Są to bardzo proste i wytrzymałe konstrukcyjnie maszyny. Z uwagi na szeroki zakres regulacji prędkości obrotowej, wyższą sprawność w odniesieniu do silników komutatorowych są potencjalnym kandydatem do przyszłościowych napędów np. w sprężcie AGD. Pomimo prostoty konstrukcji projektowanie tych maszyn jest procesem niezwykle trudnym i złożonym. Na etapie wstępnego doboru wymiarów geometrycznych trudno jest przewidzieć docelowe warunki termiczne pracy projektowanej konstrukcji. W początkowej fazie przyjmuje się, wstępne warunki termiczne. Sam proces projektowania można podzielić na kilka etapów. Po wstępnym doborze kluczowych wymiarów geometrycznych, następuje wyznaczanie charakterystyk statycznych. W następnej fazie procesu wyznacza się przebiegi czasowe prądów i momentu elektromagnetycznego w pożądanym punkcie pracy silnika (dobór parametrów sterowania). W przypadku osiągnięcia wyników niezadawalających może nastąpić powrót np. do korekty wymiarów geometrycznych, zmiany ustalonych warunków termicznych czy też innego doboru parametrów sterowania pracą maszyny. Do oceny poprawności zaprojektowanej konstrukcji stosuje się weryfikację laboratoryjną. W przypadku silników reluktancyjnych przełączalnych dzieli się ją na dwa etapy. W pierwszym weryfikuje się uzyskane charakterystyki statyczne projektowanej konstrukcji. Drugim sposobem weryfikacji jest wyznaczenie charakterystyk ruchowych.

W artykule zaprezentowano dwie metody wyznaczania charakterystyk statycznych silnika reluktancyjnego przełączalnego. Omówiono problem wpływu temperatury na wyznaczone charakterystyki statyczne maszyny w warunkach laboratoryjnych.

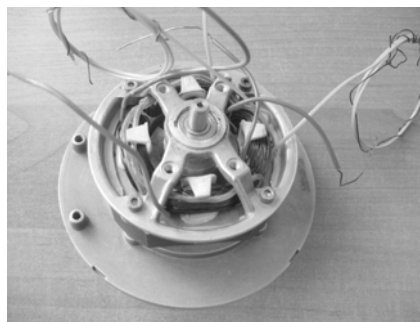
Model silnika oraz stanowisko do wyznaczania charakterystyk statycznych

Jednym z etapów projektowania silnika reluktancyjnego przełączalnego jest wyznaczanie charakterystyk statycznych. Dotyczy to głównie zależności wytwarzanego momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ przy różnych wartościach prądu I . W ten sposób powstaje rodzina momentowych charakterystyk statycznych. Bardzo często wyznaczone statyczne

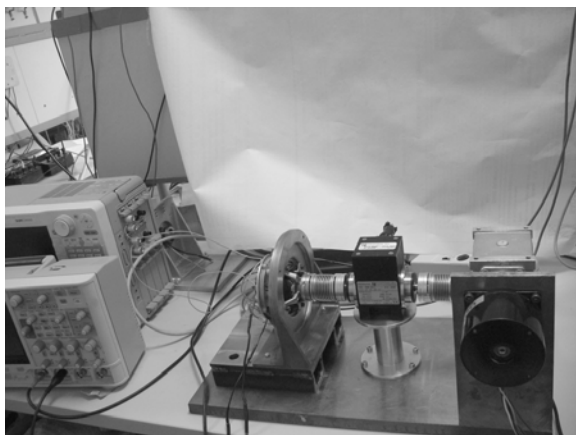
charakterystyki momentowe implementuje się w układzie sterowania pracą silnika np. przy sterowaniu DTC [1, 2]. Wyznaczenie rodziny statycznych charakterystyk momentowych projektowanego silnika na etapie jego tworzenia nie stanowi większego problemu. Zawsze jednak powstaje problem zgodności obliczeń numerycznych do rzeczywistych osiągnięć projektowanej maszyny.

W tym celu bardzo często stosuje się weryfikację laboratoryjną w odniesieniu do momentowych charakterystyk statycznych. Weryfikacja laboratoryjna z założenia powinna stanowić odniesienie do uzyskanych wyników badań na etapie obliczeń numerycznych. Na bazie zaprojektowanego silnika reluktancyjnego przełączalnego 4/2 przeznaczonego do napędu wysokoobrotowego (agregat ssący) pokazano problemy powstające w trakcie weryfikacji laboratoryjnej prototypu silnika. Na rysunku 1 pokazano zaprojektowany silnik reluktancyjny przełączalny 4/2 o budowie symetrycznej. W prototypie silnika zostały zamontowane trzy termopary typu K. Dwie z nich zamontowano w uzwojeniach, natomiast trzecia została umieszczona w rdzeniu stojana.

Stanowisko do wyznaczania charakterystyk statycznych prototypu silnika pokazano na rysunku 2. Stanowisko to składa się z silnika skokowego (wraz ze sterownikiem), przekładni zwiększającej rozdzielczość pomiarową, badanego silnika, aparatury kontrolno-rejestrującej oraz układów zasilających.



Rys.1. Wykonany prototyp wysokoobrotowego silnika reluktancyjnego przełączalnego 4/2 z zamontowanymi termoparami



Rys.2. Stanowisko laboratoryjne do wyznaczania charakterystyk statycznych silnika

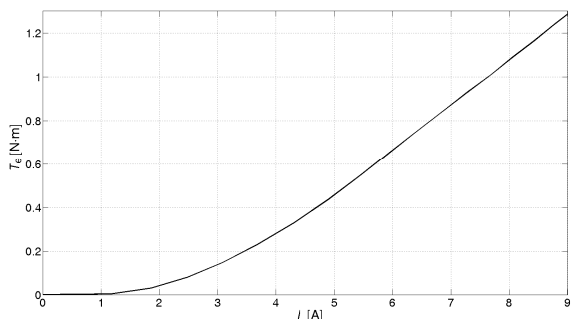
W zaprojektowanym silniku z uwagi na intensywność chłodzenia w układzie docelowym przyjęto gęstość prądu w uzwojeniu na poziomie 12 A/mm^2 . Stwarza to istotne problemy w trakcie weryfikacji laboratoryjnej charakterystyk statycznych. Istnieją dwie metody wyznaczania statycznych charakterystyk momentowych:

- przy stałym położeniu,
- przy stałym prądzie.

Obie metody mają swoje zalety oraz wady. Pierwsza metoda jest korzystniejsza ponieważ jednocześnie pozwala wyznaczać statyczne charakterystyki momentowe oraz strumieniowe [3, 4, 5].

Wyznaczanie charakterystyk statycznych przy stałym położeniu

Na rysunku 3 pokazano przykładową zależność momentu elektromagnetycznego T_e od prądu zasilającego I dla jednego z położen wirnika θ .



Rys.3. Przykładowa zależność momentu elektromagnetycznego T_e od prądu I dla wybranego położenia wirnika θ

Temperatura nie wpływa w tym przypadku na wyznaczaną wartość momentu elektromagnetycznego. Z uwagi na impulsowe zasilanie uzwojenia można uzyskać duże gęstości prądu zasilającego uzwojenie. Tym samym pozwala to na wyznaczenie charakterystyki momentowej w zakresie znacznego nasycenia obwodu magnetycznego. W modelach numerycznych maszyn reluktancyjnych przelączalnych zawsze istnieje problem implementacji charakterystyki $B=f(H)$. Zazwyczaj w obliczeniach numerycznych uzyskuje się większe wartości momentu elektromagnetycznego w zakresie dużego nasycenia obwodu magnetycznego. Wpływ temperatury ma za to szczególnie istotne znaczenie przy wyznaczaniu charakterystyk strumieniowych. Strumień sprzężony ψ z danym uzwojeniem wyznacza się z zależności:

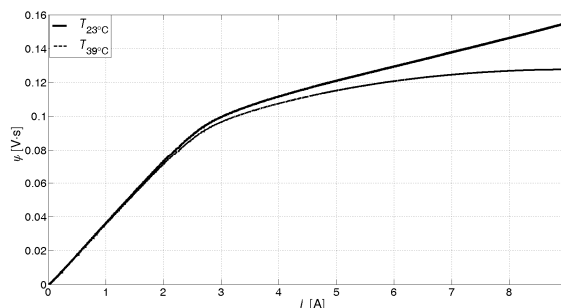
$$(1) \quad \psi = \int_{t_1}^{t_2} (u - R_{ph}(T) \cdot i) dt$$

Rezystancja uzwojenia R_{ph} w trakcie wykonywania serii pomiarów nie jest wartością stałą i ulega zmianie na skutek wzrostu temperatury T . Stała czasowa elektromagnetyczna L_{ph}/R_{ph} uzwojenia jest wielokrotnie mniejsza od stałej czasowej nagrzewania się zasilanego uzwojenia umieszczonego na rdzeniu stojana. Można zatem przyjąć, że w trakcie jednego impulsowego zasilenia (trwającego kilkaset milisekund) temperatura uzwojenia nie ulega zmianie. Pozwala to uzależnić rezystancję uzwojenia R_{ph} od aktualnej wartości temperatury T_{inst} . Zamontowane termopary w uzwojeniach silnika dają informację o aktualnej temperaturze w trakcie wykonywania pomiarów. Dzięki temu rzeczywistą rezystancję uzwojenia $R_{ph}(T)$ wyznacza się z ogólnie znanej zależności:

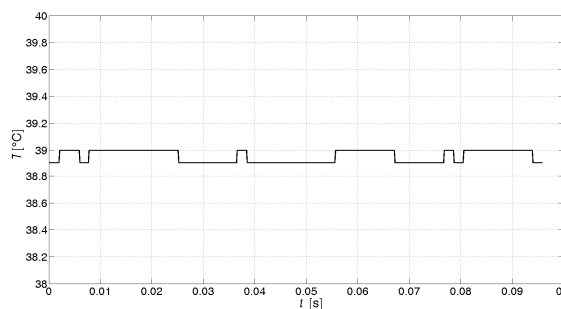
$$(2) \quad R_{ph}(T) = R_{ph_{20^\circ C}} (1 + \alpha(T_{int} - 20))$$

gdzie: α - temperaturowy współczynnik rezystancyjny dla miedzi, $R_{ph_{20^\circ C}}$ - rezystancja uzwojenia w temperaturze $20^\circ C$.

Na rysunku 4 pokazano zależność strumienia sprzężonego ψ od prądu uzwojenia I dla jednego z położen charakterystycznych wirnika θ . Zależność temperatury T od czasu t zasilanego uzwojenia w trakcie pomiaru pokazano na rysunku 5.



Rys.4. Przykładowa zależność strumienia sprzężonego ψ od prądu I dla jednego z położen charakterystycznych wirnika θ



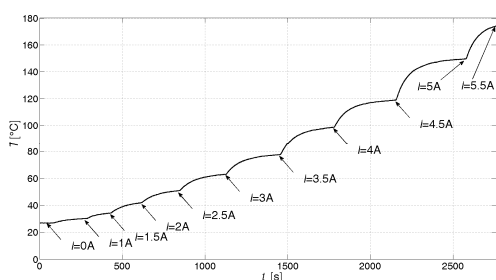
Rys.5. Przykładowa zależność temperatury T od czasu t dla jednego z położen charakterystycznych wirnika θ w trakcie wyznaczania strumienia sprzężonego ψ pokazanego na rysunku 4

Dla pokazania wpływu temperatury zamieszczono wyniki wyznaczonego strumienia sprzężonego ψ , gdzie nie została uwzględniona zmiana rezystancji uzwojenia (przyjęto wartość rezystancji dla temperatury otoczenia która wynosiła $23^\circ C$). Rzeczywista temperatura uzwojenia w trakcie wykonywania pomiaru wynosiła $39^\circ C$ (rys.5) i była ona stała z uwagi na krótki czas trwania pomiaru (poniżej $0.1s$). Brak informacji o aktualnej temperaturze uzwojenia powoduje, że wyznaczane charakterystyki strumieniowe obciążone są znacznymi błędami co jest niedopuszczalne (rys.4). Bez uwzględnienia zmiany rezystancji uzwojenia w trakcie wykonywania pomiaru uzyskuje się większe wartości strumienia sprzężonego. Wyznaczone laboratoryjnie statyczne charakterystyki strumieniowe bardzo często implementuje się w układzie sterowania pracą maszyny

reluktancyjnej przełączalnej [1, 2]. Z otrzymanych charakterystyk strumieniowych wyznacza się również zależność indukcyjności własnej uzwojenia od kąta położenia wirnika i prądu.

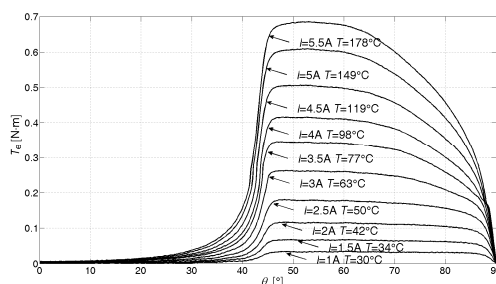
Wyznaczanie charakterystyk statycznych przy stałym prądzie

Przy wyznaczaniu momentowych charakterystyk statycznych przy stałym prądzie wpływ temperatury jest dużo bardziej istotny. W tym przypadku zakłada się, że w trakcie zmiany położenia wirnika θ prąd I płynący przez uzwojenie ma stałą wartość. Dla uniknięcia wpływu ruchu wirnika pomiary powinny się wykonywać przy prędkości zbliżonej do zera. Wówczas można założyć, że napięcie indukowane w uzwojeniu jest równe zero. Jednak w takim przypadku dla każdej zadanej wartości prądu I czas trwania pomiaru wynosi już np. kilkadziesiąt sekund. Dynamika zjawisk cieplnych zaczyna w takim przypadku odgrywać istotną rolę. W trakcie pomiaru następuje istotny wzrost temperatury T . Prowadzi to do wzrostu rezystancji uzwojenia R_{ph} a to w konsekwencji wpływa na wartość płynącego prądu I w przypadku zasilania ze źródła napięciowego. Wartość prądu I w uzwojeniu można stabilizować poprzez zastosowanie regulatora prądu, ale wpływa to negatywnie na kształt uzyskiwanych charakterystyk momentowych. Problem nasila się ze wzrostem wartości prądu przy której są wykonywane pomiary. W przeciwieństwie do poprzedniej metody wyznaczania momentu elektromagnetycznego kluczowe jest kontrolowanie temperatury zasilanego uzwojenia z uwagi na możliwość jego termicznego uszkodzenia. Na rysunku 6 pokazano zależność temperatury uzwojenia T od czasu trwania t przy wyznaczaniu rodziny statycznych charakterystyk momentowych.



Rys.6. Przykładowa zależność temperatury uzwojenia T od czasu trwania pomiaru t przy wyznaczaniu rodziny momentowych charakterystyk statycznych

Na rysunku 7 pokazano zależność momentu elektromagnetycznego T_e od kąta położenia wirnika θ dla różnych prądów zasilania uzwojenia I .



Rys.7. Przykładowa rodzina statycznych charakterystyk momentowych $T_e=f(\theta)$ przy różnych prądach zasilania uzwojenia I

Problem braku stabilizacji cieplnej układu uzwojenie/rdrzeń skutkuje zmianą kształtu statycznej charakterystyki momentowej. Problem ten można

wyeliminować przy mniejszych wartościach płynącego prądu. Wówczas można przed rozpoczęciem pomiarów uzyskać stabilność cieplną co skutkuje stałością płynącego prądu w trakcie wyznaczania momentu elektromagnetycznego (rys.6). Metoda pomiaru przy stałym prądzie jest również wrażliwa na temperaturę otoczenia. Wzrost o kilka stopni temperatury otoczenia powoduje zmniejszenie możliwej do uzyskania w danych warunkach gęstości prądu w uzwojeniu.

Wnioski

Zaprezentowane dwie metody wyznaczania charakterystyk statycznych maszyny reluktancyjnej przełączalnej. W przypadku wyznaczania statycznych charakterystyk momentowych maszyny przy stałym położeniu wpływ temperatury na ich kształt jest nieistotny. Temperatura uzwojenia z uwagi na jego impulsowe zasilanie osiąga wartość poniżej wartości dopuszczalnej wynikającej z klasy izolacji H. Możliwe jest też wyznaczenie charakterystyk momentowych przy znacznych wartościach prądu zasilającego. Wpływ temperatury na wyznaczone statyczne charakterystyki momentowe przy zastosowaniu metody stałego prądu jest znacznie bardziej istotny. Z względu na czas trwania pomiaru należy kontrolować temperaturę zasilanego uzwojenia z uwagi na niebezpieczeństwo przekroczenia dopuszczalnej wartości wynikającej z klasy izolacji H (180°C). Dopuszczalna wartość prądu jakim można zasilić uzwojenie w trakcie pomiaru jest znacznie mniejsza niż w metodzie ze stałym położeniem. W przypadku wyznaczania statycznych charakterystyk strumieniowych przy zastosowaniu metody stałego położenia znajomość aktualnej temperatury uzwojenia odgrywa kluczową rolę w poprawności wyznaczania strumienia sprzężonego.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego NN511 312 440.

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem aparatury zakupionej w wyniku realizacji Projektu nr POPW.01.03.00-18-012/09 "Rozbudowa infrastruktury naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej" współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007-2013, Priorytet I. Nowoczesna Gospodarka, Działanie 1.3 Wspieranie innowacji.

LITERATURA

- [1] Cheok A.D., Fukuda Y.: A new torque and flux control method for switched reluctance motor drives, *IEEE Transactions on Power Electronics*, (2002), Vol.17, No. 4, 543-557
- [2] Mitani M., Goto H., Guo H.J., Ichinokura O.: Position sensorless direct torque control of SR motors, *12th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC* (2006), 1143-1148
- [3] Miller T.J.E.: Electronic control of switched reluctance machines, *Newnes Power Engineering Series*, (2001)
- [4] Carstensen C.E., Fuengwarodsakul N.H., De Doncker R.W.: Flux Linkage determination for correct modeling of switched reluctance machines dynamic measurement versus static computation, *IEEE International Conference Electrical Machines & Drives, IEMDC'07*, (2007), 1317-1323
- [5] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J., Tomczewski K., Wróbel K.: Weryfikacja pomiarowa wyników obliczeń polowych silnika reluktancyjnego przełączalnego, *Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne*, (2010), 86, 91-94

Autor: dr inż. Mariusz Korkosz, e-mail: mkosz@prz.edu.pl, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów