Seria: ELEKTRYKA z. 177

Marian ŁUKANISZYN¹, Ernest MENDRELA², Mariusz JAGIEŁO³, Rafał WRÓBEL⁴)

PARAMETRY CAŁKOWE SILNIKA TARCZOWEGO PRĄDU STAŁEGO ZE STRUMIENIEM OSIOWYM W STOJANIE

Streszczenie. Przedmiotem referatu są trójwymiarowe obliczenia polowe trójpasmowego bezszczotkowego silnika tarczowego prądu stałego z magnesami trwałymi. W referacie przedstawiono wyniki obliczeń parametrów całkowych badanej maszyny elektrycznej. Rozważano między innymi: silę elektromotoryczną rotacji, indukcyjność własną i wzajemną uzwojeń oraz moment elektromagnetyczny rozwijany przez silnik. Obliczenia wykonano korzystając z metody elementów skończonych (MES). Wyniki obliczeń częściowo zweryfikowano na modelu fizycznym silnika. Uzyskano zadowalającą zbieżność wyników obliczeń oraz pomiarów, co zachęca do prowadzenia dalszych prac badawczych.

INTEGRAL PARAMETERS OF DISC-TYPE DC MOTOR WITH CO-AXIAL FLUX IN THE STATOR

Summary. A 3-D space analysis of the magnetic field and the torque of a disc-type three- phase, brushless dc motor with co-axial magnetic flux in the stator is presented. Calculations were carried out using an OPERA (3d) package with the TOSCA module. The electromagnetic torque and cogging torque were determined from the Maxwell's stress tensor. The calculation results of the torque, mutual and self inductances of the motor windings and back EMF were compared partially with the test results. The analysis can be used in optimisation of the motor design.

Key words: disc - type brushless dc motor, .permanent magnets, field modeling

1. WSTĘP

Spotykane ostatnio duże zainteresowanie silnikami bezszczotkowymi wiąże się z rozwojem technologii wysokoenergetycznych magnesów trwałych oraz elementów energoelektronicznych. Silniki tego typu charakteryzują się wysoką sprawnością i stosunkowo dużą łatwością sterowania. Jednym z wielu możliwych zastosowań tych silników jest napęd pojazdów elektrycznych. Odpowiedni kształt posiada w tym przypadku silnik tarczowy, który zabudowany w piastę koła, stanowi bezprzekładniowy napęd pojazdu [2, 3, 8, 9].

Tradycyjna wersja silnika tarczowego posiada użłobkowany stojan, klasyczne uzwojenie oraz tarcze stalowe z magnesami trwałymim, stanowiące wirnik. Takie rozwiązanie charakteryzuje się jednak znaczną, niepożądana siłą osiową działającą na łożysko wirnika. Ponadto krzyżujące się połączenia czołowe poszczególnych pasm silnika uniemożliwiają całkowite wypełnienie uzwojeniem złobków stojana [4].

Przedmiotem artykułu są trójwymiarowe obliczenia polowe prototypu trójpasmowego silnika tarczowego z poosiowym strumieniem magnetycznym w stojanie. Model fizyczny silnika został wykonany przez firmę AQUA-SZUT z Wrocławia jako napęd zintegrowanego agregatu pompowego z mokrym wirnikiem [5]. Konstrukcę silnika przedstawiono na rys.1. Stojan badanej maszyny elektrycznej stanowią cewki z ferromagnetycznymi rdzeniami. Elementy te są usytuowane na obwodzie stojana w kierunku równoległym do osi silnika. Zalane są one następnie żywicą tworząc stojan. Po obu stronach stojana są umieszczone wirniki tarczowe z magnesami trwałymi.

¹⁾ Dr hab, inż., prof. PO, Katedra Automatyzacji i Diagnostyki Układów Elektromechanicznych,

Politechnika Opolska, ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole, tel\fax (077) 4538447, e-mail: luk@po.opole.pl; ²⁾ Dr hab. inż., prof. PO, adres jw., e-mail: emen@po.opole.pl;

³⁾ Mor inż., adres jw., e-mail: mjagiela@po.opole.pl;

⁴⁾ Dr inż., adres jw., e-mail: rwrobel@po.opole.pl.

Rdzenie stojana silnika wykonane zostały z blachy typu ET 41-30. Tarcze wirników stanowi lita stal. Jako wzbudzenie silnika zastosowano magnesy trwałe z pierwiastków ziem rzadkich $(Nd_2Fe_{14}B)$ o parametrach: B_r = 1,21[T], H_c = 950[kA/m].



- Rys.1. Szkic konstrukcji silnika tarczowego z magnesami trwałymi: 1-tarcze wirnika, 2-wałek, 3-magnesy trwałe, 4-rdzenie (zęby) elementów stojana, 5-cewki
- Fig.1. Scheme of the structure of disc motor with permanent magnets: 1-rotor discs, 2-shaft, 3-permanent magnets, 4-stator element core, 5-coils

Cewki stojana są połączone w układ trójpasmowy (rys.2). Rozpatrywana maszyna z magnesami trwałymi może pracować jako silnik synchroniczny lub silnik prądu stałego. Jest to determinowane sposobem zasilania [4, 5]. W obydwu przypadkach silnik zasilany jest z tego samego inwertera (rys.3). W przypadku bezszczotkowych silników prądu stałego, w odróżnieniu do maszyny synchronicznej, konieczne jest zastosowanie czujnika określającego położenie wirnika względem stojana. Pozwala to na właściwe załączenia pasm uzwojenia.



Rys.2. Trójpasmowy układ połączeń cewek stojana z zaznaczeniem położenia hallotronów Fig. 2. Diagram of three phase stator windings and the position of the Hall sensors

W rozważanym silniku tranzystory elektronicznego komutatora są sterowane sygnałami pochodzącymi z trzech hallotronów rozmieszczonych pomiędzy cewkami w układzie pokazanym na rys.2. Sygnały te umożliwiają określenie położenia magnesów względem cewek, powodując załączenie odpowiedniej pary tranzystorów mostka przekształtnikowego, a przez to załączenie odpowiednich pasm uzwojenia. Załączane są te pasma, które przy danym położeniu względem magnesów wirnika wytwarzają moment obrotowy. Liczba biegunów wirnika powinna być różna od liczby biegunów (zębów) stojana. Takie rozwiązanie umożliwia wytworzenie momentu rozruchowego silnika. W analizowanym przypadku liczba biegunów stojana jest większa od liczby biegunów wirnika, ich stosunek jest równy 3/2. Podobny efekt można uzyskać przy stosunku 2/3, kiedy liczba biegunów wirnika jest większa od liczby biegunów stojana. Dla silników wysokoobrotowych wskazane jest pierwsze z wymienionych wyżej rozwiązań. Liczba przełączeń tranzystorów, a tym samym częstotliwość prądu w uzwojeniu stojana, jest wówczas mniejsza niż w drugim przypadku.



Rys.3. Schemat komutatora uzwojenia trójpasmowego Fig.3. Diagram of dc to ac converter for three phase windings

W referacie do określenia rozkładu indukcji magnetycznej, indukowanej siły elektromotorycznej, indukcyjności własnej i wzajemnej uzwojeń silnika oraz momentu elektromagnetycznego rozwijanego przez silnik wykorzystano trójwymiarowy model polowy silnika, bazujący na MES.

2. METODA OBLICZEŃ

Analizę pola magnetycznego w przestrzeni trójwymiarowej przeprowadzono przy następujących założeniach:

- rozważano pole magnetostatyczne;
- obszar obliczeniowy ograniczono do połowy objętości silnika;
- prędkość obrotowa silnika jest stała;
- uzwojenia są imitowane przez szyny wiodące prostokątną falę prądu;
- gęstość prądu w cewkach jest równomierna.



- Rys.4. Modele numeryczne silnika tarczowego z siatka dyskretyzacyjną: a) bez uzwojenia,
 - b) z uzwojeniem w chwili zasilania dwóch pasm
- Fig.4. Numerical models of the disc-type motor with a calculating mesh:
 - a) without windings,
 - b) with windings, when two phases are supplied

Obliczenia przedstawione w referacie wykonano z zastosowaniem pakietu OPERA 3d, który rozwiązuje polowe równania Maxwella metodą elementów skończonych (MES) [1, 5, 6, 8]. Do opisu pola magnetostatycznego (moduł TOSCA) wykorzystuje się dwa typy magnetycznych potencjałów skalarnych: zredukowany potencjał dla przestrzeni z uzwojeniami oraz całkowity w powietrzu i materiałach ferromagnetycznych. Pozwala to wydatnie zredukować wymiary siatki modelu

obliczeniowego [6]. Z charakterystyki B=f(H) rdzenia ferromagnetycznego oraz tarczy wirnika wyliczona jest przenikalność magnetyczna zastępcza (równoważna). Modele numeryczne silnika pokazano na rys.4.

3. WYNIKI OBLICZEŃ

Na rys.5 przedstawiono model fizyczny badanego silnika tarczowego z magnesami trwałymi.



Rys.5. Prototyp silnika tarczowego Fig.5. View of the motor prototype

Dane konstrukcyjne silnika przedstawiono w tablicy 1.

| Та | bl | ica | 1 |
|-----|----|------|---|
| 1 0 | Ψ. | i Ga | |

| | vvyurane | uane | Konstrukcyji | le allali | ZUwane | រមួប ទា៣ | ina | |
|---|----------|------|--------------|-----------|--------|----------|-----|---|
| | | | | | | | | |
| n | | | | | | | | |
| | | | | | | | | _ |

- Longtoulouing, anglinguung

| Stojan | | |
|--|------------------------|--|
| -średnica zewnętrzna | D _z = 80 mm | |
| -średnica wewnętrzna | D _w = 50 mm | |
| -trójpasmowe uzwojenie z liczbą cewek na biegun | q = 1 | |
| -liczba cewek | N _c = 12 | |
| -liczba zwojów w cewce | N _t = 360 | |
| Szczelina powietrzna | | |
| -wysokość | g =1.5 mm | |
| Wirnik | | |
| -liczba par biegunów | p = 4 | |
| -grubość tarczy wirnika | D _r = 5 mm | |
| -całkowita długość silnika | l = 80 mm | |

Model obliczeniowy składał się z 144900 elementów i 155556 węzłów. Przyjęta gęstość prądu w cewkach uzwojenia silnika wynosiła 6 A/mm². Wykorzystując możliwości programu OPERA 3d wykonano szereg obliczeń pola magnetycznego oraz parametrów całkowych silnika. Moment elektromagnetyczny maszyny wyznaczono z tensora naprężeń Maxwella [1,6].

Rysunek 6 ilustruje zmienność momentu elektromagnetycznego w funkcji kąta obrotu wirnika przy zasilaniu dwóch pasm uzwojenia silnika (bez przełączania), dla natężenia prądu w uzwojeniach silnika równego 3,5A. Na rys.7 zamieszczono wyniki obliczeń momentu zaczepowego [7] w funkcji kąta obrotu wirnika. Obliczenia momentu zaczepowego wykonano dla silnika w stanie bezprądowym (*I=0*). Wartość momentu od zębów, wynikająca z oddziaływania nabiegunników stojana z biegunami wirników, jest dość znaczna (0,21 N-m – rys.7). Wartość średnia momentu zaczepowego w czasie pracy silnika jest równa zeru.

Z punktu widzenia użytkownika bardziej interesujące są wartości średnie momentu elektromagnetycznego. W tablicy 2 przedstawiono wyniki obliczeń i pomiarów momentu elektromagnetycznego rozwijanego przez silnik.

| Tablic | ca 2 |
|--------|------|
|--------|------|

| Porowname wymkow obliczen i pormarow momentu elektromagnetycznego | | | | |
|---|------------------------------|-----------------------------------|--|--|
| I [A] | T _e [Nm] (pomiar) | T _e [N·m] (obliczenia) | | |
| 0.8 | 1.00 | 1.20 | | |
| 1.2 | 1.75 | 1.88 | | |
| 1.6 | 2.45 | 2.42 | | |

Parównania wypików obligzań i pomiarów momentu elektromagnetycznego



Rys.6. Moment elektromagnetyczny w funkcji kąta obrotu θ (uzwojenia silnika nie przełączane) Fig.6. Torque vs. displacement angle θ (motor windings

without switching-over)

Rys.7. Moment zaczepowy w funkcji kąta obrotu θ Fig.7. Cogging torque vs. displacement angle θ

Kątową zmienność momentu elektromagnetycznego w przypadku przełączania pasm silnika w funkcji kąta obrotu wirnika ilustruje rys.8. Widoczne są duże pulsacje momentu, co jest zjawiskiem niekorzystnym. Na rys.9 przedstawiono wyniki obliczeń międzypasmowej siły elektromotorycznej rotacji, wyznaczonej przy n = 1000 obr/min.

V1 n = 1000 (obr/n

60

Rys.8. Moment elektromagnetyczny w funkcji kąta obrotu θ (uzwojenia silnika przełączane)

Fig.8. Torque variation vs. displacement angle θ (motor windings switch-over)

 e tⁿ
Rys.9. Przebieg międzypasmowej siły elektromotorycznej w funkcji kąta θ obrotu dla prędkości obrotowej n=1000 obr/min
Fig.9. Back EMF waveform (line-to-line) vs. displacement angle θ, at the rotational speed n=1000 rpm

Rysunek 10 przedstawia zależność indukcyjności własnej i wzajemnej uzwojenia od prądu twornika. Indukcyjność tę wyznaczono przy braku strumienia magnesów trwałych. Widoczny jest duży wpływ nasycenia rdzenia stojana na wartości indukcyjności własnej uzwojenia. Należy zaznaczyć, że w związku z nasyceniem biegunów stojana indukcyjności uzwojeń będą zależeć również od wzajemnego położenia cewek względem magnesów wirnika. Charakterystyki indukcyjności zostaną wykorzystane w opracowywanym modelu obwodowym silnika.

150

100

-50

-100

-150

-10

rol [V]



Rys.10. Indukcyjność własna i wzajemna uzwojenia silnika w funkcji prądu Fig.10. Self and mutual inductance of the motor windings vs. current



4. WNIOSKI

Artykuł zawiera wyniki obliczeń trójwymiarowego pola magnetycznego trójpasmowego silnika tarczowego prądu stałego z magnesami trwałymi, wykonane w oparciu o MES. Względnie dobra zgodność wyników obliczeń z pomiarami zachęca do prowadzenia dalszych prac optymalizacyjnych. Znając rozkłady pola magnetycznego wyznaczono moment elektromagnetyczny, moment zaczepowy, siłę elektromotoryczną rotacji oraz indukcyjność własną i wzajemną.

Przedstawiony silnik charakteryzuje się stosunkowo dużą wartością rozwijanego momentu do swojej masy, dużą sprawnością oraz stosukowo prostą budową.

Pewną niedogodnością bezszczotkowego silnika prądu stałego są koszty – zarówno wysokoenergetyczych magnesów trwałych jak i elementów elektronicznych komutatora. Należy się jednak spodziwać stałego spadku cen tych elementów.

LITERATURA

- Binns K.J., Lawrenson P.J., Trowbridge C.W.: The Analytical and Numerical Solution of Electric and Magnetic Fields, John Wiley&Sons, Chichester, New York, 1992.
- Caricchi F., Crescimbini F., Di Napoli A., Santini E.: Optimum CAD-CAE design of axial flux permanent magnets motors, ICEM'92, Conference Proceedings, Vol.2, Manchester, United Kingdom, 1992, pp-637-641.
- Caricchi F., Crescimbini F., Fedeli E., Noia G.: Design and construction of a wheel-directlycoupled axial-flux PM motor prototype for EVs, IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol.1, 1994, pp.254-260.
- 4.Kenio T., Nagamori S.: Permanent-Magnet and Brushless DC Motors, Claredon Press, Oxford 1985.
- Mendrela E., Moch J., Paduch P.: Właściwości elektromechaniczne bezszczotkowego silnika tarczowego prądu stałego, XXXVI Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, SME'2000, Szklarska Poręba, 2000, s.189-206.
- 6. OPERA User Guide, Vector Fields Limited, Oxford, United Kingdom, 1994.
- 7. Pochanke A.: Modele polowo-obwodowe pośrednio sprzężone silników bezzestykowych z uwarunkowaniami zasilania, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Elektryka, z. 110, 1999.
- Wiak S., Welfle H., Komęza K., Mendrela E.: Electromagnetic field analysis of 3D structure of disc type induction motor, ICEM'98, Conference Proceedings, Istanbul, Turkey, 1998, pp.735-739.
- Wiak S., Welfle H., Komęza K., Mendrela E.: *Electromagnetic field analysis of 3D structure of disc-type motors*, International XI Symposium on Micromachines and Servodrives, Malbork, Poland 1998, pp.44-51.

Recenzent: Dr hab. inż. Ignacy Dudzikowski Profesor Politechniki Wrocławskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 lutego 2001 r.

Abstract

Among permanent magnet machines the disc-type motors are the ones, which find a growing interest in a number of applications [2, 3, 8, 9]. In the paper a new version of the disc motor with the magnetic flux crossing the air-gaps and the stator axially is presented. The motor structure is shown schematically in Fig. 1. The stator consists of electromagnetic elements made of ferromagnetic cores and coils wound on them. The diagram of three-phase stator windings is presented in Fig. 2. The motor is supplied from the dc source, so the current flowing through the winding has to alternate as the rotor magnets move in relation to the stator windings. The electronic converter with Hall-sensors is called electronic commutator (Fig. 3).

The calculations of the magnetic field were made using the OPERA (3d) package with the TOSCA module [1, 6]. Due to the symmetry of the motor, the numerical model was reduced to one half of its volume (see Fig. 4). The physical model of the considered motor is shown in Fig. 5. The calculation results and measurements of the electromagnetic torque are contained in Table 1. The method for torque calculation is based on the Maxwell's stress tensor [1, 6].

The electromagnetic torque, cogging torque, torque variation and back-EMF versus displacement angle are presented in Figs. 6 - 9, respectively. Fig. 10 shows the values of self and mutual inductances versus the stator current. The inductances will be used in the tested motor lumped-parameter model.

The torque simulation results are relatively close to those obtained from the tests (see table 1), so this calculation tool can be used for motor design optimisation. It is of great importance considering the increasing interest in application of this type of a motor.