

Analysis of magnetic circuits for a hybrid stepper motor with cogging torque reduction

Abstract. In the paper the results of analysis concerning magnetic circuits in the design of driving signals has been presented. In the research FEM Method has been applied. All simulations for computing flux density, forces, and torques have been performed by the program FLUX 2D v 10.1. The simulations have shown a significant influence of the driving current sequence impulses on the cogging torque in the hybrid stepper motor.

Streszczenie. W artykule przedstawiono zastosowanie narzędzi do analizy obwodów magnetycznych wraz z obliczeniami momentów i sił w obwodach magnetycznych silników elektrycznych przy konstrukcji sterowania układem prądowym silnika Hybrid Stepper. Wszystkie symulacje pokazały duży wpływ kolejności impulsów prądowych sterowania na moment zaczepowy w krokowym silniku hybrydowym. (Analiza obwodu magnetycznego silnika krokowego)

Keywords: magnetic circuit, permanent magnet, finite elements method, magnetic circuit

Słowa kluczowe: obwód magnetyczny, silnik z magnesami stałymi, metoda elementów skończonych, obwód magnetyczny

Introduction

Electric motors play an important role in industrial plants and processes. Permanent magnet motors are present in many fields of human activity. As economic in use, precise and reliable, they are more popular on the nowadays market. There are some problems, which are inspiring for users and constructors [1,2]. Supplying this kind of motors by rectangular impulses is cheap and easy to use, but it generates some issues related to the cogging torque [3]. The inertial moment reduces this problem. On the other side it generates the loss of the motor torque and incomplete use of permanent magnets properties. In the paper the results of analysis concerning magnetic circuits in the design of driving signals has been presented.

Brief design

The hybrid stepper motor has been analyzed. Fig. 1 illustrates the cross-sectional view of the magnetic circuit design.

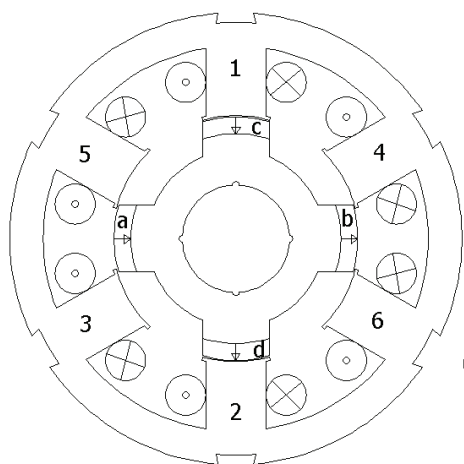


Fig. 1. Cross-section of motor design with direction of magnetization for permanent magnets.

A very simple shape of motor was considered to explain the problem. It consists of six stators winding poles, and four rotor poles with permanent magnets. This kind of construction imposes three-phase stator supplying system. Magnetization dependencies for the materials, which were used to this simulations are shown in Fig. 2, the first one for electromagnetic steel sheet and the second one for permanent magnet poles [4].

In the simulation the material properties for a shaft was taken as magnetization dependency for carbon steel.

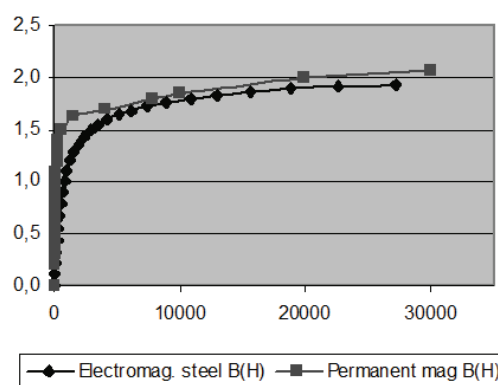


Fig. 2. Magnetization dependencies for the materials used in the computing [4].

Computing methodology

All simulation has been performed with the program FLUX 2d v10.1. This piece of software uses Maxwell Stress Tensors (MST) methodology [5]. Zero boundary conditions have been assigned around the machine. The area around the motor has been divided into 200.000 triangle elements. The elements have different dimensions, which depended on a importance of considered area. The sensitive space around the air gap, sharp shapes around the poles, was analyzed with finer mesh. The software can recognize moving and non-moving elements. The motor has been divided on the stator with six winding poles as a nonmoving part of the motor, and the rotor with four poles magnetized by permanent magnet elements as moving elements. The shape of air gap between the stator and the rotor is very important. The rotor axis is placed perpendicularly to the surface of Fig.1. Considering the formulas for computing force:

$$(1) \quad F = \int_c \left[\frac{1}{\mu_0} B(B.n) - \frac{1}{2\mu_0} B^2.n \right] dC$$

and torque

$$(2) \quad T = r * F$$

the MST method had been used. It is important to assume a very big difference between magnetic permeability (minimum 1/1000) in those two analyzed spaces (air and iron). In the formula (2) "r" is the radius for the torque and "n" it is the normal unit vector for the integration contour. In the calculations the normal part of flux vectors in the air

gap, and big difference of magnetic permeability between the air and electromagnetic steel was taken. The air gap presence in the analyzed region fulfills this condition. Additionally, considering the flux density after the first part of calculation, it is possible to predict in which part of the magnetic circuit, the electric loading will be the most effective.

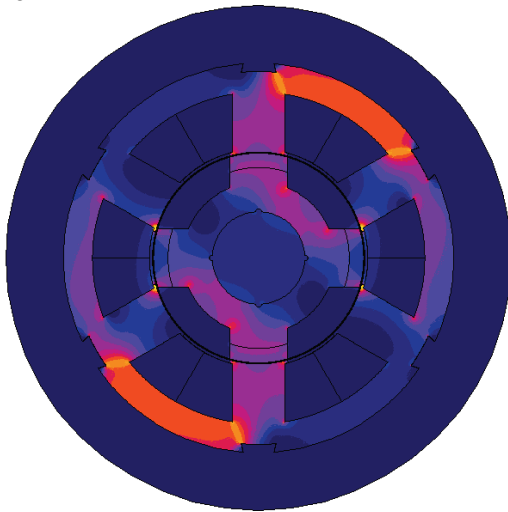


Fig. 3 Flux distribution for the HS motor.

Computational result

The computations were carried out under the assumption described above. The simulation has been done from 0° till 30° rotors turn. There are four diagrams in Fig. 4 describing HS motors torque in a different rotors position with 1° digitizing. It is possible to notice a very strong reaction for the cogging torque on the diagrams. Especially between 0° to 4° and over 16° the interaction between cogging torque and rotor torque is negatively intensive. Especially between 0° to 4° and over 16° the interaction between cogging torque and rotor torque is negatively intensive. In Fig. 4 cogging torques diagram is bold because of its importance to this kind of constructions. The diagram was computed with the condition of "0 current" in the winding poles. All simulations for specific electric loadings have been done. The correlation on diagram "1" in the Fig. 4 is showing torque distribution. The torque is generated when poles 3-4 are excited and permanent magnets on the rotors pole a-b are pulled to the poles. For diagram "2" the electric loading is the same as for diagram "1" with additional 5-6 excited poles. The currents direction for these poles induced magnetic field causes repulsion of the a-b rotors magnets. Considering the diagram "2" this kind of driving gives a positive effect only at the beginning of movement, but is negatively noticeable in the turning angle over 16°.

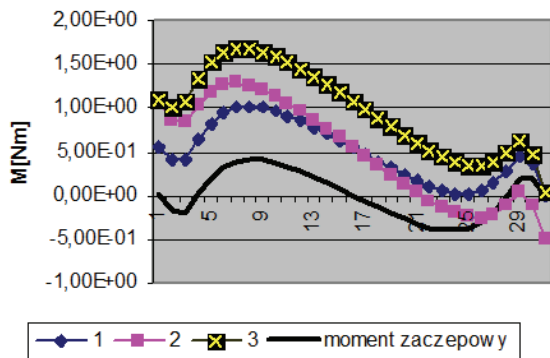


Fig. 4. Rotors torque as a function of rotations angle

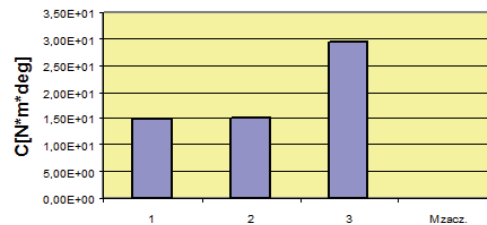


Fig. 5. Torques integral factor counted on conditions for the Fig.4 diagrams.

For that angle the cogging torque reduces significantly the rotor torque. It is a result of interaction between 5-6 poles and c-d magnets. For the diagram "3" the electric loading is similar to diagram "2" with additional 1-2 excited poles. The magnetic field reduces the interaction between 1-2 poles and c-d magnets in the same way. Simulation with this conditions depicts on the diagram "3" the most positive influence for the torque. it is visible after calculation of the integral "C" as in formula (3).). All the results are shown in Fig. 5.

$$(3) \quad C = \int_{0^{\circ}}^{30^{\circ}} T d \text{deg}$$

The average value of torque increases almost twice in the case "3". Considering the flux flow in the Fig. 3 it is easy to notice that the most effective influence of field correction occurs in the area of the highest flux densities.

From a comparison of Figs. 1 and 2 the reason, why the additional electric loading in the poles 5-6 does not increase torque, may be easily found. The biggest correction for the cogging torque for electric loading in the poles 1-2 is observed.

Conclusion

The analysis of magnetic circuits is useful in any kind of research [6,7]. The conclusions from simulations have a wide applicability scope. Simulation software allows for optimization of design, shape and weight.

Computing forces and torques in this kind of programs is easy using the Maxwell stress tensor method. During the design process of electrical motors MRS is a powerful tool. It gives many valuable details in the form of drawings, diagrams, tables, distribution of forces and torques, which can be used as tools for drive design. Additionally it is possible to optimize motor drive taking into account the reaction of the simulated object. In the paper it is shown, that this procedure is useful during drive design. The importance of cogging torque decreases when rotor increases rotation. Inertial moment of the rotor as an integrating element reduces the influence of cogging torque. Low rotation enlarges this interaction. Diagrams depicted in Fig. 6 show that the average value of rotors torque (twice as big) can have the impact not only for the mechanical and magnetic constructions, but for the drive design too. In the paper only driving "0-1" in the turning space from 0° till 30° was taken into account. Dividing this area into smaller parts allows for a more effective progress in the design process. The supply frequency is the next issue to be considered in future research.

REFERENCES

- [1] Aziza M. Zaki, Amal Z. Mohamed, Microstepping Control of Hybrid Stepper Motor Using Fuzzy Logic for Robotics Applications, Electronic Reserch Institute. Dokki, Cairo, Egypt.
- [2] Kazuaki Nakata, Kenji Hiramoto, Masuayuki Sanada, Sigeo Morimoto, Yoji Takeda Noise reduction for switched reluctance motor with a hole. PCC – Osaka 2002.

- [3] Texas Instruments, Microstepping Bipolar Drive of Two-Phase Hybrid Stepping Motor on TSM320F2808 DSC
- [4] Information – VACuumshmelze, Rare-Earth Permanent Magnet Materials, VACODYM®, VACOMAX®
- [5] Meeker D., Finite Element Method Magnetic. V3.1 User Manual. 2001
- [6] Tokuz Dulger L.C., Serdan Uyan, Modeling, simulation and control for a four-bar mechanism with a brushless servo-motor, Mechatronics Vol.7 No.4©1997
- [7] Wolf J., Spath H., Swithed Reluctance Motor With 16 Stator Poles and 12 Rotor Teeth. Elektrotechnisches Institut, Universitat Karlsruhe

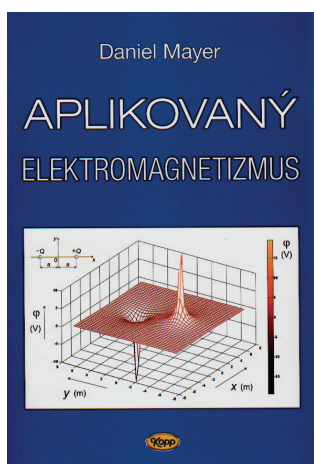
Authors: dr inż. Krzysztof Szewczyk Politechnika Częstochowska Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: szewczyk500@gmail.com
mgr inż. Adam Kościelniak absolwent Politechniki Częstochowskiej, ul. Kosmiczna 1, 42-274 Konopiska, E-mail: megamanb@poczta.fm
mgr inż. Ryszard Kot, Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Zakład Niekonwencjonalnych Technologii Produkcyjnych, 30-011 Kraków, ul. Wrocławska 37A ryszard.kot@ios.krakow.pl

Nowe książki

Daniel Mayer - Aplikowany elektromagnetyzm

Elektromagnetyzm stosowany

Czeskie Budziejowice 2012, Wydawnictwo Kopp, format B5, stron: 530., rysunków i fotografii: 412, pozycji literatury: 104.



Recenzowana obszerna praca jest przeznaczonym dla inżynierów elektryków wprowadzeniem do teorii pola elektromagnetycznego. Jak wyjaśnia autor w przedmowie, wprowadzie książka powstała na podstawie wykładów na Wydziale Elektrycznym Zachodnio Czeskiego Uniwersytetu w Pilźnie, jednak zawarty jest w niej nie tylko wkład fizyków, matematyków i twórczych inżynierów w rozwój elektromagnetyzmu, ale również przemyślenia autora nad uwarunkowaniami działalności inżynierskiej i nad motywacjami badaczy. Przytoczone są w niej także wypowiedzi twórców nauki na temat metodologii pracy badawczej i heurystyki.

W krótkim wprowadzeniu autor wskazuje drogę rozwiązywania projektów w elektrotechnice i wyjaśnia dwojaki sens pojęcia „pole” oraz sposoby jego wizualizacji.

Rozdział 1. (s. 23) jest poświęcony podstawowym pojęciom i prawom teorii pola elektromagnetycznego. Już w tej części pracy widoczne jest dążenie autora do kompletności i systematyczności przedstawienia rodzajów pola za względu na czasowy przebieg, przestrzenny rozkład oraz zróżnicowanie środowisk.

W rozdziale 2. (s. 50) są podane podstawowe własności pola elektrostatycznego, magneto statycznego oraz stacjonarnego pola prądu. Autor omawia trzy rodzaje polaryzacji dielektryka. Przydałaby się w tej części pracy bardziej szczegółowe rozpatrzenie dipoli oraz multipoli. Rozpatrując pole magneto statyczne autor postępuje się skalarnym i wektorowym potencjałem magnetycznym oraz makroskopowymi własnościami magnetyków oraz ferromagnetyków.

Rozdziały 3-5 (s. 80) dotyczą bezpośrednich zastosowań równań Maxwella w postaci stacjonarnych oraz obliczania pól stacjonarnych za pomocą wyrażeń całkowych. W tej części pracy autor nawiązuje do równań całkowych Fredholma, do praw Biota-Savarta oraz do metody odbić zwierciadlanych.

W rozdziale 6 (s.26) są przedstawione podstawowe numeryczne metody rozwiązywania zagadnień brzegowych pola elektromagnetycznego. Autor ograniczył się do opisanie metody różnic skończonych oraz do metody elementów skończonych. Zaprezentował i porównał także 11 profesjonalnych programów produkcji firm: ANSYS Inc. Southpointe z USA; COMSOL AB ze Sztokholmu; ERA Technology Limited, Victor Fields Software, Wimborne z Wielkiej Brytanii; CEDRAT Group z Francji; Infolytika z Montrealu w Kanadzie; Impressum CST z Niemiec; Tera Analysis z Danii; David Meeker, Wltham z USA; Pavel Karban, Plzeň z Czech. W rozdziale zamieszczono kilka przykładów zastosowania programów profesjonalnych, m.in. do analizy pola elektrycznego wokół izolatora przepustowego wysokiego napięcia.

Rozdział 7 (s.31) dotyczy analitycznych i numerycznych metod obliczania pojemności, indukcyjności własnej oraz wzajemnej i rezystancji elementów obwodów elektrycznych

Rozdziały od 8 do 10 (s. 110). dotyczą obwodów magnetycznych, energii oraz sił w stacjonarnym polu elektrycznym i magnetycznym, a także matematycznej analogii między podstawowymi prawami stacjonarnych pól elektrycznego i magnetycznego. Szczególnie dużo uwagi poświęcił autor siłom działającym w polu magnetycznym; wprowadził m.in. uogólnioną siłę Lorentza działającą na granicy dwóch środowisk o różnej przenikalności magnetycznej.

Rozdziały od 11 do 13 (s. 94) dotyczą pola elektromagnetycznego zmiennego w czasie i pola w poruszającym się środowisku. Wnikliwie autor przedstawił zwrot prądu indukowanego oraz zasadę Lorenza. Rozpatrując pole okresowo zmienne wprowadził zapis równań Maxwella za pomocą liczb zespolonych. Omawiając dwie koncepcje, obwodową i polową strumienia energii elektromagnetycznej, posłużył się wektorem gęstości strumienia energii, tj. wektorem Poyntinga. Szerzej niż zwykle w literaturze podręcznikowej autor przedstawił powstawanie i skutki prądów wirowych, w tym lewitację magnetyczną, zjawisko naskórkowości, strat mocy wywołanych przez prądy wirowe w przewodach masywnych o prostokątnym oraz kołowym polu powierzchni przekroju. Przedstawił także ogólny algorytm numerycznego rozwiązywania pola prądów wirowych i wywołanych przez nie strat mocy w przewodzie o dowolnym kształcie powierzchni przekroju i dowolnym czasowym przebiegiem prądu całkowitego – także w stanach nieustalonych.

W rozdziale 14 (s. 28) w zwartej formie jest przedstawiona falowa teoria pola elektromagnetycznego w środowisku liniowym, jednorodnym i izotropowym. Autor przedstawił równania falowe w idealnym dielektryku oraz w dobrym przewodniku (równania dyfuzji pola). Szerzej rozpatrzył falę płaską w dielektryku, a także harmoniczne fale w dielektryku oraz w środowisku przewodzącym. Na zakończenie rozdziału autor podał elektrodynamiczne potencjały niestacjonarnego pola elektromagnetycznego, wektory Hertza oraz oscylacyjne obwody generujące fale elektromagnetyczne.

Dwa końcowe rozdziały 15 i 16 (s.20) są poświęcony zjawiskom elektromagnetycznym w środowisku anizotropowym oraz rozwiązalności i jednoznaczności rozwiązania równań pola elektromagnetycznego. Autor przypomniał podstawowe operacje rachunku wektorowego, wielkości występujące w omawianej teorii oraz krótkie biografie twórców teorii pola elektromagnetycznego.

Zaletą omawianej pracy są liczne komentarze omawianych zagadnień oraz duża liczba przykładów ilustrujących praktyczne zastosowania omawianej teorii..

Praca profesora Mayera dzięki swym walorom poznawczym i interesującemu sposobowi przedstawiania zagadnień może być bardzo przydatna zarówno w pracy dydaktycznej, zwłaszcza na poziomie studiów podyplomowych, jak i w twórczości inżynierskiej.

Miroslaw Dąbrowski