

Piotr Mynarek, Marcin Kowol
Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

ANALIZA POŁOWO-OBWODOWA SILNIKA SYNCHRONICZNEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI O ROZRUCHU CZĘSTOTLIWOŚCIOWYM

FIELD-CIRCUIT ANALYSIS OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Streszczenie: W pracy przedstawiono obliczenia połowo-obwodowe silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (PMSM). Analizę przeprowadzono za pomocą trójwymiarowego modelu numerycznego, zbudowanego w programie Flux3D, który bazuje na metodzie elementów skończonych. Za pomocą opracowanego modelu wykonano analizę stanów pracy silnika. Wyznaczono także rozkład indukcji magnetycznej, moment zaczepowy w funkcji kąta obrotu wirnika oraz siłę elektromotoryczną jaka indukuje się w uzwojeniu silnika. Wyniki obliczeń zostały zweryfikowane pomiarami wykonanymi na obiekcie rzeczywistym silnika.

Abstract: The paper presents results of performance calculations of permanent magnet synchronous motor using its three-dimensional field-circuit finite-element numerical model. Flux distribution, cogging torque and back electromotive force characteristics vs. angle and phase current waveform are obtained. In order to validate correctness of the calculation results, measurements on the physical model of the machine are carried out.

Słowa kluczowe: Silniki PMSM, metoda elementów skończonych, analiza stanów dynamicznych

Keywords: PMSM, finite-element method, transient analysis

1. Wstęp

Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSM z ang. *Permanent Magnet Synchronous Motor*) zyskują w ostatnim czasie coraz większą popularność. Spowodowane to jest przede wszystkim tym, że maszyny z magnesami neodymowymi charakteryzują się wysoką sprawnością, dużą gęstością mocy, niezawodnością ruchową oraz szerokim zakresem prędkości obrotowej [6]. Silniki PMSM cechują się także dużą przeciążalnością momentu, co w połączeniu z stosunkowo niskim momentem bezwładności wirnika zapewnia dobre właściwości dynamiczne [2]. Wymienione zalety silników z magnesami trwałymi powodują, że silniki te w szczególności PMSM zastępują coraz częściej silniki indukcyjne. Zjawisko to jest w szczególności wyraźne w napędach dedykowanych do pracy ciągłej np. napędach pomp i wentylatorów [1, 7].

Przestrzenny charakter zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w przetwornikach elektromechanicznych z magnesami trwałymi sprawia, że wartości parametrów silnika zmieniają się w zależności od kąta położenia wirnika, jak również od wartości prądu w uzwojeniu

stojana. Dlatego też, tradycyjne metody obwodowe analizy maszyn elektrycznych stają się nieefektywne. Coraz częściej dzięki znacznemu rozwojowi technik komputerowych oraz gwałtownemu wzrostowi mocy obliczeniowej komputerów dostępnych dla przeciętnego użytkownika stosowana jest analiza połowo-obwodowa silników elektromechanicznych. W artykule przedstawiono obliczenia połowo-obwodowe do analizy silnika PMSM.

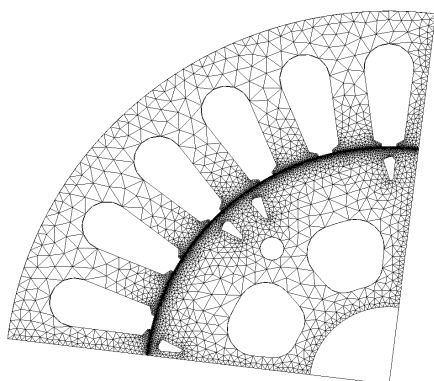
2. Model numeryczny

W pracy jako obiekt badań przyjęto silnik SMKwsg90M8 o rozruchu częstotliwościowym i parametrach przedstawionych w tab.1. W celu przeanalizowania parametrów elektromagnetycznych ww. maszyny został zbudowany model połowy w środowisku Flux3D, bazującym na metodzie elementów skończonych. Naturalnym podejściem podczas budowy modeli połowych przetworników elektromechanicznych jest stosowanie warunków brzegowych pozwalających ograniczyć do minimum obszar obliczeniowy. Dlatego też autorzy podczas budowy modelu połowego analizowanego silnika zastosowali warunki periodyczne

oraz symetrii, ograniczając w ten sposób obszar obliczeniowy do 1/8 objętości całej maszyny. Zabieg ten pozwolił w znaczący sposób zredukować koszt numeryczny potrzebny do rozwiązania zagadnienia. W modelu przyjęto następujące założenia upraszczające: pominięto histerezę magnetyczną i zjawisko prądów wirowych.

Tab.1 Wybrane parametry badanej maszyny

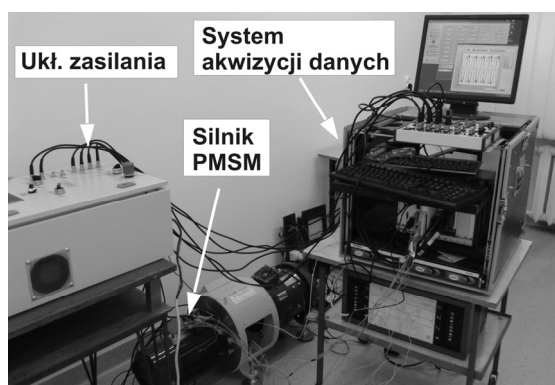
Wielkość	U_n [V]	I_n [A]	P_n [kW]	n_n [obr/min]	η [%]
Wartość	400	3,7	2	2200	91



Rys. 1. Siatka dyskretyzacyjna w przekroju silnika

3. Stanowisko pomiarowe

W celu zweryfikowania wyników symulacji komputerowych przeprowadzono pomiary na rzeczywistym obiekcie. W tym celu zestawiono stanowisko pomiarowe zilustrowane na rys. 2.



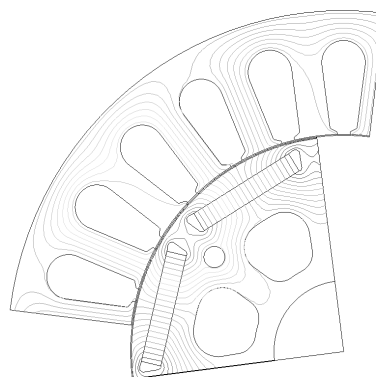
Rys. 2. Stanowisko pomiarowe

W skład zbudowanego stanowiska pomiarowego wchodzi autorski system akwizycji danych. System akwizycji danych został zbudowany w oparciu o środowisko LabView. Wykorzystano w tym celu sprzęt firmy National Instruments w skład którego wchodzi: jednostka

PXIe-8130, karty pomiarowe PXI-6133 i PXIe-4353. Opracowany system pozwala na rejestrację chwilowych jak i skutecznych wielkości elektrycznych silnika. Wykorzystany system pomiarowy został szczegółowo opisany w pozycji [5].

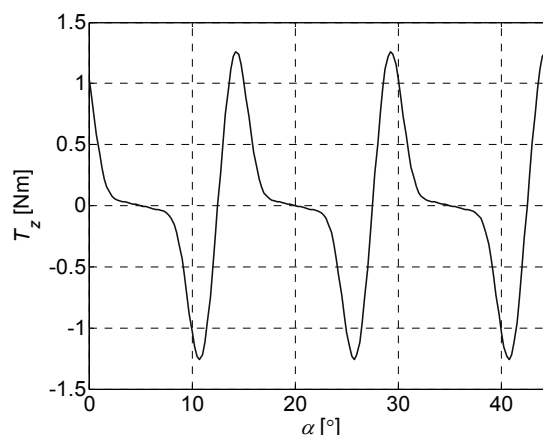
4. Wyniki obliczeń

Dla opracowanego modelu polowego przeprowadzono szereg symulacji komputerowych. W pierwszej etapie badań wyznaczono rozkład indukcji magnetycznej i linii pola w analizowanej maszynie. Na rys. 3 przedstawiono linie pola magnetycznego dla kąta obrotu wirnika $\alpha=14,25^\circ$ oraz zerowej wartości prądu w uzwojeniach silnika $I=0A$. Położenie to odpowiada maksymalnej wartości momentu zaczepowego.



Rys. 3. Linie pola magnetycznego dla wybranego położenia wirnika ($\alpha=14,25^\circ$, $I=0A$)

Zmienność momentu zaczepowego (T_z) w funkcji kąta położenia wirnika obrazuje rys. 4. Wielkość ta została wyznaczona w zakresie od 0° do 45° , przy zmianach położenia wirnika względem stojana o $0,25^\circ$. Okres zmian momentu zaczepowego wynosi 15° .



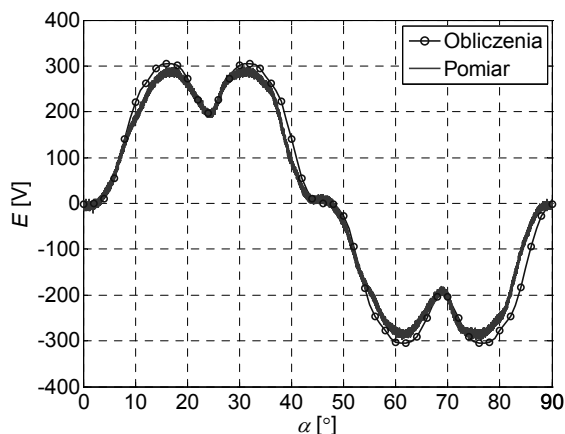
Rys. 4. Zależność momentu zaczepowego (T_z) od kąta położenia wirnika – obliczenia

Wartość maksymalna T_z jaką otrzymano z przeprowadzonych obliczeń wynosiła $T_{zmax\ obl}=1,26$ Nm, natomiast z pomiarów otrzymano $T_{zmax\ pom}=1,31$ Nm. W programie Flux3D moment zaczepowy wyznaczono wykorzystując metodę pracy wirtualnej (VW) [4]. Moment oblicza się jako pochodną koenergii (W') względem kąta obrotu wirnika przy zerowej wartości prądu:

$$T_z = -\left. \frac{\partial W'}{\partial \alpha} \right|_{I=0} \quad (1)$$

gdzie: $W' = \iiint_V \left(\int_0^H \mathbf{B} \cdot d\mathbf{H} \right) dV$, α - kąt obrotu wirnika względem stojana.

W kolejnym etapie badań wyznaczono siłę elektromotoryczną indukującą się w uzwojeniu silnika, dla różnych wartości prędkości obrotowych wirnika. Siłę tą obliczono przy założeniu zerowych wartości prądu w uzwojeniu i zadanej prędkości obrotowej wirnika. Na rys. 5 przedstawiono przebieg SEM przy znamionowej prędkości obrotowej silnika $n=2200$ obr/min. Wyniki symulacji komputerowych zostały zweryfikowane z pomiarami. Wartość maksymalna siły elektromotorycznej jaką otrzymano z przeprowadzonych obliczeń wynosiła $E_{obl}=296$ V, natomiast z pomiarów otrzymano $E_{pom}=304,9$ V. Błąd pomiędzy obliczeniami a pomiarami wynoszący 3% można uznać za zadowalający i świadczy o poprawności zbudowanych modeli.



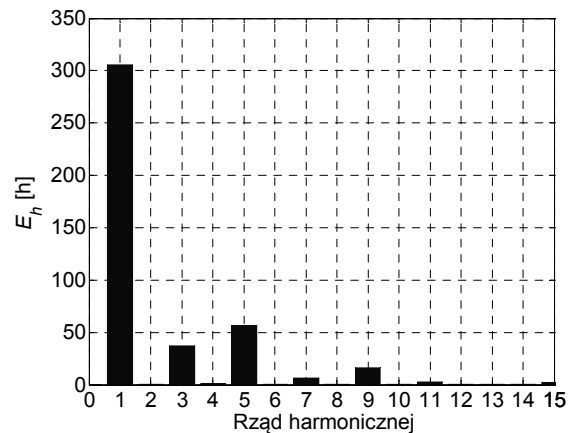
Rys. 5. Przebieg fazowej siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu analizowanego silnika

Dla wyznaczonej siły elektromotorycznej przeprowadzono analizę zawartości wyższych

harmonicznyc. Na podstawie otrzymanego przebiegu SEM obliczono współczynnik zawartości wyższych harmonicznyc (THD z ang. *Total Harmonic Distortion*) zgodnie z zależnością (2).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n U_k^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie: U_1 - wartość skuteczna napięcia składowej podstawowej, U_k - wartość skuteczna napięcia k -tej harmonicznej

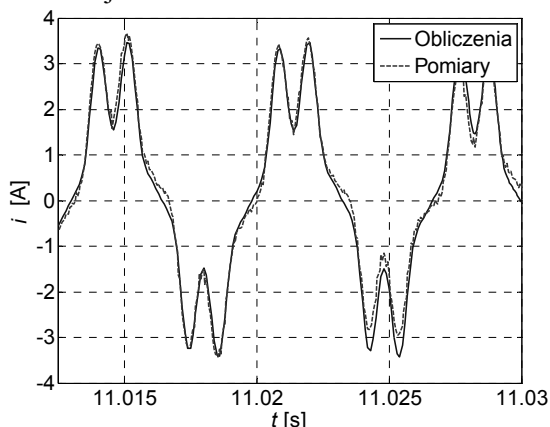


Rys. 6. Zawartość wyższych harmonicznyc w SEM

Obliczona wartość współczynnika THD w badanym przetworniku elektromechanicznym wynosi 16,1%. Wartość współczynnika THD jest niezwykle istotna z punktu widzenia poprawnej pracy silnika synchronicznego [3]. Przebieg siły elektromotorycznej powinien być zbliżony jak najbardziej do sinusoidy. Odkształcenie SEM od pierwszej harmonicznej jest zjawiskiem niepożądanym. Zbyt duża wartość współczynnika THD skutkuje zniekształceniem przebiegów prądu silnika jak i wprowadza dodatkowe pulsacje momentu elektromagnetycznego.

W następnej kolejności autorzy przeprowadzili obliczenia mające na celu wyznaczenia przebiegów chwilowych prądów w uzwojeniu silnika w stanie ustalonym. W modelu przyjęto sinusoidalne wymuszenie napięciowe. Zastąpienie sygnału PWM sygnałem sinusoidalnym spowodowane było dużym kosztem numerycznym wynikającym z bardzo małego kroku całkowania [8]. Na rysunku 7 przedstawiono otrzymane z symulacji komputerowej przebiegi prądu w wybranej fazie silnika dla biegu

jałowym przy znamionowej prędkości obrotowej.



Rys. 7. Przebieg prądów w wybranej fazie analizowanego silnika

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono obliczenia jakie otrzymano z przeprowadzonej analizy polowej-obwodowej synchronicznego silnika z magnesami trwałymi. Otrzymane wyniki zweryfikowano z pomiarami wykonanymi na obiekcie rzeczywistym. Uzyskane wartości parametrów elektromechanicznych wykazują dużą zbieżność z pomiarami, co świadczy o poprawnie zbudowanym modelu matematycznym. Za pomocą zbudowanego modelu polowego można w szybki sposób, a zarazem z dostateczną dokładnością, wyznaczyć wybrane parametry elektromagnetyczne synchronicznego silnika z magnesami trwałymi oraz przeanalizować zachodzące w nim stany dynamiczne.

W dalszych badaniach autorzy przeprowadzą obliczenia mające na celu wyznaczenie strat występujących w analizowanej maszynie co pozwoli na ocenę ciepłą silnika.

7. Literatura

- [1] Barański M., Szelał W., Jędryczka C., Mikołajewicz J.: *Analiza silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim i magnesach w wirniku rozłożonych w kształcie litery U*. Prace Naukowe Instytutu Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 66, Wrocław 2012, s.78-85.
- [2] Brock S., Pajchrowski T.: *Bezczujnikowy i energooszczędny napęd wentylatora z silnikiem PMSM*. Prace Naukowe Instytutu Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 66, Wrocław 2012, s.98-104.
- [3] Hafner M., Schoning M., Hamayer K.: *Automated sizing of permanent magnet synchronous machine with respect to electromagnetic and ther-*

mal aspects. COMPEL-The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2010, Vol. 29, No5.

- [4] Henrotte F., Hameyer K.: *Computation of electromagnetic force densities: Maxwell stress tensor vs. virtual work principle*. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2004, 168 pp. 235–243
- [5] Kowol M., Mynarek P., Kołodziej J.: *Zastosowanie środowiska LabVIEW w badaniach silników z magnesami trwałymi*. Poznan University of Technology Academic Journal Electrical Engineering, No. 75, Poznań 2013, s. 49-56
- [6] Król E.: *Porównanie efektywności energetycznej silników z magnesami trwałymi i silników indukcyjnych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 78/2007, wyd. BOBRME Komel s.75-78.
- [7] Tudorache T., Trifu I., *Permanent-Magnet Synchronous Machine Cogging Torque Reduction Using a Hybrid Model*. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 10, October 2012, pp. 2627-2632.
- [8] Zalas P., Antal L.: *Silnik PMSM małej mocy przeznaczony do rozruchu synchronicznego*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 3/2012, wyd. BOBRME Komel, s. 125-130.

Autorzy

mgr inż. Piotr Mynarek
dr inż. Marcin Kowol

Instytut Układów Elektromechanicznych
i Elektroniki Przemysłowej
Adres: ul. Prószkowska 76 (budynek 1),
45-758 Opole
Tel. 77 449 8008

E-mail:
piotr_mynarek@o2.pl
m.kowol@po.opole.pl



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOLECZNY



Piotr Mynarek jest stypendystą projektu Stypendia doktoranckie - inwestycja w kadrę naukową województwa opolskiego współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Wiesław Jażdżyński