

Piotr MYNAREK*
Marcin KOWOL*
Marian ŁUKANISZYN*

ZASTOSOWANIE METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH DO WYZNACZANIA PARAMETRÓW ELEKTROMAGNETYCZNYCH SILNIKA PMSM

W pracy przedstawiono obliczenia parametrów elektromagnetycznych silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (PMSM). Analizę przeprowadzono za pomocą trójwymiarowego modelu numerycznego, zbudowanego w programie Flux 3D, który bazuje na metodzie elementów skończonych. Za pomocą opracowanego modelu wyznaczono rozkład indukcji magnetycznej, moment zaczepowy w funkcji kąta obrotu wirnika oraz siłę elektromotoryczną jaka indukuje się w uzwojeniu silnika. Wyniki obliczeń zostały zweryfikowane z pomiarami wykonanymi na obiekcie rzeczywistym silnika.

1. WSTĘP

W ostatnim czasie można zauważyć znaczący wzrost zainteresowania silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi (PMSM z ang. *Permanent Magnet Synchronous Motor*). Jest to spowodowane przede wszystkim gwałtownym rozwojem technologii materiałów magnetycznych z pierwiastków ziem rzadkich (NdFeB) oraz dynamicznym rozwojem układów energoelektronicznych. Silniki PMSM swoją popularność zawdzięczają przede wszystkim wysokiej sprawności, dużej gęstości mocy, niezawodności ruchowej oraz szerokiemu zakresowi prędkości obrotowej [5]. Poza tym maszyny te charakteryzują się dużą przeciążalnością momentu, co w połączeniu z stosunkowo niskim momentem bezwładności wirnika zapewnia dobre właściwości dynamiczne. Dzięki tym wszystkim zaletom coraz częściej można zaobserwować, że silniki z magnesami neodymowymi w szczególności PMSM zastępują silniki indukcyjne w napędach dedykowanych do pracy ciągłej np. napędach pomp i wentylatorów [1, 6]. Dodatkowo silniki PMSM stosowane są coraz chętniej także w układach napędowych robotów przemysłowych oraz obrabiarek [2].

Przestrzenny charakter zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w przetwornikach elektromechanicznych z magnesami trwałymi sprawia, że wartości

* Politechnika Opolska.

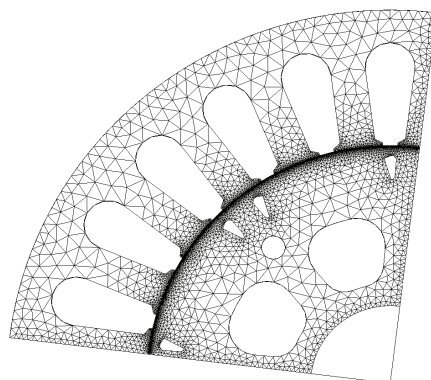
parametrów silnika zmieniają się także w zależności od kąta położenia wirnika, a także od wartości prądu. Dlatego też, tradycyjne metody obwodowe analizy maszyn elektrycznych stają się nieefektywne. Coraz częściej dzięki znacznemu rozwojowi technik komputerowych oraz gwałtownemu wzrostowi mocy obliczeniowej komputerów dostępnych dla przeciętnego użytkownika stosowana jest analiza polowa. W artykule przedstawiono zastosowanie metody elementów skończonych (MES) 3D do wyznaczania parametrów elektromagnetycznych silnika PMSM.

2. MODEL MATEMATYCZNY

W pracy jako obiekt badań przyjęto silnik SMKwsg90M8 o rozruchu częstotliwościowym i parametrach przedstawionych w tabeli 1. W celu przeanalizowania parametrów elektromagnetycznych ww. maszyny został zbudowany model połowy w środowisku Flux, 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, ograniczając w ten sposób obszar obliczeniowy do 1/4 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.

Tabela 1. Wybrane parametry badanej maszyny

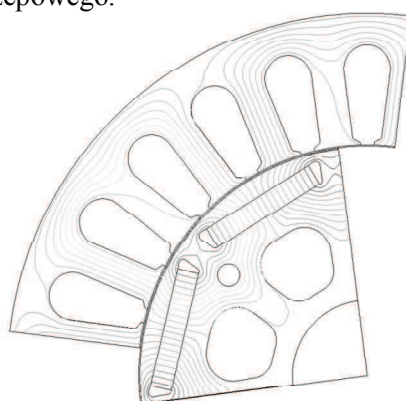
Wielkość	U_n [V]	I_n [A]	P_n [kW]	n_n [obr/min]	η [%]
Wartość	400	3,7	2	2200	91



Rys. 1. Wygenerowana siatka dyskretyzacyjna w przekroju silnika

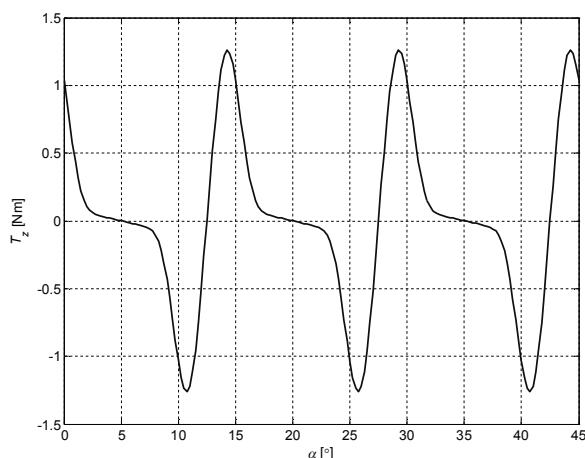
3. WYNIKI OBLICZEŃ

Dla opracowanego modelu polowego przeprowadzono szereg symulacji komputerowych. W pierwszej etapie badań wyznaczono rozkład indukcji magnetycznej i linii pola w analizowanej maszynie. Na rys. 2 przedstawiono linie pola magnetycznego dla kąta obrotu wirnika $\alpha = 14,25^\circ$ oraz zerowej wartości prądu w uzwojeniach silnika $I = 0$ A. Położenie to odpowiada maksymalnej wartości momentu zaczepowego.



Rys. 2. Linie pola magnetycznego dla wybranego położenia wirnika ($\alpha = 14,25^\circ$, $I = 0$ A)

Zmienność momentu zaczepowego (T_z) w funkcji kąta położenia wirnika obrazuje rys. 3. 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° .



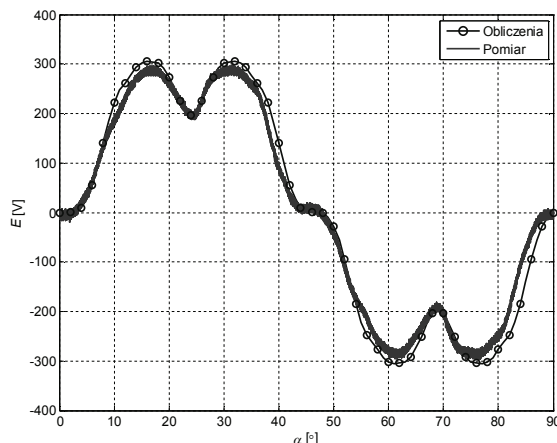
Rys. 3. Zależność momentu zaczepowego (T_z) od kąta położenia wirnika – obliczenia

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 Flux 3D moment zaczepowy wyznaczono wykorzystując metodę pracy wirtualnej (VW) [4]. Moment oblicza się jako pochodną koenergii (W') względem kąta obrotu wirnika przy zerowej wartości prądu:

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

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. 4 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 zadawalający i świadczy o poprawności zbudowanych modeli.



Rys. 4. Przebieg fazowej siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu analizowanego silnika

W następnej kolejności autorzy przeprowadzili analizę zawartości wyższych harmonicznych w indukowanej w uzwojeniu fazowym sile elektromotorycznej. Na podstawie otrzymanego przebiegu SEM obliczono współczynnik zawartości wyższych harmonicznych (*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

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. Odształcenie SEM od pierwszej harmonicznej jest zjawiskiem niepożądanym. Zbyt duża wartość współczynnika THD skutkuje zniekształceniem przebiegów prądu silnika jak i wprowadza dodatkowe pulsacje momentu elektromagnetycznego.

4. WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki jakie otrzymano z przeprowadzonej analizy połowej synchronicznego silnika z magnesami trwałymi. Otrzymane wyniki zweryfikowano z pomiarami wykonanymi na obiekcie rzeczywistym. Małe różnice pomiędzy wynikami symulacji komputerowych a pomiarami świadczą o poprawności zbudowanego modelu numerycznego silnika. Za pomocą zbudowanego modelu połowego można w szybki sposób, a zarazem z dostateczną dokładnością, wyznaczyć wybrane parametry elektromagnetyczne synchronicznego silnika z magnesami trwałymi. W celu pełnej analizy konstrukcji silnika należy dodatkowo przeprowadzić analizę stanów dynamicznych silnika jak zachodzących w nim zjawisk cieplnych, co będzie dalszym etapem prac autorów.



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



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

LITERATURA

- [1] Barański M., Szeląg W., Jędrzycka 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., Bezcujnikowy 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 thermal aspects. COMPEL-The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2010, Vol. 29, No5.
- [4] Henrotte F., Hamayer 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] Król E., Porównanie efektywności energetycznej silników z magnesami trwałymi i silników indukcyjnych . Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 78/2007, s.75-78.
- [6] 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.

APPLICATION OF FINITE ELEMENTS METHOD FOR DETERMINING ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF PMSM

This paper presents the calculation of the electromagnetic parameter of the permanent magnet synchronous motor. The analysis was performed using three-dimensional numerical model, which was built in Flux 3D environment, based on the finite element method. The magnetic flux density distribution, cogging torque as a function of the rotational angle of the rotor and electromotive force in the motor winding were calculated using the presented field model. Simulation results are successfully verified by measurements performed on the physical model of the motor.