

Bezsztotkowe maszyny prądu stałego z magnesami trwałymi (PMBLDC) ogólnego zastosowania – część I, specyfika konstrukcji, metody analizy

Permanent magnet brushless DC machines (PMBLDC) for general purpose – part I, the specificity of construction, methods of analysis

Tomasz Kołacz^a, Jerzy Skwarczyński^{a,*}

^a State Higher Vocational School in Tarnow, Mickiewicza 8, Tarnów, Poland

Article history:

Received 16 April 2018
Received in revised form
26 May 2018
Accepted 6 June 2018
Available online 27 June 2018

Streszczenie

W pracy dokonano oceny własności silnika PMBLDC małej mocy przeznaczonego do napędu roweru. Część pierwsza opracowania poświęcona jest warunkom powstawania momentu, w drugiej przedstawiono wyniki pomiarów i obliczeń SEM, prądów, napięć i momentu. Artykuł ma na celu poszerzenie zasobu informacji o silnikach PMBLDC powszechnego użytku oraz ich własnościach.

Słowa kluczowe: silniki PMBLDC ogólnego zastosowania, specyfika konstrukcji, warunki powstawania momentu, pomiar momentu elektromagnetycznego

Wstęp

Podstawową konstrukcją PMBLDC z polem radialnym jest silnik z cylindrycznym stojanem, wyposażony w typowe, trójfazowe uzwojenia ułożone w żłobkach, wzbudzany magnesami trwałymi ulokowanymi na/w także cylindrycznym wirniku. Jednak większość silników małej mocy i mikrosilników, zaliczanych do PMBLDC, budową znacznie różni się od konstrukcji klasycznej: rdzeń stojana jest wydatnobiażący, z liczbą biegunów/zębów różną od liczby biegunów magnesów wirnika. W szczególności różnice te są widoczne w silnikach z małą liczbą tych biegunów. Przy dużej liczbie magnesów rdzeń statora sprawia wrażenie cylindrycznego, uzębionego, z uzwojeniami złożonymi z cewek nawiniętych wokół pojedynczych zębów. Charakterystyczną cechą klasycznych uzwojeń jest liczba żłobków na biegun i fazę w klasycznych uzwojeniach zwykle większą od jednej, tutaj jest liczbą ułamkową, np. 3/8 lub nawet 1/7. Zastosowanie takich uzwojeń ułatwia miniaturyzację i zmniejsza cenę silnika, ale w klasycznych maszynach 3-fazowych jest nie do przyjęcia, ponieważ pogarszałoby ich parametry eksploatacyjne.

Zainteresowania autorów koncentrowały się wokół oceny własności konkretnego silnika przeznaczonego do napędu roweru, a w szczególności pomiarowego i analitycznego określenia wytwarzanego momentu, charakterystyk mechanicznych

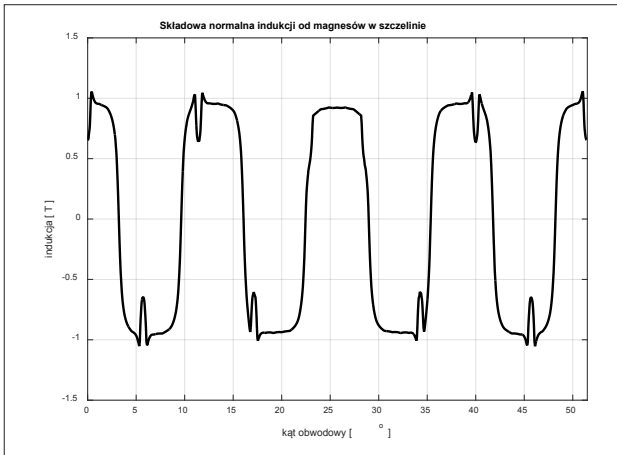
oraz parametrów. Silniki PMBLDC są dziś podstawowym napędem ogólnego zastosowania, w związku z czym ilość publikacji dotyczących tych maszyn jest ogromna. Na szczególną uwagę zasługuje [1]. Prezentowany artykuł ma na celu poszerzenie zasobu informacji o silnikach powszechnego użytku oraz ich własnościach. Część pomiarowa opracowania była tematem pracy dyplomowej [2].

Obiekt badań

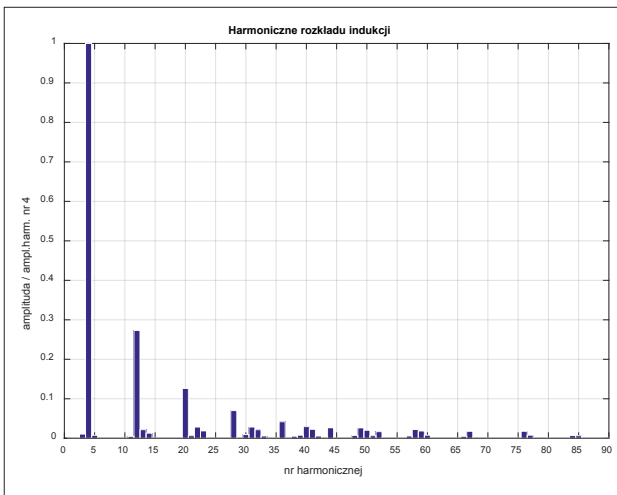
Silnikiem, który podlegał badaniom był wolnoobrotowy silnik rowerowy do zamontowania w piaście koła. Jest typowym przykładem wielobiegunowego silnika PMBLDC z trójfazowymi uzwojeniami utworzonymi z cewek wokółzębowych. Uzwojenia znajdują się na zębach nieruchomego jarzma. Silnik wzbudzany jest przez sztabkowe magnesy trwałe, przyklejone do wewnętrznej powierzchni stalowego, zewnętrznego wirnika, w tej konstrukcji przewidzianego do połączenia szprychami z kołem roweru. Liczba biegunów określona jest ilością magnesów, która może sięgać kilkudziesięciu. Liczba zębów bywa różna, pozostając w określonych relacjach z liczbą par biegunów, przy czym liczba powtarzających się takich sekwencji na obwodzie silnika wynosi od jednej do kilkunastu. W rozpatrywanym przypadku podstawowy układ stanowiło 8 magnesów na wirniku i 9 cewek wokół zębów stojana. W ramach tego układu każda faza składa się z 3 kolejnych zezwojów (cewek), dających 3 bieguny pola

*Corresponding author: j_skw@pwszta.edu.pl

pioniej², lub zainstalowania na powierzchni twornika specjalnej cewki pomiarowej. Przebieg *sem* indukowanej w takiej cewce można przedstawić szeregiem Fouriera:



Rysunek 2. Pole magnetyczne w szczelinie badanej maszyny – składowa normalna indukcja w 1/7 obwodu szczeliny



Rysunek 3. Pole magnetyczne w szczelinie badanej maszyny – amplitudy harmonicznych 1–90 rozkładu indukcji

$$e_c(t) = \sum_{\rho=1}^{\infty} (E_{c\rho C} \cos \rho p_b \omega t + E_{c\rho S} \sin \rho p_b \omega t) \quad \rho = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

Przebiegowi *sem* wg (4) odpowiada rozkład indukcji w szczelinie powietrznej zawierający harmoniczne tego samego rzędu:

$$B_g(\alpha) = \sum_{\rho=1}^{\infty} (B_{g\rho C} \cos \rho p_b (\alpha - \varphi) + B_{g\rho S} \sin \rho p_b (\alpha - \varphi)) \quad \rho = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Pojedyncza cewka skupiona o poskoku $2\vartheta_c$, obejmująca przedział kątowny γ_c mł_c obwodu stojana, sprzężona jest ze strumieniem pochodzącym od pola magnesów (5), który wynosi:

$$\psi_c = n_c R_s I_{Fe} \int_{\gamma_c - \vartheta_c}^{\gamma_c + \vartheta_c} B_g(\alpha) d\alpha = \sum_{\rho=1}^{\infty} (\Psi_{c\rho C} \cos \rho p_b (\varphi - \gamma_c) - \Psi_{c\rho S} \sin \rho p_b (\varphi - \gamma_c)) \quad \rho = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

2. Przez cewkę skupioną rozumiana jest cewka, której boki mają wymiary przekroju poprzecznego znacznie mniejsze od wymiarów szczeliny.

przy czym

$$\Psi_{c\rho C} = 2 n_c R_s I_{Fe} B_{g\rho C} \frac{\sin \rho p_b \vartheta_c}{\rho p_b}, \quad \Psi_{c\rho S} = 2 n_c R_s I_{Fe} B_{g\rho S} \frac{\sin \rho p_b \vartheta_c}{\rho p_b} \quad (7)$$

Dla wirnika obracającego się z prędkością ω , którego chwilowe położenie określa kąt $\varphi = \omega t + \varphi_0$, zgodnie z prawem indukcji:

$$e_c(t) = -\frac{d}{dt} \psi_c(\varphi) = -\frac{d\psi_c(\varphi)}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = \omega \sum_{\rho=1}^{\infty} \rho p_b (\Psi_{c\rho C} \sin \rho p_b (\omega t - \gamma_c) - \Psi_{c\rho S} \cos \rho p_b (\omega t - \gamma_c)) \quad (8)$$

Porównując (8) z (4) oraz wykorzystując (7) otrzyma się:

$$E_{c\rho C} = -\rho p_b \omega \Psi_{c\rho S} \quad \rightarrow \text{dla } \rho = 1$$

$$|E_{c1C}| = 2 \omega n_c R_s I_{Fe} B_{g1C} \sin p_b \vartheta_c \quad (9)$$

$$E_{c\rho S} = \rho p_b \omega \Psi_{c\rho C} \quad \rightarrow \text{dla } \rho = 1$$

$$|E_{c1S}| = 2 \omega n_c R_s I_{Fe} B_{g1S} \sin p_b \vartheta_c \quad (10)$$

Znajomość harmonicznych SEM umożliwia więc wyznaczenie harmonicznych zmian strumienia sprzężonego z cewką, jako funkcji położenia wirnika. Jeśli rozpiętość cewki $2\vartheta_c$ spełnia warunek: $p_b \vartheta_c \neq n\pi$, z równań można wyznaczyć wartości B_{g1C} , B_{g1S} . Odtworzenie w ten sposób pozostałych harmonicznych nie prowadzi oczywiście do uzyskania obrazu pola, jak na Rys. 2.

Przepływ i indukcja wytwarzane przez uzwojenia

Przebieg pojedynczej skupionej cewki, której oś znajduje się w położeniu γ_c względem początku układu $\alpha = 0$, można przedstawić szeregiem [5]:

$$\Theta_c(\alpha) = \Theta_{co} + \sum_{\nu=1}^{\infty} \Theta_{c\nu} \cos \nu(\alpha - \gamma_c) \quad \nu = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

przy czym:

$$\Theta_{co} = \frac{\vartheta_c}{\pi} I_{nc} \quad (12)$$

$$\Theta_{c\nu} = -\frac{2}{\pi} I_{nc} \frac{\sin \nu \vartheta_c}{\nu} \frac{\sin \nu \kappa_c}{\nu \kappa_c} \quad (13)$$

ϑ_c – połowa rozpiętości cewki,

κ_c – połowa otwarcia żłobka, w którym znajduje się cewka,

I_{nc} – amperozwoje cewki.

Przebieg wytwarzany przez uzwojenia dwóch faz połączone szeregowo, zasilane jedno od początku, drugie od końca, jest sumą przepływów 6 sąsiednich cewek, przez które przepływa ten sam prąd, przy czym należy uwzględnić sposób ich łączenia. Początek układu wygodnie jest przyjąć w środku uzwojenia

(pomiędzy cewką 3 i 4). Nie można zakładać, że producent wykonał wszystkie cewki twornika jednakowe, ale jeśli uzwojenia faz mają być symetryczne, inną liczbę zwojów może mieć tylko cewka środkowa. Ewentualne różnice w liczbach zwojów cewek uzwojenia n_{cu} uwzględnimy współczynnikiem w :

$$w_{21} = \frac{n_{cu2}}{n_{cu1}} = w_{34} = \frac{n_{cu5}}{n_{cu4}} = \frac{n_{cu}}{n_{cusr}} = w_u \quad (14)$$

Przepływ uzwojenia utworzonego z cewek należących do dwóch faz można teraz przedstawić wzorem:

$$\Theta_a(\alpha) = \Theta_{c1} - \Theta_{c2} + \Theta_{c3} - \Theta_{c4} + \Theta_{c5} - \Theta_{c6} = \sum_{v=1}^{\infty} \Theta_{av} \sin v\alpha \quad v=1,2,3... \quad (15)$$

przy czym

$$\Theta_{av} = 2\Theta_{cu} (\sin v5\vartheta_{cu} - w_u \sin v3\vartheta_{cu} + \sin v\vartheta_{cu}) = -\frac{4}{\pi} I n_{uf} \frac{\sin v\vartheta_{cu}}{v} \frac{\sin v\kappa_{cu}}{v\kappa_{cu}} C_{av} \quad (16)$$

$$n_{uf} = 3n_{cu} - \text{liczba szeregowo połączonych zwojów fazy} \quad (17)$$

$$C_{av} = \frac{1}{3} (\sin v5\vartheta_{cu} - w_u \sin v3\vartheta_{cu} + \sin v\vartheta_{cu}) \quad (18)$$

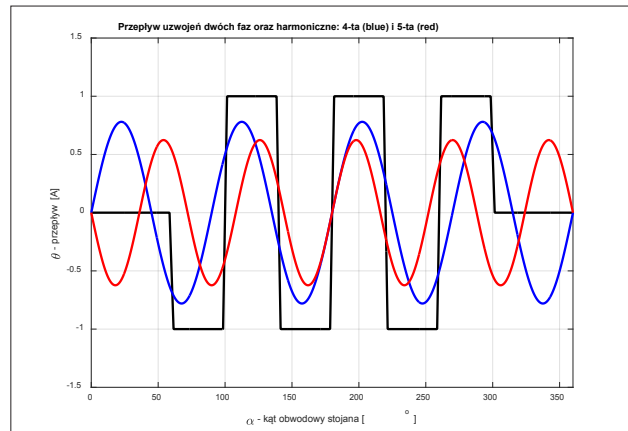
Przestrzeń pomiędzy powierzchnią cylindryczną opisaną na zębach twornika (stojana) i wewnętrzną powierzchnią stalowego pierścienia wirnika wypełniona jest w znacznej części magnesami sztabkowymi. Niewielką jej część stanowi szczelina, niezbędna dla zapewnienia swobodnego obracania się wirnika. Ponieważ przenikalność magnetyczna magnesów neodymowo-borowych jest zbliżona do przenikalności magnetycznej powietrza, można uznać, że indukcja magnetyczna w szczelinie B_a , spowodowana przepływem prądu przez uzwojenia dwóch faz wynosi:

$$B_a(\alpha) \approx \frac{\mu_0}{\delta_z} \Theta_a(\alpha) \quad (19)$$

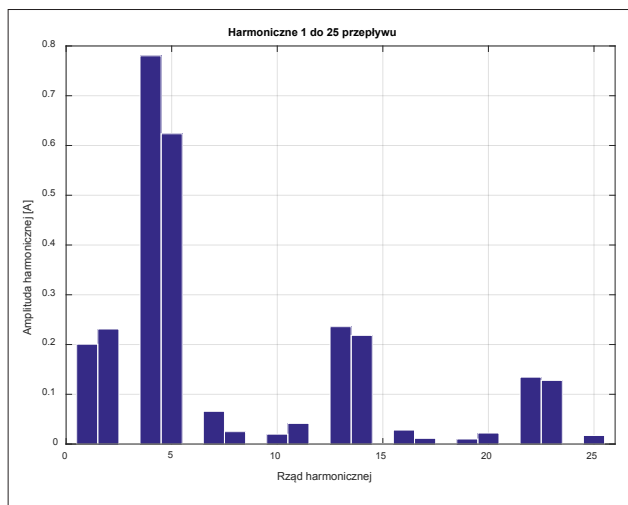
przy czym δ_z jest różnicą pomiędzy promieniami powierzchni cylindrycznych zewnętrznych stojana i wewnętrznej wirnika.

Porównanie (15) wraz z (19) z (5) wykazuje zasadnicze różnice pomiędzy klasycznymi konstrukcjami maszyn PMBLDC i omawianym typem maszyn ogólnego zastosowania. W tych drugich, w przepływie uzwojeń twornika oraz pochodzącej stąd indukcji obecne są wszystkie harmoniczne, także rzędu niższego od p_b , podczas gdy w polu głównym, wytworzonym przez magnesy trwałe, podstawową (najniższą) i dominującą jest harmoniczna rzędu p_b . Wystąpienie w przepływie uzwojeń konstrukcji klasycznych harmonicznych rzędu niższego od p_b uważane jest za przejaw niesymetrii lub stan awaryjny, podobnie jak obecność harmonicznych parzystych. Ponieważ powodują szereg niekorzystnych zjawisk, dlatego uzwojeń o podobnych cechach w maszynach średniej i dużej mocy generalnie nie stosuje się.

Wyznaczony na podstawie (15) przepływ przedstawiono na rysunku 4 (kolor czarny). Dla jasności rysunku początek układu przesunięto o 180 stopni (do osi fazy niezasilanej). Do obliczeń przyjęto $\vartheta_c = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{Z_p}$ oraz $\kappa_c = \frac{3}{40} \vartheta_c$.



Rysunek 4. Przepływ wytwarzany przez uzwojenia dwóch faz – czwarta i piąta harmoniczna na tle przepływu uzwojeń



Rysunek 5. Przepływ wytwarzany przez uzwojenia dwóch faz – amplitudy harmonicznych 1–25 przepływu

Na rysunku 5 zaznaczono punktami wartości amplitud 25 początkowych harmonicznych rozkładu w szereg Fouriera przepływu z rys. 4. Wyraźnie dominuje harmoniczna 4 i 5. Przebieg 4. i 5. harmonicznej przepływu jest uwidoczniony na rys. 4.

Pole wytworzone przez uzwojenia twornika nazywa się zwykle polem oddziaływania twornika. W maszynach wzbudzanych magnesami trwałymi zewnętrznymi (powłokowymi) jest ono bez porównania mniejsze od pola pochodzącego od magnesów ze względu na dużą wartość szczeliny zastępczej δ_z .

Warunki powstawania momentu elektromagnetycznego

Zgodnie z (2) warunkiem koniecznym wytwarzania momentu średniego różnego od zera jest występowanie harmonicznych tego samego rzędu w rozkładzie indukcji oraz okładzie prądowym. Zakładając idealną symetrię konstrukcji i pomijając wpływ uzłobkowania można przyjąć, że p_b par magnesów położonych na wirniku wytwarza w szczelinie pole:

$$B_g(\alpha) = B_{pm}(\alpha) \approx \sum_{\rho=1}^{\infty} B_{p\rho} \cos \rho p_b (\alpha - \varphi) \quad \rho = 1, 3, 5, 7, \dots \quad (20)$$

Początek układu ($\alpha = 0$) przyjęto w osi żłobka, w którym znajdują boki cewek należących do dwóch zasilonych faz. Kąt φ mierzony jest od początku układu do osi wybranego magnesu polaryzowanego dodatnio.

Po obliczeniu pochodnej (15) wg (3) i podstawieniu układu oraz indukcji (20) do (2), a następnie wykonaniu całkowania poszczególnych składników podwójnej sumy, wartość różną od zera uzyskuje się jedynie z wyrazów niezależnych od kąta α , tzn. dla wskaźników $v = \rho p_b$. W rezultacie otrzymuje się wartość wytwarzanego momentu:

$$T_e = -p_b \pi R_s l_{Fe} \sum_{\rho=1}^{\infty} \rho \Theta_{a\rho p_b} B_{p\rho} \cos \rho p_b \varphi \quad \rho = 1, 3, 5, 7, \dots \quad (21)$$

Dla rozpatrywanego silnika, w wyniku współdziałania czwartej harmonicznej układu oraz podstawowej harmonicznej indukcji ($\rho = 1$), wytworzonej przez 8 magnesów ($p_b = 4$), powstanie moment:

$$T_e = -4\pi R_s l_{Fe} \Theta_{a4} B_{p4} \cos 4\varphi \quad (22)$$

Wartość amplitudy B_{p4} można określić na podstawie (9) i (10):

$$B_{p4} = \sqrt{B_{s1c}^2 + B_{s1s}^2} = \frac{1}{2\omega n_p R_s l_{Fe} \sin p_b \vartheta_{cp}} \sqrt{E_{cp1c}^2 + E_{cp1s}^2} = \frac{E_{cp1m}}{2\omega n_p R_s l_{Fe} \sin p_b \vartheta_{cp}} \quad (23)$$

Wartość amplitudy Θ_{a4} przepływu uzwojenia wynika z (16) i (18):

$$\Theta_{a4} = 2\Theta_{u4} (\sin 4 \cdot 5 \vartheta_{cu} - w_u \sin 4 \cdot 3 \vartheta_{cu} + \sin 4 \vartheta_{cu}) = -\frac{4}{\pi} I_{u4} \frac{\sin 4 \vartheta_{cu} \sin 4 \kappa_{cu}}{4 \cdot 4 \kappa_{cu}} C_{u4} \quad (24)$$

Wartość momentu wytwarzanego na 1/7 obwodu silnika wyniesie:

$$T_e = i_u(t) \frac{E_{cp1m}}{\omega} \frac{2n_{cu}}{n_{cp}} \frac{\sin 4 \vartheta_{cu} \sin 4 \kappa_{cu}}{\sin p_b \vartheta_{cp} 4 \kappa_{cu}} C_{u4} \cos 4\varphi \quad (25)$$

$C_{u4} = \frac{1}{3} (\sin 4 \cdot 5 \vartheta_{cu} - w_u \sin 4 \cdot 3 \vartheta_{cu} + \sin 4 \vartheta_{cu})$; dla $\vartheta_{cu} = \frac{\pi}{9}$ oraz $w_u = 1$ $C_{u4} = 0,83$

Prędkość kątowa ω w (23) odpowiada warunkom, w których wyznaczono przebieg $e_{cp}(t)$.

Moment zależy od chwilowego położenia wirnika względem stojana. Okresem funkcji cosinus jest tutaj kąt $\frac{\pi}{2}$.

Można przewidywać na podstawie (21), że zwiększając liczbę magnesów na obwodzie do 10 ($p_b = 5$) i zachowując maksymalną wartość indukcji w szczelinie, uzyska się praktycznie taki sam moment jak w układzie 8PM – 9 cewek, ponieważ $\Theta_{a4}/\Theta_{a5} \approx 1,25 = \frac{5}{4}$.

Podsumowanie

Przedstawione wzory i zależności stanowią podstawę dla opracowania wyników pomiarów laboratoryjnych badanego silnika. Ich prezentacja będzie treścią II części artykułu.

Bibliografia

1. Hanselman D. Brushless Permanent Magnet Motor Design. Magna Physics Publishing 2006.
2. Madura K, Zabawa D. Mikrosilniki elektryczne PMBLDC ogólnego zastosowania, praca dyplomowa, opiekun J. Skwarczyński, PWSZ w Tarnowie, 2018.
3. Libert F, Soulard J. Investigation on Pole-Slot Combinations for Permanent-Magnet Machines with Concentrated Windings, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.508.1648&rep=rep1&type=pdf>
4. Heller B, Hamata V. Harmonic field effects in induction machines, Elsevier Science Ltd; First Edition 1977.
5. Skwarczyński J, Tertel Z. Elektromechaniczne przetwarzanie energii, Uczelniane Wyd. Nauk.-Dyd. AGH, Kraków 2000.
6. FEMM <http://www.femm.info>

Article history:

Received 16 April 2018
 Received in revised form
 26 May 2018
 Accepted 6 June 2018
 Available online 27 June 2018

Abstract

The paper presents research on properties of the low power PMBLDC motor, designed to drive a bicycle. In the first part of the study the conditions of the torque generation were analyzed. The purpose of the article is to provide new information about PMBLDC motors and their properties. In the first part of the article the motor construction and torque generation in it were studied. Also the methodology of analysis were presented. The second part of the article will treat on the measurements and calculations of EMF, currents, voltages, and electromagnetic torque.

Key words: PMBLDC general purpose motors, the specificity of construction, conditions of torque generation, electromagnetic torque measurement