PHÂN TÍCH TÁC ĐỘNG CỦA ĐỘ MỞ MIỆNG RÃNH VÀ CHIỀU DÀI NAM CHÂM ĐẾN MÔ MEN ĐẬP MẠCH Ở ĐỘNG CƠ BLDC ROTOR NGOÀI ỨNG DỤNG TRONG QUÂN SỰ

Nguyễn Việt Anh[1], Phùng Anh Tuấn[2*], Phạm Hùng Phi[2], Nguyễn Mạnh Dũng[2]

Tóm tắt: *Động cơ một chiều không chổi than BLDC (BrushLess Direct current) ngày càng được sử dụng rộng rãi do những ưu điểm cấu tạo tương đối đơn giản, hiệu suất cao, khả năng điều chỉnh tốc độ tốt. Tuy nhiên một trong những nhược điểm của nó là mô-men đập mạch có giá trị lớn trong quá trình làm việc. Giảm mô-men đập mạch là một trong những mục tiêu quan trọng của việc thiết kế chế tạo động cơ BLDC. Đặc biệt, trong các ứng dụng quân sự, mô-men đập mạch gây ra rung động và tiếng ồn không mong muốn. Trong bài báo, tác giả phân tích những yếu tố ảnh hưởng tới mô-men và biên độ mô-men đập mạch. Kết quả mô phỏng kiểm nghiệm ảnh hưởng của răng/rãnh và kích thước nam châm động cơ BLDC tới giá trị mô-men đập mạch. Qua đó tác giả đưa ra phương án về thiết kế độ mở miệng rãnh stator và độ phủ nam châm để giảm thiểu ảnh hưởng này đến chất lượng mô-men và đặc tính làm việc của động cơ.*

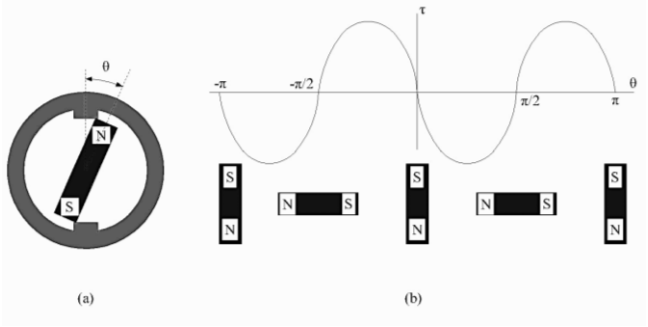
Từ khóa: Mô-men đập mạch; BLDC; Hệ số Carter; Thông số miệng rãnh; Mô hình từ tản răng stator.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

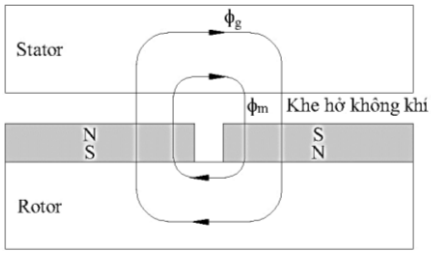
Động cơ một chiều không chổi than (BLDC) thuộc nhóm động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) có ưu thế mật độ công suất lớn, hiệu suất làm việc cao. Mặc dù vậy, mô-men đập mạch lớn do cấu trúc chế tạo gây ra rung động, tiếng ồn và ảnh hưởng nghiêm trọng đến các đặc tính làm việc của hệ thống. Để đảm bảo sự vận hành trơn tru của BLDC, nhiều nghiên cứu đã được thực hiện với mục đích giảm mô-men đập mạch bằng cách thay đổi độ mở miệng rãnh [5]; thêm các rãnh phụ [6] hoặc thay đổi đổi cấu trúc rotor [7]; tối ưu bước nghiêng rãnh [8]. Việc tối ưu hóa đặc tính mô-men của loại động cơ này đang là bài toán được quan tâm rộng rãi.

Trong lĩnh vực quân sự, loại động cơ có mật độ công suất cao là rất phù hợp. Tuy nhiên, đi cùng với mục đích sử dụng thì yêu cầu chất lượng của đặc tính cơ ở động cơ phải đạt được mức cao. Do vậy, giảm mô-men đập mạch của động cơ BLDC nhằm đưa động cơ này ứng dụng trong quân sự là một nhu cầu hiện hữu và cần được giải quyết.

Khảo sát về mối quan hệ giữa độ mở miệng rãnh (b_{s0}) và độ phủ nam châm (α) ảnh hưởng đến mô-men đập mạch được trình bày trong nghiên cứu này. Một dải các thông số (b_{s0}, α) hiệu quả để giúp ích cho việc nghiên cứu giảm mô-men đập mạch sẽ được đề xuất ở phần kết luận.



Hình 1. *Mô hình tương đương của động cơ BLDC một đôi cực [1, 2].*



Hình 2. *Giản đồ đường đi từ thông.*

Xét mô hình động cơ một chiều không chổi than với mạch từ và thanh nam châm như hình 1a. Khi động cơ hoạt động, có sự dịch chuyển tương đối giữa nam châm và mạch từ. Đồ thị hình

1b mô tả quá trình thay đổi vị trí của thanh nam châm kéo theo sự thay đổi của giá trị mô-men được gọi là mô-men đập mạch [1, 2].

Với giả thiết có được một khe hở không khí đồng đều giữa stator và nam châm, mô-men điện từ sinh ra nhờ sự biến thiên năng lượng theo vị trí góc của rotor (θ).

$$W_c = \frac{1}{2}Li^2 + \frac{1}{2}\sum R\phi_g^2 + \frac{1}{2}Mi^2 \quad (1)$$

$$T = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2}i^2.\frac{\partial L}{\partial \theta} + \frac{1}{2}\sum R.\frac{\partial}{\partial \theta}\phi_g^2 + \frac{1}{2}i^2.\frac{\partial M}{\partial \theta} \quad (2)$$

Mô-men đập mạch (cogging torque) phát sinh có thể được tính bằng cách giải phương trình (2) với i=0.

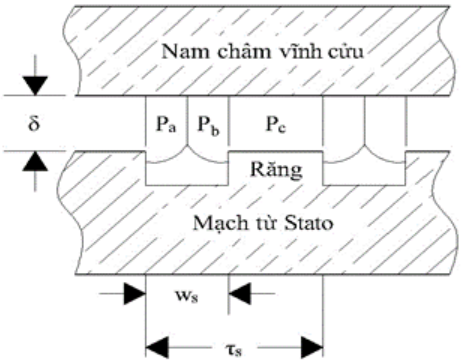
$$T_{cogging} = \frac{\partial W_c}{\partial \theta}_{i=0} = \frac{1}{2}\sum R.\frac{\partial}{\partial \theta}_{i=0}\phi_g^2 \quad (3)$$

Giá trị mô-men này phụ thuộc vào biến thiên từ trở theo công thức (3). Đây chính là nguyên nhân gây ra sự nhấp nhô mô-men ở đầu trục của động cơ.

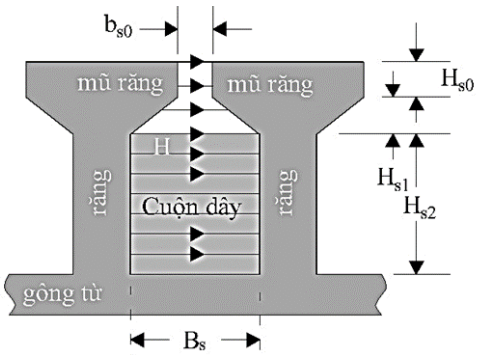
Chu kì của mô-men đập mạch phụ thuộc vào cấu trúc của máy. Cụ thể là bội chung nhỏ nhất của số cực rotor (*số nam châm gắn trên rotor*) và số rãnh stator.

$$\beta_{cogging-period} = \frac{360^0}{BCNN(N_s,N_r)} \quad (4)$$

Từ thông dưới một bước cực gồm hai phần, một phần đi trực tiếp giữa stator và rotor qua khe hở không khí (P_c) và một phần kéo dài qua miệng rãnh hở ($P_{a,b}$) như trong hình 3 [3].



Hình 3. *Từ thông khe hở không khí [3].*



Hình 4. *Từ trường tản rãnh stator [1, 2].*

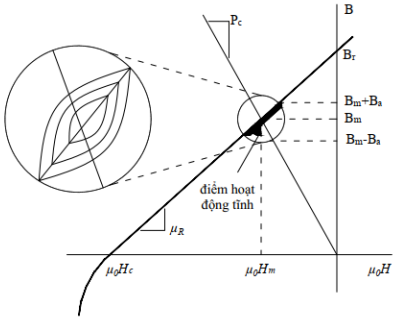
Hệ số k=$\frac{w_S}{\tau_S}$ được dùng để đánh giá sự chênh lệch giữa từ thông của hai thành phần này. Khi động cơ làm việc, do cấu trúc của rãnh không phải là rãnh thẳng, các đường sức từ sẽ phân bố sao cho đạt được đường đi ngắn nhất. Điều này sẽ dẫn tới sự bão hòa một phần mũ răng (hình 4) [1, 2].

2. ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ LÊN MÔ-MEN ĐẬP MẠCH

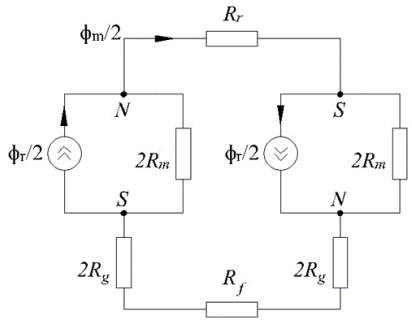
2.1. Đặc tính làm việc của nam châm vĩnh cửu trong động cơ BLDC

Trên đường cong khử từ của nam châm, ta thiết kế nam châm làm việc trong phạm vi tuyến tính. Khi đó phương đường thẳng B=f(H) có dạng:

$$B_m = B_r - \frac{\Delta B}{\Delta H_m}.H = B_r - \mu\mu_0 \quad (5)$$



Hình 5. *Mô hình tuyến tính hóa đường cong khử từ của nam châm vĩnh cửu [1, 2].*



Hình 6. *Sơ đồ mạch tương đương rút gọn chưa tính phản ứng phần ứng.*

Từ đó ta có thể tính được từ thông tại điểm làm việc của nam châm theo công thức:

$$\phi_m = \phi_r - \frac{\mu\mu_0 A_m}{W_m}.F_m = \phi_r - \frac{F_m}{R_m} \tag{6}$$

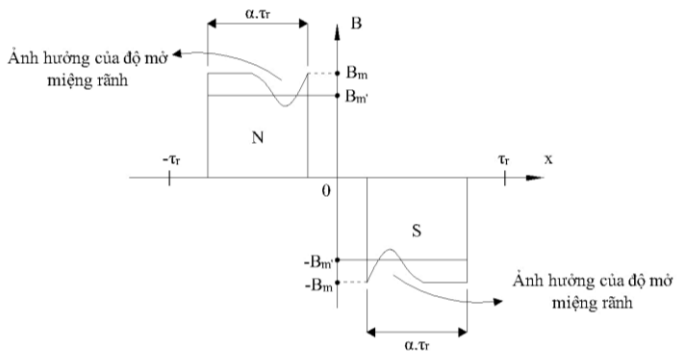
Với sự tương đồng giữa mạch điện và mạch từ, ta có thể coi nam châm vĩnh cửu là một nguồn dòng ϕ_r mắc song song với R_m. Xét trong một vòng kín từ thông móc vòng qua 2 nửa nam châm liền kề nhau ta có sơ đồ mạch từ trong hình 6.

Từ đây rút ra được phương trình từ trường tại khe hở không khí:

$$B_g = \frac{A_m}{A_g}.B_m = \frac{L_m}{L_s}.B_r.\frac{4R_m}{4R_m + 4R_g + R_r + R_f} \tag{7}$$

2.2. Độ mở miệng rãnh

Để đơn giản hóa mô hình tính toán ảnh hưởng của độ mở miệng rãnh, ta tiếp cận nguyên lý của F.W.Carter. Carter đưa ra cách tiếp cận vấn đề ảnh hưởng của rãnh stator cho việc phân tích và thiết kế máy điện nói chung. Theo đó, ảnh hưởng của rãnh stator được thể hiện ở bề rộng khe hở không khí g khi này sẽ trở thành g_C.



Hình 7. *Giá trị mật độ từ thông của một cặp cực nam châm với ảnh hưởng của độ mở miệng rãnh stator theo hệ số Carter [4].*

Với g_C là chiều dài khe hở không khí theo nguyên lý của F.W.Carter. Từ đó ta có phương trình liên hệ mật độ từ thông suy giảm bởi độ mở miệng rãnh:

$$k_C = \frac{g_C}{g} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma g} \tag{8}$$

Các biểu thức để xác định γ trong công thức tính hệ số Carter là [4]:

$$\gamma=\frac{4}{\pi}\left[\frac{b_s}{2g}\arctan(\frac{b_s}{2g})\text{-}\ln\sqrt{1+(\frac{b_s}{2g})^2}\right] \quad (9)$$

$$\gamma=\frac{\tau_s}{g}\left[\frac{b_s}{g}-\frac{4g}{\pi.\tau_s}\ln(1+\frac{\pi.b_s}{4g})\right] \quad (10)$$

$$\gamma=\frac{2b_s}{\pi g}\left[\arctan(\frac{b_s}{2(l_m+g)})-\frac{l_m+g}{b_s}\ln\sqrt{1+(\frac{b_s}{2(l_m+g)})^2}\right] \quad (11)$$

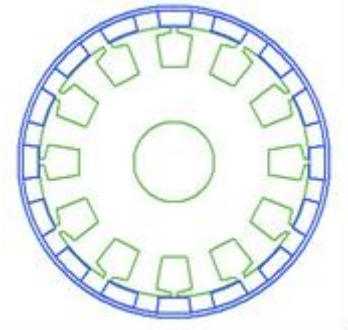
Ở phần tiếp theo, tác giả sẽ xây dựng mô hình mô phỏng để đánh giá tác động của các thông số liệt kê ở trên lên mô-men đập mạch. Sự thay đổi của mô-men đập mạch theo các thông số đó sẽ là các gợi ý để thực hiện việc lựa chọn các thông số có ảnh hưởng đáng kể và dẫn hướng cho các nghiên cứu tiếp theo.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG ĐÁNH GIÁ TÁC ĐỘNG CỦA CÁC THÔNG SỐ LÊN MÔ-MEN ĐẬP MẠCH

3.1. Thông số động cơ

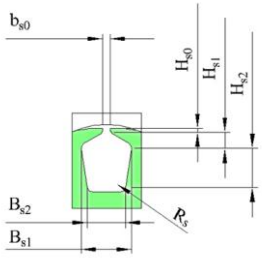
Thông số động cơ thiết kế và rãnh stator lần lượt như trong bảng 1, 2.

***Bảng 1**. Thông số động cơ.*



Thông số	Giá trị	Đơn vị
Số pha	3	pha
Số cực	16	Cực
Số rãnh	12	rãnh
Số thanh dẫn một rãnh	1600	thanh
Kiểu đấu đây	Y	
Điện áp DC	127	V
Tốc độ	190	v/p
Đường kính ngoài stator	132	mm
Đường kính trong stator	40	mm
Đường kính ngoài rotor	150	mm
Đường kính trong rotor	133	mm
Chiều dài tác dụng mạch từ	8	mm
Chiều dài tác dụng nam châm	25,84	mm
Độ dày nam châm	8,25	mm
Đường kính dây dẫn	0,25	mm
Loại thép kỹ thuật	C45	
Loại nam châm	Y30BH	

***Bảng 2.** Thông số rãnh stator.*



Thông số	Giá trị	Đơn vị
Độ rộng đáy lớn	17,4	mm
Độ rộng đáy nhỏ	13	mm
Độ cao hiệu dụng rãnh	15	mm
Độ cao miệng rãnh	2	mm
Độ cao nêm rãnh	2	mm

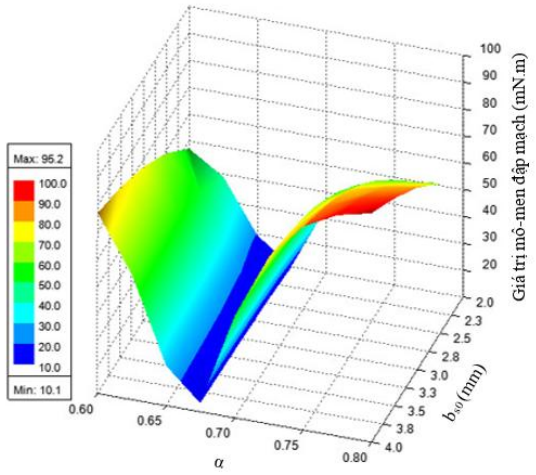
3.2. Khảo sát kích thước rãnh và chiều dài của nam châm so với bước cực

Từ những phân tích ở trên, có thể lựa chọn khoảng thiết kế thông số miệng rãnh stator và độ phủ của nam châm như bảng 3.

Bảng 3. *Thông số thiết kế.*

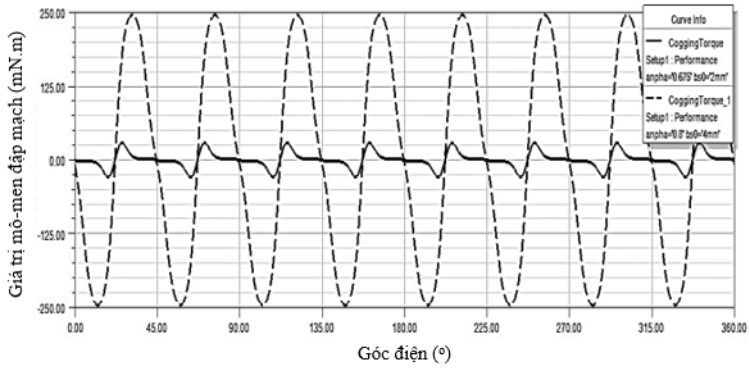
Thông số	Ký hiệu	Khoảng giá trị	Bước khảo sát	Đơn vị
Độ mở miệng rãnh	b_{s0}	2-4	0,5	mm
Độ phủ nam châm	α	60-80	2,5	%

Bằng cách sử dụng phần mềm phần tử hữu hạn để mô phỏng động cơ BLDC trên, có thể quan sát ảnh hưởng của hai thông số trên đến giá trị mô-men đập mạch và các thông số khác của động cơ nhằm đảm bảo yêu cầu giả thiết ban đầu.



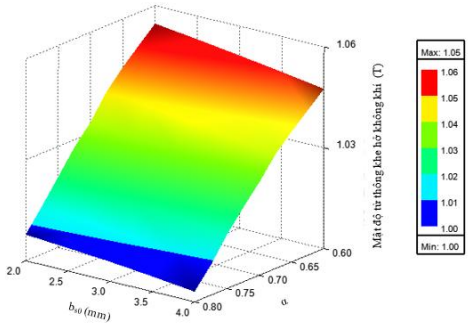
Hình 8. *Giá trị mô men đập mạch theo độ mở miệng rãnh và độ phủ nam châm.*

Trong hình 8 cho thấy quan hệ phi tuyến giữa độ mở miệng rãnh và độ phủ nam châm. Chênh lệch giữa giá trị lớn nhất (b_{s0}=4mm; α=80%) và nhỏ nhất (b_{s0}=2mm; α=67,5%) khoảng 10 lần.

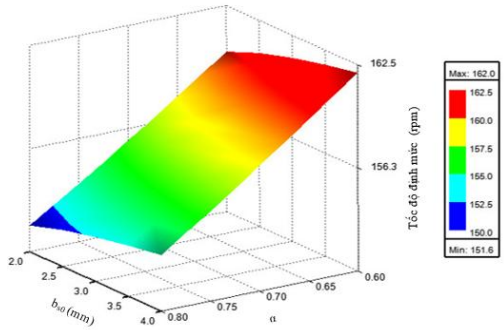


Hình 9. *Giá trị lớn nhất và nhỏ nhất của mô men đập mạch (---: Mô-men đập mạch lớn nhất ứng với giá trị α=0,8 và b_{s0}=4mm; —: Mô-men đập mạch nhỏ nhất ứng với giá trị α=0,675 và b_{s0}=2mm).*

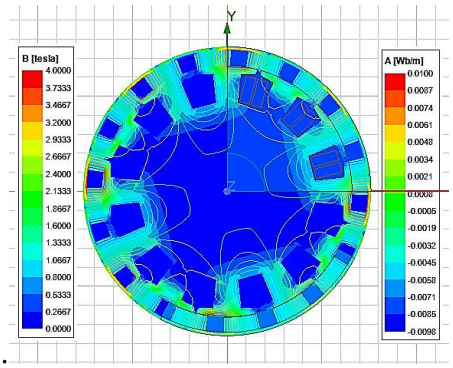
Từ hình 10 cho thấy với dải phân tích đã lựa chọn thì giá trị của từ thông khe hở không khí nằm trong dải từ 1-1,06 T. Với giá trị này, hoàn toàn có thể thiết kế kích thước rãnh stator sao cho vẫn đảm bảo vật liệu thép làm việc trong vùng tuyến tính.



Hình 10. *Mật độ từ thông khe hở không khí theo b_{s0} và α.*



Hình 11. *Tốc độ định mức theo b_{s0} và α.*



Hình 12. *Mật độ từ thông trong động cơ tại b_{s0}=2mm; α=67,5%.*

Từ những kết quả trên, có thể thấy tồn tại một cặp giá trị (b_{s0}; α) sao cho đạt được kết cấu của động cơ mà ở đó mô-men đập mạch đạt giá trị rất nhỏ. Vùng cực tiểu của giá trị này cho thấy mô-men đập mạch tỷ lệ thuận với độ mở của miệng rãnh và kèm theo là nam châm phủ phần lớn chiều dài bước cực. Điều này là phù hợp vì khi miệng rãnh lớn, chênh lệch không gian giữa phần dẫn từ và không dẫn từ ở mũ răng trở nên đáng kể. Bên cạnh đó, nam châm càng dài so với bước cực, khả năng về việc đường sức từ trường sẽ tìm cách thỏa mãn tính chất đường đi ngắn nhất sẽ phát huy tác dụng trong việc tạo ra biến thiên mãnh liệt trong vùng không gian gần kề khe ngăn cách nam châm. Điều này làm gia tăng biến thiên từ thông đập mạch trong khe hở không khí. Từ đó dẫn đến việc gia tăng mô-men đập mạch.

4. KẾT LUẬN

Bài báo này đã phân tích nguyên nhân hình thành mô-men đập mạch. Có thể nhận thấy ảnh hưởng của thông số miệng rãnh và độ phủ nam châm là những thành phần công nghệ ảnh hưởng lớn nhất tới mô-men đập mạch. Phân tích ảnh hưởng của thông số này đến các đặc tính của động cơ theo các quan hệ sau:

• Sự thay đổi của thông số miệng rãnh và độ phủ nam châm làm ảnh hưởng lớn tới giá trị của mô-men đập mạch. Với một thiết kế, sự thay đổi thông số này có thể khiến mô-men đập mạch thay đổi hàng chục lần.

• Ảnh hưởng của độ phủ nam châm cao hơn so với của độ mở miệng rãnh.

• Thông số độ mở miệng rãnh và độ phủ nam châm ảnh hưởng trực tiếp tới các thông số hoạt động của động cơ, như mô-men, tốc độ,…

Việc phối hợp lựa chọn thiết kế đảm bảo yêu cầu độ đập mạch của mô-men nằm trong vùng mong muốn là một công việc rất khó. Tuy nhiên, thông qua bài báo này, tác giả đã chỉ ra những

thông số ảnh hưởng lớn nhất đến mô-men đập mạch nhằm đưa ra những gợi ý liên quan đến tối ưu hóa thông số này. Nghiên cứu tối ưu mô-men đập mạch giúp cho việc ứng dụng của loại động cơ BLDC trong thực tế trở nên dễ dàng hơn. Giảm mô-men đập mạch cho phép sự kỳ vọng việc áp dụng động cơ vào trong những ứng dụng khí tài quân sự cần độ yên tĩnh lớn như động cơ chân vịt của ngư lôi hoặc quạt gió buồng chỉ huy đài điều khiển phòng không.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Duane Hanselman. "*Brushless Permanent Magnet Motor Design"* 2nd Edition. 2006, Magna Physics Publishing, ISBN: 1-881855-15-5.

[2]. Jacek F. Gieras. *"Permanent Magnet Motor Techlonogy 3nd Edition"*. 2010, Taylor and Francis Group, ISBN: 978-1-4200-6440-7.

[3]. Đại học Bách khoa Hà Nội, *"Giáo trình Thiết kế khí cụ điện hạ áp"*. 1986.

[4]. Hung Vu Xuan, "*Modeling of exterior rotor permanent magnet machines with concentrated windings*", TU Delft Publisher, 2012. 250 pages. ISBN 9789088914690.

[5]. T. Liu, S. Huang, J. Gao, and K. Lu, ''*Cogging torque reduction by slot-opening shift for permanent magnet machines*,'' IEEE Trans. Magn., **vol. 49**, no. 7, pp. 4028–4031, Jul. 2013.

[6]. C. Xia, Z. Chen, T. Shi, and H. Wang, ''*Cogging torque modeling and analyzing for surface-mounted permanent magnet machines with auxiliary slots*,'' IEEE Trans. Magn., **vol. 49**, no. 9, pp. 5112–5123, Sep. 2013.

[7]. W. Ren, Q. Xu, Q. Li, and L. Zhou, ''*Reduction of cogging torque and torque ripple in interior PM machines with asymmetrical V-type rotor design*,'' IEEE Trans. Magn., **vol. 52**, no. 7, Jul. 2016, Art. no. 8104105

[8]. X. Ge, Z. Q. Zhu, G. Kemp, D. Moule, and C. Williams, ''*Optimal step-skew methods for cogging torque reduction accounting for threedimensional effect of interior permanent magnet machines*,'' IEEE Trans. Energy Convers., **vol. 32**, no. 1, pp. 222–232, Mar. 2017

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE EFFECT OF SLOT-OPENNING WIDTH AND MAGNET LENGTH ON THE COGGING TORQUE IN THE EXTERNAL ROTOR BLDC MOTOR USING IN MILITARY APPLICATION.

BLDC-Brushless Direct Current motors are more and more widely used thanks to the advantages of relatively simple structure, high efficiency, and good speed regulation. However, one of its disadvantages is that the cogging torque is high. Reducing the cogging torque is one of the aims of the BLDC motor design. In particular, in military applications, the cogging torque causes unwanted vibrations and noises. In this paper, the author analyzes factors which influence the cogging torque. Simulation results show the effect of teeth/groove and the size of the magnet on the cogging torque value. Thereby, the author gives a plan on the design of the stator groove opening and the magnet coverage to minimize the effect of this parameter on the quality of torque and the working characteristics of the motors.

Keywords: Cogging torque; BLDC; Carter coefficient; Slot dimensions; Leakage flux model of stator teeth; Military application.

Nhận bài ngày 17 tháng 11 năm 2020
Hoàn thiện ngày 10 tháng 12 năm 2020
Chấp nhận đăng ngày 14 tháng 12 năm 2020

Địa chỉ: [1]Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội;
[2] Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
[*]Email: tuan.phunganh1@hust.edu.vn.