

# THIẾT KẾ ĐỘNG CƠ MỘT CHIỀU KHÔNG CHỖI THAN ROTOR NGOÀI CHO XE ĐẠP ĐIỆN SỬ DỤNG ANSYS

DESIGNING OUTER-ROTOR TYPE BRUSHLESS DIRECT-CURRENT MOTOR FOR ELECTRICAL BICYCLE USING ANSYS

Nguyễn Việt Anh

## TÓM TẮT

Công nghệ gắn động cơ truyền động điện trực tiếp vào bánh xe đã trở thành một trong những xu hướng trong hệ thống truyền động xe điện. Bài báo này có mục đích trình bày thiết kế và mô phỏng động cơ một chiều không chổi than (BLDC) rotor ngoài. Đầu tiên, các thông số vật liệu, kích thước của stator, rotor được chọn và tính toán theo phương pháp truyền thống. Công cụ phần mềm RMXprt của ANSYS được sử dụng để xây dựng hình học của động cơ và để tính toán các tham số thiết kế cơ bản. Sau đó, thiết lập mô hình phần tử hai chiều bằng ANSYS Maxwell. Các đặc tính từ trường và mô-men xoắn của mô hình đã được phân tích. Kết quả cho thấy thiết kế của động cơ là hợp lý.

**Từ khóa:** Rotor ngoài; động cơ DC không chổi than truyền động trực tiếp; thiết kế cấu trúc; phân tích điện từ; gợn mô-men xoắn

## ABSTRACT

Technology of attaching electric drive motors directly to wheels has become one of the trends in electric vehicle drive systems. This article presents the design and simulation of an external brushless dc (BLDC) motor. First, the material parameters, stator size and rotor are selected and calculated according to the traditional method. Software tools, ANSYS RMXprt, are used to build engine geometry and to calculate basic design parameters. Then, set up a two-dimensional element model using ANSYS Maxwell. The magnetic and torque characteristics of the model were analyzed. The results show that the engine design is reasonable.

**Keywords:** Outer rotor; direct-drive brushless DC motor; structural design; electromagnetic analysis; torque.

Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

Email: anhnguyen.hai@gmail.com

Ngày nhận bài: 01/7/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/8/2020

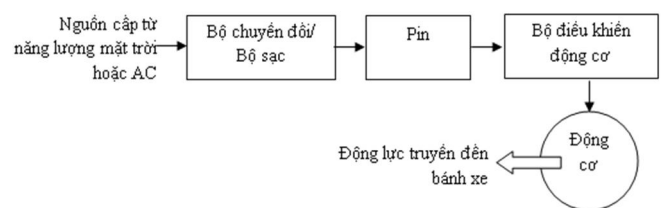
Ngày chấp nhận đăng: 21/10/2020

## 1. GIỚI THIỆU

Sự phát triển của phương tiện năng lượng mới đã trở thành điểm nóng của khoa học công nghệ. Trong các phương tiện sử dụng năng lượng mới, xe điện đã dần trở thành chủ lực trong các phương tiện, vì ô nhiễm môi trường ít, tiêu thụ năng lượng thấp, điều khiển kiểm soát rõ ràng và một số lợi thế khác... Xe điện sẽ là một trong những công nghệ tốt nhất trong tương lai để giảm việc sử dụng

nhiên liệu hóa thạch và cũng là hoạt động thân thiện với môi trường bằng cách giảm phát thải khí độc hại. Xe điện có nhiều bộ phận như mô-đun sạc, bộ chuyển đổi, bộ điều khiển, pin, động cơ điện và sơ đồ khối của năng lượng chảy trong một chiếc xe điện được thể hiện trong hình 1.

Từ hình 1, nguồn điện có thể được lấy từ bên ngoài bằng cách sử dụng các tấm pin mặt trời để tạo ra điện hoặc từ nguồn cung cấp AC. Nguồn này sau đó được chỉnh lưu bằng bộ chuyển đổi và được cung cấp cho pin thông qua mô-đun sạc. Pin cung cấp năng lượng điện cho động cơ thông qua bộ điều khiển, giúp kiểm soát các thông số đầu vào và đầu ra. Công suất cơ học đầu ra từ động cơ được cung cấp cho bánh xe thông qua trục truyền động. Theo cách này, năng lượng điện chảy qua các bộ phận khác nhau trong một chiếc xe điện và được chuyển đổi thành năng lượng cơ học. Do đó, động cơ điện trên chiếc xe đạp cần xác định các đặc tính đầu ra như công suất, mô-men xoắn, tốc độ,... để vượt qua lực do tải trọng và các lực đối lập khác tác động lên xe.



Hình 1. Sơ đồ khối năng lượng chạy trong một chiếc xe điện [10]

## 2. XÁC ĐỊNH CÔNG SUẤT ĐỘNG CƠ

Lấy mô hình nhất định của xe đạp điện làm đối tượng nghiên cứu, một động cơ DC không chổi than truyền động trực tiếp tốc độ trung bình hoặc thấp với cấu trúc rotor ngoài được phát triển. Đối với kích thước của hệ thống một chiếc xe đạp điện, được giả sử là di chuyển với tốc độ 25km/h (6,94m/s) ở mặt đường phẳng với độ dốc 0° và 3,5km/h đối với xe lên dốc[5]. Bảng 1 là các trọng số gần đúng của hệ thống truyền động.

Bảng 1. Hệ thống thành phần trọng lượng trên xe đạp điện

Thông số	Trọng lượng (kg)
Xe đạp	25
Động cơ và hệ thống truyền động	8

Bộ điều khiển và mạch điện tử	2
Ắc quy	5
Người đi xe đạp và ngồi sau	150

Bước đầu tiên để thiết kế động cơ là thiết lập các mục tiêu của công việc theo mức tiêu thụ năng lượng và hiệu suất của xe cho từng cá nhân sử dụng. Năng lượng mà một chiếc xe cần để di chuyển ở một tốc độ nhất định có thể được tính toán xấp xỉ bằng cách thêm các tải trọng mà nó phải vượt qua. Ba loại tải trọng đường phải được tính đến [6, 7].

- ✓ Tải trọng thụ động của xe.
- ✓ Tải trọng để vượt qua quán tính di chuyển.
- ✓ Tải trọng được đưa ra bởi điều kiện xe di chuyển trên đường.

Như vậy lực cần thiết để xe đạp kéo được trọng tải theo yêu cầu, xác định:

$$F_{\text{tong}} = F_{\text{lan}} + F_{\text{leodoc}} + F_{\text{cankhidonghoc}} \quad (1)$$

Trong đó:

- $F_{\text{tong}}$ : Tổng lực kéo mà đầu ra của động cơ phải vượt qua, để di chuyển xe.
- $F_{\text{lan}}$ : Lực do lực cản lăn.
- $F_{\text{leo doc}}$ : Lực cản do leo dốc.
- $F_{\text{cankhidonghoc}}$ : Lực do cản khí động học.

### 2.1. Lực cản lăn

Là lực cản được cung cấp cho xe do sự tiếp xúc của lốp xe với đường. Công thức tính lực do lực cản lăn được đưa ra theo phương trình:

$$F_{\text{lan}} = C_{rr} \cdot M \cdot g \quad (2)$$

Trong đó:

- $C_{rr}$ : Hệ số lực cản lăn.
- $M$ : Khối lượng xe tính bằng kg.
- $g$ : Gia tốc do trọng lực =  $9,81 \text{ m/s}^2$

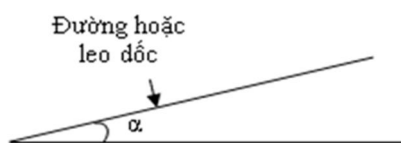
Đối với ứng dụng cho xe đạp điện ta chọn,  $C_{rr} = 0,01$ , vì thế:  $F_{\text{lan}} = 0,01 \cdot 180 \cdot 9,81 = 17,658 \text{ N}$  (3)

Công suất cần thiết để vượt qua lực cản lăn 17,658N là:

$$P_{\text{lan}} = F_{\text{lan}} \cdot \frac{v}{3600} = 17,658 \cdot \frac{25000}{3600} = 122,625 \text{ (W)} \quad (4)$$

### 2.2. Lực cản leo dốc

Góc  $\alpha$  hợp bởi giữa mặt đất và độ dốc của đường dẫn khi vượt cầu được thể hiện bởi hình 2.



Hình 2. Góc  $\alpha$  hợp bởi mặt đất và độ dốc của cầu

Công thức tính lực cản dốc được đưa ra theo phương trình:

$$F_{\text{leodoc}} = F_{\text{ms}} \pm M \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

Trong hình 2, ta xét chiếc xe đạp điện vượt dốc có góc lệch do với mặt phẳng là  $\alpha = 30^\circ$ .

$$F_{\text{leodoc}} = C_{rr} \cdot M \cdot g \cdot \cos \alpha + M \cdot g \cdot \sin \alpha$$

$$F_{\text{leodoc}} = M \cdot g \cdot (C_{rr} \cdot \cos \alpha + \sin \alpha)$$

$$F_{\text{leodoc}} = 180 \cdot 9,81 \cdot (0,01 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{1}{2})$$

$$F_{\text{leodoc}} = 898,08 \text{ N} \quad (6)$$

Công suất cần thiết để vượt qua lực cản dốc 898,08N là:

$$P_{\text{leodoc}} = F_{\text{leodoc}} \cdot \frac{v}{3600} = 898,08 \cdot \frac{3500}{3600} = 873,13 \text{ (W)} \quad (7)$$

### 2.3. Lực cản khí động lực học

Công thức tính lực cản khí động học được đưa ra theo phương trình:

$$F_{\text{cankhidonghoc}} = 0,5 \cdot C_a \cdot A_f \cdot \rho \cdot (v + v_0)^2 \quad (8)$$

Đây là ba lực chính tác dụng lên xe khi nó di chuyển với tốc độ không đổi. Trong khi tăng tốc và giảm tốc tác dụng của lực do quán tính cũng có tác dụng. Ở đây ta chọn công suất cần thiết để vượt qua lực cản khí động lực học và các lực cản khác là  $P_{\text{cankhidonghoc}} = 80 \text{ W}$ .

Do đó, tổng công suất cần thiết để di chuyển xe là:

$$P_{\text{tong}} = 873,13 + 80 = 953,13 \text{ (W)} = 0,953 \text{ (kW)} \quad (9)$$

Tuy nhiên không nên chọn động cơ điện có công suất đầu ra 0,953kW. Vì truyền tải điện cho bánh xe còn bao gồm các tổn thất. Do đó, công suất cơ học ( $M_{\text{keo}}$ ) cần thiết để điều khiển xe được đưa ra theo phương trình:

$$M_{\text{keo}} = \frac{P_{\text{tong}}}{\eta} \quad (10)$$

Trong đó,  $\eta$  là hiệu suất của hệ thống truyền động. Ta chọn hiệu quả của hệ thống truyền tải là 0,8. Do đó, sản lượng điện cơ cần thiết là:

$$M_{\text{keo}} = \frac{P_{\text{tong}}}{\eta} = \frac{953,13}{0,8} = 1191,4 \text{ (W)} = 1,119 \text{ (kW)} \quad (11)$$

Như vậy để minh họa lựa chọn công suất định mức cho một chiếc xe đạp điện có tải trọng 180kg, ta chọn động cơ có công suất  $P = 1,2 \text{ kW}$ . Theo cách này, tính năng đánh giá năng lượng cần thiết để điều khiển một chiếc xe đạp điện có tải trọng cụ thể được tính toán.

### 2.4. Vận tốc góc

Vận tốc góc của xe đạp điện với kích thước 15inch ở tốc độ 25km/h. Được đánh giá phân tích vòng/phút của động cơ và được tính:

$$n_{\text{rpm}} = 9,55 \cdot \frac{v(\frac{m}{s})}{v(m)} = 9,55 \cdot \frac{6,94}{0,177} = 374,44 \text{ (v/p)} \quad (12)$$

### 2.5. Mô-men xoắn

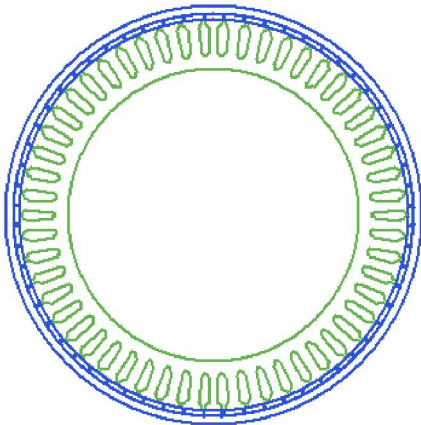
Mô-men xoắn do máy tạo ra là một hàm của tốc độ góc với bánh xe và công suất đầu ra của động cơ được thể hiện như sau:

$$T(N.m) = \frac{P(W)}{\omega(\frac{rad}{s})} = \frac{1191}{\frac{2\pi \cdot 374,44(v/p)}{60}} = 30,389(N.m) \quad (13)$$

### 3. QUY TRÌNH THIẾT KẾ ĐỘNG CƠ BLDC

#### 3.1. Cấu hình động cơ

Cấu hình rotor ngoài của động cơ BLDC với 3 pha, 48 rãnh, 56 cực như trong hình 3. Các cực rotor được hình thành bằng 56 miếng nam châm vĩnh cửu. Số lượng phân số của các rãnh trên mỗi cực là 48/56. Sự sắp xếp này giúp loại bỏ mô-men xoắn gợn của động cơ.



Hình 3. Cấu hình rotor ngoài của động cơ BLDC

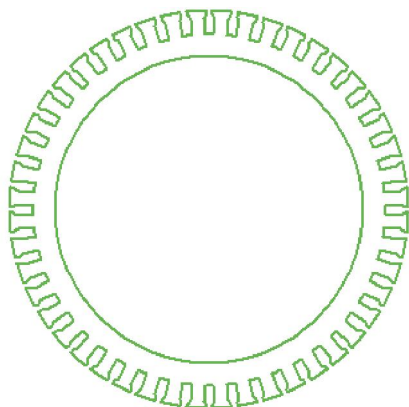
Thông số kỹ thuật của động cơ được thể hiện trong bảng 2.

Bảng 2. Thông số kỹ thuật của động cơ BLDC

STT	Thông số	Giá trị
1	Công suất định mức: $P_{dm}$ (W)	1200
2	Điện áp định mức: $V_{dc}$ (V)	48
3	Tốc độ định mức: $n_{dm}$ (v/p)	375
3	Tốc độ góc định mức: $\omega_{dm}$ (rad/s)	39,27
4	Hiệu suất: $\eta$	0,8
5	Hệ số công suất: $\cos\phi$	0,95
6	Số pha: m	3

#### 3.2. Thiết kế Stator

Các tham số của stator được thể hiện trong hình 4 và thông số hiển thị trong bảng 3.



Properties: 1200W - RmxprtDesign1 - Machine

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Outer Diameter	298	mm	298mm	Outer diameter of the st...	<input type="checkbox"/>
Inner Diameter	230	mm	230mm	Inner diameter of the st...	<input type="checkbox"/>
Length	50	mm	50mm	Length of the stator core	<input type="checkbox"/>
Stacking Factor	0.95			Stacking factor of the s...	<input type="checkbox"/>
Steel Type	M270_35A			Steel type of the stator ...	<input type="checkbox"/>
Number of Slots	48			Number of slots of the s...	<input type="checkbox"/>
Slot Type	3			Slot type of the stator c...	<input type="checkbox"/>
Skew Width	0		0	Skew width measured i...	<input type="checkbox"/>

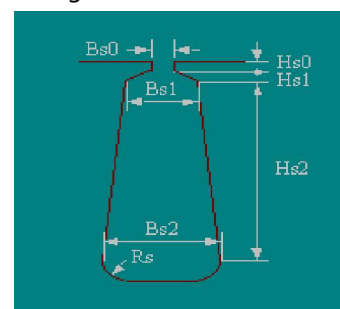
Hình 4. Hình dạng stator BLDC 48 rãnh và các thông số được nhập vào Rmxprt

Bảng 3. Thông số kỹ thuật stator

STT	Thông số	Giá trị
1	Đường kính ngoài Stator: $D_{os}$ (mm)	298
2	Đường kính trong Stator: $D_{is}$ (mm)	230
3	Chiều dài Stator: $L_s$ (mm)	50
4	số rãnh	48
5	Số thanh dẫn trong một rãnh	
6	Loại thép	M270-35A
7	Hệ số ép chặt	0,95
8	Loại rãnh	3
9	Độ rộng nghiêng	0
10	Số thanh dẫn trong một rãnh	5
11	Tiết diện dây ( $mm^2$ )	6,36
12	Số lớp dây quấn	2
13	Đường kính dây (mm)	3
14	Kiểu đầu dây	Y-ngắn

#### 3.3. Thiết kế rãnh

Thông số cho một rãnh có dạng như hình 5 và thông số được hiển thị ở bảng 4.



Properties: 1200W - RmxprtDesign1 - Machine

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Auto Design	<input type="checkbox"/>			Auto design Hs2, Bs1 a...	<input type="checkbox"/>
Parallel Tooth	<input type="checkbox"/>			Design Bs1 and Bs2 ba...	<input type="checkbox"/>
Hs0	3	mm	3mm	Slot dimension: Hs0	<input type="checkbox"/>
Hs1	3	mm	3mm	Slot dimension: Hs1	<input type="checkbox"/>
Hs2	Hs2		11.90mm	Slot dimension: Hs2	<input type="checkbox"/>
Bs0	5	mm	5mm	Slot dimension: Bs0	<input type="checkbox"/>
Bs1	8.34	mm	8.34mm	Slot dimension: Bs1	<input type="checkbox"/>
Bs2	6.77	mm	6.77mm	Slot dimension: Bs2	<input type="checkbox"/>
Rs	0	mm	0mm	Slot dimension: Rs	<input type="checkbox"/>

Show Hidden

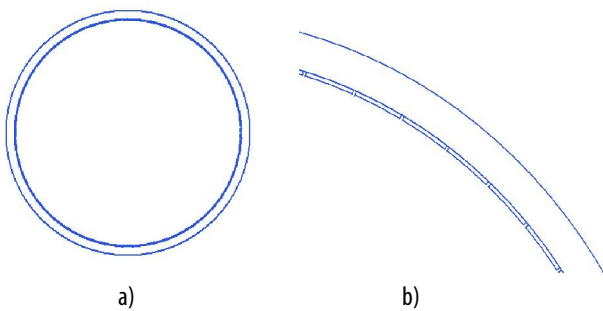
Hình 5. Hình dạng stator BLDC 48 rãnh và các thông số được nhập vào Rmxprt

Bảng 4. Thông số kỹ thuật của rãnh

STT	Thông số	Giá trị
1	Chiều cao miệng rãnh $H_{30}$ : (mm)	3
2	Chiều cao cổ rãnh $H_{31}$ : (mm)	3
3	Chiều cao rãnh $H_{32}$ : (mm)	11,96
4	Độ rộng miệng rãnh $B_{30}$ : (mm)	5
5	Độ rộng đáy nhỏ của rãnh $B_{31}$ : (mm)	8,34
6	Độ rộng đáy lớn của rãnh $B_{32}$ : (mm)	6,77
7	$R_3$ : (mm)	0

3.4. Thiết kế rotor

Rotor bên ngoài có gắn nam châm vĩnh cửu có dạng như hình 6. Mẫu cực rotor này có sẵn trong RMXprt. Chỉ có kích thước nam châm và đường kính ngoài của rotor là giá trị đầu vào.



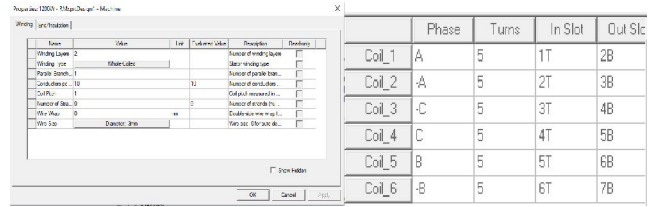
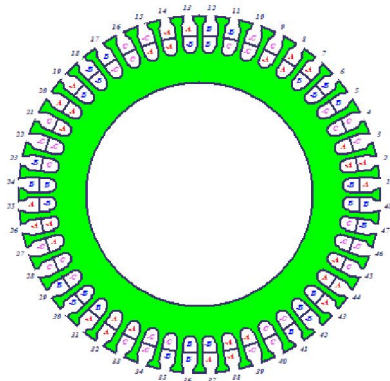
Hình 6. Hình dạng rotor: a) 56 cực từ b) 1/8 rotor

Bảng 5. Dữ liệu rotor

STT	Thông số	Giá trị
1	Chiều dài khe hở không khí: g (mm)	1
2	Đường kính trong Rotor: Dir (mm)	300
3	Đường kính ngoài Rotor: Dor (mm)	324
4	Chiều dài Rotor: Lr (mm)	50
5	Số cực	56
6	Loại thép	M270-35A
7	Hệ số ép chặt lõi thép	0,95
8	Khoảng cách giữa 2 nam châm: (mm)	0,84
9	Độ dày nam châm: (mm)	1,2
10	Loại Nam châm	NdFe30

3.5. Thiết kế cuộn dây

Sơ đồ kết nối cuộn dây có dạng như hình 7.

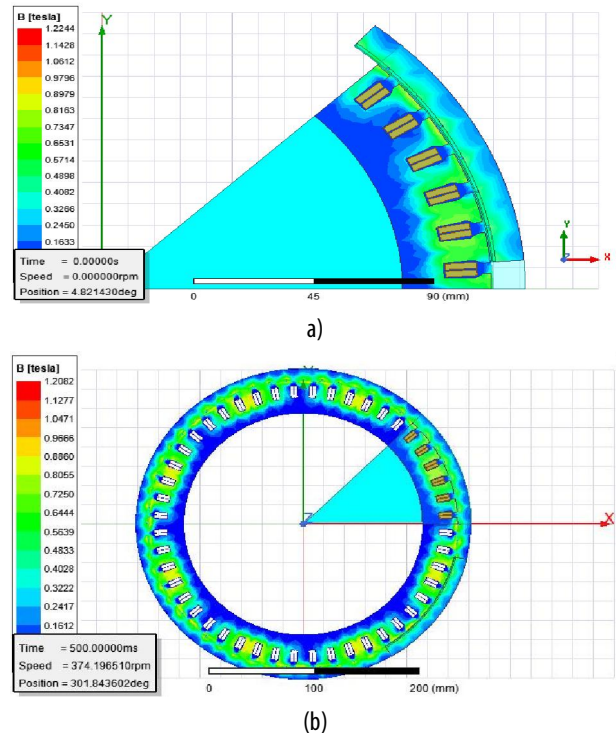


Hình 7. Sơ đồ kết nối của cuộn dây ba pha và các thông số được nhập vào Rmxprt

4. MÔ PHỎNG KẾT QUẢ THIẾT KẾ ĐỘNG CƠ BLDC CHO XE ĐẠP ĐIỆN

RMxprt cung cấp cho thiết kế động cơ thô và hiệu suất dựa trên kích thước đầu vào nhất định. Để kiểm tra hiệu suất của động cơ kỹ lưỡng, cần phải chạy một mô phỏng phần tử hữu hạn trong phần mềm như Maxwell 2D. Hình học chuẩn bị trong RMXprt được đưa vào môi trường Maxwell 2D. Có phần mềm tự tạo chia lưới cần thiết cho FEA, nó cũng tự động chọn các điều kiện biên trong đó hình học sẽ được giải quyết. Các kích thích cuộn dây cũng được gán tự động và chính phần mềm quyết định tính đối xứng trong hình học.

Sau đây là một số phân tích được thực hiện trong Maxwell 2D bằng cách chạy các mô phỏng và lưu các trường tại một thời điểm thích hợp. Hình 8 cho thấy các dòng từ thông trong stator và rotor khi chưa có dòng điện và khi có dòng điện.

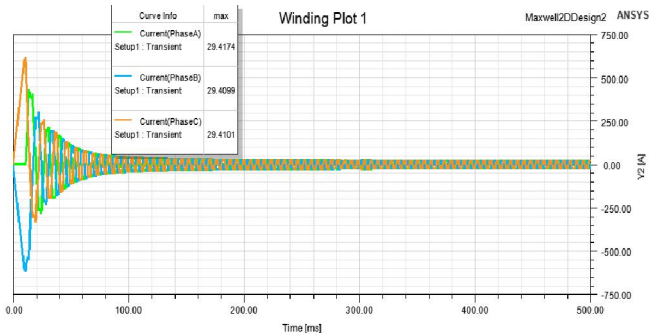


Hình 8. Mật độ từ thông trong động cơ: a) Khi chưa có dòng điện; b) Khi có dòng điện

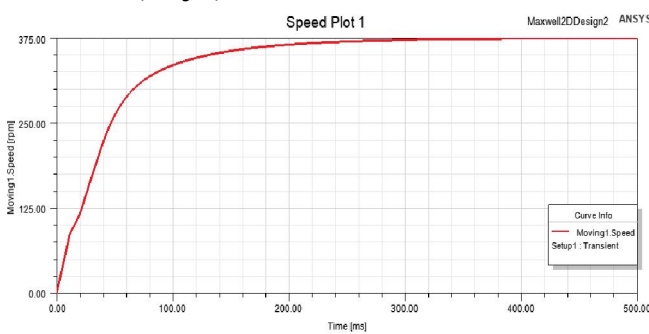
Mật độ từ thông tĩnh của động cơ được thể hiện trong hình 8(a), trong đó các màu khác nhau đại diện cho các giá trị khác nhau của mật độ từ thông. Hình 8(a) chỉ ra rằng không có bão hòa quá mức xảy ra trong động cơ và mật độ tối đa của từ thông tồn tại trong đầu răng stator.

Việc phân tích từ trường khe hở không khí là cơ sở để phân tích thiết kế và hiệu suất của động cơ DC không chổi than [7]. Mật độ thông lượng khe hở không khí chủ yếu được tính bằng độ dày cực, chiều dài khe hở không khí và hệ số cung cực.

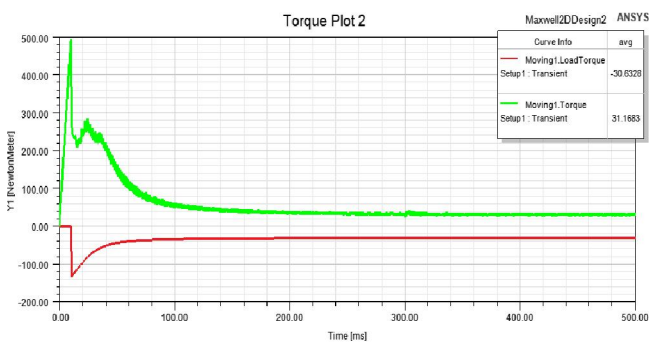
Hình 9, 10, 11 thể hiện đồ thị dòng điện, tốc độ và công suất điện từ của động cơ.



Hình 9. Đồ thị dòng điện

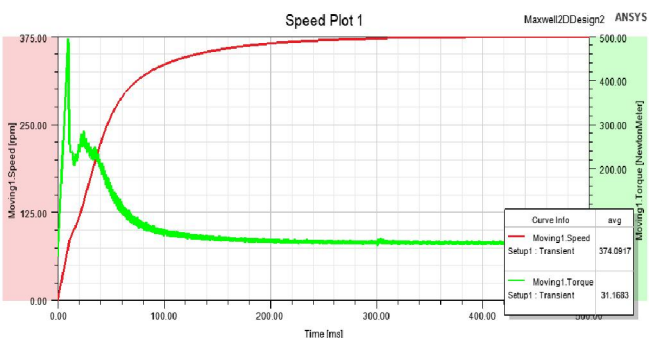


Hình 10. Đồ thị tốc độ



Hình 11. Công suất điện từ của động cơ

Đặc tính tốc độ mô-men xoắn được thể hiện trong hình 12.



Hình 12. Momen đầu ra so với đường cong tốc độ

## 5. KẾT LUẬN

Bài báo này đã chứng minh một cách tiếp cận để thiết kế động cơ DC không chổi than và một động cơ DC không chổi than rotor bên ngoài truyền động trực tiếp được thiết kế với kích thước chính đã được tính toán sơ bộ, chiều dài khe hở không khí và hệ số cung cực, là các thông số quan trọng của động cơ để có thể cung cấp công suất khoảng 1,2kW với các gợn mô-men xoắn nhỏ đáng kể. Công cụ RMxprt của ANSYS giải quyết các phương trình thiết kế động cơ cơ bản và cung cấp dữ liệu thiết kế thô. Dữ liệu này không nên được coi là thông số thiết kế động cơ tối ưu. Theo thiết kế này, động cơ cho hiệu quả đáng kể ở tốc độ và mô-men xoắn định mức. Ngoài ra các gợn sóng mô-men xoắn nằm trong giới hạn và dòng điện trong cuộn dây không vượt quá giá trị định mức.

Có thể kết luận ở đây sau khi thực hiện dự án này, không phải lúc nào kết quả thu được từ RMxprt phải khớp với kết quả thu được bằng cách mô phỏng cùng một mô hình trong Maxwell 2D. Một điểm cần lưu ý, nam châm nên bao phủ diện tích tối đa để từ thông đến từ nam châm phải bao phủ hết diện tích khe hở không khí. Ngoài ra gợn sóng mô-men xoắn sẽ giảm khi khoảng cách không khí thông lượng trở nên đồng đều hơn.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. T. J. E. Miller, 1989. *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*. New York, NY (USA); Oxford University Press.
- [2]. T. Kenjo, S. Nagarnori, 1985. *Permanent Magnet and Brusless DCMotor*. Oxford university press.
- [3]. J. R. Hendershot, T. J. E. Miller, 1994. *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*. Magna Physics Pub.
- [4]. S.A.Nasar, 1987. *Handbook of Electric Machines*. McGraw-Hill Companies.
- [5]. Prathamesh Mukund Dusane, 2016. *Simulation of a Brushless DC Motor in ANSYS – Maxwell 3D*. Master thesis, Czech Technical University in Prague.
- [6]. V.P. Buhr Karel, 2012. *Analysis of the electric vehicle with the BLDC PM motor in the wheel body*. Transactions on Transport Sciences 5(1):1-10.
- [7]. Bo Long, Shin Teak Lim, Ji Hyoung Ryu, Kil To Chong, 2014. *Energy-Regenerative Braking Control of Electric Vehicles Using Three-Phase Brushless Direct-Current Motors*. Energies, vol. 7, pp. 99-114.
- [8]. A.K.Sawhney, 2015. *Electrical Machine Design*, Dhanpat Rai Publications.
- [9]. Tushar Waghmare, P.R.Choube, Anup Dakre, A.M.Suryawanshi, Prabhakar Holambe, 2016. *Design of Internal Permanent Magnet Brushless Dc Motor Using Ansys*. International Journal of Research Publications in Engineering and Technology [IJRPET], Volume 2, Issue 4.
- [10]. T. Porselvi, Sriharharan M. K, Ashok J., Ajith Kumar S., 2017. *Selection of Power Rating of an Electric Motor for Electric Vehicles*. International Journal of Engineering Science and Computing, Volume 7 Issue No.4.
- [11]. Yuejin Z., Chunjiang L., Guanzen T., 2011. *Analytical Method for Air-Gap Main Magnetic Field Computation of Surface Mounted Permanent Magnet Torque Motors*. Trans. China Electrotech. Soc., 26, 13–17.

## AUTHOR INFORMATION

**Nguyen Viet Anh**

Faculty of Electrical Engineering Technology, Hanoi University of Industry