



Tạp chí điện tử
Khoa học và Công nghệ Giao thông
Trang website: <https://jstt.vn/index.php/vn>



Article info

Type of article:

Original research paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.5.256-267>

***Corresponding author:**

Email address:

bacnd@huce.edu.vn

Received: 07/07/2026

Received in Revised Form:
20/09/2026

Accepted: 24/09/2026

Electromagnetic Performance Analysis of a Low-Voltage BLDC Motor for Automated Guided Vehicles Using Finite Element Simulation

Nguyen Duc Bac*, Nguyen Thanh Dat

Hanoi University of Civil Engineering, No. 55 Giai Phong Street, Bach Mai Ward, Hanoi, Vietnam

Abstract: Automated guided vehicles (AGVs) are increasingly used in logistics and smart manufacturing systems, where traction motors play a crucial role in traction capability, energy efficiency, and operational stability. This paper presents the design of a low-voltage brushless direct current (BLDC) motor based on AGV traction requirements and the development of a finite element model in ANSYS Maxwell to analyze its electromagnetic characteristics and operating performance. Torque, speed, output power, efficiency, current, and magnetic flux density distribution are investigated under different operating conditions. For an AGV with a total mass of 100 kg, accelerating at 0.2 m/s^2 on a 4° slope, the required shaft power is 48.52 W per motor at the initial target speed of 0.8 m/s. The 24 V, 12-slot, eight-pole configuration reaches a maximum efficiency of 91.61% among the evaluated points. Retaining the initially selected gear ratio of approximately 25.525 gives an equivalent vehicle speed of approximately 0.43 m/s at the investigated motor speed of 1396.53 rpm. At this speed, the required shaft power is 26.06 W per motor, while the estimated available shaft power is approximately 29.5 W, giving a margin of about 13%. Electromagnetic torque ripple is approximately 64.1%, indicating substantial torque fluctuations. The results support a preliminary assessment of traction capability at the reduced vehicle speed.

Keywords: Brushless DC motor (BLDC); Automated Guided Vehicle (AGV); motor design; finite element analysis (FEA); ANSYS Maxwell; electromagnetic performance.



Thông tin bài viết
Dạng bài viết:
Bài báo nghiên cứu

DOI:
<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.5.256-267>

*Tác giả liên hệ:
Địa chỉ Email:
bacnd@huce.edu.vn

Ngày nộp bài: 07/07/2026
Ngày nộp bài sửa: 20/09/2026
Ngày chấp nhận: 24/09/2026

Phân tích đặc tính điện từ và hiệu năng vận hành của động cơ BLDC điện áp thấp ứng dụng cho xe AGV bằng mô phỏng phần tử hữu hạn

Nguyễn Đức Bắc*, Nguyễn Thành Đạt

Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam

Tóm tắt: Xe tự hành AGV ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống logistics và sản xuất thông minh, trong đó động cơ truyền động đóng vai trò quyết định đến khả năng kéo tải, hiệu quả sử dụng năng lượng và độ ổn định vận hành. Bài báo trình bày quá trình thiết kế động cơ một chiều không chổi than (BLDC) điện áp thấp theo yêu cầu truyền động của xe AGV và xây dựng mô hình phần tử hữu hạn trên phần mềm ANSYS Maxwell để phân tích các đặc tính điện từ và hiệu năng làm việc của động cơ. Trên cơ sở mô hình đã xây dựng, các đặc tính momen, tốc độ, công suất đầu ra, hiệu suất, dòng điện và phân bố mật độ từ thông được khảo sát trong các chế độ vận hành khác nhau. Với AGV có tổng khối lượng 100 kg, gia tốc $0,2 \text{ m/s}^2$ và độ dốc 4° , công suất yêu cầu tại mỗi trục động cơ là 48,52 W ở vận tốc tính chọn ban đầu 0,8 m/s. Cấu hình 24 V, 12 rãnh–8 cực đạt hiệu suất lớn nhất 91,61% trong các điểm khảo sát. Khi giữ tỷ số truyền tính chọn khoảng 25,525, tốc độ động cơ khảo sát 1396,53 rpm tương ứng vận tốc quy đổi của xe khoảng 0,43 m/s. Tại vận tốc này, công suất yêu cầu là 26,06 W mỗi động cơ, trong khi công suất trục khả dụng ước tính khoảng 29,5 W, cao hơn yêu cầu khoảng 13%. Hệ số nhấp nhô momen điện từ khoảng 64,1%, cho thấy dao động momen còn đáng kể. Kết quả cung cấp cơ sở đánh giá sơ bộ khả năng đáp ứng tải tại vận tốc điều chỉnh.

Từ khóa: Động cơ BLDC; xe tự hành AGV; thiết kế động cơ; phương pháp phần tử hữu hạn; ANSYS Maxwell; đặc tính điện từ.

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ tự động hóa, chuyển đổi số và công nghiệp thông minh đã thúc đẩy quá trình hiện đại hóa trong lĩnh vực logistics và sản xuất. Các hệ thống kho thông minh, dây chuyền vận chuyển tự động và trung tâm phân phối hiện đại ngày càng yêu cầu các giải pháp vận chuyển có tính linh hoạt cao, khả năng làm việc liên tục và

hiệu quả sử dụng năng lượng lớn. Trong bối cảnh đó, xe tự hành AGV (Automated Guided Vehicle) đã trở thành một trong những giải pháp quan trọng nhằm nâng cao năng suất vận hành, giảm chi phí nhân công và tối ưu hóa hiệu quả khai thác trong các hệ thống logistics thông minh [1, 2].

Hiệu năng vận hành của xe AGV phụ thuộc chủ yếu vào hệ thống truyền động điện, trong đó động cơ điện quyết định trực tiếp khả năng tăng

tốc, lực kéo, độ ổn định chuyển động cũng như mức tiêu thụ năng lượng của toàn hệ thống [3]. Đối với các AGV hoạt động trong kho logistics, động cơ truyền động cần đáp ứng đồng thời nhiều yêu cầu kỹ thuật như momen khởi động lớn, khả năng làm việc trong dải tốc độ rộng, hiệu suất cao, độ tin cậy lớn và khả năng điều khiển linh hoạt dưới điều kiện tải thay đổi liên tục [4].

Trong số các loại động cơ điện hiện nay, động cơ một chiều không chổi than (Brushless DC Motor - BLDC) được đánh giá là giải pháp phù hợp cho các hệ thống AGV nhờ các ưu điểm như mật độ công suất lớn, hiệu suất cao, khả năng đáp ứng động nhanh, kết cấu nhỏ gọn, độ tin cậy cao và chi phí bảo trì thấp [5, 6]. Việc sử dụng nam châm vĩnh cửu giúp giảm đáng kể tổn hao rotor, nâng cao hiệu quả chuyển đổi năng lượng và kéo dài tuổi thọ làm việc so với nhiều loại động cơ truyền thống. Những đặc tính này đặc biệt phù hợp với các hệ thống AGV sử dụng nguồn pin điện áp thấp và yêu cầu vận hành liên tục trong thời gian dài.

Nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc nâng cao hiệu năng của động cơ BLDC thông qua các hướng tiếp cận khác nhau. Một số nghiên cứu tập trung phát triển các chiến lược điều khiển dòng điện, momen và quá trình chuyển mạch nhằm giảm dao động momen [6–9]. Trong khi đó, các nghiên cứu về động cơ nam châm vĩnh cửu tập trung cải tiến cấu hình rotor và cách bố trí nam châm nhằm nâng cao hiệu suất và cải thiện đặc tính momen [10–12]. Bên cạnh đó, các phần mềm mô phỏng điện từ dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn như ANSYS Maxwell ngày càng được sử dụng rộng rãi nhằm phân tích trường điện từ, đánh giá phân bố từ thông và dự đoán đặc tính làm việc của động cơ trong các điều kiện tính toán đã xác định [13].

Các nghiên cứu về điều khiển momen [7] và cải thiện hiệu suất theo cấu hình nam châm [10] cung cấp cơ sở phân tích động cơ BLDC. Trong nghiên cứu này, vấn đề được xem xét là mối liên hệ định lượng giữa tải kéo AGV, đặc tính động cơ và tỷ số truyền, đồng thời kiểm tra tính nhất quán giữa momen, công suất, dòng điện và hiệu suất tại

điểm làm việc.

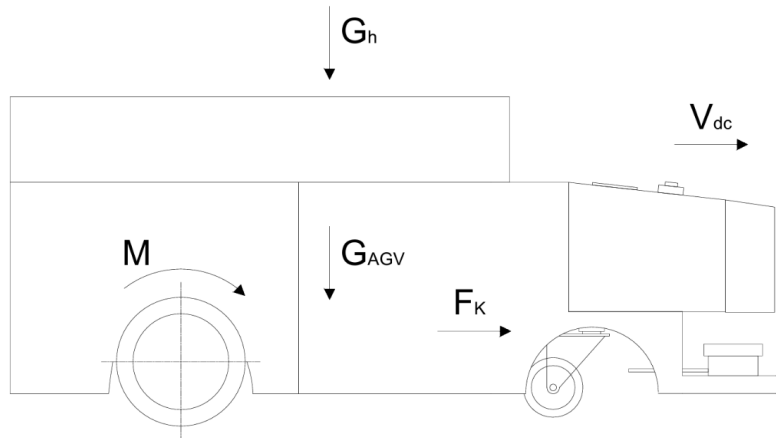
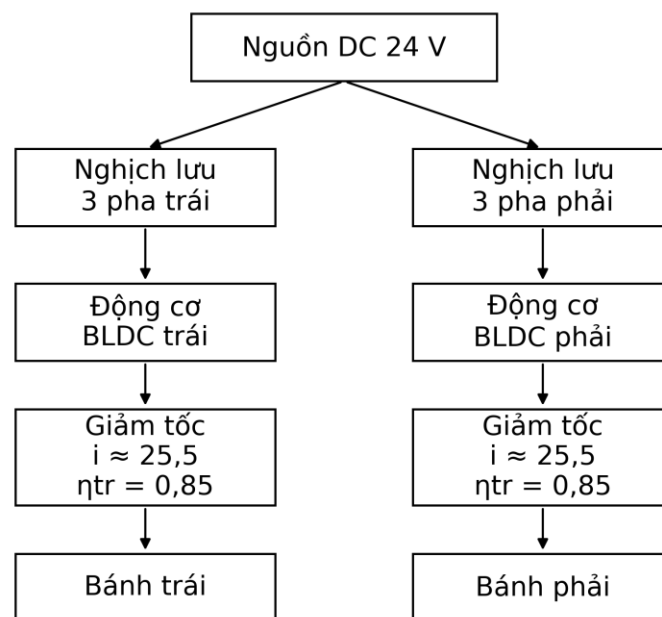
Xuất phát từ những vấn đề trên, nghiên cứu này thực hiện thiết kế một động cơ BLDC điện áp thấp theo yêu cầu truyền động của xe AGV trong kho logistics. Trên cơ sở động cơ đã thiết kế, mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng trên phần mềm ANSYS Maxwell nhằm phân tích các đặc tính điện từ và đánh giá hiệu năng vận hành của động cơ dưới các điều kiện làm việc khác nhau. Các đặc tính quan trọng như momen điện từ, tốc độ, công suất đầu ra, hiệu suất, dòng điện tiêu thụ và phân bố mật độ từ thông được khảo sát nhằm đánh giá khả năng đáp ứng yêu cầu truyền động của động cơ đối với xe AGV. Đóng góp của nghiên cứu là đánh giá một cấu hình BLDC điện áp thấp theo trường hợp tải AGV cụ thể, lượng hóa công suất và momen yêu cầu, đối chiếu với các đường đặc tính để lựa chọn điểm vận hành và tỷ số truyền. Phân tích này không đề xuất cấu trúc động cơ hoặc thuật toán điều khiển mới; kết quả chỉ ra khả năng đáp ứng sơ bộ và các giới hạn của cấu hình khảo sát.

2. Thiết kế động cơ và phương pháp mô phỏng

2.1. Xác định yêu cầu thiết kế động cơ truyền động cho xe AGV

Việc xác định đúng yêu cầu truyền động là cơ sở quan trọng để lựa chọn và thiết kế động cơ phù hợp cho xe AGV. Trong nghiên cứu này, các thông số truyền động được xác định dựa trên trường hợp thiết kế của AGV trong kho logistics, bao gồm tải trọng, tốc độ di chuyển, điều kiện mặt sàn và đặc tính chuyển động.

Trên cơ sở đó, lực kéo yêu cầu và công suất truyền động được tính toán để làm cơ sở thiết kế động cơ BLDC. Xe được xét trên sàn phẳng ($\alpha = 0^\circ$) và đoạn dốc lớn nhất 4° ; giả thiết hệ số cản lăn không đổi, bỏ qua cản không khí ở tốc độ thấp và chia đều tải kéo cho hai bánh chủ động khi xe đi thẳng. Các lực tác dụng lên xe được biểu diễn trong Hình 1. Sơ đồ truyền động được trình bày trong Hình 2; các thông số đầu vào được tổng hợp trong Bảng 1.

**Hình 1.** Lực tác dụng lên xe**Hình 2.** Sơ đồ truyền động từ động cơ đến hai bánh chủ động theo phương án tính chọn ban đầu**Bảng 1.** Thông số làm việc của xe AGV trong trường hợp thiết kế

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Khối lượng xe AGV	50	kg
Khối lượng hàng	50	kg
Vận tốc tính chọn ban đầu v	0,8	m/s
Gia tốc a	0,2	m/s ²
Đường kính bánh D	0,15	m
Hệ số cản lăn f_0	0,015	—
Góc dốc α	0 / 4	°
Hiệu suất truyền động η	0,85	—
Số động cơ	2	—

Trong đó:

F_k : Lực kéo tiếp tuyến của xe

V_{dc} : Tốc độ di chuyển của xe

M : Momen xoắn trên trục bánh xe chủ động

G_h : Trọng lượng của thùng hàng

G_{AGV} : Trọng lượng của xe AGV

g : Gia tốc trọng trường 9,81 m/s²

Với tổng khối lượng $m = 100$ kg, trọng lượng

$G = 100 \times 9,81 = 981 \text{ N}$. Thay số cho trường hợp tăng tốc trên dốc 4° như sau:

- Lực cản di chuyển khi xe chờ hàng, tính theo (1):

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 \text{ (N)} \quad (1)$$

trong đó:

+ Lực cản do ma sát, tính theo (2):

$$W_1 = f_0 \cdot G \cdot \cos \alpha \text{ (N)} \quad (2)$$

$$W_1 = 0,015 \times 981 \times \cos 4^\circ = 14,679 \text{ N.}$$

với:

f_0 : Hệ số cản di chuyển bề mặt sàn bê tông công nghiệp phủ epoxy = 0,015

G : Tổng trọng lượng của xe AGV và hàng (N)

α : Góc nghiêng của đường, bằng 0° trên sàn phẳng và 4° ở đoạn dốc lớn nhất.

+ Lực cản do dốc, tính theo (3):

$$W_2 = G \cdot \sin \alpha \text{ (N)} \quad (3)$$

$$W_2 = 981 \times \sin 4^\circ = 68,431 \text{ N.}$$

+ Lực cản do quán tính, tính theo (4):

$$W_3 = m \cdot a \text{ (N)} \quad (4)$$

$$W_3 = 100 \times 0,2 = 20 \text{ N.}$$

với:

+ m : khối lượng của xe AGV và hàng (kg)

+ a : Gia tốc của xe AGV (m/s^2)

+ Lực cản do gió, tính theo (5):

$$W_{4kt} = q \cdot A \text{ (N)} \quad (5)$$

$$W_4 = 0 \times A = 0 \text{ N.}$$

với:

+ q : Áp lực cản không khí, lấy bằng 0 (N/m^2) theo giả thiết bỏ qua cản khí ở tốc độ thấp.

+ A : Diện tích chắn gió (m^2)

- Vậy lực cản di chuyển khi xe chờ hàng theo

(6) là:

$$W_{kt} = W_{1kt} + W_{2kt} + W_{3kt} + W_{4kt} \text{ (N)} \quad (6)$$

$$W = 14,679 + 68,431 + 20 + 0 = 103,110 \text{ N.}$$

- Công suất di chuyển khi xe chờ hàng

+ Công suất di chuyển chung tính toán theo

(7):

$$N = \frac{W \cdot v}{\eta} \text{ (W)} \quad (7)$$

$$N = 103,110 \times 0,8 / 0,85 = 97,045 \text{ W.}$$

với:

W : Lực cản di chuyển khi xe chờ hàng (N)

v : Tốc độ di chuyển của xe

η : Hiệu suất truyền động của cơ cấu di chuyển

- Công suất 1 động cơ di chuyển được tính theo (8):

$$N_1 = N_2 = 97,045 / 2 = 48,522 \text{ W.}$$

- Chọn công suất và hộp giảm tốc (HGT):

+ Công suất của một động cơ được tính theo

(9):

$$N_{\text{chọn}} = 55 \text{ W} > 48,522 \text{ W} \quad (9)$$

+ Điện áp cấp cho động cơ: 24V

+ Tỷ số truyền HGT tính chọn: $i_{gt} \approx 25,525$ (xấp xỉ 25,5).

+ Tốc độ động cơ, tính theo (10):

$$n_{dc} = i_{gt} \frac{60v}{\pi D} \text{ (rpm)} \quad (10)$$

$$n_{dc} = 25,525 \times 60 \times 0,8 / (\pi \times 0,15) \approx 2600 \text{ rpm.}$$

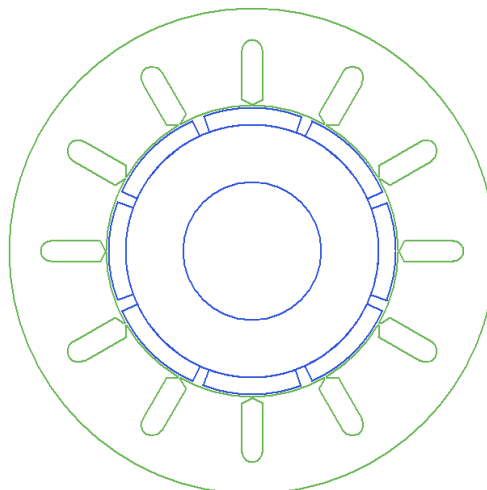
Tốc độ bánh xe $n_b = 60v/(\pi D) = 101,859 \text{ rpm}$; momen yêu cầu tại mỗi bánh $M_b = WD/4 = 3,867 \text{ N}\cdot\text{m}$. Với tỷ số truyền 25,525 và $\eta = 0,85$, momen yêu cầu tại mỗi trục động cơ là $0,1782 \text{ N}\cdot\text{m}$. Mục tiêu 55 W tại 2600 rpm tương ứng $0,2020 \text{ N}\cdot\text{m}$ và dự trữ công suất 13,35%. Đây là mục tiêu tính chọn; khả năng thực tế theo đường đặc tính được đối chiếu ở Phần 4. Kết quả tính toán yêu cầu truyền động của xe AGV là cơ sở để xác định các thông số thiết kế ban đầu của động cơ BLDC. Trên cơ sở đó, mô hình động cơ được xây dựng và phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn nhằm đánh giá các đặc tính điện từ và hiệu năng vận hành.

2.2. Thiết kế động cơ và xây dựng mô hình phần tử hữu hạn

Trên cơ sở các yêu cầu truyền động đã xác định ở mục 2.1, động cơ BLDC điện áp thấp được thiết kế nhằm đáp ứng yêu cầu làm việc của xe AGV trong hệ thống kho logistics. Quá trình thiết kế được thực hiện theo quy trình tính toán thiết kế máy điện truyền thống, bao gồm lựa chọn cấu trúc động cơ, xác định các kích thước hình học chủ yếu, thiết kế dây quấn stator, lựa chọn vật liệu nam

châm vĩnh cửu và kiểm tra các thông số làm việc của động cơ. Các thông số thiết kế của động cơ được xác định thông qua quy trình tính toán này và được khảo sát bằng mô phỏng điện từ trước khi tiến hành phân tích các đặc tính làm việc. Sau khi hoàn thành quá trình thiết kế, mô hình của động cơ được xây dựng để phục vụ phân tích điện từ bằng

phương pháp phần tử hữu hạn. Mô hình bao gồm stator, rotor nam châm vĩnh cửu, dây quấn ba pha và khe hở không khí, cho phép khảo sát các đặc tính điện từ và hiệu năng vận hành của động cơ trong các điều kiện làm việc khác nhau. Hình 3 trình bày mô hình hình học của động cơ BLDC được sử dụng trong nghiên cứu.



Hình 3. Mô hình phần tử hữu hạn của động cơ BLDC trong ANSYS Maxwell

Bảng 2. Các thông số thiết kế chính của động cơ BLDC

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Công suất tính chọn ban đầu	55	W
Tốc độ tính chọn ban đầu	2600	rpm
Số cực	8	-
Điện áp	24	V
Đường kính ngoài stator	70	mm
Đường kính trong stator	42	mm
Đường kính trong rotor	20	mm
Số rãnh stator	12	slot
Chiều dài mạch từ	30	mm
Loại nam châm	NdFeB N35	-
Độ cao nam châm	2,5	mm
Đường kính ngoài rotor (kể cả nam châm)	41,5	mm
Khe hở không khí	0,25	mm

Các thiết lập tính toán và mô phỏng được trình bày trong Bảng 3. Hình 4–7 được xác định bằng tính toán giải tích; Hình 8–9 là kết quả phân tích trường bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Momen trục của bộ đặc tính được phân biệt với momen điện từ khi đối chiếu công suất.

3. Kết quả mô phỏng

Trên cơ sở mô hình động cơ BLDC và các

thiết lập ở Bảng 2–3, các đặc tính điện từ và hiệu năng vận hành của động cơ được khảo sát trong điều kiện làm việc định trước. Các kết quả mô phỏng bao gồm đặc tính momen – tốc độ, hiệu suất – tốc độ, công suất đầu ra, dòng điện tiêu thụ và phân bố mật độ từ thông. Các kết quả này là cơ sở để đánh giá khả năng đáp ứng yêu cầu truyền động của động cơ đối với xe AGV điện áp thấp.

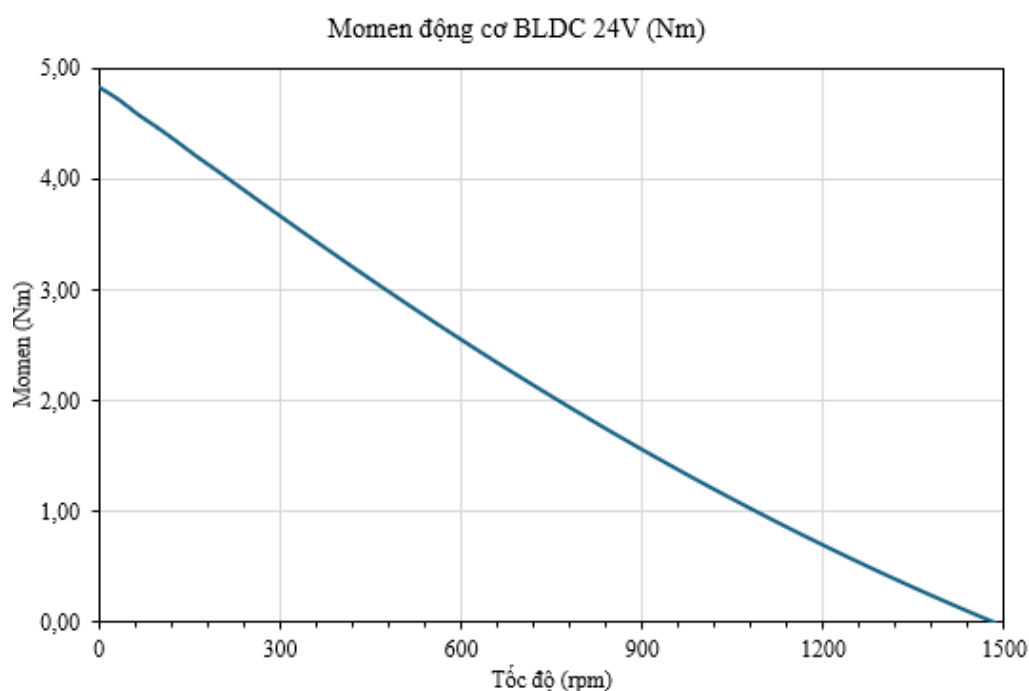
Bảng 3. Thiết lập tính toán và mô phỏng

Nội dung	Thiết lập
Dây quấn	Ba pha, nối sao, hai lớp; bước dây 2 rãnh; 64 vòng nối tiếp/pha; điện trở pha 0,3671 Ω tại 75 °C.
Vật liệu và khe hở	Lõi thép 1008 với đường cong từ hóa B–H phi tuyến; nam châm NdFe35; khe hở không khí 0,25 mm.
Phương pháp và chế độ mô phỏng	Tính toán giải tích kết hợp mô phỏng phần tử hữu hạn hai chiều quá độ. Nguồn một chiều 24 V; chuyển mạch sáu bước, góc dẫn 120°. Mô hình giải tích xét sụt áp khóa 0,2 V, diốt 0,5 V và tổn hao cơ; mô phỏng trường sử dụng khóa lý tưởng.
Điều kiện biên và lưới	Biên ngoài A = 0; cặp biên liên kết phản tuần hoàn; tổng số phần tử lưới trên miền mô phỏng là 790.
Thời gian và hội tụ	Bước thời gian 0,1 ms; thời gian mô phỏng 0,3 s; ngưỡng sai số dư phi tuyến 10^{-4} .

3.1. Đặc tính momen – tốc độ

Đặc tính momen – tốc độ được sử dụng để đánh giá khả năng sinh lực kéo và phạm vi làm việc của động cơ BLDC. Kết quả mô phỏng đặc tính momen theo tốc độ quay được trình bày trong Hình

4 cho thấy momen trục giảm theo tốc độ, từ 4,8337 N·m tại $n = 0$ về 0 tại tốc độ không tải 1483,26 rpm. Tại 1310,58 rpm, momen trục đạt 0,4118 N·m. Đường đặc tính không có vùng momen không đổi trong dải tốc độ khảo sát.

**Hình 4.** Đặc tính momen - tốc độ của động cơ BLDC

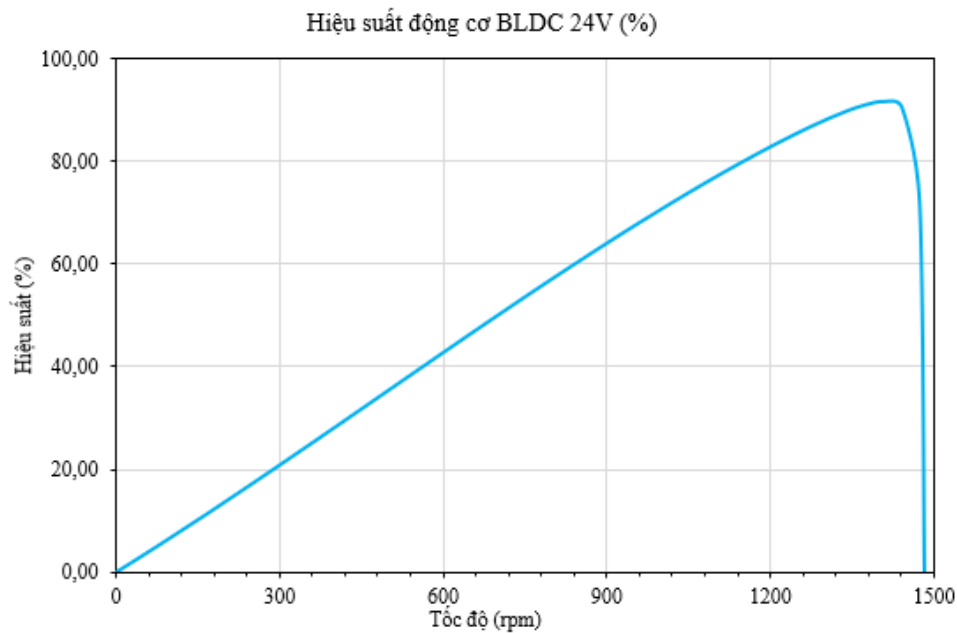
Đặc tính thu được mô tả khả năng sinh momen theo điều kiện nguồn của phép tính. Khả năng làm việc liên tục không được suy ra chỉ từ giá trị momen lớn ở tốc độ thấp, mà còn phụ thuộc giới hạn dòng và tổn hao.

3.2. Đặc tính hiệu suất – tốc độ

Đặc tính hiệu suất được sử dụng để đánh giá khả năng chuyển đổi năng lượng của động cơ

trong các chế độ vận hành khác nhau. Kết quả mô phỏng được trình bày trong Hình 5.

Trong các điểm khảo sát trên Hình 5, hiệu suất lớn nhất đạt 91,61% tại 1408,88 rpm, sau đó giảm ở vùng gần không tải. Tại điểm hiệu suất lớn nhất, công suất trục là 25,45 W; vì vậy, lựa chọn điểm vận hành cần xét cả công suất yêu cầu của tải.



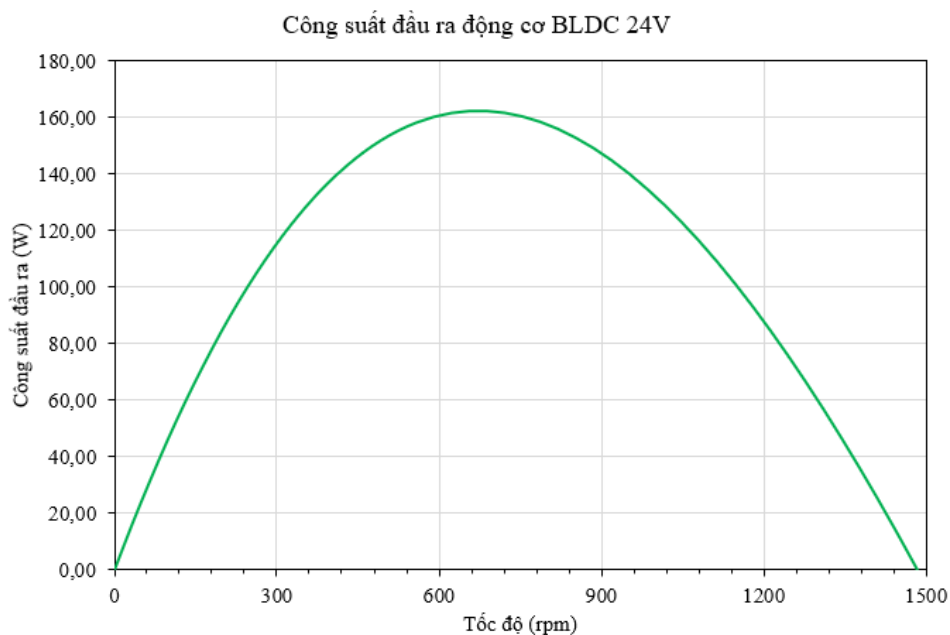
Hình 5. Đặc tính hiệu suất - tốc độ của động cơ BLDC

3.3. Đặc tính công suất và dòng điện

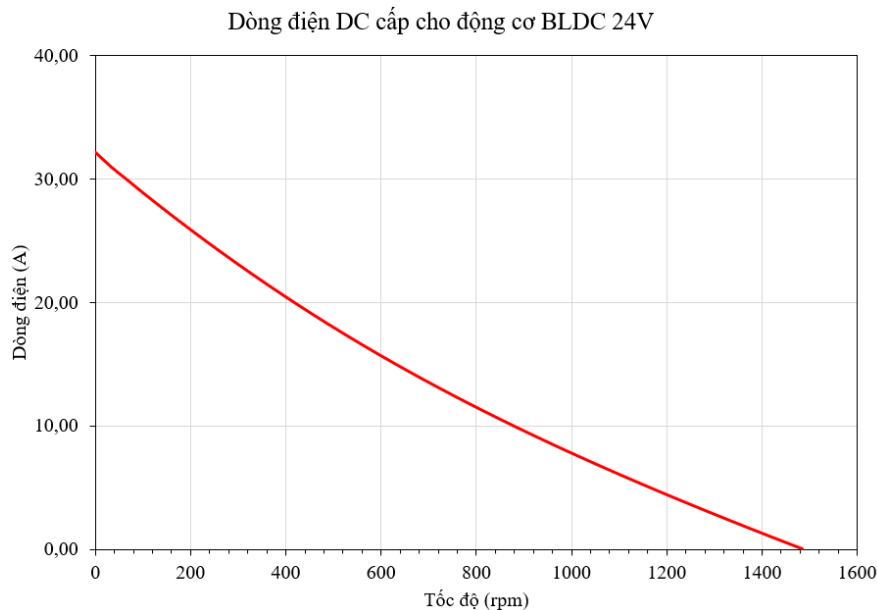
Đặc tính công suất đầu ra và dòng điện tiêu thụ được sử dụng để đánh giá khả năng cung cấp công suất cũng như mức tiêu thụ năng lượng của động cơ trong quá trình vận hành. Kết quả mô phỏng được trình bày trong Hình 6 và Hình 7.

Kết quả trên Hình 6 cho thấy công suất đầu ra lớn nhất trong các điểm khảo sát đạt 162,04 W tại 688,06 rpm, sau đó giảm. Dòng điện nguồn một chiều trên Hình 7 là 32,10 A tại $n = 0$ và giảm dần khi tốc độ tăng. Đây là đặc tính với nguồn 24 V,

chưa áp dụng giới hạn dòng; công suất cực đại không đồng nhất với công suất tính chọn 55 W hoặc công suất làm việc liên tục. Dòng tại $n = 0$ là dòng khóa rotor của phép tính, không đồng nhất với dòng khởi động quá độ khi bộ điều khiển có giới hạn dòng. Tại 1310,58 rpm, công suất trực đạt 56,51 W, dòng điện nguồn là 2,662 A và hiệu suất là 88,46%. Các số liệu này nhất quán với momen trục 0,4118 N·m theo quan hệ giữa công suất, momen và tốc độ, đồng thời phù hợp với tỷ số giữa công suất trực và công suất nguồn một chiều 24 V.



Hình 6. Đặc tính công suất - tốc độ của động cơ BLDC



Hình 7. Đặc tính dòng điện - tốc độ của động cơ BLDC

3.4. Phân bố mật độ từ thông

Phân bố mật độ từ thông được sử dụng để đánh giá trạng thái làm việc của mạch từ và khả năng khai thác vật liệu từ của động cơ. Kết quả mô phỏng được trình bày trong Hình 8.

Thang màu của Hình 8 có giới hạn trên 1,9379 T; các vùng mật độ từ thông cao tập trung cục bộ ở đầu răng. Bản đồ thể hiện sự phân bố không đều của từ thông trong mạch từ; đánh giá mức độ bão hòa cần đối chiếu với đường cong B–H của lõi thép.

4. Phân tích, thảo luận và đánh giá khả năng ứng dụng

Khả năng ứng dụng của động cơ được đánh giá bằng cách đối chiếu các đặc tính ở Phần 3 với yêu cầu truyền động của AGV. Với các thông số trong Bảng 1, bốn trường hợp khảo sát được xác định từ hai độ dốc 0° và 4° , kết hợp với hai mức gia tốc 0 và $0,2 \text{ m/s}^2$. Tổng khối lượng xe và hàng là 100 kg, hiệu suất truyền động là 0,85; lực kéo được chia đều cho hai bánh chủ động khi xe đi thẳng.

Bảng 4 tổng hợp yêu cầu tải theo các công thức ở mục 2.1 tại vận tốc tính chọn ban đầu 0,8 m/s và vận tốc điều chỉnh khoảng 0,430 m/s, được xác định từ đặc tính động cơ ở phần dưới.

Bảng 4. Yêu cầu truyền động của AGV tại hai vận tốc khảo sát; công suất tính cho mỗi động cơ

Chế độ (α ; a)	Lực kéo toàn xe (N)	Momen mỗi bánh (N·m)	Công suất (W), v = 0,8 m/s	Công suất (W), v ≈ 0,430 m/s
0° ; 0 m/s ²	14,715	0,552	6,925	3,719
0° ; 0,2 m/s ²	34,715	1,302	16,336	8,775
4° ; 0 m/s ²	83,110	3,117	39,111	21,007
4° ; 0,2 m/s ²	103,110	3,867	48,522	26,063

Ở vận tốc tính chọn ban đầu 0,8 m/s, tăng tốc trên dốc 4° yêu cầu công suất lớn nhất, bằng 48,522 W tại mỗi trục động cơ. Khi giảm vận tốc xuống khoảng 0,430 m/s, công suất yêu cầu của trường hợp này còn 26,063 W. Với cùng độ dốc và gia tốc, lực kéo và momen bánh xe không đổi theo giả thiết bỏ qua cản không khí; công suất yêu cầu

giảm theo vận tốc.

Các đường đặc tính trên Hình 5–7 cho thấy công suất lớn nhất đạt 162,04 W tại 688,06 rpm, trong khi hiệu suất lớn nhất đạt 91,61% tại 1408,88 rpm trong các điểm khảo sát. Hai điểm cực đại không trùng nhau, do đó lựa chọn vùng vận hành cần xét đồng thời hiệu suất và công suất khả dụng

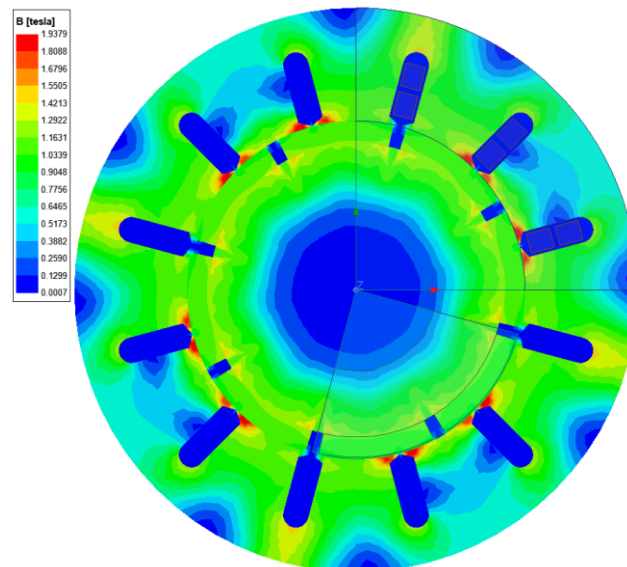
theo tải yêu cầu. Công suất cực đại của đường đặc tính không đồng nhất với công suất làm việc liên tục của động cơ.

Với tỷ số truyền tính chọn ban đầu khoảng 25,525, vận tốc xe 0,8 m/s đòi hỏi tốc độ động cơ khoảng 2600 rpm, vượt tốc độ không tải 1483,26 rpm của bộ đặc tính khảo sát. Vì vậy, cấu hình này chưa đáp ứng vận tốc ban đầu với hộp giảm tốc đã chọn. Theo (10), tốc độ khảo sát 1396,53 rpm tương ứng vận tốc quy đổi 0,4297 m/s, xấp xỉ 0,430 m/s. Phương án đánh giá tiếp theo giữ tỷ số truyền và điều chỉnh vận tốc theo giá trị này.

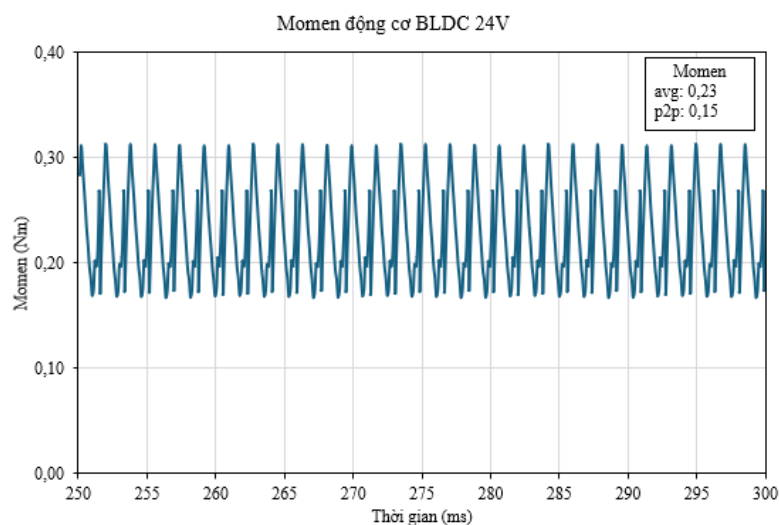
Nội suy tuyến tính momen trục và dòng điện nguồn từ số liệu của Hình 4 và Hình 7 tại 1396,53 rpm cho các giá trị xấp xỉ 0,2020 N·m và 1,345 A.

Công suất trục và hiệu suất tính từ các đại lượng này lần lượt xấp xỉ 29,5 W và 91,5%. Với vận tốc quy đổi 0,4297 m/s, momen yêu cầu lớn nhất tại mỗi trục là 0,1782 N·m và công suất yêu cầu là 26,063 W. Công suất khả dụng cao hơn yêu cầu khoảng 13%, cho thấy khả năng đáp ứng sơ bộ về momen và công suất tại vận tốc điều chỉnh. Để đánh giá chất lượng momen, Hình 9 trình bày dạng sóng momen điện từ ở chế độ áp đặt tốc độ 1396,53 rpm. Mô phỏng sử dụng nguồn một chiều 24 V, chuyển mạch sáu bước với góc dẫn 120°, không sử dụng điều chế độ rộng xung và không giải quá độ cơ.

Các thiết lập tương ứng được trình bày trong Bảng 3.



Hình 8. Phân bố mật độ từ thông của động cơ BLDC



Hình 9. Dạng sóng momen điện từ tại tốc độ 1396,53 rpm

Trong khoảng thời gian cuối 250–300 ms trên Hình 9, momen trung bình theo thời gian là 0,2284 N·m và chênh lệch đỉnh–đỉnh là 0,1464 N·m. Hệ số nhấp nhô, xác định bằng tỷ số giữa chênh lệch momen đỉnh–đỉnh và momen trung bình, bằng khoảng 64,1%. Các giá trị được tính từ dữ liệu số trước khi làm tròn chú thích trên hình. Kết quả cho thấy momen điện từ còn dao động đáng kể ở chế độ này. Ảnh hưởng đến chuyển động của AGV còn phụ thuộc quán tính và đặc tính cơ cấu truyền động.

Như vậy, với tỷ số truyền khoảng 25,525, cấu hình khảo sát có khả năng đáp ứng sơ bộ yêu cầu momen và công suất ở vận tốc quy đổi khoảng 0,43 m/s. Công suất trục và hiệu suất động cơ được đánh giá từ bộ đặc tính Hình 4–7; momen điện từ ở Hình 9 được dùng đánh giá độ nhấp nhô, không thay trực tiếp cho momen trục. Kết quả đối chiếu chưa xác lập khả năng duy trì vận tốc của toàn xe bằng mô phỏng quá độ cơ; khả năng điều chỉnh tốc độ theo tải và làm việc liên tục cần được kiểm chứng.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã kết hợp tính toán yêu cầu truyền động của xe AGV với mô phỏng động cơ BLDC điện áp thấp để phân tích đặc tính điện từ và đánh giá khả năng đáp ứng tải. Với AGV có tổng khối lượng 100 kg, gia tốc $0,2 \text{ m/s}^2$ và độ dốc 4° , công suất yêu cầu lớn nhất tại mỗi trục động cơ giảm từ 48,522 W ở vận tốc 0,8 m/s xuống 26,063 W ở vận tốc điều chỉnh khoảng 0,430 m/s.

Đối với cấu hình 24 V, 12 rãnh–8 cực, hiệu suất lớn nhất trong các điểm khảo sát là 91,61% tại 1408,88 rpm. Với tỷ số truyền khoảng 25,525, tốc độ khảo sát 1396,53 rpm tương ứng vận tốc quy đổi khoảng 0,43 m/s. Từ đặc tính động cơ, công suất trục và hiệu suất tại tốc độ này được ước tính lần lượt là 29,5 W và 91,5%; công suất khả dụng cao hơn yêu cầu lớn nhất khoảng 13%. Kết quả là cơ sở đề xuất vận tốc điều chỉnh phù hợp với khả năng cung cấp momen và công suất của cấu hình khảo sát; chưa khẳng định vận tốc toàn xe đã được kiểm chứng bằng mô phỏng động lực học.

Ở chế độ khảo sát của dạng sóng momen, hệ số nhấp nhô khoảng 64,1%, cho thấy momen điện từ còn dao động đáng kể. Bản đồ mật độ từ thông cho thấy các vùng tập trung từ thông cục bộ ở đầu răng stator. Các kết quả này cung cấp cơ sở để xem xét điều chỉnh thiết kế và điều khiển nhằm cải thiện chất lượng momen của động cơ.

Nghiên cứu lượng hóa mối liên hệ giữa yêu cầu sức kéo AGV, đặc tính động cơ và tỷ số truyền, hỗ trợ lựa chọn sơ bộ cấu hình truyền động phù hợp. Các nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung giảm nhấp nhô momen, hoàn thiện điều khiển và thực nghiệm kiểm chứng khả năng đáp ứng tải, phát nhiệt và chế độ làm việc liên tục của hệ truyền động.

Tuyên bố về việc sử dụng AI tạo sinh

Trong quá trình chuẩn bị bài báo này, các tác giả đã sử dụng ChatGPT (OpenAI) nhằm cải thiện khả năng đọc hiểu và diễn đạt ngôn ngữ của bản thảo. Sau khi sử dụng công cụ này, các tác giả đã rà soát và chỉnh sửa nội dung khi cần thiết, đồng thời chịu hoàn toàn trách nhiệm về nội dung của bài báo được công bố.

Tài liệu tham khảo

- [1] Z. Zhang, J. Chen, Q. Guo. (2022). Application of Automated Guided Vehicles in Smart Automated Warehouse Systems: A Survey. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 134(3), 1529–1563. <https://doi.org/10.32604/cmes.2022.021451>
- [2] T. Le-Anh, M.B.M. De Koster. (2006). A review of design and control of automated guided vehicle systems. *European Journal of Operational Research*, 171(1), 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.01.036>
- [3] M. Meißner, L. Massalski. (2020). Modeling the electrical power and energy consumption of automated guided vehicles to improve the energy efficiency of production systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(1–2), 481–498. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05796-8>
- [4] J. Pyrhönen, T. Jokinen, V. Hrabovcová. (2013). *Design of Rotating Electrical Machines* (2nd

- ed.), Wiley, Hoboken, NJ, USA. <https://doi.org/10.1002/9781118701591>.
- [5] J.F. Gieras. (2009). Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications (3rd ed.), CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- [6] R. Krishnan. (2010). Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives, CRC Press. Boca Raton, FL, USA. <https://doi.org/10.1201/9781420014235>
- [7] J. Fang, X. Zhou, G. Liu. (2012). Instantaneous torque control of small inductance brushless DC motor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(12), 4952–4964. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2193420>
- [8] Z. Li, X. Fan, Q. Kong, J. Liu, S. Zhang. (2024). Torque ripple suppression of BLDCM with optimal duty cycle and switch state by FCS-MPC. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 5, 381–391. <https://doi.org/10.1109/OJPEL.2024.3368221>
- [9] X. Sa, H. Wu, G. Zhao, Z. Zhao. (2025). Torque ripple reduction in BLDC motors using phase current integration and enhanced zero vector DTC. *Electronics*, 14(15), 2999. <https://doi.org/10.3390/electronics14152999>
- [10] D.B. Minh, V.D. Quoc, P.N. Huy. (2021). Efficiency Improvement of Permanent Magnet BLDC Motors for Electric Vehicles. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 11(5), 7615–7618. <https://doi.org/10.48084/etasr.4367>
- [11] Y. Park, H. Kim, H. Jang, S.-H. Ham, J. Lee, D.-H. Jung. (2020). Efficiency improvement of permanent magnet BLDC with Halbach magnet array for drone. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 30(4), 1–5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2971672>
- [12] R. Islam, I. Husain, A. Fardoun, K. McLaughlin. (2009). Permanent-magnet synchronous motor magnet designs with skewing for torque ripple and cogging torque reduction. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(1), 152–160. <https://doi.org/10.1109/TIA.2008.2009653>
- [13] ANSYS, Inc (2024). Getting Started with RMXprt Ansys Electromagnetics Suite 2024 R2 Help. <https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/Electronics/v242/en/Subsystems/Maxwell/Content/GettingStartedwithRMXprt.htm>. (truy cập ngày 23/01/2026)