

# PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG GIỮA DÂY QUẤN STATOR VÀ MẬT ĐỘ TỪ THÔNG ĐẾN ĐIỂM LÀM VIỆC CỦA NAM CHÂM TRONG QUÁ TRÌNH QUÁ ĐỘ

ANALYSIS OF THE EFFECT BETWEEN THE STATOR WINDING AND THE MAGNET'S MAGNETIC FIELD DENSITY ON THE WORKING POINT DURING THE TRANSITION

Nguyễn Việt Anh<sup>1</sup>, Nguyễn Mạnh Dũng<sup>2</sup>, Phạm Hùng Phi<sup>2</sup>,  
 Triệu Việt Linh<sup>2</sup>, Phùng Anh Tuấn<sup>2,\*</sup>, Nguyễn Vũ Thanh<sup>2</sup>

## TÓM TẮT

Trong bài báo này, các đặc tính điện từ động cơ một chiều không chổi than rotor ngoài được phân tích và mô hình hóa. Mật độ từ thông tại điểm làm việc của nam châm có ảnh hưởng đáng kể khi tương tác trực tiếp với dòng điện phần ứng để tạo ra mô-men xoắn. Mật độ từ thông tại điểm làm việc được phân tích theo đặc tính vật liệu từ tính và số lượng thanh dẫn trong dây quấn stator động cơ. Cả hai yếu tố đều là những đại lượng cần thiết để dự đoán chính xác sự phân bố từ thông và mô-men khi bị khử từ. Các tác giả tập trung phân tích mật độ từ thông nam châm tại điểm làm việc để hạn chế nguy cơ khử từ hoàn toàn dẫn đến hư hỏng nam châm. Phương pháp phân tích phần tử hữu hạn (FEM) được sử dụng để xác minh mô hình phân tích. Kết quả thu được là yếu tố then chốt trong việc thiết kế, lựa chọn tối ưu nam châm.

**Từ khóa:** Động cơ một chiều không chổi than, mật độ từ thông tại điểm làm việc của nam châm, thanh dẫn, vật liệu từ cứng, khử từ.

## ABSTRACT

In this paper, the electromagnetic properties of external rotor permanent magnet motors are analyzed and modeled. The magnetic flux density at the magnet's working point has a significant effect when interacting directly with the armature current to produce torque. It is analyzed according to magnetic material properties and number of conductors in the motor stator windings. Both factors are required to accurately predict the magnetic flux and moment distribution when demagnetized. The author focuses on analyzing the magnetic flux density at the working point to limit the risk of complete demagnetization leading to motor damage. Finite element analysis (FEM) method is used to verify the analytical model. The obtained results are a key factor in optimal magnet design.

**Keywords:** Brushless direct current motor, the magnetic flux density at the magnet's working point, conductor, hard magnetic materials, demagnetization.

<sup>1</sup>Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

<sup>2</sup>Viện Điện, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

\*Email: tuan.phunganh1@hust.edu.vn

Ngày nhận bài: 01/12/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 20/01/2021

Ngày chấp nhận đăng: 26/02/2021

## KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$\Phi_m$	Wb	Nguồn dòng quy đổi từ thông của nam châm
$\mathcal{R}_{vr}$	1/H	Từ trở phần gông rotor
$\mathcal{R}_{vs}$	1/H	Từ trở gông stator
$\mathcal{R}_m$	1/H	Từ trở của nam châm vĩnh cửu
$\mathcal{R}_g$	1/H	Từ trở khe hở không khí
$\mathcal{R}_f$	1/H	Từ trở do từ thông tản móc vòng giữa hai nam châm, không đi qua cực stator
$\mathcal{R}_{ps}$	1/H	Từ trở cực từ stator
$F_s$	A.vòng	Sức từ động của dây quấn stator
$T_s$	Thanh	Số thanh dẫn trong một rãnh
$d$	mm	Đường kính dây dẫn
UCLN	-	Ước số chung lớn nhất
BLDC	-	Brushless DC Motor - Động cơ một chiều không chổi than.

## 1. GIỚI THIỆU

Những năm gần đây động cơ nam châm vĩnh cửu đã phát triển mạnh mẽ và ứng dụng trong ngành công nghiệp cũng như các thiết bị gia dụng [1,2]. Một trong những vấn đề mà loại động cơ nam châm vĩnh cửu này có liên quan đến sự khử từ gây ra bởi các điều kiện như từ trường mạnh, nhiệt độ làm việc cao, ứng suất cơ học cao hoặc sự kết hợp của các yếu tố lại với nhau [3,4]. Hiện tượng này ảnh hưởng đến các đặc tính hoạt động của động cơ như mật độ công suất, mô-men đầu ra và nó cũng làm tăng mô-men đập mạch [3-6]. Phương pháp thiết kế động cơ BLDC hiện nay chỉ tập trung tại điểm làm việc định mức. Vì vậy các tài liệu thiết kế thường bỏ qua phân tích ảnh hưởng của phản ứng phần ứng. Một số nghiên cứu đã được thực hiện để xem xét hiện tượng này bao gồm việc sử dụng một mạch từ tương

đương và tính toán từ trở [7, 8], phân tích sử dụng phương trình Poisson và các điều kiện biên [9] hay sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn [10-12].

Bài báo này hướng tới việc phân tích ảnh hưởng của dây quấn stator đến hiện tượng phản ứng phản ứng trong quá trình quá độ ở động cơ BLDC. Trong giai đoạn quá độ, nhóm tác giả xem xét đến phản ứng phản ứng để đề phòng khả năng bị khử từ hoàn toàn khi khởi động dẫn đến việc hư hỏng động cơ. Phản ứng phản ứng chịu tác động lớn bởi dòng điện stator. Bởi vậy quá trình tính chọn dây quấn stator có ý nghĩa rất quan trọng.

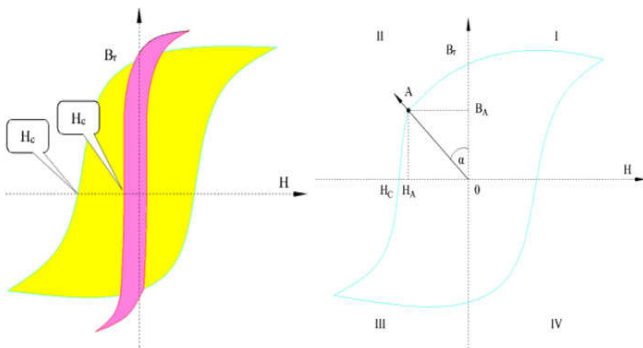
Xét động cơ BLDC 12/16 với các thông số chi tiết trong bảng 1. Các tác giả đã thực hiện mô hình hóa, tính toán giải tích để xác định từ thông tại điểm làm việc nam châm. Lý thuyết đưa ra được kiểm chứng bằng phần mềm Ansys Maxwell. Với giả thiết kích thước rãnh không thay đổi, đường cong khử từ nam châm có dạng tuyến tính, khe hở không khí đồng đều.

**2. PHÂN TÍCH ĐẶC TÍNH NAM CHÂM**

**2.1. Nam châm vĩnh cửu - vật liệu từ cứng**

Vật liệu từ cứng còn được gọi là nam châm vĩnh cửu do có giá trị lực kháng từ lớn, thể hiện việc loại bỏ từ dư rất khó (tính vĩnh cửu của từ dư lớn).

Khi phân tích các tính chất của nam châm trong phạm vi máy điện, ta tập trung khai thác các tính chất của nam châm tại góc phần tư thứ II (hình 1). Ta gọi đường cong từ trễ tại vị trí góc phần tư này là đường cong khử từ.



Hình 1. Đồ thị đường cong đặc tính B-H của vật liệu từ [14]

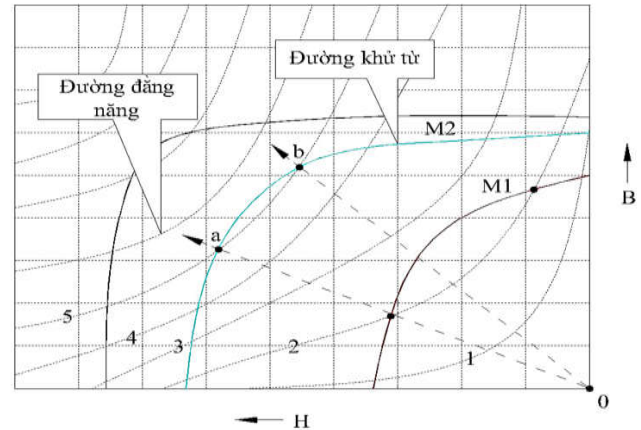
**2.2. Tích năng lượng (BH) của nam châm**

Mật độ năng lượng của nam châm trong một đơn vị thể tích được xác định bằng diện tích giới hạn bởi đường cong từ hóa (có đơn vị J/m<sup>3</sup>) và bằng:

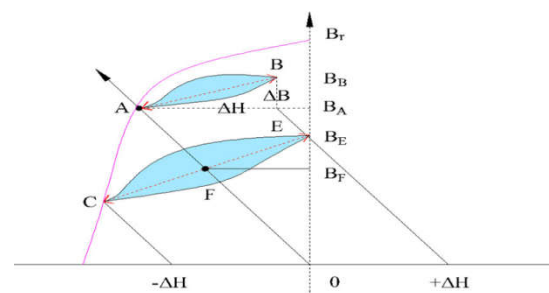
$$W = \int HdB = \mu_0 \int HdH = \mu_0 \cdot \frac{H^2}{2} = \frac{BH}{2} \quad (1)$$

Mỗi điểm trên đường cong khử từ (hình 2) đều cho một cặp giá trị (BH) tương ứng. Điểm cho B = B<sub>r</sub> thì H = 0; điểm cho H = H<sub>c</sub> thì B = 0. Có một điểm trên đường cong khử từ cho tích năng lượng cực đại (BH) = (BH)<sub>max</sub>. Khi thiết kế kích thước nam châm, ta có thể thay đổi độ dày nam châm w<sub>mv</sub> hệ số phủ nam châm α để thay đổi đến điểm làm việc mong muốn [13]. Trong quá trình vận hành động cơ, dưới ảnh hưởng của phản ứng phản ứng, nam châm có thể bị

khử từ xuống giá trị từ trường tại điểm làm việc nhỏ hơn 0. Khi đó, nam châm bị mất từ tính hoàn toàn và phải được nạp từ lại nếu muốn tiếp tục sử dụng. Do vậy, nếu điểm cho tích năng lượng (BH)<sub>max</sub> có B<sub>max</sub> quá nhỏ thì ta cần chọn điểm làm việc để B cao hơn. Khi đó, ta chấp nhận nhược điểm tích năng lượng nhỏ đi.



Hình 2. Họ các đường đẳng năng (BH)= constant trên góc phần tư thứ II [14]



Hình 3. Ảnh hưởng từ trường ngoài lên điểm làm việc nam châm [14]

Hình 2 trình bày họ các đường đẳng năng, là tập hợp nhiều đường cong mà các điểm trên đó cho tích (BH) bằng hằng số. Hai nam châm M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> với hai đường cong khử từ tương ứng, có thể thấy rằng với cùng giá trị mật độ từ thông thì nam châm M<sub>2</sub> có tích năng lượng (BH) lớn hơn nam châm M<sub>1</sub>. Trên đường cong khử từ của nam châm M<sub>2</sub>, xét hai điểm làm việc a, b thuộc cùng một đường đẳng năng. Do đó kích thước nam châm sẽ khác nhau để có thể tạo ra được hai điểm làm việc a, b tương ứng. Tuy nhiên, để thu được mật độ từ thông tại điểm làm việc cao (có lợi cho động cơ) thì ta có thể lựa chọn điểm làm việc b để thiết kế kích thước nam châm.

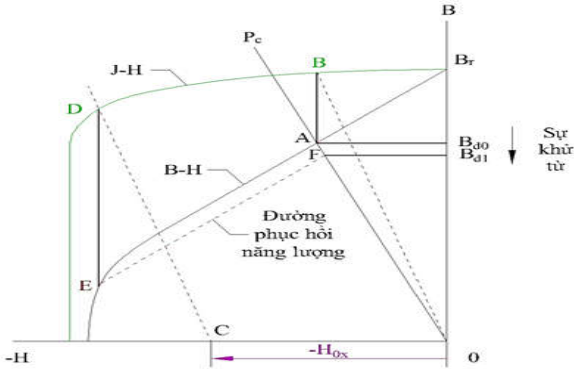
**2.3. Đường phục hồi của nam châm**

Trong điều kiện vận hành, nam châm bị tác động bởi từ trường ngoài (đối với máy điện là phản ứng phản ứng) do vậy điểm làm việc của nam châm bị thay đổi (hình 3).

Về mặt tuyệt đối, đường cong khử từ và đường cong phục hồi của nam châm khi chịu tác động từ trường ngoài sẽ không trùng nhau. Coi phản ứng phản ứng trong máy điện là quá trình đặt vào nam châm một từ trường xoay chiều ±ΔH. Khi đặt từ trường +ΔH, một đường cong từ trễ bắt đầu từ A lên đến B. Sau khi loại bỏ +ΔH thì điểm B trở về điểm A. Quá trình này diễn ra thuận nghịch. Khi đặt từ

trường  $-\Delta H$ , điểm làm việc mới ở C và sẽ trở về vị trí mới là điểm F khi loại bỏ từ trường  $-\Delta H$ . Quá trình này diễn ra không thuận nghịch.

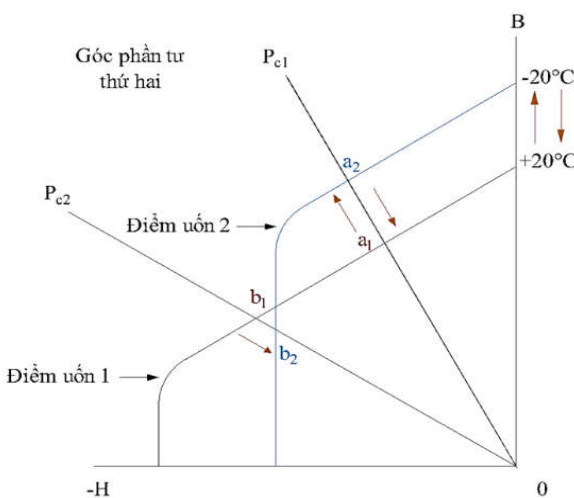
Do vậy, khi đặt vào từ trường xoay chiều  $\pm \Delta H$ , điểm làm việc ổn định mới của nam châm là điểm F (hình 4).



Hình 4. Đường cong khử từ của nam châm ferite [14]

Với nam châm ferite (nam châm được sử dụng trong bài báo) có đường cong phục hồi năng lượng rất gần với đường cong khử từ nên ta có thể bỏ qua sự suy giảm từ trường tại điểm làm việc trong tính toán mạch từ tương đương.

Ngoài ra nam châm còn bị ảnh hưởng khi nhiệt độ thay đổi, cảm ứng từ có thể thay đổi rất mạnh. Nhiệt độ tăng, từ dư nam châm giảm xuống và có nguy cơ giảm về 0 khi chịu tác động của từ trường ngoài (hình 5).



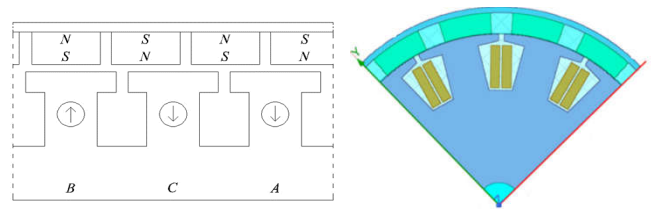
Hình 5. Đường cong khử từ nam châm ferite theo nhiệt độ [14]

### 3. TÍNH TOÁN THÔNG SỐ MẠCH TỪ ĐỘNG CƠ TRONG PHẢN ỨNG PHẦN ỨNG

#### 3.1. Xây dựng sơ đồ trái 1/4 động cơ 12 rãnh, 16 cực

Do tính đối xứng trong máy điện nên các cấu trúc hình học của động cơ BLDC sẽ được lập lại theo số lần nhất định. Điều này phụ thuộc vào số cực rotor  $N_r$  và số rãnh stator  $N_s$ . Khi triển khai mạch từ tương đương của động cơ, ta chỉ cần phân tích trên một phần, các phần còn lại có tính chất tương tự. Số phần được chia ra có thể xác định theo công thức:

$$n_d = \text{UCLN}(N_s, N_r) \tag{2}$$



Hình 6. Sơ đồ trái 1/4 động cơ BLDC 12 rãnh, 16 cực

Trên đường cong khử từ của nam châm, ta chỉ xét nam châm làm việc trong phạm vi tuyến tính. Khi đó, phương trình đường thẳng  $B = f(H)$ :

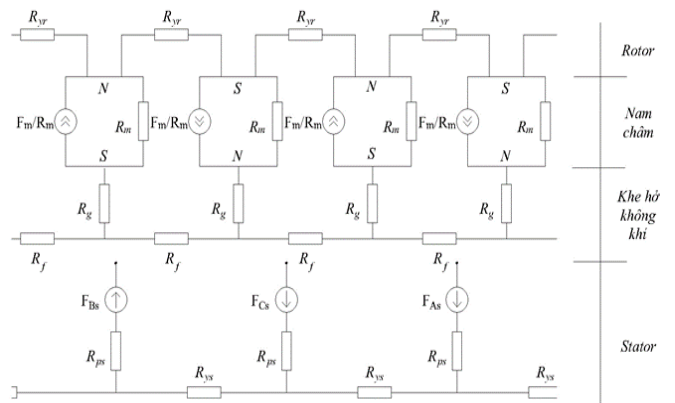
$$B_m = B_r - \frac{dB}{dH} \cdot H_m = B_r - \mu \mu_0 \cdot H_m \tag{3}$$

Phương trình liên hệ giữa từ thông và sức từ động  $\phi = g(F)$ :

$$\phi_m = \phi_r - \frac{\mu \mu_0 \cdot A_m}{W_m} \cdot F_m = \phi_r - \frac{F_m}{\mathfrak{R}_m} \tag{4}$$

Với sự tương đồng giữa mạch điện và mạch từ trong việc giải mạch, từ phương trình (4) ta có thể coi nam châm vĩnh cửu là một nguồn dòng  $\phi_m$  mắc song song với từ trở  $\mathfrak{R}_m$ .

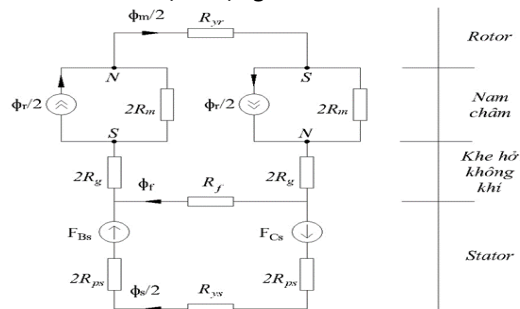
Quy đổi tương đương từ hình 6 sang mạch từ để tính toán, ta thu được sơ đồ mạch như hình 7.



Hình 7. Sơ đồ mạch từ tương đương của động cơ 12/16

Tại một thời điểm bất kỳ, động cơ BLDC ba pha luôn chỉ có hai pha dẫn. Do vậy, ta có thể đơn giản hóa sơ đồ mạch từ như hình 8.

Trường hợp trên là mô hình thể hiện cho hiện tượng trợ từ của phản ứng phần ứng đến từ trường của nam châm. Tương tự khi đảo chiều của nguồn sức từ động  $F_s$  ta thu được mô hình cho hiện tượng khử từ.



Hình 8. Sơ đồ mạch tương đương rút gọn có tính đến phản ứng phần ứng

**3.2. Xác định điểm làm việc của nam châm**

Áp dụng định luật Kirchhoff cho sơ đồ trên, ta thu được ba phương trình:

$$\frac{\Phi_r}{2} \cdot 2\mathfrak{R}_m + \frac{\Phi_r}{2} \cdot 2\mathfrak{R}_m = \frac{\Phi_m}{2} (4\mathfrak{R}_m + 4\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{yr}) + \Phi_f \cdot \mathfrak{R}_f \tag{5}$$

$$F_s + F_s = \frac{\Phi_s}{2} (4\mathfrak{R}_{ps} + \mathfrak{R}_{ys}) - \Phi_f \cdot \mathfrak{R}_f \tag{6}$$

$$\Phi_m = \Phi_s + \Phi_f \tag{7}$$

Giải ba phương trình (5, 6, 7) ta có nghiệm  $\Phi_m, \Phi_s, \Phi_f$ . Trong đó:

$$\Phi_m = \frac{\frac{\Phi_r \cdot 4\mathfrak{R}_m}{4\mathfrak{R}_{ps} + \mathfrak{R}_{ys}} + \frac{\Phi_r \cdot 4\mathfrak{R}_m}{2\mathfrak{R}_f} \pm \frac{4F_s}{4\mathfrak{R}_{ps} + \mathfrak{R}_{ys}}}{\frac{4\mathfrak{R}_m + 4\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{yr}}{4\mathfrak{R}_{ps} + \mathfrak{R}_{ys}} + \frac{4\mathfrak{R}_m + 4\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{yr} + 2\mathfrak{R}_f}{2\mathfrak{R}_f}} \tag{8}$$

Dấu (+) ứng với trường hợp trợ từ và dấu (-) ứng với trường hợp khử từ.

Với phản ứng phần ứng trợ từ, vì  $\Phi_f$  nhỏ hơn nhiều  $\Phi_s$  ( $\mathfrak{R}_f$  rất lớn) nên phương trình (8) trở thành:

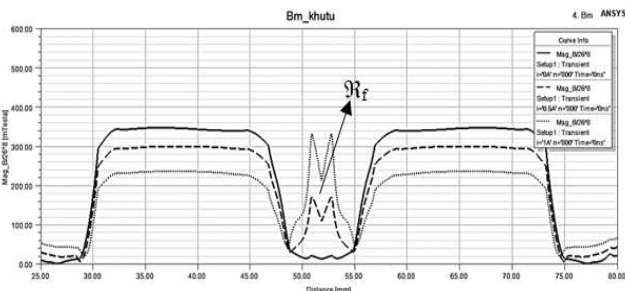
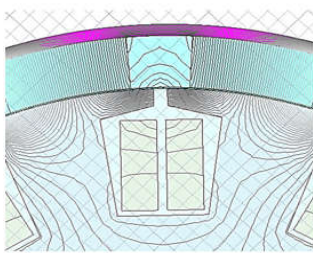
$$\Phi_m = \frac{\Phi_r \cdot 4\mathfrak{R}_m + 4F_s}{4\mathfrak{R}_m + 4\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{yr}} \tag{9}$$

Khi không xét đến phản ứng phần ứng, phương trình (9) trở thành:

$$\Phi_m = \frac{\Phi_r \cdot 4\mathfrak{R}_m}{4\mathfrak{R}_m + 4\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{yr}} \tag{10}$$

Với phản ứng phần ứng khử từ, giá trị từ thông  $\Phi_r$  tăng dần lên và mức độ tăng sẽ tỷ lệ thuận với mức độ khử từ. Khi đó phương trình (8) sẽ trở thành:

$$\Phi_m = \frac{\frac{\Phi_r \cdot 4\mathfrak{R}_m}{4\mathfrak{R}_{ps} + \mathfrak{R}_{ys}} + \frac{\Phi_r \cdot 4\mathfrak{R}_m}{2\mathfrak{R}_f} - \frac{4F_s}{4\mathfrak{R}_{ps} + \mathfrak{R}_{ys}}}{\frac{4\mathfrak{R}_m + 4\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{yr}}{4\mathfrak{R}_{ps} + \mathfrak{R}_{ys}} + \frac{4\mathfrak{R}_m + 4\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_{yr} + 2\mathfrak{R}_f}{2\mathfrak{R}_f}} \tag{11}$$



Hình 9. Dòng từ thông và mật độ từ thông tương ứng trong phản ứng phần ứng khử từ

Hình 9 nhận thấy với mức độ khử từ lần lượt:  $I_s = 0A; 0,5A; 1A$  thì mật độ từ thông tại vị trí  $\mathfrak{R}_f$  tăng tương ứng với giá trị dòng điện. Trong khi đó mật độ từ thông tại điểm làm việc của nam châm giảm. Điều này một lần nữa khẳng định ảnh hưởng của dòng điện đến phản ứng phần ứng khử từ là đáng kể.

Phương trình cân bằng điện áp của động cơ một chiều nam châm vĩnh cửu có dạng:

$$\vec{U} = \vec{E}_0 + j \cdot \vec{I}_s \cdot 2\pi \cdot f \cdot L + \vec{I}_s \cdot R_s \tag{12}$$

Xét trong thời điểm khởi động, khi đó tốc độ quay bằng không.

$$I_s = \frac{U}{R_s} = \frac{U}{\frac{\rho \cdot l}{s}} = \frac{U \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}}{\rho \cdot l_{tb} \cdot 2 \cdot T_s} = \frac{U \cdot \pi}{8 \cdot \rho \cdot l_{tb}} \cdot \frac{d^2}{T_s} \tag{13}$$

Sức từ động xác định bằng biểu thức:

$$F_s = I_s \cdot \frac{T_s}{2} \tag{14}$$

Như vậy khi xét phản ứng phần ứng trong quá trình quá độ, ta đã xây dựng được hàm liên hệ giữa từ thông tại điểm làm việc nam châm với số thanh dẫn dưới một cực stator, vật liệu thép kỹ thuật điện:  $\Phi_m(T_s, \mathfrak{R})$ .

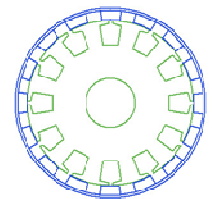
**4. TRIỂN KHAI TÍNH TOÁN BẰNG PHƯƠNG PHÁP SỐ**

**4.1. Thông số mô phỏng**

Các số liệu cần thực hiện trong mô phỏng tra theo bảng 1.

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	$T_s$	-
Đường kính dây dẫn	0,25	mm
Kiểu đầu dây	Y	-
Điện áp DC	127	V
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	26	mm
Độ dày nam châm	8,25	mm
Mật độ từ dư	0,39	T
Độ từ thẩm tương đối	1,1	-
Hệ số điện đầy rãnh	0,4	-



Với điều kiện kích thước rãnh không thay đổi (hệ số điện đầy rãnh giữ nguyên). Khi số lượng thanh dẫn dưới một cực từ thay đổi thì đường kính dây sẽ phải thay đổi tương ứng. Cụ thể theo phương trình:

$$d^2 \cdot T_s = \text{const} \tag{15}$$



Từ ba phương trình (13, 14, 15) ta thấy khi tăng số thanh dẫn  $T_s$  lên  $k$  lần thì dòng điện  $I_s$  giảm xuống  $k^2$  tương ứng và ngược lại.

**4.2. Khảo sát số thanh dẫn trong một rãnh stator**

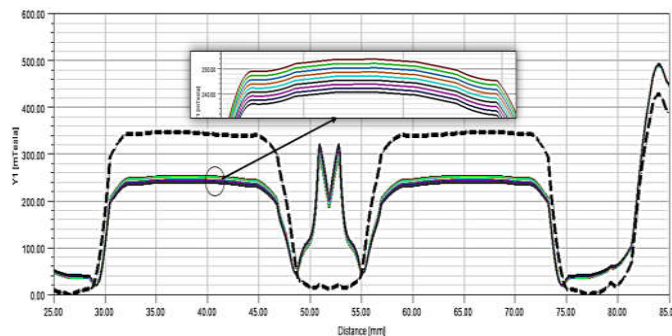
Từ những phân tích ở trên, có thể lựa chọn khoảng thiết kế số lượng thanh dẫn như bảng 2.

Bảng 2. Số lượng thanh dẫn khảo sát

Thông số	Ký hiệu	Khoảng giá trị	Bước khảo sát	Đơn vị
Số thanh dẫn	$T_s$	1600 - 2000	50	-
Đường kính dây	$d$	0,31 - 0,16	0,0075	mm

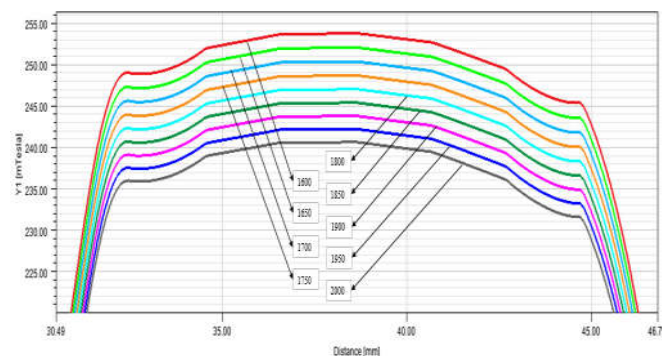
Sử dụng nguồn xoay chiều ba pha cấp điện cho động cơ. Do sự đảo chiều liên tục của dòng điện dẫn đến sự đảo chiều liên tục của  $F_s$  ở công thức (8). Nên trong động cơ luôn tồn tại phản ứng phản ứng trợ từ và khử từ.

Bằng cách sử dụng phần mềm phần tử hữu hạn để mô phỏng động cơ BLDC trên, có thể quan sát ảnh hưởng khi thay đổi  $T_s$  đến thông số  $B_m$ .



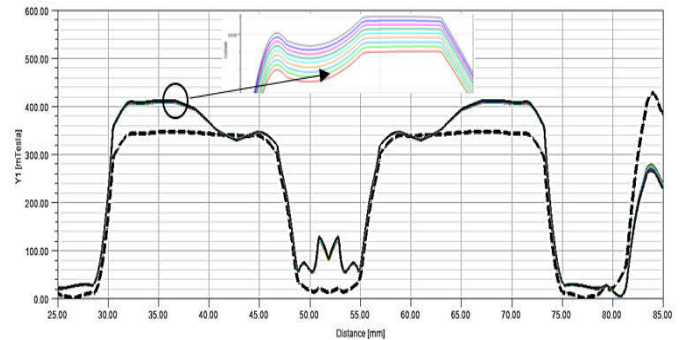
Hình 10. Mật độ từ thông tại điểm làm việc của nam châm theo thông số khảo sát tại bảng 2 (---: Bỏ qua phản ứng phản ứng; —: Có xét đến phản ứng phản ứng khử từ)

Khi chưa xét đến phản ứng phản ứng thì mật độ từ thông đạt giá trị cao. Với nam châm có độ dày càng lớn thì giá trị này càng tiến gần đến  $B_r$  (0,39 T). Điều này hoàn toàn phù hợp với công thức (10).

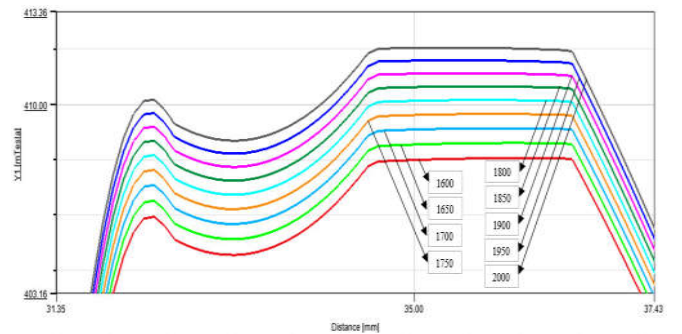


Hình 11. Mật độ từ thông tại điểm làm việc tương ứng thông số khảo sát tại bảng 2 (xét đến phản ứng phản ứng khử từ)

Khi xét đến phản ứng phản ứng khử từ thì mật độ từ thông lúc này sẽ giảm xuống. Mức độ suy giảm càng mạnh mẽ khi số lượng thanh dẫn tăng. Điều này phù hợp với công thức (11).

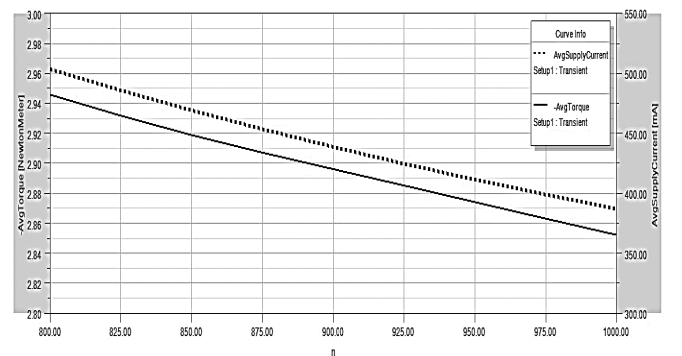


Hình 12. Mật độ từ thông tại điểm làm việc của Nam châm theo thông số khảo sát tại bảng 2 (---: Bỏ qua phản ứng phản ứng; —: Có xét đến phản ứng phản ứng trợ từ)

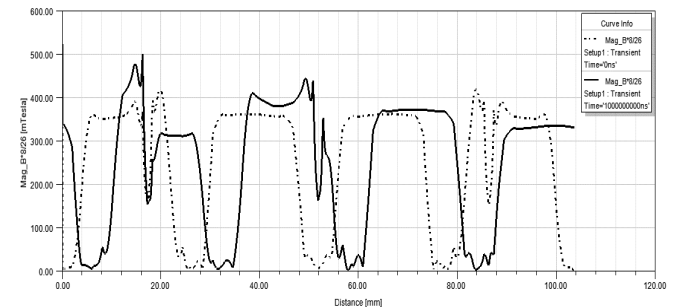


Hình 13. Mật độ từ thông tại điểm làm việc tương ứng thông số khảo sát tại bảng 2 (xét đến phản ứng trợ từ)

Khi xét đến phản ứng phản ứng trợ từ thì mật độ từ thông lúc này sẽ tăng lên. Mức độ gia tăng càng mạnh mẽ khi số lượng thanh dẫn tăng. Điều này phù hợp với công thức (9).

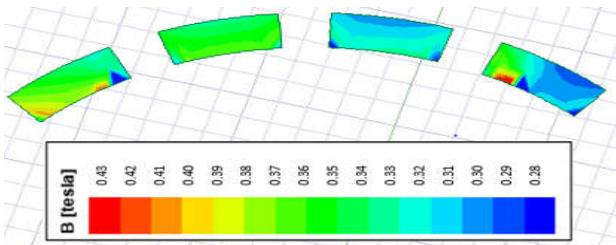


Hình 14. Đặc tính dòng điện và mô-men khởi động theo thông số khảo sát tại bảng 2

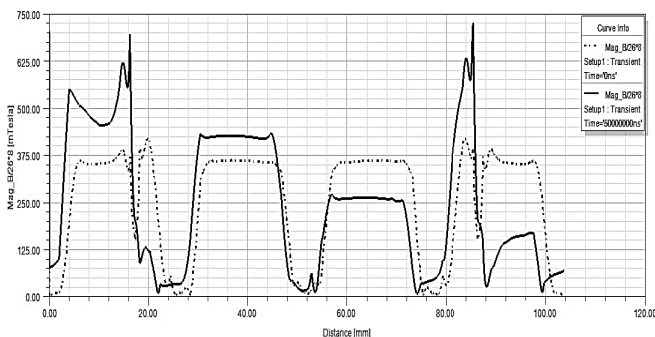


Hình 15. Mật độ từ thông tại điểm làm việc nam châm ở chế độ xác lập (---: Bỏ qua phản ứng phản ứng; —: Có xét đến phản ứng phản ứng)

Hình 14 cho ta thấy dòng điện khởi động và mô-men khởi động giảm dần theo chiều tăng của số thanh dẫn. Việc lựa chọn số thanh dẫn sẽ được ràng buộc tương ứng với nhiệt độ phát nóng và công suất của động cơ. Với ưu tiên hạn chế nguy cơ bị khử từ hoàn toàn của nam châm ta sẽ chọn số thanh dẫn/ rãnh là  $T_s = 1600$ . Kết quả mô phỏng tại hình 15, 16, 17 sẽ kiểm chứng thông số này.



Hình 16. Phân bố mật độ từ thông tại điểm làm việc nam châm ở chế độ xác lập



Hình 17. Mật độ từ thông tại điểm làm việc nam châm ở chế độ quá độ (---: Bỏ qua phản ứng phần ứng; —: Có xét đến phản ứng phần ứng)

Kết quả mô phỏng sự khử từ và trợ tự ở hai chế độ quá độ, xác lập cho thấy rằng độ suy giảm và gia tăng từ thông không đáng ngại đến mức nam châm bị khử từ hoàn toàn. Do vậy, cấu trúc động cơ thiết kế có thể chấp nhận được.

### 5. KẾT LUẬN

Phương pháp phân tích mạch từ tương đương và FEM để khảo sát hiện tượng khử từ và trợ từ trong quá trình quá độ là một cách tiếp cận hiệu quả. Bài báo đã chỉ ra ảnh hưởng của dây quấn đến phản ứng phần ứng trợ từ và khử từ. Sự ảnh hưởng này tác động không lớn trong quá trình xác lập của động cơ nhưng càng đáng kể đến quá trình khởi động. Vì vậy, yêu cầu tính toán, phân tích là cần thiết để đảm bảo động cơ hoạt động tin cậy.

Các kết quả mô phỏng đưa ra giá trị phù hợp với các công thức giải tích đã dẫn dắt. Theo đó, mức độ ảnh hưởng của phản ứng phần ứng trợ từ và khử từ sẽ làm cho mật độ từ thông tại điểm làm việc nam châm gia tăng và suy giảm tương ứng. Ảnh hưởng này tỷ lệ thuận với số vòng dây quấn và rất đáng kể trong quá trình khởi động máy (do dòng điện khởi động cao).

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. G. Choi, T. M. Jahns, 2014. *Demagnetization characteristics of permanent magnet synchronous machines*. IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Dallas, TX, pp. 469–475, 2014.

[2]. V. I. Patel, J. Wang, S. S. Nair, 2015. *Demagnetization Assessment of Fractional-Slot and Distributed Wound 6-Phase Permanent Magnet Machines*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 51, No. 6, pp. 1–11, Jun. 2015.

[3]. K. S. Kim, K. S. Kim, B. H. Lee, B. H. Lee, 2017. *Design of concentrated flux synchronous motor to prevent irreversible demagnetization*. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, FL, USA, pp. 1–6.

[4]. J. R. Riba Ruiz, J. A. Rosero, A. Garcia Espinosa, L. Romeral, 2009. *Detection of Demagnetization Faults in Permanent-Magnet Synchronous Motors Under Nonstationary Conditions*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, No. 7, pp. 2961–2969.

[5]. H. K. Kim, J. Hur, 2017. *Dynamic Characteristic Analysis of Irreversible Demagnetization in SP Mand IPM-Type BLDC Motors*. IEEE Transactionson Industry Applications, Vol. 53, No. 2, pp. 982–990, 2017.

[6]. D. H. Kang, H. K. Kim, J. Hur, 2015. *Irreversible demagnetization diagnosis of IPM-type BLDC motor using BEMF harmonic characteristics basedon space harmonics*. IEEE Energy ConversionCongress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, pp. 6956–6961.

[7]. M. Niazazari, M. Mirsalim, S. Mohammadi, 2014. *Analytical framework for analysis and demagnetization study of a slotted solid-rotor linestart permanent-magnet synchronous motor*. The 5th Annual International Power Electronics, DriveSystems, and Technologies Conference (PEDSTC2014), Tehran, pp. 494–499.

[8]. D. Momma, Y. Yoshida, K. Tajima, 2016. *Demagnetization analysis of ferrite magnet motorbased on reluctance network analysis*. 19<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machinesand Systems (ICEMS), Chiba, pp. 1–4.

[9]. J. De Bisschop, P. Sergeant, A. Hemeida, H. Vansompel, L. Dupré, 2017. *Analytical Model for Combined Study of Magnet Demagnetization and Eccentricity Defects in Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machines*. IEEETransactions on Magnetics, Vol. 53, No. 9, pp. 1–12.

[10]. W. N. Fu, S. L. Ho, 2010. *Dynamic Demagnetization Computation of Permanent Magnet Motors Using Finite Element Method With Normal Magnetization Curves*. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 20, No. 3, pp. 851–855.

[11]. J. H. Park, H. K. Kim, S. T. Lee, J. Hur, 2016. *Characteristics of irreversible demagnetization inaccordance with phase advance angle in IPM-typeBLDC motor*. IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), Miami, FL, pp. 1–1.

[12]. K. C. Kim, K. Kim, H. J. Kim, J. Lee, 2009. *Demagnetization Analysis of Permanent Magnets According to Rotor Types of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, No. 6, pp. 2799–2802.

[13]. Nguyễn Việt Anh, Phùng Anh Tuấn, Phạm Hùng Phi, Nguyễn Mạnh Dũng, 2020. *Phân tích tác động của độ mở miệng rãnh và chiều nam châm đến mô-men đập mạch ở động cơ BLDC rotor ngoài ứng dụng trong quân sự*. Tạp chí nghiên cứu KH&CN quân sự, số 70, tháng 12.

[14]. Nguyễn Hoàng Nghi, 2012. *Cơ sở từ học và các vật liệu từ tiên tiến*. NXB Khoa học và kỹ thuật.

### AUTHORS INFORMATION

Nguyen Viet Anh<sup>1</sup>, Nguyen Manh Dung<sup>2</sup>, Pham Hung Phi<sup>2</sup>,  
 Trieu Viet Linh<sup>2</sup>, Phung Anh Tuan<sup>2</sup>, Nguyen Vu Thanh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry

<sup>2</sup>School of Electrical Engineering, Hanoi University of Science and Technology