

MÔ PHỎNG TỪ TRƯỜNG MÁY ĐIỆN MỘT CHIỀU BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

Nguyễn Ngọc Văn¹, Đặng Việt Hùng²

TÓM TẮT

Việc mô phỏng phân bố của từ trường trong máy điện cho phép đánh giá ảnh hưởng của cấu trúc, hình dạng và các thông số vật liệu đến các thông số vận hành. Hiện nay, các chương trình mô phỏng dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method - FEM) là công cụ mạnh, tin cậy và có chi phí thấp, hỗ trợ cho các nhà nghiên cứu, sản xuất trong quá trình thiết kế, đánh giá và cải thiện các đặc tính kỹ thuật của thiết bị. Nội dung bài báo tập trung phân tích, đánh giá ảnh hưởng của từ thông, mật độ từ cảm, sóng hài và mô men trong máy điện một chiều không chổi than (Brushless DC - BLDC) dựa trên kết quả mô phỏng.

Từ khóa: *Phương pháp phần tử hữu hạn, tính toán từ trường, máy điện một chiều không chổi than.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, trong tính toán và thiết kế máy điện, khi cụ điện các nhà sản xuất luôn mong muốn sản phẩm sản xuất ra vận hành tin cậy, tiết kiệm điện năng và có độ bền cao. Để đánh giá hiệu quả hoạt động cũng như ảnh hưởng của các vật liệu khác nhau đến sự làm việc của máy điện thì việc phân tích, làm rõ sự biến đổi của trường điện từ xảy ra bên trong là vấn đề hết sức quan trọng. Giải pháp mô phỏng các hiện tượng điện từ trường trong máy điện bằng phần mềm dựa trên FEM đã được nghiên cứu rộng rãi [1,2,4,5], giải pháp giúp phân tích hiệu quả tác động của cấu trúc, hình dạng và vật liệu từ tới phân bố từ trường trong máy điện. Ở những khu vực có mật độ từ cảm cao như răng, rãnh. Với mục tiêu cải thiện phân bố từ trường ở các khu vực đặc biệt hoặc nghiên cứu ứng dụng vật liệu từ mới, phương án mô phỏng bằng các phần mềm chuyên dụng trở thành một giải pháp nổi bật với chi phí thấp. Các nghiên cứu mô phỏng máy điện thường tập trung vào việc tính toán, phân tích trường điện từ máy điện xoay chiều, một chiều thông thường và chưa có nhiều nghiên cứu đánh giá về sóng hài và mô men. Do vậy, nội dung bài báo sẽ tập trung vào việc phân tích, đánh giá từ trường, đồng thời với các thông số về sóng hài và mô men của máy điện một chiều không chổi than (BLDC). BLDC là loại máy điện một chiều đặc biệt. BLDC làm việc tin cậy, không tạo tia lửa điện, không gây nhiễu và có tuổi thọ cao hơn so với các loại máy điện một chiều thông thường.

^{1,2}Giảng viên khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực Hà Nội

2. NỘI DUNG

2.1. Mô phỏng từ trường máy điện bằng FEM

FEM là phương pháp số cho phép phân tích bên trong đối tượng nghiên cứu và ước lượng chính xác các thông số, sự phân bố điện từ trường như mật độ từ thông trong khe hở không khí hoặc trong bất kỳ bộ phận nào của thiết bị điện. Trên cơ sở các kết quả phân tích về phân bố trong không gian của điện từ trường, có thể xác định các điểm bất lợi về mặt cấu trúc hoặc thiết kế của thiết bị.

Theo FEM, quá trình tính toán mô phỏng từ trường trong máy điện thực hiện như sau:

Rời rạc hóa một mô hình mẫu, tạo ra các phần tử và các nút. Các phần tử được liên kết bởi các nút thành mô hình mẫu hoàn chỉnh.

Dựa trên đặc thù các vật liệu khác nhau của mô hình mẫu, các thông số về vật liệu tương ứng sẽ được xác định cho mỗi phần tử.

Phương trình Maxwell và các điều kiện biên được sử dụng để liên kết tất cả các phần tử với nhau tùy theo cấu trúc bằng việc đơn giản hóa một cách phù hợp, từ đó thiết lập các phương trình phần tử hữu hạn.

Tùy theo các đặc trưng riêng, có thể một phương pháp tính toán chính xác sẽ được lựa chọn để giải quyết các biểu thức từ trường ở các nút không xác định.

Các phương trình Maxwell đối với từ trường:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}; B = \mu_s H; \text{div } \vec{B} = 0 \quad (1)$$

Trong đó: $\vec{H}$ là vector cường độ từ trường,

$\vec{B}$ là vector cảm ứng từ,

μ_s là độ từ thẩm

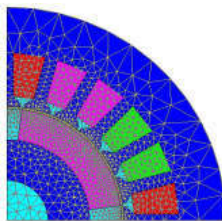
$\vec{J}$ là vector mật độ dòng điện.

$$\text{Mặt khác: } \vec{B} = \text{rot } \vec{A}; \text{div } \vec{A} = 0 \quad (2)$$

Với $\vec{A}$ là từ thế vector.

$$\text{Kết hợp với (1) rút ra: } \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu_s} \frac{\partial A}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{\mu_s} \frac{\partial A}{\partial y} \right] + J = 0 \quad (3)$$

Sử dụng FEM, mô hình được phân tích bằng cách phân chia thành các phần tử tuyến tính dạng tam giác (hình 1). Lưới phần tử được chia nhỏ hơn tại những vị trí quan trọng hay nơi từ trường phân bố tập trung nhằm làm giảm độ phức tạp tính toán và tăng tốc độ tính toán.

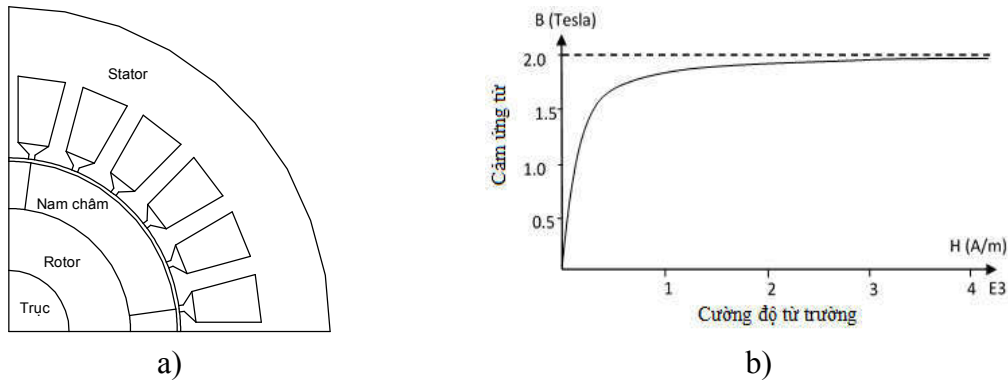


Hình 1. Các lưới phần tử hữu hạn ở động cơ BLDC

2.2. Mô phỏng từ trường máy điện một chiều

2.2.1. Mô hình mô phỏng

Mô hình nghiên cứu là động cơ một chiều không chổi than nam châm vĩnh cửu 3 pha, 4 cực, 24 rãnh. Do tính chất đối xứng của động cơ qua các trục, mô hình hình học 2D được xây dựng trên mặt phẳng cắt ngang chỉ bao gồm $\frac{1}{4}$ động cơ gồm 6 rãnh stator và 1 cực bắc của nam châm (hình 2a). Việc xây dựng mô hình, phân tích và mô phỏng được thực hiện trên phần mềm mô phỏng trường điện từ Flux2D [6].



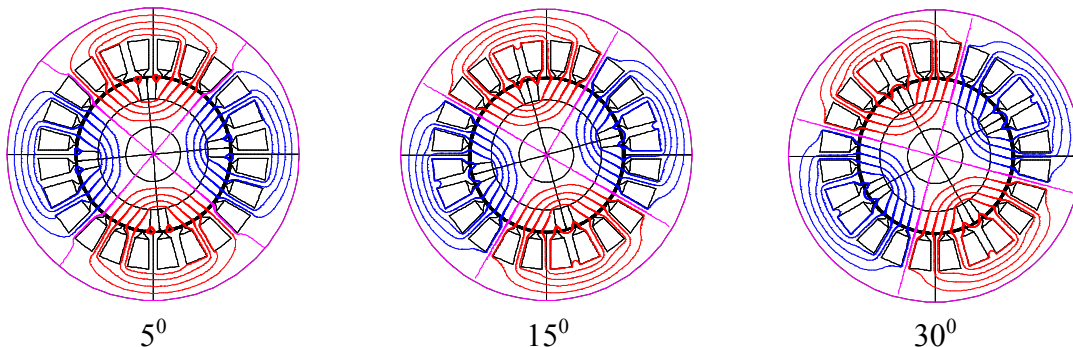
Hình 2. Mô hình mô phỏng (a) và đặc tính $B(H)$ của rotor và stator động cơ BLDC (b)

Trong mô hình mô phỏng, thông số của vật liệu từ như sau: độ từ thẩm nam châm vĩnh $\mu_r = 1.07$, mật độ từ cảm $B = 0.401\text{T}$, độ từ thẩm ban đầu của rotor và stator $\mu = 7500$, mật độ từ cảm bão hòa $B = 1,99\text{T}$ (hình 2b). Bài báo thực hiện mô phỏng và phân tích ảnh hưởng của từ trường nam châm điện đến rotor, stator và khe hở không khí động cơ BLDC với các góc quay khác nhau của rotor.

2.2.2. Kết quả mô phỏng

2.2.2.1 Tính toán phân bố từ thông theo góc Rotor

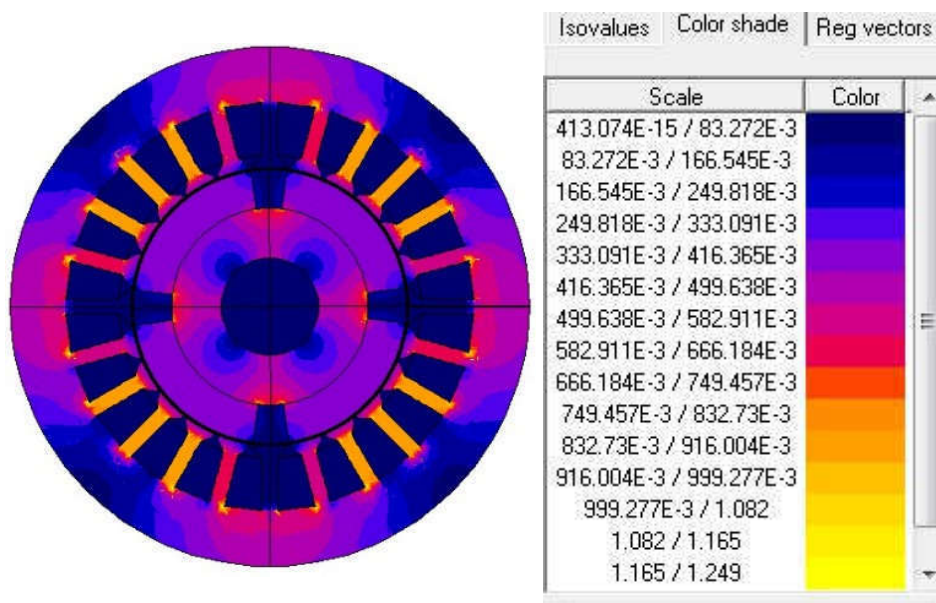
Kết quả mô phỏng cho phép tính toán các giá trị và hiển thị đường phân bố từ thông theo góc quay rotor, ta thấy giá trị lớn nhất từ thông là $2,58.10^{-6}\text{Wb}$ và xuất hiện tại vị trí ở hai rãnh cuộn dây giữa hai cực nam châm (hình 3).



Hình 3. Phân bố từ thông trong các trường hợp khác nhau của góc rotor

2.2.2.2. Phân bố mật độ từ cảm trong động cơ

Kết quả mô phỏng cho phép hiển thị kết quả phân bố dưới dạng màu sắc độ lớn mật độ từ cảm trong toàn bộ mặt cắt của động cơ và trên từng phần tử riêng biệt như rotor hay stator. Giá trị lớn nhất của mật độ từ cảm đạt 1,332T xuất hiện tại vị trí trên thân răng stator đối diện với nam châm rotor (hình 4).

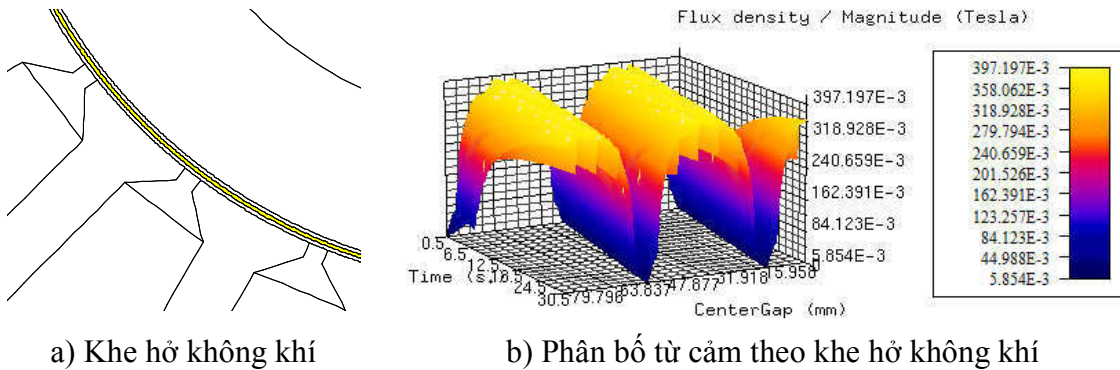


Hình 4. Phân bố từ thông và mật độ từ cảm

Nhận thấy giá trị mật độ từ cảm lớn nhất $B = 1,322T$ xác định điểm làm việc trên đường cong từ hóa của vật liệu từ. Điểm làm việc này nằm trên đoạn tuyến tính của đường cong từ hóa (mật độ từ cảm ứng với đoạn bão hòa của vật liệu từ đang khảo sát là 1,99T) và ở vị trí chuẩn bị bão hòa của vật liệu từ. Việc đẩy cao điểm làm việc sát đoạn bão hòa của đường đặc tính cho phép tận dụng tốt khả năng dẫn từ của vật liệu, dẫn đến kích thước hình học của động cơ và khối lượng vật liệu từ là tối ưu. Như vậy, kết quả mô phỏng ngoài việc cho phép nhà thiết kế xác định phân bố từ trường, mật độ từ cảm, còn cho phép xác định điểm làm việc trên đường cong từ hóa của vật liệu từ. Điều này đóng vai trò quan trọng trong việc tận dụng tối ưu khả năng dẫn từ của vật liệu cũng như tối ưu hóa phương án thiết kế kinh tế, kỹ thuật.

2.2.2.3. Phân bố từ cảm dọc theo khe hở không khí rotor và stator

Kết quả phân bố từ cảm thành phần vuông góc dọc theo khe hở không khí rotor và stator (hình 5a) tại các thời điểm khác nhau khi rotor quay quanh trục cho thấy giá trị mật độ từ cảm thay đổi dọc theo vị trí tương đối rotor và stator, đạt giá trị lớn nhất bằng $397,197.10^{-3} T$. Từ trường khe hở không khí có phân bố dạng hình sin theo không gian. Kết quả mô phỏng cho phép xây dựng trực quan đồ thị phân bố từ cảm dọc theo khe hở không khí (hình 5.b).



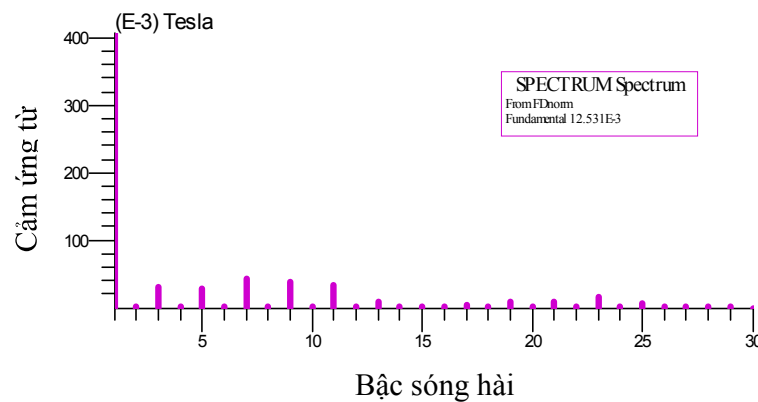
a) Khe hở không khí

b) Phân bố từ cảm theo khe hở không khí

Hình 5. Phân bố cảm ứng từ vuông góc tại khe hở không khí thời điểm $t = 1, 3, 5, 7s$

2.2.2.4. Phân tích thành phần sóng hài

Tính toán mô phỏng cho phép phân tích biên độ các thành phần sóng hài xuất hiện trong quá trình làm việc của động cơ. Xét tại thời điểm $t=1s$, phân tích cho thấy xuất hiện các thành phần sóng hài có biên độ lớn là các sóng hài bậc lẻ 3, 5, 7, 9 và 11 trong đó giá trị lớn nhất là hài bậc 7 (hình 6).

**Hình 6. Phổ sóng hài theo thành phần cảm ứng từ tương ứng tại khe hở không khí**

Từ giá trị phổ sóng hài thu được, có thể xác định độ méo dạng sóng hài (THD) tương ứng theo công thức sau:

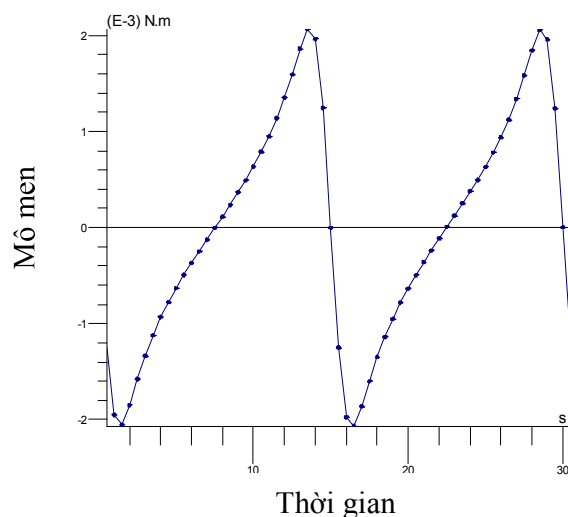
$$THD = 100 \cdot \frac{\sqrt{B_2^2 + B_3^2 + B_4^2 + \dots + B_n^2}}{B_1} \quad (4)$$

Dựa vào phổ sóng hài trên hình 6, độ méo của từ cảm thu được là THD (từ cảm) = 22%. Do sóng hài có thể ảnh hưởng đến các thiết bị khác trong hệ thống điện, nhiều tiêu chuẩn đã được đưa ra để đánh giá mức độ nghiêm trọng của sóng hài. Một trong các tiêu chuẩn này là tiêu chuẩn IEEE 519 của Viện Kỹ thuật Điện - Điện tử [3], tiêu chuẩn căn cứ vào mức độ nhạy cảm của các thiết bị trong một hệ thống điện làm ngưỡng quy định mức sóng hài áp tối đa được cho phép. Do đó, chuẩn IEEE 519 đưa ra các ngưỡng sóng hài khác nhau cho các hệ thống điện khác nhau. Trong trường hợp máy điện nghiên cứu ở trên mức độ méo dạng

sóng hài cho từ cảm thu được từ tính toán mô phỏng (22%) đã vượt ngưỡng cho phép đối với hệ thống công nghiệp (10%).

2.2.2.5. Phân tích mômen trên trục động cơ

Hình 7 thể hiện sự thay đổi của giá trị mômen trên trục động cơ trong khoảng thời gian 30s, giá trị cực đại bằng $2,0188.10^{-3}\text{N.m}$. Việc tính toán chính xác giá trị mômen giúp cho việc tối ưu hóa vấn đề cơ khí khi chế tạo các máy điện.



Hình 7. Mômen trên trục động cơ

3. KẾT LUẬN

Sử dụng phần mềm mô phỏng trường điện từ trên cơ sở FEM cho phép xây dựng mô hình mô phỏng và đánh giá các tham số điện từ trường trong máy điện. Thực hiện mô phỏng trên động cơ BLDC cho thấy phân bố và ảnh hưởng của từ trường nam châm vĩnh cửu đối với trường hợp khác nhau của góc rotor. Kết quả mô phỏng cho thấy giá trị lớn nhất của từ thông xuất hiện tại vị trí ở hai rãnh cuộn dây giữa hai cực nam châm; giá trị lớn nhất của mật độ từ cảm xuất hiện tại vị trí trên thân răng stator đối diện với nam châm rotor; từ trường khe hở không khí có phân bố dạng hình sin theo không gian; xuất hiện sóng hài bậc lẻ trong đó lớn nhất là bậc 7 xét tại thời điểm $t=1\text{s}$. Các kết quả mô phỏng giúp đánh giá và cho phép đưa ra các giải pháp trong thiết kế, chế tạo nhằm tối ưu hóa và nâng cao hiệu suất động cơ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Viet Phuong Bui ; O. Chadebec ; L.-L. Rouve ; J.-L. Coulomb (2006), *An Homogenised FEM Model to Predict the Stray Magnetic Field Created by Faulty Electrical Machines*, 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, Miami, USA.

- [2] Bozhidar Stoev and al. (2017), *Finite element analysis of rotating electrical machines - An educational approach*, Global Engineering Education Conference, Athens, Greece.
- [3] IEEE Std 519-2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, Viện kỹ thuật Điện - Điện tử.
- [4] S.J. Salon (1990), *Finite element analysis of electric machinery*, IEEE Computer Applications in Power, Volume: 3, Issue: 2.
- [5] Stefanov Goce, Vasilija Sarac (2011), *Calculation of Electromagnetic Fields in Electrical Machines using Finite Elements Method*, International Journal of Engineering and Industries.
- [6] User's guide Flux2D, 2006.

SIMULATION OF ELECTROTROMAGNETIC FIELD IN DC MOTORS USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Nguyen Ngoc Van, Dang Viet Hung

ABSTRACT

The simulation of magnetic field distribution in electric machines enables people to evaluate the influence of device construction, device geometry and material parameters on machine performance. Recently, computer-aided simulation programs based on the Finite Element Method (FEM) are effective, reliable and low-cost tools for supporting researchers,

This paper aims to analyze and evaluate the impact of magnetic flux, flux density, Total Harmonic Distortion (THD) and moment through the simulation of a model of brushless direct current motor (BLDC).

Keywords: *FEM, magnetic field calculation, BLDC.*