

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA VẬT LIỆU VÔ ĐỊNH HÌNH ĐẾN MẬT ĐỘ TỪ CẢM TRONG ĐỘNG CƠ TỪ TRỞ CHUYỂN MẠCH

RESEARCH THE EFFECT OF AMORPHOUS MATERIAL ON MAGNETIC DENSITY IN SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Phí Hoàng Nhã^{1,*}, Nguyễn Văn Hùng¹,
Nguyễn Sơn Tùng¹, Ngô Mạnh Tùng¹

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2025.003>

TÓM TẮT

Động cơ từ trở chuyển mạch có nhiều ưu điểm, dần được ứng dụng phổ biến trong các thiết bị công nghiệp và gia dụng. Giống như các loại động cơ khác, vật liệu chủ yếu chế tạo động cơ là thép Silic kỹ thuật điện. Hiện nay, có nhiều loại vật liệu mới được áp dụng trong chế tạo động cơ và các thiết bị điện nói chung nhằm nâng cao hiệu suất, trong đó có vật liệu vô định hình. Bài báo này đề xuất sử dụng vật liệu vô định hình trong chế tạo động cơ từ trở chuyển mạch, cụ thể là sử dụng trong chế tạo riêng rotor, riêng stator, cả rotor và stator; đồng thời nghiên cứu, phân tích ảnh hưởng của loại vật liệu này đến mật độ từ cảm trong động cơ. Kết quả mô phỏng được thực hiện trên phần mềm FEMM để kiểm chứng giá trị mật độ từ cảm nhằm chỉ ra trường hợp tối ưu nhất.

Từ khóa: Động cơ từ trở chuyển mạch; SRM; mật độ từ cảm; vật liệu; vô định hình.

ABSTRACT

Switched reluctance motor have many advantages and are gradually being used in industrial and household appliances. Like other types of motors, the main material for making motors is electrical engineering silicon steel. Currently, there are many new materials applied in the manufacture of motors and electrical equipment in general to improve performance, including amorphous material. This paper proposes the use of amorphous material in the manufacture of switched reluctance motor, specifically for the manufacture of rotor, stator, rotor and stator; and at the same time study and analyze the influence of this material on the magnetic density in the motor. Simulation results are performed on FEMM software to verify the value of magnetic density to indicate the best case.

Keywords: Switched reluctance motor; SRM; magnetic density; material; amorphous.

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: nhaph@hauai.edu.vn

Ngày nhận bài: 30/8/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 07/11/2024

Ngày chấp nhận đăng: 26/01/2025

1. GIỚI THIỆU

Động cơ từ trở chuyển mạch (SRM) là động cơ có từ khá lâu, tuy nhiên, đến những năm gần đây, loại động cơ này mới được ứng dụng rộng rãi. Một trong những lý do là SRM cần có hệ thống điều khiển phức tạp, đủ để đáp ứng quá trình chuyển pha. Hiện nay, SRM được ứng dụng nhiều trong các loại xe điện và trở thành động cơ nhiều triển vọng khi sở hữu những ưu điểm nổi bật như mô men khởi động lớn, độ tin cậy cao, giá thành chế tạo thấp.

Trước những ưu điểm của SRM, các nghiên cứu gần đây tập trung nâng cao hiệu suất cho loại động cơ này. Một trong các giải pháp được đưa ra, đó là sử dụng vật liệu mới - vật liệu vô định hình để chế tạo động cơ. Vật liệu vô định hình (VDH) là vật liệu mới có ba đặc trưng cơ bản là điện trở suất lớn, lực kháng từ nhỏ, đường cong từ hóa hẹp; điều này sẽ mang lại cho thiết bị điện những đặc tính làm việc tốt. Các nghiên cứu [1-8] đã ứng dụng VDH trong chế tạo động cơ. Nghiên cứu [9-12] sử dụng vật liệu VDH trong chế tạo SRM, tuy nhiên chỉ dừng lại ở việc chứng minh giá trị tổn hao thấp trong loại động cơ này.

Từ những vấn đề hạn chế trên, bài báo này trình bày sự ảnh hưởng của vật liệu VDH đến mật độ từ cảm trong SRM ở các trường hợp khác nhau, bao gồm: SRM có rotor làm bằng VDH, stator làm bằng thép Silic; SRM có rotor làm bằng thép Silic, stator làm bằng VDH; SRM có cả rotor và stator làm bằng VDH. Kết quả kiểm chứng mật độ từ cảm được thực hiện trên phần mềm FEMM nhằm chỉ ra sự ảnh hưởng của loại vật liệu này và đưa ra trường hợp tối ưu nhất khi sử dụng VDH trong chế tạo động cơ từ trở chuyển mạch.

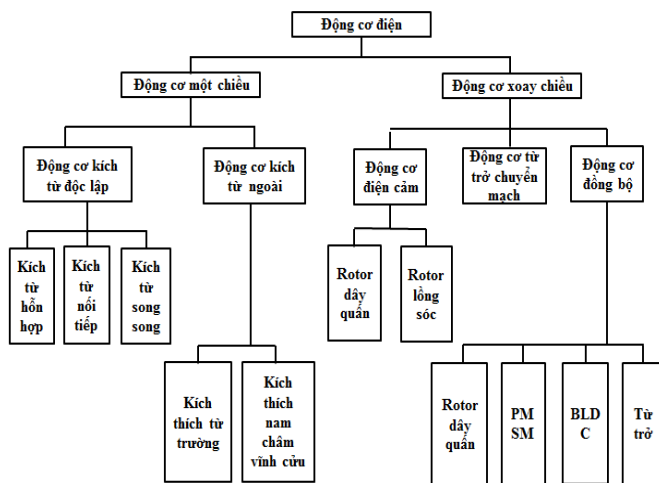
Sau phần giới thiệu chung, bài báo trình bày khái quát về động cơ từ trở chuyển mạch; đặc tính vật lý của vô định hình cũng như ảnh hưởng của vật liệu đến mật độ từ cảm;

ảnh hưởng của vật liệu vô định hình trong SRM ở ba trường hợp và cuối cùng là kết luận của bài báo.

2. ĐỘNG CƠ TỪ TRỞ CHUYỂN MẠCH

2.1. Cấu tạo và nguyên lý làm việc

Động cơ từ trở chuyển mạch thuộc nhánh động cơ điện xoay chiều (hình 1). Động cơ hoạt động dựa trên sự chuyển mạch giữa các pha và sự thay đổi từ trở trong mạch từ nên được gọi là động cơ từ trở chuyển mạch. Bên cạnh đó, một loại động cơ cũng có sự biến thiên từ trở trong mạch từ là động cơ từ trở đồng bộ. Chính vì vậy, để phân biệt cụ thể giữa hai loại động cơ này, động cơ từ trở chuyển mạch cần được gọi đầy đủ.



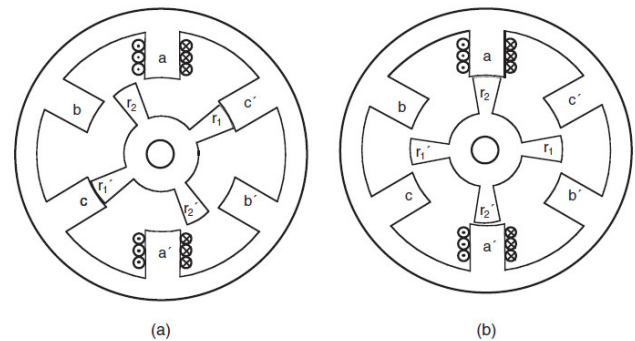
Hình 1. Phân loại động cơ điện

Động cơ từ trở chuyển mạch được phân làm hai loại chính: động cơ quay và động cơ tuyến tính. Động cơ quay dùng để truyền động quay, động cơ tuyến tính dùng để truyền động tịnh tiến.

Cấu tạo của động cơ từ trở chuyển mạch dạng quay cũng giống như các loại động cơ quay khác, gồm rotor và stator. Tùy theo số cực của rotor và stator mà người ta có các loại động cơ từ trở chuyển mạch 6/4, 8/6, 10/8,... Cả stator và rotor của động cơ từ trở chuyển mạch đều là loại cực lõi. Stator của động cơ được gắn cố định với vỏ, trên các cực đối diện của nó được quấn các cuộn dây giống như stator của động cơ 1 chiều hay động cơ xoay chiều 3 pha. Rotor của động cơ là phần di động, có thể quay quanh trục stator. Tuy nhiên, trên rotor không có cuộn dây nào. Cấu tạo của rotor đơn giản chỉ là lõi thép được ghép bởi các lá thép mỏng và chia làm các cực đối diện nhau.

Nguyên lý làm việc của SRM khá đơn giản, khi có dòng điện kích thích vào cuộn dây trên cực stator thì rotor sẽ chuyển động dịch chuyển sao cho cực rotor tương ứng gần nhất với cực stator bị kích thích sẽ dịch chuyển để trở thành thẳng hàng với cực stator đó, để từ trở giữa hai cực

của rotor và stator có giá trị nhỏ nhất. Khi hai cực của stator được kích thích thẳng hàng với hai cực của rotor thì nhờ cấu tạo khác nhau về số cực giữa rotor và stator, cho nên cực khác của rotor lại nằm lệch so với các cực stator. Ta lại cho dòng điện kích thích vào cực stator kế tiếp sẽ kéo cực rotor này thẳng hàng. Bằng việc cấp dòng điện kích thích lần lượt trên các cuộn dây trên cực stator, rotor sẽ quay. Chuyển động của rotor vì thế tạo ra mô men và năng lượng. Cụ thể, ta xét một động cơ từ trở chuyển mạch dạng 6/4 đơn giản như hình 2.



Hình 2. Nguyên lý hoạt động của động cơ từ trở chuyển mạch dạng 6/4
a) Pha c thẳng hàng; b) Pha a thẳng hàng [13]

Giả sử ban đầu các cực r_1, r'_1 của rotor và các cực c, c' của stator nằm thẳng hàng. Đưa một dòng điện kích thích vào pha a. Khi đó thông lượng tạo ra giữa cực a, a' của stator và r_2, r'_2 của rotor sẽ tạo ra lực đẩy làm cho cực r_2, r'_2 hướng đến cực a và a' . Khi chúng đã thẳng hàng, dòng điện ở pha a sẽ bị ngắt, khi đó rotor sẽ có vị trí mới như hình 2b. Bây giờ ta lại kích thích vào cuộn dây ở pha b, kéo r_1, r'_1 hướng đến b và b' theo chiều kim đồng hồ. Tiếp đến, ta lại cho dòng điện kích thích vào pha c sẽ làm cho r_2, r'_2 thẳng hàng với c và c' . Do đó, nhờ việc cung cấp điện vào các cuộn dây ở 3 pha của stator, ta đã làm dịch chuyển rotor đi góc 90° .

Dòng điện được chuyển mạch đóng điện và cắt điện nhờ các khóa bán dẫn. Muốn làm cho rotor quay theo vòng thì ta chỉ việc thay đổi thứ tự cấp điện sao cho thứ tự được liên tục và hợp lý. Trong trường hợp trên ta cấp điện cho các pha theo thứ tự abc thì rotor quay theo chiều kim đồng hồ. Nếu như ta cấp điện theo thứ tự acb thì rotor sẽ quay theo chiều ngược lại.

2.2. Phương trình cơ bản của động cơ

Mô hình toán của động cơ từ trở chuyển mạch được sử dụng để thiết lập bộ điều khiển từ phương trình vi phân thu được từ các phương trình máy điện cơ bản. Động lực học của động cơ từ trở chuyển mạch bao gồm các phương trình về điện áp, phương trình mô men và phương trình cơ, được biểu diễn:

Phương trình vi phân mô tả SRM với m pha [13] có dạng sau:

$$\begin{cases} u_j = R \cdot i_j + \frac{d\psi_j}{dt} \\ T_j(\theta, i_j) = \frac{\partial W'_j}{\partial \theta} \\ J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = T_e - T_l \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

trong đó: u_j là điện áp của pha j ; R là điện trở pha j ; i_j là dòng điện pha j .

ψ_j từ thông pha j , được xác định:

$$\psi_j = \int_0^T (v_j - R \cdot i_j) dt \quad (2)$$

W'_j là đối năng lượng từ trường, được xác định:

$$\partial W'_j(\theta, i_j) = \int_0^{i_j} \psi_j(\theta, i_j) di_j \quad (3)$$

trong đó: T_e là mô men một pha; T_l là mô men tải; J là mô men quán tính.

Mô men trong SRM là hàm phi tuyến theo dòng điện nếu mạch từ là tuyến tính. Khi đó, mô men tổng sinh ra chính bằng tổng mô men ở các pha:

$$T_e(\theta, i_1, i_2, \dots, i_m) = \sum_{j=1}^m T_j(\theta, i_j) \quad (4)$$

3. VẬT LIỆU VÔ ĐỊNH HÌNH

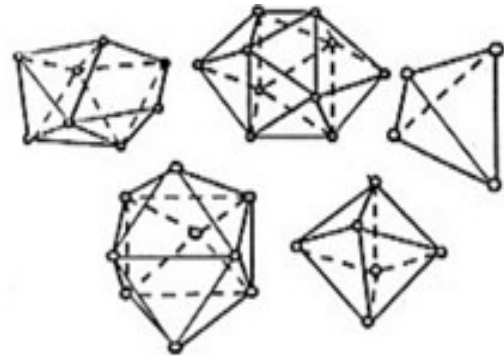
3.1. Khái niệm

Vật liệu vô định hình là chất rắn không có trật tự xa (hay cấu trúc tuần hoàn) về vị trí cấu trúc nguyên tử. Hầu hết các nhóm vật liệu có thể thấy hoặc có cấu trúc từ dạng vô định hình như thủy tinh, polymer (polystyrene),... Kim loại vô định hình cũng là một loại vật liệu vô định hình. Thông thường, cấu trúc tinh thể là cấu trúc có tính trật tự xa, có nghĩa là tính chất sắp xếp tuần hoàn có mặt ở trong độ dài rất lớn so với hằng số mạng tinh thể. Cấu trúc vô định hình có nghĩa là bất trật tự, nhưng về mặt thực chất, nó vẫn mang tính trật tự xét trong phạm vi rất hẹp, gọi là trật tự gần (short-range order).

Trạng thái vô định hình là trạng thái của vật liệu gồm những nguyên tử được sắp xếp một cách bất trật tự sao cho một nguyên tử có các nguyên tử bao bọc một cách ngẫu nhiên nhưng xếp chặt xung quanh nó. Khi xét một nguyên tử làm gốc thì bên cạnh nó với khoảng cách d dọc theo một phương bất kỳ (d là bán kính nguyên tử) có thể tồn tại một nguyên tử khác nằm sát với nó, nhưng ở

khoảng cách $2d, 3d, 4d...$ thì khả năng tồn tại của nguyên tử loại đó giảm dần. Cách sắp xếp như vậy tạo ra trật tự gần. Vật rắn vô định hình được mô tả giống như những quả cầu cứng xếp chặt trong túi cao su bó chặt một cách ngẫu nhiên tạo nên trật tự gần (theo mô hình quả cầu rắn xếp chặt của Bernal và Scot).

Cấu trúc vô định hình được hình thành từ năm loại mạng chính (như biểu diễn trong hình 3), tỉ lệ nguyên tử chiếm 65% thể tích, còn lại 35% là lỗ trống, và số lân cận gần nhất là 5.



Hình 3. Năm loại mạng cơ bản trong cấu trúc trật tự gần theo mô hình Bernal [14]

3.2. Tính chất lý hóa

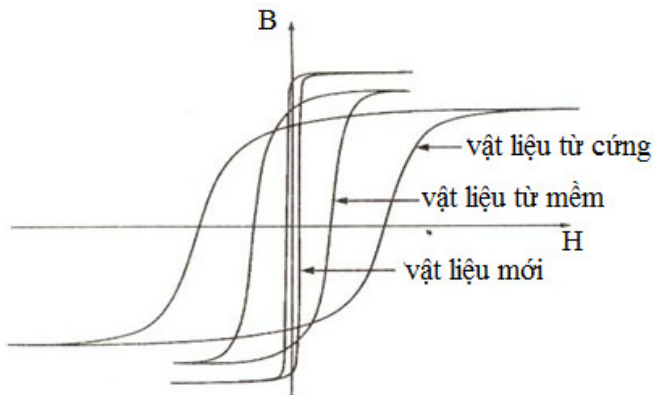
Sự đồng nhất về tính chất hóa học của vật liệu vô định hình sinh ra các tính chất cơ học. Sự thiếu hụt về ranh giới và hướng giữa các hạt tạo ra mô đun đàn hồi rất cao trong vật liệu này. Hằng số cơ học, thông số vật lý của vô định hình và hợp kim Silic thông thường được so sánh và trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Đặc tính của sắt vô định hình và thép Silic [15]

Vật liệu	Sắt vô định hình	Thép Silic
Mật độ từ thông (T)	1,56	1,8 - 2
Điện trở suất ($\mu\Omega\text{cm}$)	130 - 170	50 - 60
Độ dày lá thép (mm)	0,03	0,3 - 0,5
Sức căng (kg/mm^2)	150	50
Độ cứng Vickers	900	200 - 300
Mật độ khối lượng (g/cm^3)	7,18	7,65
Độ từ thẩm vật liệu (H/m)	$10^4 - 15 \cdot 10^5$	3000 - 8000
Tổn hao lõi sắt tại 1,45T và 50Hz (W/kg)	0,22	2,8

Điện trở suất của vô định hình ($130\mu\Omega\text{cm}$) rất lớn, ít nhất là gấp 2 hoặc 3 lần so với thép Silic ($48\mu\Omega\text{cm}$) hiện đang được sử dụng trong máy biến áp và động cơ. Sắt từ được phân loại (hình 4) gồm từ mềm nếu từ hóa của nó có thể dễ dàng thay đổi bởi kích thích, nam châm cứng

(hoặc nam châm vĩnh cửu) nếu sự từ hóa của nó là hằng số dưới bất cứ sự kích thích nào (trong một số giới hạn). Trong đồ thị đường B/H ở hình 4, thép VDH có từ trễ rất nhỏ, gần như bằng 0 so với vật liệu từ mềm.



Hình 4. Đường cong từ trễ của các loại vật liệu

3.3. Sự ảnh hưởng của vật liệu đến mật độ từ cảm trong động cơ

Mối quan hệ giữa vật liệu chế tạo động cơ và mật độ từ cảm sinh ra là mối quan hệ ràng buộc. Theo [16], cường độ từ trường H mô tả từ trường được sinh ra bởi sức từ động và đơn vị của nó là Ampe.vòng/m.

$$H = w.l/l \quad (5)$$

Cũng như thế, cường độ từ trường H sinh ra mật độ từ trường B, tại nơi mà nó sinh tồn tại. Chúng có quan hệ với nhau:

$$B = \mu.H \quad (6)$$

Giá trị của B không chỉ phụ thuộc vào H (tức phụ thuộc cường độ dòng điện) mà còn phụ thuộc vào môi trường nơi mà H được đặt vào. Đơn vị B trong hệ SI là Wb/m² hoặc Tesla (T). Ảnh hưởng của môi trường được biểu thị bằng độ từ thẩm μ có đơn vị là henry/m, (H/m). Ở đây, độ từ thẩm của chân không gọi là μ_0 , nó có giá trị là:

$$\mu_0 = 4.\pi.10^{-7} (H/m) \quad (7)$$

Độ từ thẩm của không khí có giá trị xấp xỉ độ từ thẩm của chân không. Tỷ số giữa độ từ thẩm của các chất với độ từ thẩm của chân không được gọi là độ từ thẩm tương đối μ_r .

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (8)$$

Độ từ thẩm tương đối là đại lượng không đơn vị và bằng 1 đối với chân không. Độ từ thẩm của các chất có thể miêu tả:

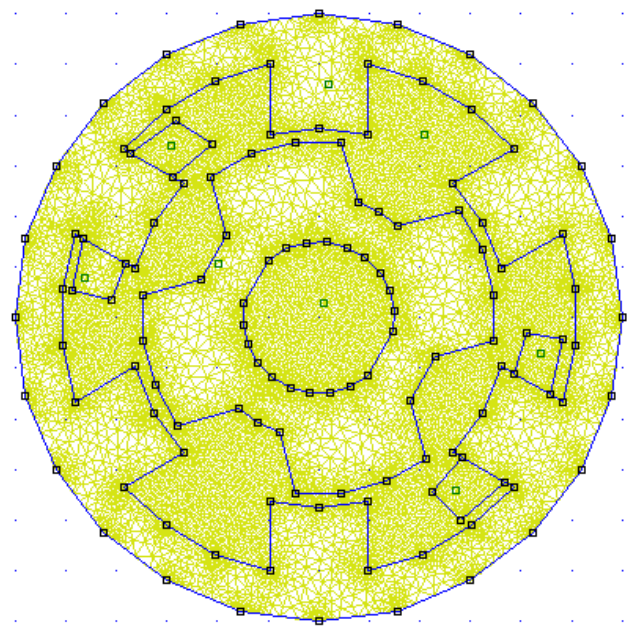
$$\mu = \mu_r.\mu_0 = \frac{B}{H} \quad (9)$$

Với các vật liệu sử dụng trong chế tạo máy điện, giá trị μ_r có thể lên đến hàng nghìn. Nếu giá trị μ_r lớn thì chỉ cần dòng điện nhỏ đã đủ để sinh ra một mật độ từ thông B cần thiết cho trước trong máy. Bằng việc thế phương trình (5) vào phương trình (6) thì mật độ từ thông được tính bằng công thức:

$$B = \mu.H = \frac{\mu.w.l}{l} \quad (10)$$

Như vậy, khi xét riêng vật liệu đơn lẻ, từ (10) thấy rằng thông số độ từ thẩm của vật liệu có ảnh hưởng trực tiếp đến mật độ từ cảm sinh ra, tỷ lệ thuận. Nếu xét tổng thể trong động cơ, mối quan hệ này còn có thể phải chịu thêm nhiều sự chi phối ảnh hưởng khác, nhất là trạng thái bão hòa của vật liệu. Do đó, phần tiếp theo của bài báo sẽ trình bày các kết quả mô phỏng để làm rõ mối quan hệ này.

4. ẢNH HƯỞNG CỦA VẬT LIỆU VÔ ĐỊNH HÌNH TRONG SRM



Hình 5. Mô hình SRM chia lưới các phần tử trong FEMM

Vật liệu mới - vật liệu vô định hình đã cho thấy được ưu điểm trong vấn đề giảm tổn hao ở động cơ điện nói riêng và máy điện nói chung. Tuy nhiên, trong động cơ còn nhiều vấn đề cần xem xét kỹ lưỡng, trong đó phải kể đến mật độ từ cảm. Giá trị mật độ từ cảm sẽ giúp đánh giá, dự báo được hiệu suất của động cơ. Từ phương trình (10), nếu hệ số độ từ thẩm μ lớn sẽ dẫn đến giá trị độ từ cảm B tăng lên. Ở vật liệu vô định hình, độ từ thẩm $\mu = 10^4 - 15.10^5$ (H/m) lớn hơn nhiều so với độ từ thẩm của thép Silic ($\mu = 3000 - 8000$ (H/m)). Do đó, nhóm tác giả kỳ vọng với độ từ cảm B tăng lên khi động cơ sử dụng vật liệu vô

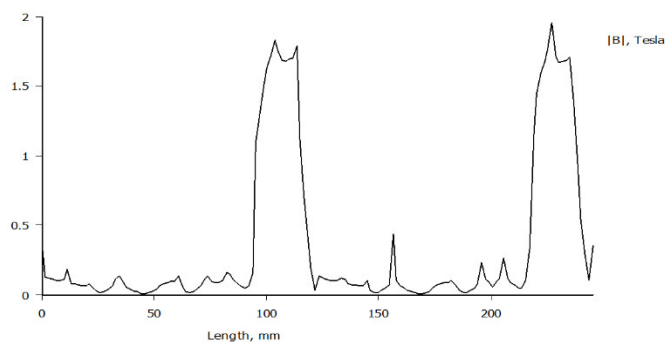
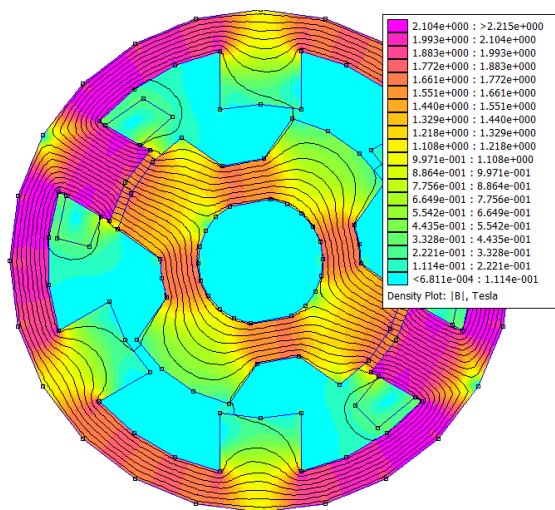
định hình thay thế thép Silic truyền thống làm lực từ, mô men và hiệu suất của động cơ tăng. Các kết quả mô phỏng được thực hiện trên phần mềm FEMM nhằm kiểm chứng, làm rõ luận cứ này. Phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng, lưới chia các phần tử được tính toán tự động trong phần mềm, mô hình chia lưới trong động cơ như hình 5.

Trong phần này, bài báo trình bày mô phỏng, đánh giá ảnh hưởng của vật liệu VĐH đến độ từ cảm trong SRM, với ba kịch bản khác nhau, bao gồm: trường hợp 1: SRM có stator làm bằng thép kỹ thuật điện, rotor làm bằng vật liệu VĐH; trường hợp 2: SRM có rotor làm bằng thép kỹ thuật điện, stator làm bằng vật liệu VĐH; trường hợp 3: SRM có cả stator và rotor làm bằng vật liệu VĐH. Bảng 2 là thông số kích thước của động cơ SRM dùng để mô phỏng.

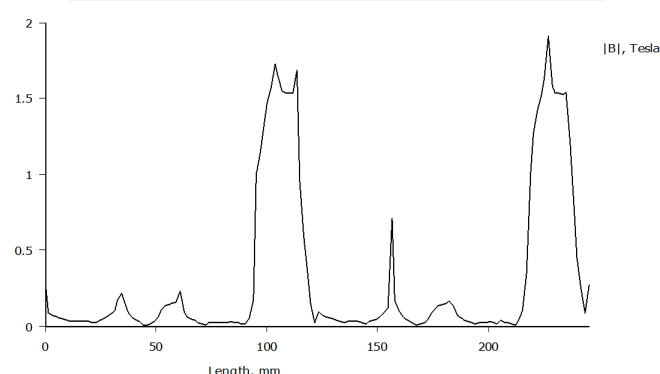
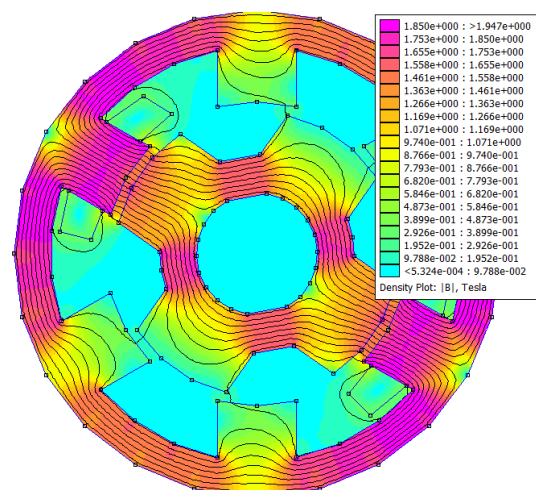
Bảng 2. Thông số kích thước động cơ từ trở

Số cực stator/số cực rotor N_s/N_r	6/4	Góc cực stator/góc cực rotor β_s/β_r (độ)	20/24	Chiều dài khe hở không khí G (mm)	0,3
Đường kính ngoài D_o (mm)	190	Đường kính trong D (mm)	89,7	Đường kính rotor D_r (mm)	100
Đường kính trục D_{sh} (mm)	28	Độ dày gông stator, rotor y_s, y_r (mm)	12,5	Chiều dài động cơ l (mm)	114
Chiều cao cực stator h_s (mm)	77,2	Chiều cao cực rotor h_r (mm)	59,5	Vật liệu	Silic/VĐH

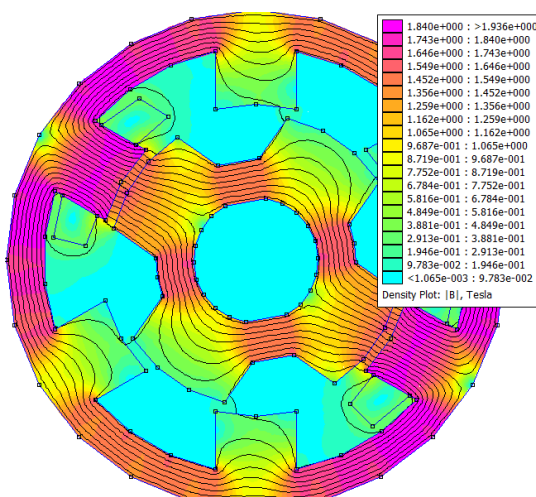
Xét ở trường hợp khi cực rotor và stator thẳng hàng (hình 6), đây là vị trí có giá trị mật độ từ cảm lớn nhất ở động cơ từ trở chuyển mạch.

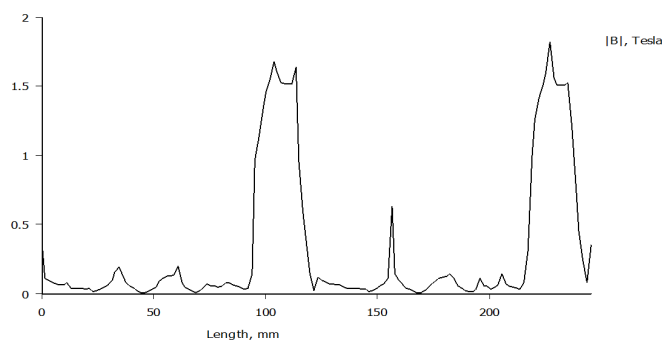


(a)



(b)

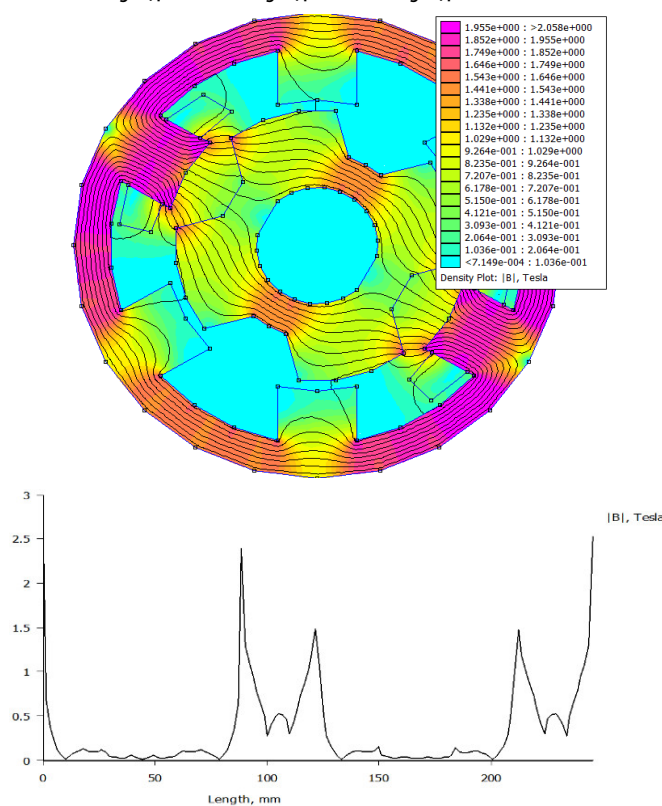




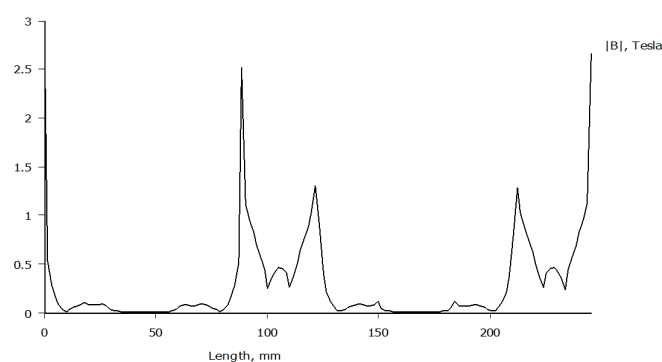
(c)

Hình 6. Sự phân bố mật độ từ cảm trong SRM và đồ thị độ từ cảm trên rotor khi cực rotor và stator thẳng hàng

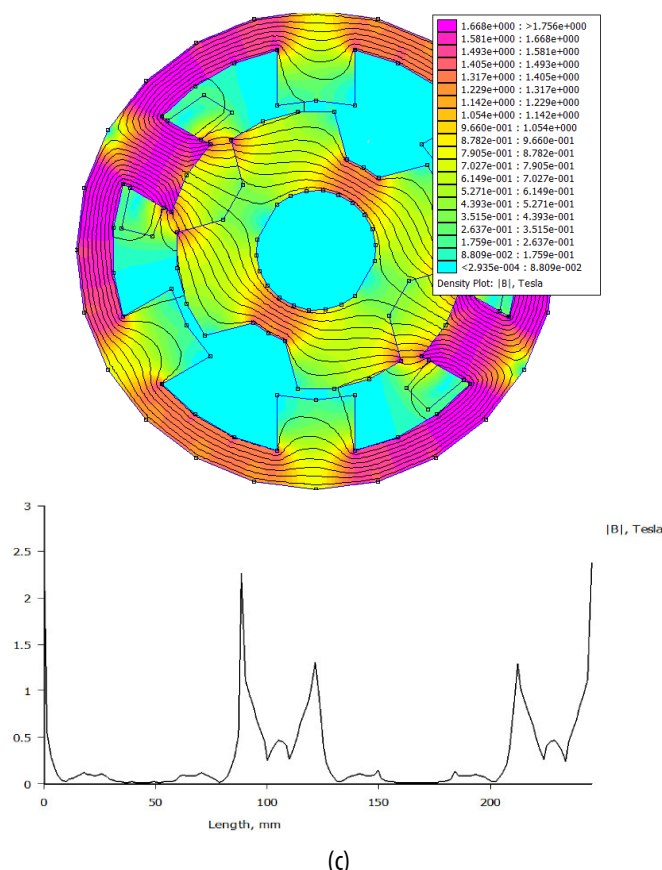
a) Trường hợp 1; b) Trường hợp 2; c) Trường hợp 3



(a)



(b)



(c)

Hình 7. Sự phân bố mật độ từ cảm trong SRM và đồ thị độ từ cảm trên rotor khi cực rotor và stator không thẳng hàng

a) Trường hợp 1; b) Trường hợp 2; c) Trường hợp 3

Xét ở trường hợp khi cực rotor và stator không thẳng hàng (hình 7), đây là vị trí có giá trị mật độ từ cảm nhỏ nhất ở động cơ từ trở chuyển mạch.

Kết quả mô phỏng ở các hình 6 và 7 cho thấy, trường hợp 1 có giá trị mật độ từ cảm lớn nhất. Điều này gần như trái ngược với (10), bởi mối quan hệ giữa B và μ là tỷ lệ thuận với nhau, trong đó μ của VĐH lớn gấp nhiều lần so với thép kỹ thuật điện. Tuy nhiên, giá trị của B trong động cơ từ trở chuyển mạch không phải tỷ lệ thuận theo hướng đơn thuần khi μ lớn bao nhiêu thì B lớn bấy nhiêu, mà còn phụ thuộc vào độ bão hòa của vật liệu (như đường cong

B/H ở hình 4). Như vậy, với thép VĐH, chỉ cần H nhỏ thì B sẽ nhanh đạt giá trị bão hòa do độ từ thẩm vật liệu lớn, khi đó đường cong B/H hẹp. Bảng 3 trình bày giá trị mật độ từ cảm cực đại trong SRM.

Bảng 3. Giá trị mật độ từ cảm cực đại ở stator trong các trường hợp

Vị trí stator, rotor	Các trường hợp	$B_{\max}$
Cực stator và rotor thẳng hàng	Trường hợp 1	2,104T
	Trường hợp 2	1,85T
	Trường hợp 3	1,84T
Cực stator và rotor không thẳng hàng	Trường hợp 1	1,955T
	Trường hợp 2	1,669T
	Trường hợp 3	1,668T

Trường hợp 2 và 3 cho thấy, giá trị mật độ từ cảm gần bằng nhau, cụ thể trường hợp 2 có mật độ từ cảm lớn hơn trường hợp 3 không đáng kể, lần lượt là 1,85T và 1,84T ở trường hợp cực stator và rotor thẳng hàng và 1,669T và 1,668T ở trường hợp cực stator và rotor không thẳng hàng. Sự khác biệt ở trường hợp 2 và 3 nằm ở vật liệu chế tạo rotor, khi mà trường hợp 2 sử dụng thép kỹ thuật điện chế tạo rotor, còn trường hợp 3 sử dụng thép VĐH trong chế tạo cả stator và rotor.

Như vậy, vật liệu vô định hình được sử dụng trong chế tạo SRM chỉ giúp giảm được tổn hao trong động cơ mà không giúp nâng cao giá trị mật độ từ cảm B. Điều này đồng nghĩa với mô men điện từ không được cải thiện so với thép kỹ thuật điện truyền thống.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã làm rõ mối quan hệ giữa vật liệu vô định hình và mật độ từ cảm trong động cơ từ trở, xét ở các trường hợp thay đổi vật liệu trong cấu trúc stator, rotor và cả hai. Kết quả mô phỏng cho thấy mô men điện từ không được cải thiện nếu sử dụng loại vật liệu mới này. Mặc dù VĐH với ưu điểm giảm tổn hao, nhưng trong tương lai, để thép VĐH trở thành vật liệu phổ biến chế tạo động cơ thì mật độ từ cảm cần được cải thiện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Zhuonan Wang, Yuji Enomoto, Motoya Ito, Ryoso Masaki, et al., "Development of a permanent magnetic motor utilizing amorphous wound cores," *IEEE transactions on magnetics*, 46, 2, 570-573, 2010.
- [2]. Leng Jian Wei, Qi Xiaohui, Li Junfang, An Fei, "The high frequency characteristic of amorphous iron induction motor," in *2010 International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering*, 439-442, 2010.
- [3]. Zhuonan Wang, Ryoso Masaki, Shigeki Morinaga, et al., "Development of an Axial Gap Motor with Amorphous Metal Cores," *IEEE transactions of industry applications*, 47, 3, 1293-1299, 2011.

[4]. M. Dams, K. Komeza, S. Wiak, "The highly efficient three phase small induction motors with stator cores made from amorphous iron," *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 23, 3, 625-632, 2004.

[5]. M. Dams, K. Komeza, "Performance Characteristics of a High Speed Energy Saving Induction Motor with an Amorphous Stator Core," in *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, Marseille, France, IEEE, 2454-2461, 2012.

[6]. Li Jun Fang, Leng Jian Wei, Qu Chong Nian, "Research on a novel Fe-based Amorphous Electric Motor," in *2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology*, Chengdu, China IEEE, 184-187, 2010.

[7]. Roman Kolano, Krzysztof Krykowski, et al., "Amorphous soft magnetic materials for the stator of a novel high speed PMBLDC motor," *IEEE transactions on magnetics*, 49, 4, 1367-1371, 2013.

[8]. Tao Fan, Qi Li, Xuhui Wen, "Development of a High power density motor made of amorphous alloy cores," *IEEE transactions of industrial electronics*, 61, 9, 4510-4518, 2014.

[9]. Hiroaki Hayashi, Akira Chiba, Tadashi Fukao, "Efficiency Comparison of Switched reluctance motors with low loss materials," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, FL, USA, 1-6, 2007.

[10]. Xiang Qianwen, Ji Xiaofu, Sun Yukun, "Performance and Design of an SRM with Amorphous Stator," *Advanced Materials Research*, 750-752, 999-1002, 2013.

[11]. Yiduan Chen, Huijuan Liu, Jingxiong Zhang, "Structure optimization and performance analysis of SRM with Amorphous Alloys Core using FEM," *Sensor & Transducers*, 162, 1, 273-279, 2014.

[12]. Akira Chiba, Hiroaki Hayashi, Kensaku Nakamura, Shinya Ito, et al., "Test results of an SRM made from a layered block of heat treated amorphous alloys," *IEEE transactions of industry applications*, 44, 3, 699-706, 2008.

[13]. R. Krihnan, *Switched reluctance motor drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design and Application*. Industrial Electronics Series, USA, 2001.

[14]. Đoàn Thanh Bảo, *Nghiên cứu chế tạo máy biến áp có lõi thép sử dụng vật liệu vô định hình*. Luận văn thạc sĩ, Đại học Bách khoa Hà Nội, Hà Nội, 2010.

[15]. Leng Jian Wei, Qi Xiaohui, Li Junfang, An Fei, "The high frequency characteristic of amorphous iron induction motor," in *2010 International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering*, 439-442, 2010.

[16]. Bùi Đức Hùng, Triệu Việt Linh, *Máy điện 1*. NXB Giáo dục Việt Nam, 2008.

AUTHORS INFORMATION

**Phi Hoang Nha, Nguyen Van Hung,
Nguyen Son Tung, Ngo Manh Tung**
Hanoi University of Industry, Vietnam