

Phân tích và so sánh các cấu trúc ổ từ 4 cực kiểu lai hai bậc tự do Analysis and Comparison of the 4-pole 2DOF-HMBs

Vũ Đình Đạt^{1,2*}, Nguyễn Quang Địch¹, Nguyễn Huy Phương¹

¹Hanoi University of Science and Technology

²Hung Yen University of Technology and Education

*Corresponding author E-mail: vudinhdat@gmail.com

Abstract

Recently Hybrid Magnetic Bearings (HMBs) are being studied by many researchers because they have the ability to combine the advantages of the both active magnetic bearings and passive magnetic bearings. This paper focuses on two structures of the four-pole hybrid-type magnetic bearing, the ones with the auxiliary clearance and the others without the auxiliary clearance. Finite element analysis method (FEM) using ANSYS was applied to analyze and evaluate the performance of the above hybrid active magnetic bearings. The simulation results are also compared with the equivalent magnetic circuit method (EMCM) to verify and give ideas to optimize the design to improve the quality of the HMB.

Keywords: ANSYS, AMB, EMCM, FEM, HMB,

Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
y	Wb	Từ thông
H	A/m	Cường độ từ trường
B	Tesla	Mật độ từ thông
F	N	Lực điện từ
I	A	Cường độ dòng điện
X	mm	Khoảng cách khe hở không khí

Chữ viết tắt

FEM	finite element method
EMCM	equivalent magnetic circuit method
PMB	passive magnetic bearing
AMB	active magnetic bearing
HMB	hybrid magnetic bearing

Tóm tắt

Trong thời gian gần đây các ổ từ kiểu lai (HBM) đang được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu do chúng có khả năng kết hợp được ưu điểm của cả ổ từ chủ động lẫn ổ từ bị động. Bài báo này tập trung giới thiệu về hai loại cấu trúc ổ từ kiểu lai bốn cực là loại có khe hở phụ và loại không có khe hở phụ. Trong đó phương pháp phân tích phần tử hữu hạn (FEM) sử dụng ANSYS được áp dụng để phân tích và đánh giá khả năng hoạt động của các dạng ổ từ chủ động kiểu lai (HMB) nêu trên. Các kết quả mô phỏng cũng được so sánh với phương pháp mạch từ tương đương (EMCM) nhằm kiểm chứng và đưa ra những ý tưởng tối ưu hóa thiết kế nhằm nâng cao chất lượng HMB.

1. Phần mở đầu

Ổ đỡ từ là một loại ổ đỡ mà có khả năng nâng không tiếp xúc các trục chuyển động nhờ vào lực từ trường. Do giữa trục quay và phần tĩnh không tiếp xúc với nhau, nên ổ đỡ từ có nhiều ưu điểm nổi bật mà vòng bi cơ không có được như không có ma sát, hao mòn, không cần chất bôi trơn và khả năng kiểm soát được trạng thái làm việc [1,2]. Kết quả là ổ đỡ từ có thể làm việc ở các môi trường khắc nghiệt như rất nóng, rất lạnh hoặc chân không cũng như có thể làm việc với tốc độ rất cao.

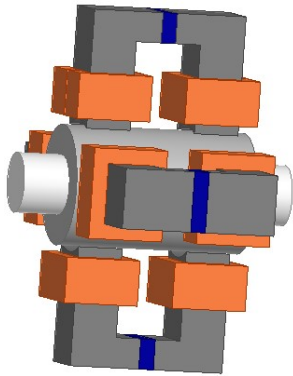
Ổ đỡ từ có 3 loại cơ bản là ổ đỡ từ bị động (PMB), ổ đỡ từ chủ động (AMB) và ổ đỡ từ kiểu lai (HMB). Với ổ đỡ từ bị động thì lực nâng được sinh ra nhờ các nam châm vĩnh cửu. Do đó kiểu ổ đỡ này đơn giản và không tiêu thụ năng lượng nhưng không cho phép kiểm soát được lực nâng. Với ổ đỡ từ chủ động thì lực nâng được sinh ra bởi các nam châm điện, và nhờ vào việc kết hợp với các cảm biến và bộ điều khiển thì lực nâng hoàn toàn có thể được kiểm soát. Tuy nhiên nhược điểm lớn nhất của ổ đỡ từ chủ động là tổn hao năng lượng lớn. Ổ đỡ từ kiểu lai là sự kết hợp cấu trúc giữa ổ từ chủ động và bị động để vừa đảm bảo khả năng kiểm soát lực nâng cũng như đảm bảo hiệu suất cao [3,4]. Một kiểu cấu trúc của ổ đỡ từ kiểu lai được thể hiện trong [5,6], trong đó dòng từ thông tản và dòng từ thông điều khiển chia sẻ với nhau cùng một đường dẫn, điều này có thể dẫn đến bão hòa và làm cho tổn hao lớn.

Một hướng nghiên cứu về cấu trúc khác của HMB là tạo ra lực xuyên tâm trục rotor [7,8]. Với cấu trúc này, từ tản được tách ra khỏi từ thông điều khiển, tạo ra hai dòng dịch chuyển của từ thông xuyên tâm và hướng dọc trục. Tuy nhiên quá trình kiểm soát và điều khiển phức tạp vì mạch từ gồm nhiều

vòng từ thông móc vòng theo các hướng dọc và ngang trục. Như vậy với hai cấu trúc trên của HMB, ta dễ dàng nhận thấy một vấn đề phổ biến là là các mạch từ của các kênh dọc và ngang trục đan xen với nhau, ảnh hưởng lẫn nhau, điều này làm khó khăn cho quá trình mô hình hóa và xây dựng hệ thống điều khiển ổn định và chính xác.

Để khắc phục các nhược điểm trên thì hướng nghiên cứu đang được nhiều nhà khoa học quan tâm đó là thiết kế một cấu trúc ổ từ HMB mới trong đó mạch từ theo hướng x và y độc lập với nhau (Hình 1). Với cấu trúc này ổ từ thường có 4 cực để kiểm soát các phương chuyển động x và y. Ngoài ra, trên mỗi cực sẽ được bố trí thêm các phiến nam châm vĩnh cửu để hỗ trợ lực nâng nhằm giảm dòng điện chạy trong các cuộn dây của cực từ. Có hai dạng cấu trúc phổ biến hiện nay đó là dạng không có khe hở phụ và dạng có khe hở phụ quanh khu vực bố trí nam châm.

Bài báo này sẽ phân tích cụ thể về cấu trúc và đặc tính làm việc của hai dạng ổ từ kiểu lai ở trên để từ đó đưa ra đánh giá ưu và nhược điểm của mỗi cấu trúc.

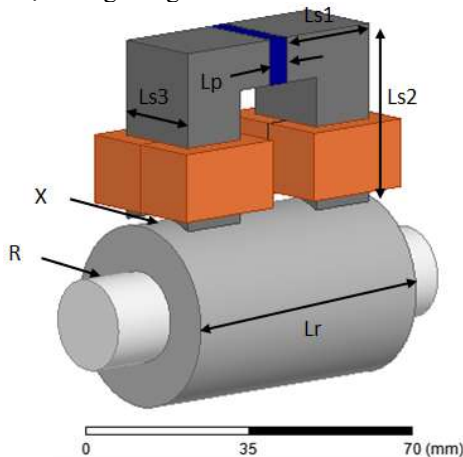


Hình 1: Mô hình ổ từ kiểu lai với cực từ độc lập

2. Phân tích các ổ đỡ từ kiểu lai với cực từ độc lập

2.1. Mô hình cực từ lai không có khe hở phụ

Do tính đối xứng và độc lập của mô hình ổ từ kiểu lai như đã nêu trên (Hình 1) nên ta sẽ chỉ cần phân tích một cực đơn của ổ từ. Cực từ lai kiểu không có khe hở phụ được thể hiện chi tiết như trong Hình 2, trong đó nam châm vĩnh cửu được kẹp chặt bởi hai nửa cực từ. Các thông số cơ bản của cực từ được thể hiện trong Bảng 1.



Hình 2: Mô hình cực từ lai không có khe hở phụ

Bảng 1: Thông số cơ bản của HMB không có khe hở phụ

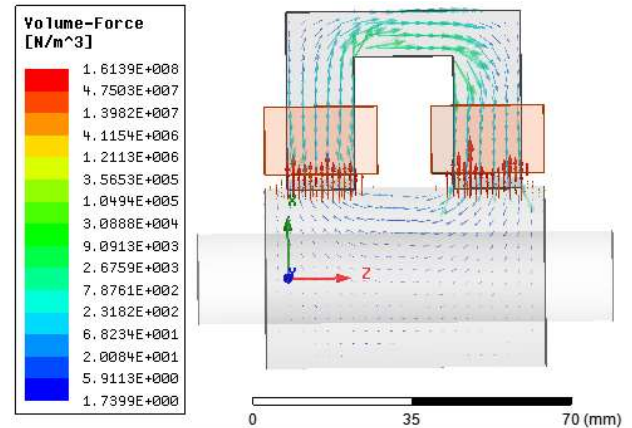
Chiều dài nam châm	Lp	5mm
Chiều dài cạnh khung thép	Ls1	23.5mm
Chiều dài cạnh khung thép	Ls2	51mm
Chiều rộng khung thép	Ls3	20mm
Chiều dài Rotor	Lr	62mm
Bán kính Rotor	R	16mm
Dòng điện	i	0A-10A
Số vòng dây	n	100
Khe hở không khí	X	1mm
Tiết diện mặt cắt khe hở không khí	A	300 mm ²
Độ từ thẩm chân không	m_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ T.m/A
Nam châm vĩnh cửu		NdFe30
Hệ số từ thẩm nam châm	m_u	1,045
Vật liệu thép		Steel-1008
Vật liệu cuộn dây		Đồng
Môi trường xung quanh		Chân không

Để dễ dàng đánh giá hiệu quả của cách kết hợp giữa nam châm điện và nam châm vĩnh cửu trong mô hình này ta sẽ tiến hành phân tích lực từ khi chỉ có cuộn dây và khi có cuộn dây kết hợp với nam châm bằng phần mềm mô phỏng phần tử hữu hạn ANSYS.

2.2. Phân tích mô hình bằng phương pháp FEM

2.2.1. Cực từ chỉ gồm cuộn dây

Mô phỏng mô hình cực từ và phân tích kết quả bằng phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần mềm ANSYS 16 ta được kết quả lực từ của cực từ tác dụng hút rotor trong Hình 4 ứng với dòng điện $i=10A$.

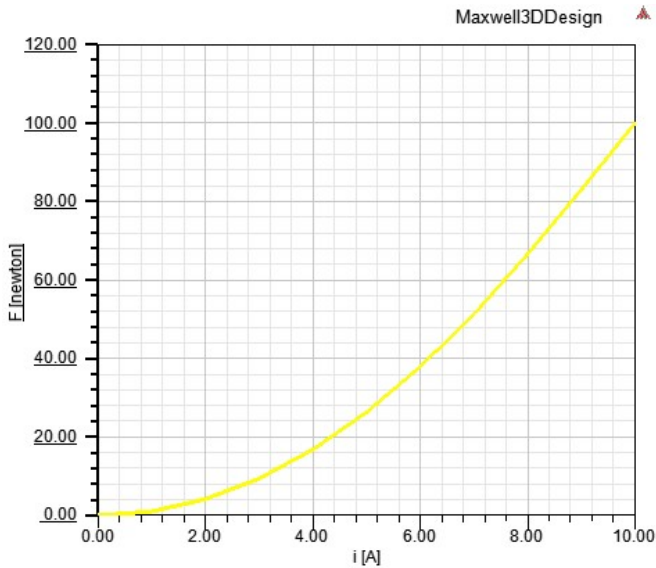


Hình 4: Lực từ tác dụng lên Rotor

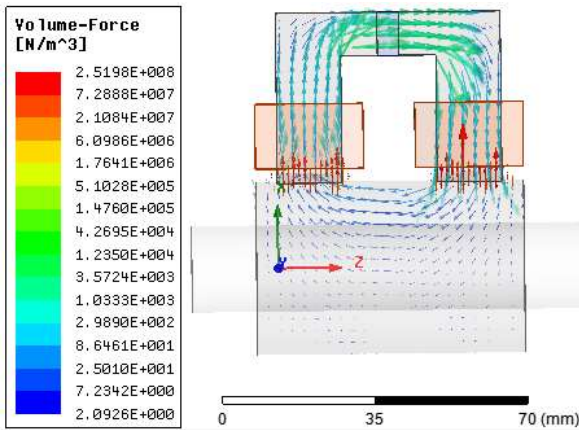
Sau đó ta sẽ khảo sát sự thay đổi Lực từ khi cho dòng điện tăng dần từ 0A tới 10A được kết quả trong Hình 5.

2.2.2. Cực từ gồm cuộn dây và nam châm vĩnh cửu

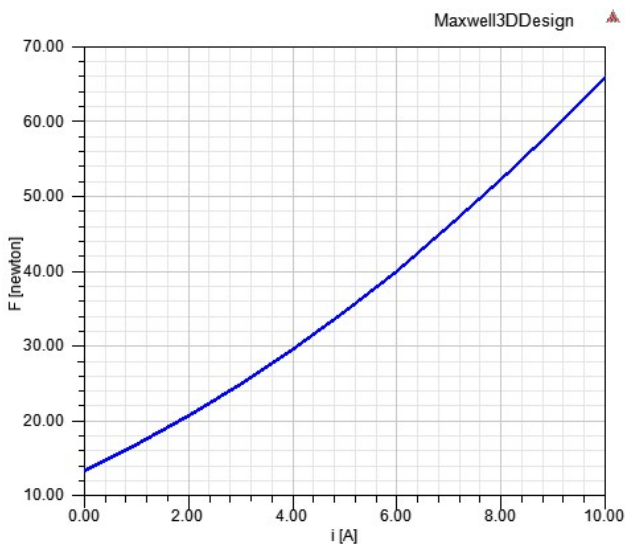
Tương tự như trên, mô phỏng mô hình cực từ và phân tích kết quả bằng phương pháp phần tử hữu hạn được kết quả trong Hình 6 và Hình 7.



Hình 5: Đồ thị lực từ tác dụng lên rotor theo dòng điện



Hình 6: Lực từ tác động lên Rotor

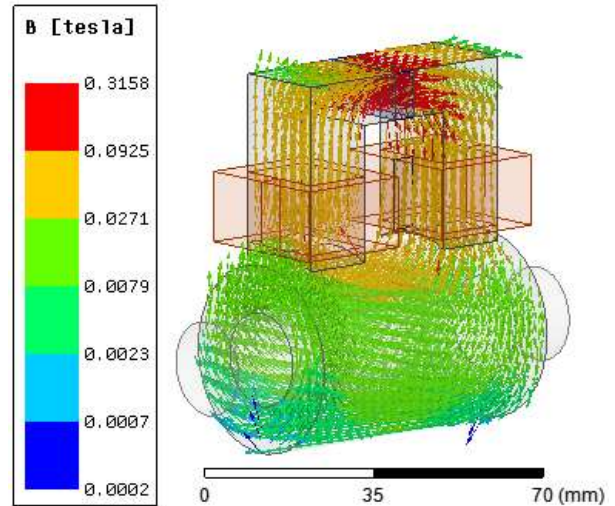


Hình 7: Đồ thị lực từ tác dụng lên rotor theo dòng điện

2.2.3. Phân tích đánh giá kết quả

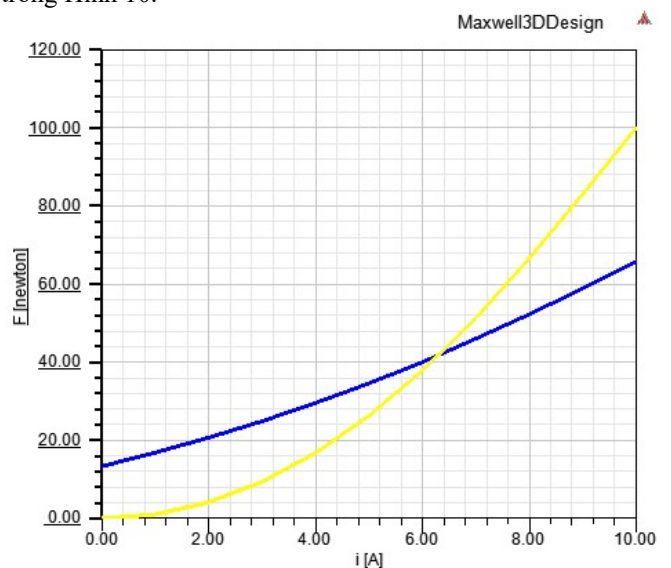
Bản chất của ô từ lai đó là sự kết hợp thêm nam châm vĩnh cửu vào ô từ chủ động, bởi vậy để đánh giá hiệu quả của ô từ lai ta sẽ tổng hợp kết quả của cực từ khi chưa thêm nam

châm vĩnh cửu và khi đã thêm nam châm vĩnh cửu vào vsg kết quả được thể hiện trong Hình 9. Từ đồ thị ta thấy ở thời điểm đầu (dòng điện từ 0A tới 6.2A) hiệu quả về lực nâng rotor của ô từ lai là rõ ràng khi đường màu xanh tăng đều và luôn ở trên đường màu vàng. Nhưng tới thời điểm sau (dòng điện từ 6.2A tới 10A) thì ô từ lai và cụ thể là sự kết hợp của nam châm với cuộn dây đã mang lại hiệu quả âm về lực nâng rotor. Mặc dù dòng điện được tiếp tục bơm vào nhưng lực tăng không nhiều, trong khi đó nếu không có nam châm thì lực lại tăng khá lớn. Để tìm hiểu nguyên nhân chúng ta sẽ trích xuất từ ANSYS đồ thị phân bố mật độ từ cảm tại thời điểm dòng điện 6.2A như Hình 8 dưới đây.

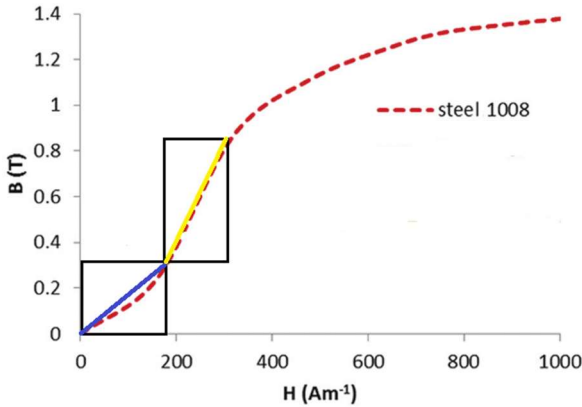


Hình 8: Đồ thị phân bố mật độ từ cảm

Từ đồ thị phân bố mật độ từ cảm dễ dàng nhận ra tại vị trí tích hợp nam châm vĩnh cửu độ từ cảm B tập trung lớn nhất (vùng màu đỏ), điều này dẫn nguy cơ bão hòa từ của mạch từ với những vật liệu khác nhau. Cụ thể ở đây là độ thẩm từ khác nhau của vật liệu nam châm NdFe30 và của gông thép Steel-1008. Chi tiết hơn ta đi xem xét biểu đồ đặc tính H-B của thép trong góc phần tư thứ 2 (trường hợp từ hóa tăng) trong Hình 10.



Hình 9: Tổng hợp các lực từ tác dụng lên rotor theo dòng điện
 ■ Lực từ khi hệ chỉ có cuộn dây
 ■ Lực từ khi hệ có cuộn dây và nam châm



Hình 10: Đường đặc tính H-B của thép steel_1008

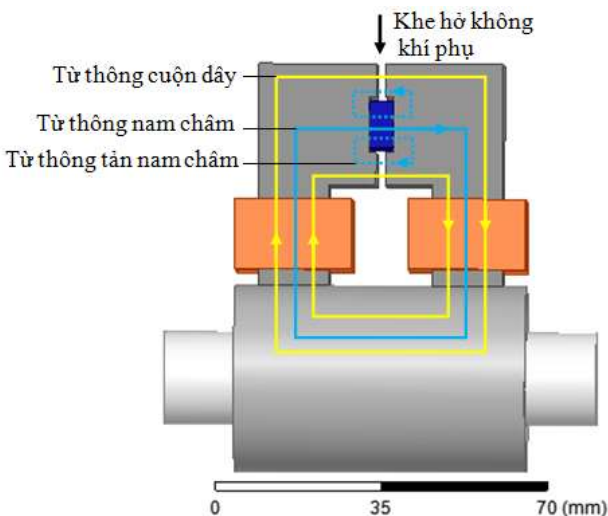
Tại điểm giao giữa đường màu vàng và đường màu xanh trong Hình 8 ứng với dòng điện $i=6,2A$, dễ dàng dùng AN-SYS theo Hình 9 đo được mật độ từ cảm $B=0.3158 T$.

Ứng với giá trị $B=0.3158 T$, độ thấm từ của vật liệu thép Steel_1008 (đường màu xanh Hình 8) sẽ nhỏ hơn với độ từ thẩm của nam châm NdFe30(1,04) vì vậy trong khoảng dòng điện I từ 0 tới 6.2A thì từ trở của thép lớn hơn nam châm. Vì vậy cường độ từ trường do cuộn dây đi hoàn toàn qua nam châm, hiệu quả về lực tổng hợp là tốt. Thế nhưng bước sang giai đoạn sau, từ trở của nam châm dần dần lớn hơn của thép dẫn đến từ trường do cuộn dây sinh ra sẽ bị hạn chế khi qua nam châm dẫn đến hiệu quả về lực tổng hợp ngày càng giảm rõ rệt.

Khi dòng điện tăng mà hiệu quả về lực không tăng tương ứng thì sẽ mau chóng dẫn đến hiện tượng bão hòa từ, hạn chế khả năng chịu tải của ổ từ. Vậy bài toán đặt ra là phải bảo toàn được năng lượng sinh ra của cả nam châm và cuộn dây không để chúng hạn chế nhau, từ đó ta đưa ra đề xuất cải tiến tách hai dòng từ thông sinh ra bởi nam châm và cuộn dây độc lập và tương hỗ nhau lẫn nhau.

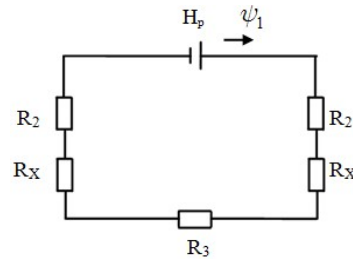
3. Phân tích ổ từ lai có khe hở phụ

3.1. Phương pháp mạch từ tương đương (EMCM)



Hình 11: Mô hình cực từ lai có khe hở phụ

Từ những phân tích ở mục 2 ta thấy rằng để có được sự kết hợp hiệu quả nam châm điện và nam châm vĩnh cửu trong cực từ lai thì ta cần phải bố trí tách biệt đường cảm ứng từ của nam châm và cuộn dây nhưng vẫn đảm bảo được lực từ là tổng của hai lực thành phần. Cấu trúc một cực của ổ từ lai 4 cực có khe hở phụ được thể hiện chi tiết như trong Hình 11. Để xây dựng được mô hình mạch từ tương đương trong trường hợp này, ta chia từ thông qua mạch từ được tạo ra bởi 2 nguồn. Nguồn thứ nhất là do nam châm vĩnh cửu (đường màu xanh Hình 11), nguồn thứ 2 do sức từ động của cuộn dây tạo ra (đường màu vàng Hình 11). Tương ứng ta có mạch từ tương đương trong Hình 12 và Hình 13.



Hình 12: Mạch từ tương đương do nam châm vĩnh cửu tạo ra

Với R_2 là từ trở của gông thép.

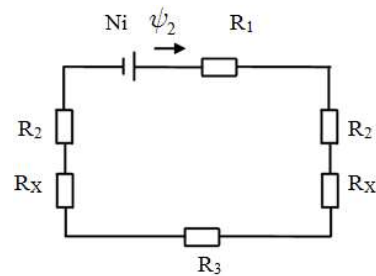
R_x là từ trở khe hở không khí.

R_3 là từ trở của Rotor.

$$\text{Tổng trở: } R_{t1} = 2R_2 + 2R_x + R_3 \quad (1)$$

$$\text{Từ thông: } y_1 = \frac{H_p}{R_{t1}} = \frac{H_p}{2R_2 + 2R_x + R_3} \quad (2)$$

$$\text{Lực từ: } F_1 = \frac{y_1^2}{m_0 A} \quad (3)$$



Hình 13: Mạch từ tương đương do nam châm điện tạo ra

Với R_1 là từ trở của khe hở không khí phụ

$$\text{Tổng trở: } R_{t2} = R_1 + 2R_2 + 2R_x + R_3 \quad (4)$$

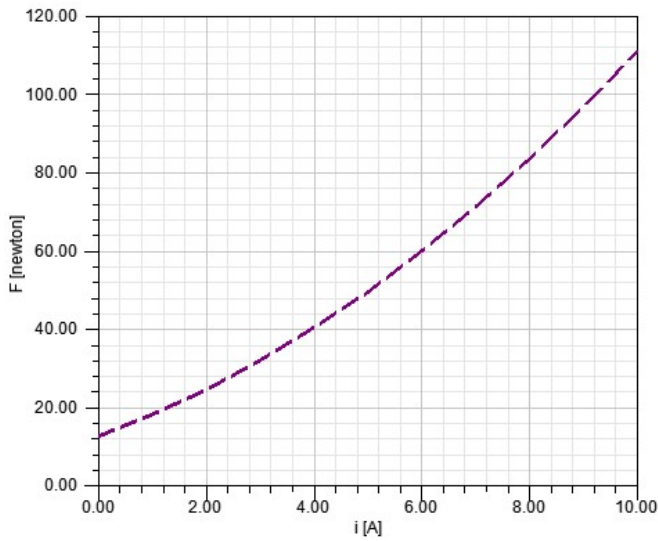
$$\text{Từ thông: } y_2 = \frac{Ni}{R_{t2}} = \frac{H_p}{R_1 + 2R_2 + 2R_x + R_3} \quad (5)$$

$$\text{Lực từ: } F_2 = \frac{y_2^2}{m_0 A} \quad (6)$$

$$\text{Tổng lực từ: } F = F_1 + F_2 = \frac{y_1^2}{m_0 A} + \frac{y_2^2}{m_0 A} \quad (8)$$

Sử dụng các thông số cơ bản của mô hình ta tính toán giá trị lực F ứng với các dòng điện i thay đổi từ 0A tới 10A được đồ thị quan hệ giữa dòng điện và lực từ tác dụng lên Rotor

theo phương pháp tính toán mạch từ tương đương EMCМ trong Hình 14.



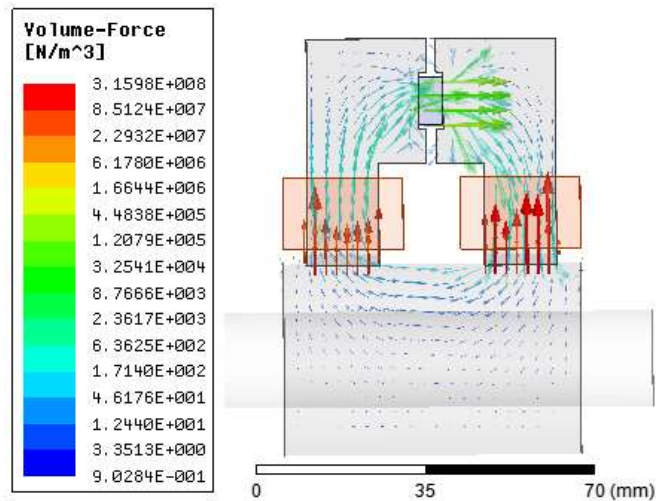
Hình 14: Lực từ tác động lên Rotor theo EMCМ

3.2. Phương pháp mô phỏng (FEM)

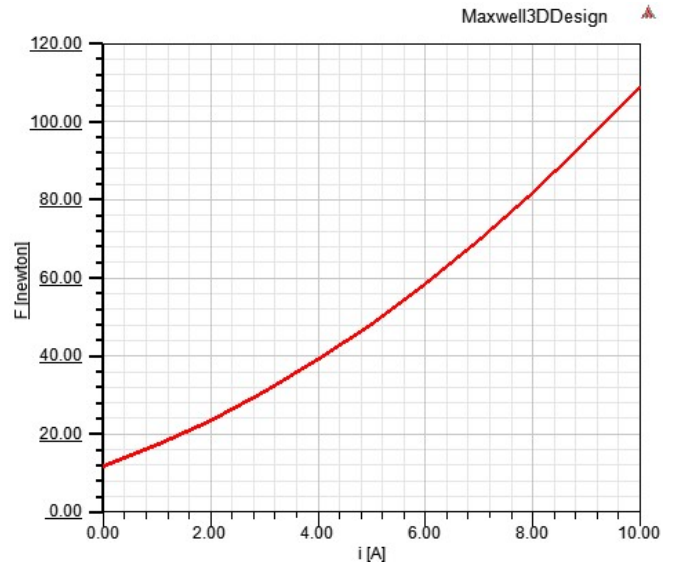
Các thông số mô hình giống Hình 3, thêm thông số khe hở không khí phụ $X_a=2\text{mm}$. Mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần mềm ANSYS 16 ta được kết quả lực từ của cực từ tác dụng hút rotor trong Hình 15 và Hình 16.

3.3. Phân tích đánh giá kết quả

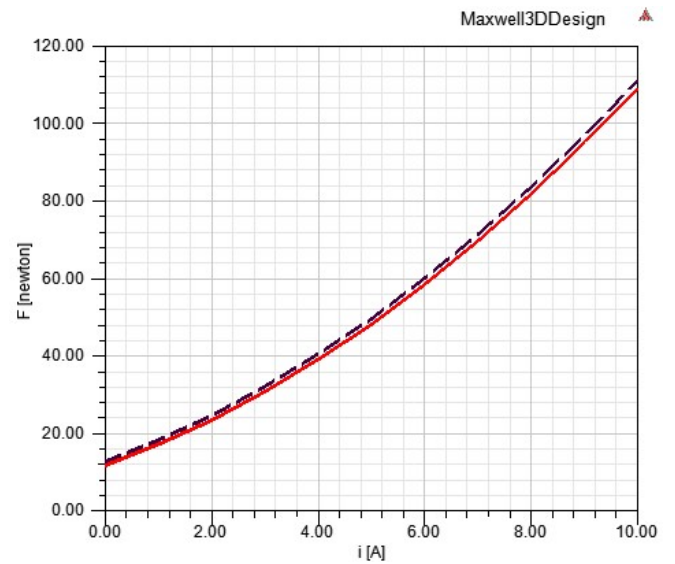
Để xác minh tính đúng đắn của tính toán ta sẽ đánh giá kết quả tính toán lực từ tác dụng lên Rotor bằng phương pháp mạch từ tương đương EMCМ và phương pháp mô phỏng phần tử hữu hạn FEM ta sẽ tổng hợp kết quả từ đồ thị Hình 14 và Hình 16 trong một đồ thị Hình 17.



Hình 15: Lực từ tác động lên Rotor



Hình 16: Đồ thị lực từ tác dụng lên Rotor theo FEM

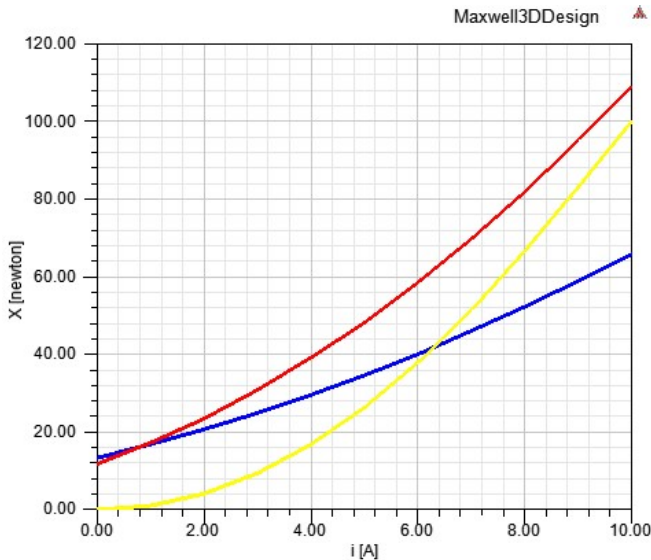


Hình 17: Tổng hợp các lực từ tác động lên Rotor (EMCМ & FEM)

- Lực từ HMB có khe hở phụ theo EMCМ
- Lực từ HMB có khe hở phụ theo FEM

Đường nét đứt màu tím chính là giá trị lực được tính theo phương pháp mạch từ tương đương và đường màu đỏ là giá trị lực được tính theo phương pháp phần tử hữu hạn dùng phần mềm ANSYS 16 khi cho dòng điện thay đổi từ 0A cho tới 10A. Kết quả cho thấy sự sai khác rất nhỏ, ở giá trị dòng điện $i=0\text{A}$ độ sai khác là 1.1% và tại giá trị dòng điện lớn nhất $i=10\text{A}$ độ sai khác là 2%. Giá trị tính toán cao hơn giá trị mô phỏng một phần rất nhỏ bởi khi tính toán đã bỏ qua từ thông tản của nam châm khung thép. Như vậy có thể thấy rằng kết quả tính toán và mô phỏng là hoàn toàn tin cậy.

Vậy để đánh giá ổ đỡ từ kiểu lai dạng có khe hở phụ và không có khe hở phụ ta có thể lấy giá trị mô phỏng FEM của hai kiểu ở Hình 9 và Hình 16 tổng hợp chung trong một đồ thị Hình 18 bên dưới:



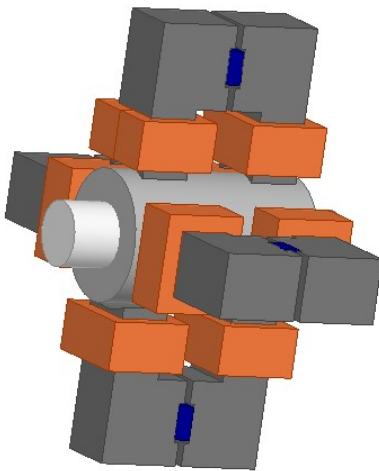
Hình 18: Tổng hợp các lực từ tác dụng lên rotor theo dòng điện

- Lực từ khi hệ chỉ có cuộn dây
- Lực từ HMB không có khe hở phụ
- Lực từ HMB có khe hở phụ

Nhìn đồ thị Hình 18 ta thấy ổ từ lai có khe hở phụ đã giải quyết được cơ bản vấn đề bão hòa từ của ổ từ lai kiểu không có khe hở phụ, biên độ làm việc và khả năng chịu tải của ổ từ lai có khe hở phụ sẽ cao hơn ổ từ lai kiểu không có khe hở phụ.

Vấn đề thứ hai là năng lượng tiêu tốn để nâng Rotor của ổ từ lai có khe hở phụ nhỏ hơn rất nhiều ổ từ lai kiểu không có khe hở phụ, tuy rằng ở thời điểm đầu khi giá trị dòng điện i từ 0A cho tới gần 1A thì ổ từ lai kiểu không có khe hở phụ cho thấy lợi thế hơn ổ từ lai kiểu có khe hở phụ.

Từ đề xuất cho cách bố trí mới cực từ ta cũng đưa ra mô hình ổ từ kiểu lai như Hình 19.



Hình 19: Mô hình ổ từ lai kênh X và Y độc lập có khe hở phụ

Mô hình bao gồm 4 cực, trên mỗi cực nam châm vĩnh cửu được bố trí xen giữa hai cuộn dây như hình vẽ. Tại vị trí tiếp giáp với nam châm vĩnh cửu sẽ có hai khe hở không khí phụ tạo ra đường đi của từ thông cuộn dây tránh hiện tượng bão hòa từ và tổn thất năng lượng khi từ thông cuộn dây và nam châm đi cùng đường. Mô hình này đã tối ưu được năng

lượng theo những minh chứng ở trên và tăng khả năng chịu tải của ổ từ lai.

4. Kết luận

Bài báo đã thực hiện việc phân tích mô phỏng hai cấu trúc cơ bản của ổ đỡ từ kiểu lai với các cực từ độc lập với nhau. Từ các kết quả mô phỏng và phân tích, ta thấy cách bố trí kết hợp giữa nam châm điện và nam châm vĩnh cửu trên cùng một vòng từ thông có thể xảy ra hiện tượng tổn hao sắt từ khiến lực từ suy giảm. Lý do chính ở đây là độ thẩm từ của vật liệu lõi thép nam châm điện và nam châm vĩnh cửu là khác nhau, nhất là khi cường độ từ trường trong mạch tăng thì độ tự thẩm của hai loại vật liệu này càng khác nhau lớn, từ trở của nam châm lúc này lớn hơn nhiều so với từ trở của thép vì thế cần thiết kể một khe hở không khí với tính toán phù hợp để làm đường dẫn từ thông thứ hai cho mạch từ.

Vậy để bảo toàn được giá trị lực từ, giảm tối thiểu tổn thất từ trường thì cần tách riêng hai nguồn từ trường nam châm điện và nam châm vĩnh cửu thông qua khe hở phụ. Ưu điểm cấu trúc ổ từ HMB khe hở phụ sẽ giảm bớt hiện tượng bão hòa từ tại điểm tích hợp nam châm do từ thông có thể đi qua khe hở phụ. Ngoài ra với cấu trúc này luôn đảm bảo có từ thông dư và tạo ra lực điện từ duy trì tối thiểu ngay cả khi không có dòng điện kích thích trong cuộn dây và việc đặt nam châm vĩnh cửu chính giữa mạch từ sẽ giúp từ thông tập trung hơn đồng thời giảm từ thông tản.

Tài liệu tham khảo

- [1] V. Babuska, S.M. Beatty, B.J. DeBlonk, et al., *A review of technology developments in flywheel attitude control and energy transmission systems*, in: Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, vol. 4, March 2004, pp. 2784–2800. ddsdfs
- [2] J.M.D. Coey, *Permanent magnet applications*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials (2002) 441–456. fsdsdfs
- [3] T. Ohji, S. Ichiyama, K. Amei, et al., *A new conveyor system based on a passive magnetic levitation unit having repulsive-type magnetic bearings*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials (2004) e1731–e1733. dsdsd
- [4] A. Hamler, V. Gorican, B. Stumberger, et al., *Passive magnetic bearing*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials (2004) 2379–2380.
- [5] R.B. Zmood, L.J. Qin, J.A. Kirk, et al., *A magnetic bearing system design methodology and its application to a 50Wh open core composite flywheel*, in: Proceedings of the Energy Conversion Engineering Conference 32nd Intersociety, vol. 27 (4), August 1997, pp. 2306–2311. sgdsgsgsd
- [6] Alexei V. Filatov, Patrick T. McMullen, Lanvance A. Hawking, et al., *Magnetic bearing actuator design for a gas expander generator*, in: Proceedings of the Ninth International Symposium on Magnetic Bearings, Lexington Kentucky, USA, pp. 81–86, August 3–6, 2004.
- [7] Brian T. Murphy, Hamid Ouroua, Matthew T. Caprio, John D. Herbst, *Permanent magnet bias, homopolar magnetic bearings for a 130 kW-hr composite flywheel*, in: Proceedings of the Ninth International Symposium on Magnetic Bearings, Lexington Kentucky, USA, pp. 66–72, August 3–6 2004. sgsdsgsd
- [8] Xu. Yanliang, Dun. Yueqin, Wang. Xiuhe, et al., *Analysis of hybrid magnetic bearing with a permanent magnet in the rotor by FEM*, IEEE Transactions on Magnetics 42 (4) (2006) 1363–1366.
- [9] Sun Jinji n , Fang Jiancheng, *A novel structure of permanent-magnet-biased radial hybrid magnetic bearing*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 323 (2011) 202–208 Contents.