

MÔ PHỎNG TỪ TRƯỜNG CỦA PHANH DẦU TỪ TRƯỜNG ĐA CỰC TỪ SIMULATION OF THE MAGNETIC FIELD OF A MULTI-POLE MAGNETORHEOLOGICAL BRAKE

TRẦN THANH TÙNG^{1*}, NGUYỄN TIẾN HOÀNG¹, HOÀNG QUANG TUẤN^{1,2}

¹Viện Cơ khí động lực, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

²Khoa Công nghệ ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email liên hệ: tung.tranhanh2@hust.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả mô phỏng từ trường và tính toán mômen phanh của phanh sử dụng dầu từ trường (MRF). Một mô hình phanh sử dụng dầu từ trường đã được thiết kế, mô phỏng và tính toán lực phanh tạo ra. Mô hình phanh gồm: Hai rotor, một stator với sáu cuộn dây quấn trên và hai lớp dầu nằm giữa rotor và stato. Từ mô hình 3D thì xây dựng mô hình phần tử hữu hạn và giải bài toán từ trường trong môi trường 3D - từ trường của phần mềm FLUX. Từ những kết quả cường độ từ trường, mật độ từ thông sẽ tính toán mômen phanh dựa trên công thức Bingham của dầu từ trường. Tổng kết, nghiên cứu này đã mô phỏng từ trường của phanh và tính toán mômen phanh đối những loại dầu từ trường khác nhau.

Từ khóa: Dầu từ trường (MRF), phanh từ trường (MRB), FLUX.

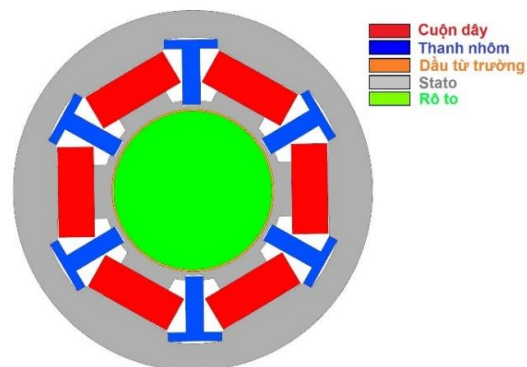
Abstract

The paper presents the results of magnetic field and braking torque using Magnetorheological Fluid (MRF). A Magnetorheological Brake (MRB) was designed, simulated and calculated the generated braking torque. The MR brake model consists of: two rotors, a stator with six upper winding and two MRF layers between the rotors and stator. From the 3D model, a 3D finite element electromagnetic model of MRB was built and simulated by FLUX software. From the results of the magnetic field strength, the magnetic flux density will calculate the braking torque based on the Bingham Rheological model of MRF. Summary, this study simulated the magnetic field of the MR Brake and calculated the braking torque for different MRFs.

Keywords: Magnetorheological Fluid (MRF), magnetorheological Brake (MRB), FLUX.

1. Tổng quan nghiên cứu

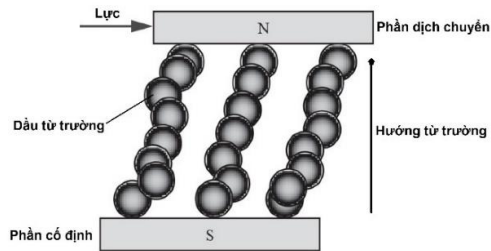
Dầu từ trường (MRF) được phát hiện và nghiên cứu đầu tiên bởi Jacob Rabinow tại Cục Tiêu chuẩn Quốc gia Hoa Kỳ vào cuối những năm 1940 [1]. Theo nhiều nghiên cứu và tài liệu, dầu từ trường (MRF) là một loại vật liệu thông minh có trạng thái pha có thể thay đổi nhanh chóng và thuận nghịch từ chất lỏng có độ nhớt thấp sang chất bán rắn trong một từ trường có kiểm soát. Thông thường, chất lỏng MR bao gồm các hạt sắt từ hoặc thuận từ mềm ($0,03 \sim 10 \mu\text{m}$) phân tán trong chất lỏng. Hiện nay, càng có nhiều nghiên cứu về MRF và ứng dụng của dầu. Có nhiều ứng dụng MRF như: giảm chấn, ly hợp, giá đỡ, rô bốt, xúc giác và phanh. Ví dụ, Liu và cộng sự đã nghiên cứu “Phân tích và mô phỏng rung động của máy công cụ dựa trên giảm chấn từ trường” [2]. Jing và Shubua đã đưa ra “Phân tích mômen phanh của phanh dầu từ trường dạng đĩa” [3]. Ngoài ra còn có nhiều nghiên cứu khác về dầu từ trường (MRF).



Hình 1. Phanh sử dụng dầu từ trường 1 lớp dầu

Trong một thiết kế khác, phanh sử dụng dầu từ trường với nhiều cực điện từ đã được sử dụng thay cho thiết kế phanh một cực thông thường. Mặc dù phanh một cực có cấu tạo đơn giản và dễ chế tạo nhưng hiệu quả phanh của nó không cao. Hình 1 thể hiện phanh sử dụng dầu từ trường với 1 lớp dầu và 6 cực từ cách đều nhau.

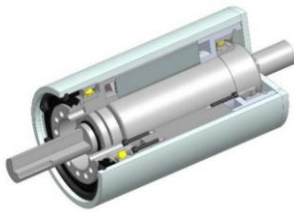
Khi chất lỏng MR được sử dụng như một cơ cấu chấp hành có thể điều khiển được trong các thiết bị ứng dụng, ứng xử của chất lỏng được phân loại thành bốn chế độ khác nhau: Chế độ chảy, chế độ ép, chế độ kẹp và chế độ cắt. Trong chế độ cắt, thông thường người ta cho rằng một trong hai bộ phận kích hoạt từ trường có thể tự do dịch hoặc xoay so với bộ phận kia. Trong nghiên cứu này, dầu từ trường được sử dụng ở chế độ cắt cho phanh MR.



Hình 2. Ứng dụng cắt trong dầu từ trường

2. Thiết kế phanh từ trường nhiều cực và sử dụng hai lớp dầu từ trường

Để tạo ra một từ trường để điều khiển mômen xoắn, sáu cuộn dây được đặt trên sáu cực stator của phanh. Dầu từ trường (MRF) bao gồm hai lớp, một lớp nằm giữa rotor bên trong và stator và lớp kia nằm giữa vòng phân cách hình trụ và rotor bên ngoài. Dưới đây là mô hình thiết kế 3D của phanh sử dụng dầu từ trường đa cực và hai lớp dầu từ trường trên phần mềm thiết kế 3D NX.

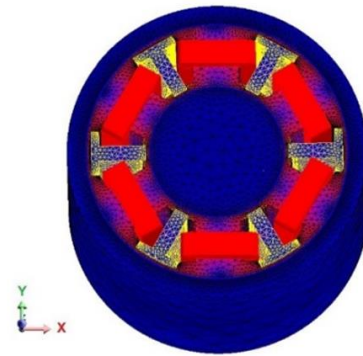


Hình 3. Thiết kế mô hình 3D phanh sử dụng dầu từ trường trên phần mềm NX

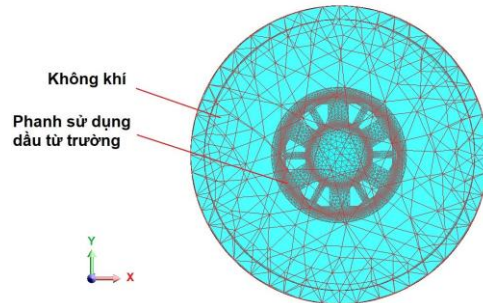
Vì vậy, nó được gọi là phanh nhiều cực, mục đích chính là cải thiện mômen xoắn của phanh. Bên cạnh đó, vòng ngăn cách hình trụ ngăn chặn sự rò rỉ dầu từ trường có thể chảy vào bên trong cuộn dây. Những thông số cơ bản của một phanh sử dụng dầu từ trường với sáu cực và hai lớp dầu đã đưa ra trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số cơ bản của thiết kế phanh

Thông số thiết kế	Giá trị (mm)
Bán kính rotor trong	22
Bề dày lớp dầu từ trường bên trong	0,5
Bán kính stator	43,5
Bề dày lớp dầu từ trường bên ngoài	0,5
Bán kính rotor ngoài	50
Độ dày cực	15
Khe hở lắp thanh chữ T	5
Chiều dài phanh	75



Hình 4. Mô hình chia lưới trên phần mềm FLUX



Hình 5. Mô hình chia lưới môi trường xung quanh

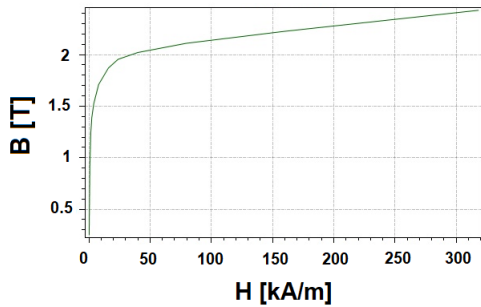
3. Xây dựng bài toán và phương pháp tính mômen phanh

Từ mẫu thiết kế 3D trên phần mềm NX, mô hình được đưa vào môi trường 3D - từ trường của phần mềm FLUX để thiết lập bài toán.

Sử dụng Meshgems của Voronoi-Delaury để chia lưới mô hình, lưới được sử dụng ở đây là lưới tetra. Một tứ diện đều có 4 đỉnh, 6 cạnh và được giới hạn bởi 4 mặt giác.

Bảng 2. Thông số lưới của mô hình

Thông số	Số lượng phần tử
Nodes	390.083
Phần tử đường	55.069
Phần tử mặt phẳng	499.588
Phần tử thể tích	2.224.810



Hình 6. Đường cong B-H của vật liệu thép 1018

3.1. Vật liệu

Thép từ tính 1018:

Theo tham khảo cùng với xem xét chi phí vật liệu và khả năng gia công, thép 1018 sẽ được lựa chọn để gia công cho phanh sử dụng dầu từ trường. Loại thép này hỗ trợ làm tăng cường độ từ trường cho lớp dầu phanh.

Hơn thế nữa, thép này có đặc tính thông dụng khác như là: nhiệt và đặc tính cấu tạo. Thép này sẽ được sử dụng để gia công những chi tiết: Rotor trong và ngoài, stator.

Bên cạnh đó 6 thanh nhôm chữ T đã được lắp đặt ngăn cách giữa 2 cuộn dây cạnh nhau. Hiện tượng này ảnh hưởng đến từ trường phanh. Vì nhôm là vật liệu có tính chất cách từ, giá thành hợp lý cùng với đó thì nhôm là vật liệu có sẵn trên thị trường.

Dầu từ trường:

Dầu từ trường của hãng Lord được chia làm 3 nhóm chính: Ứng suất chảy thấp, trung bình và cao.

Một trong những thông số quan trọng của dầu từ trường trong ứng dụng cắt này là ứng suất chảy theo từ trường cấp vào. Tùy thuộc vào từng ứng dụng và mục đích yêu cầu phanh, những thông số như: độ nhớt dầu khi không có từ trường, ứng suất chảy, đặc tính từ trường, độ dẫn nhiệt và hệ số giãn nở nhiệt. Trong Bảng 3 đưa ra những thông số quan trọng của 4 loại dầu khác nhau (MRF-122EG, MRF-126LF: Ứng suất chảy thấp; MRF-132DG: Ứng suất chảy trung bình và MRF-140BC: Ứng suất chảy cao) [5]. Với những kết cấu và ứng dụng khác nhau thì sử dụng những loại dầu từ trường khác nhau. Đối với phanh sử dụng dầu từ trường thì thông số ứng suất chảy ảnh hưởng trực tiếp đến mômen phanh.

3.2. Tính toán mômen phanh

Trong nghiên cứu này, có 4 loại dầu (MRF-122EG; MRF-122LF; MRF-132DG and MRF-140BC) được sử dụng để đưa vào mô phỏng và tính toán. Ứng xử của dầu từ trường được thể hiện trong ứng dụng mô hình ứng xử của Bingham [6]. Công thức Bingham là công thức đơn giản để mô tả ứng xử của dầu từ trường. Ứng dụng trong trường hợp ứng suất cắt:

$$\tau = \tau_\gamma + \eta \cdot \dot{\gamma} \tag{1}$$

Trong đó: τ là ứng suất cắt tổng, τ_γ là ứng suất chảy theo từ trường đặt vào và phụ thuộc vào cường độ từ trường H_{MR} trong chất lỏng, η là độ nhớt của dầu từ trường khi không có từ trường tác dụng và $\dot{\gamma}$ là tốc độ cắt của phanh sử dụng dầu từ trường ở chế độ cắt. Để đơn giản hóa việc phân tích mômen xoắn, các đặc tính ứng suất cắt trong lớp dầu từ trường được tạo ra, mômen phanh có thể được tính toán bằng từ thông đi qua lớp dầu từ trường theo phương vuông góc. Khi một dòng điện đầu vào bên ngoài được đặt vào các cuộn dây, từ thông xuất hiện. Trong phanh sử dụng dầu từ trường được đề xuất này, mômen xoắn phanh (T_{MR}) được tạo ra bởi một lớp dầu từ trường có thể được xác định như sau:

Bảng 3. Đặc tính của một số loại dầu từ trường trên thị trường [5]

Đặc tính dầu	MRF-122EG	MRF-126LF	MRF-132DG	MRF-140BC
Hạt mang theo	Hydrocacbon	Hydrocacbon	Hydrocacbon	Hydrocacbon
Khối lượng riêng (g.cm ⁻³)	2,28 ÷ 2,48	2,64 ÷ 2,84	2,95 ÷ 3,15	3,75 ÷ 3,95
Ứng suất chảy ở 100 kA.m ⁻¹ (kPa)	22	30	30	29
Ứng suất chảy ở 200 kA.m ⁻¹ (kPa)	32	39	44	50
Độ nhớt (mPa)	0,042 ± 0,020	0,070 ± 0,020	0,112 ± 0,02	0,1140 ± 0,040
Nhiệt độ hoạt động (°C)	-40 ÷ 130	-40 ÷ 130	-40 ÷ 130	-40 ÷ 130
Độ dẫn nhiệt (W.m ⁻¹ .°C ⁻¹)	0,21 ÷ 0,81	-	0,25 ÷ 1,06	-
Hệ số giãn nở nhiệt 0÷50°C	6,5 x 10 ⁻⁴	-	5,5 x 10 ⁻⁴	-

$$T_{MR} = R_{MR}^2 \int_{A_{MR}} \tau dA_{MR} \quad (2)$$

$$T_{MR} = R_{MR}^2 \int_{A_{MR}} \tau_{\gamma} dA_{MR} + \frac{2\pi\eta\omega z}{g} R_{MR}^3 \quad (3)$$

Trong đó: A_{MR} là vùng chất lỏng từ trường hoạt động. R_{MR} là bán kính lớp dầu từ trường. z là chiều dài của phanh xét, ω là tốc độ quay của phanh và g là bề dày khe hở chứa dầu từ trường. Tổng mômen phanh của phanh MR (T_{bt}) có thể được tính bằng tổng mômen xoắn phanh (T_{MR}) và mômen ma sát sinh ra từ các bộ phận làm kín và chịu lực trong phanh MR (T_{fr}):

$$T_{bt} = T_{MR} + T_{fr} \quad (4)$$

Vì cấu tạo phanh sử dụng dầu từ trường gồm có hai lớp dầu: Lớp dầu trong và lớp dầu ngoài nên tổng mômen phanh bằng tổng mômen phanh của lớp trong và lớp ngoài:

$$T_{bt} = (R_{MRi}^2 + R_{MRo}^2) \int_0^z \int_0^{2\pi} \tau_{\gamma} d\theta dz + \frac{2\pi\eta\omega z}{g} (R_{MRi}^3 + R_{MRo}^3) + T_{fr} \quad (5)$$

Trong đó: T_{bt} là tổng mômen phanh của phanh MR, T_{MRi} và T_{MRo} là mômen phanh của dầu từ trường bên trong và bên ngoài, T_{fr} là mômen ma sát sinh ra từ các bộ phận làm kín và chịu lực trong phanh. R_{MRi} , A_{MRi} là bán kính và vùng làm việc của lớp chất lỏng từ trường bên trong. R_{MRo} , A_{MRo} là bán kính và vùng làm việc của lớp chất lỏng MR bên ngoài.

4. Mô phỏng và phân tích

Trong bài báo này sẽ đưa kết quả của vùng từ trường tập trung, phân bố từ thông và mômen phanh ở các loại dầu khác nhau đã liệt kê trong Bảng 3. Dòng điện cấp vào cuộn dây từ 0A đến 3A với bước nhảy là 0,5A mỗi lần. Phần mềm FLUX là một trong những phần mềm được sử dụng cho vấn đề từ tính ở nhiều khía cạnh: 2D, Skew, 3D và PEEC. Dựa trên cấu trúc của phanh nhiều cuộn dây hai lớp dầu từ trường, nên áp dụng điều kiện biên cho mô hình. Sau khi mô phỏng từ trường bằng phần mềm FLUX, các kết quả được phân tích: cường độ từ trường, mật độ từ thông và mômen phanh.

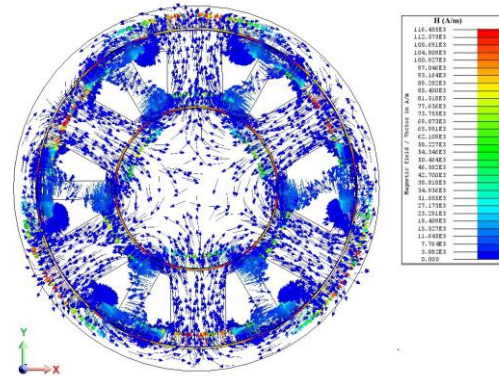
4.1. Cường độ từ trường

Cường độ từ trường là một trong những thông số quan trọng để chuyển đổi ứng suất chảy, từ đó có thể tính toán mômen phanh theo công thức (5). Hình 7 cho thấy cường độ từ tính đặc biệt của tất cả các bộ phận phanh MR: Stator, rotor, thanh nhôm hình chữ T, lớp cách stator và rotor và 2 lớp chất lỏng MR. Cường

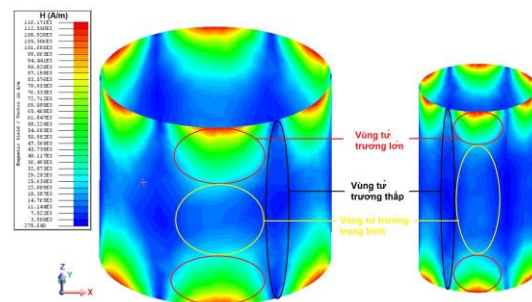
độ từ trường cực đại đạt 116,3kA.m⁻¹ tại dòng điện 3A.

Đường sức từ ở 2 cuộn dây gần nhau: Từ trong cuộn dây 1 đi vuông góc với đầu từ trường, ra rotor ngoài và quay lại đi vào cuộn dây 2 bên cạnh theo chiều đi ngược lại. Tạo thành 1 vòng khép kín từ thông.

Với thiết kế phanh dầu từ trường đa cực từ có cường độ từ trường lớn hơn mà còn về diện tích tiếp xúc và tạo ra mômen phanh hiệu quả hơn.



Hình 7. Cường độ từ trường của phanh



Hình 8. Phân bố từ trường trên lớp dầu từ trường

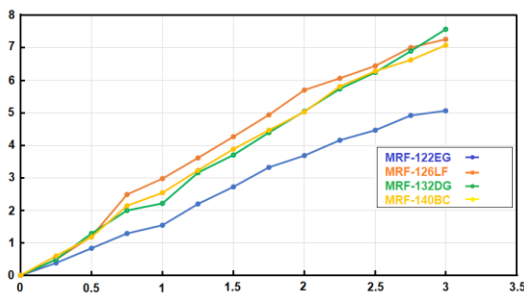
Hình 8 thể hiện vùng phân bố từ trường trên lớp dầu của phanh sử dụng dầu từ trường ở cả lớp trong và lớp ngoài. Từ trường được chia làm 3 vùng chính là: Vùng từ trường lớn, vùng từ trường trung bình và vùng từ trường thấp. Phân bố không đều theo chiều dọc của một cuộn dây, cường độ từ trường lớn nhất tập trung ở đầu đỉnh cuộn dây thì ở đây cường độ được bổ sung ở cả hai phía của cuộn dây (theo chiều dọc và chiều ngang). Tiếp theo đó sẽ giảm dần về phía giữa cuộn dây, được thể hiện màu xanh nhạt. Vị trí ở trên đỉnh và chân thanh nhôm chữ T thì có cường độ nhỏ là vì nhôm là vật liệu dẫn từ thấp và cùng với đó đường sức từ tại đây ít tập trung.

4.2. Mômen phanh

Mômen phanh của cơ cấu phanh này phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố như là: kết cấu phanh, các thiết bị lắp ráp kèm theo và dòng điện cuộn dây. Một trong

những yếu tố quan trọng khác nữa đó là loại dầu từ trường được sử dụng trong phanh này. Trong bài toán thì sẽ tính toán cho 4 loại dầu từ trường sau: MRF-122EG, MRF-126LF, MRF-132DG và MRF-140BC.

Hình 9 thể hiện mômen phanh khi thay đổi dòng điện cấp vào của 4 loại dầu từ trường khác nhau. Trong các loại dầu nói trên thì dầu MRF-132DG sẽ tạo ra mômen phanh tốt nhất khi ở dòng điện 3A vào khoảng 7,56N.m. Và dầu sinh ra mômen thấp nhất là MRF-122EG là 5,07N.m. Đối với dầu MRF-126LF thì tại các thời điểm dòng điện từ 0,75A đến 2,5A đều sinh ra mômen lớn hơn các loại dầu còn lại nhưng khi tăng dòng thì mômen lại tăng chậm.



Hình 9. Mômen phanh khi thay đổi dòng điện theo từng loại dầu từ trường (MRF-122EG, MRF-126LF, MRF-132DG và MRF-140BC)

5. Kết luận

Ứng dụng của dầu từ trường đang là vấn đề được rất nhiều nhà khoa học quan tâm và nghiên cứu. Trong bài báo này đã đưa ra một kết cấu phanh có 6 cực từ và sử dụng 2 lớp dầu từ trường. Bài báo này đạt được những kết quả sau đây:

- Xây dựng mô hình 3D cơ cấu phanh sử dụng dầu từ trường trên phần mềm thiết kế NX;
- Đưa ra kết quả: Từ trường, mật độ từ thông và mômen. Tính toán mômen phanh được tính toán cho 4 loại dầu từ trường khác nhau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Rabinow. J, *The magnetic fluid clutch*, AIEE Transactions, Vol.67, pp.1308-1315, 1948.
- [2] Liu S. and Zhang X., *Analysis and simulation of machine tool vibration based on magneto-rheological dampers*, Advanced materials research, 971-973, pp.368-371, 2014.
- [3] Ping W., Jing H. and Shuhua. W., *Analysis of Torque in Magnetorheological Rotary Brake*, Advanced Materials Research, 239-242, pp.2297-2301, 2011.
- [4] Wei W. D., *Application Analysis of Magnetorheological Technology in Hydraulic Transmission and Control*, Journal of Physics: Conference Series (ISPECE), 1449, 012123, 2019.
- [5] Lord Technical Data 2019.
Website: www.lord.com
- [6] Osama A. , Craig A. R. and William K., *Magneto-Rheological Fluids: Materials, characterization and devices*, Journal of intelligent material systems and structures, Vol.7, pp.123-130, 1996.

Ngày nhận bài:	26/6/2021
Ngày nhận bản sửa:	05/8/2021
Ngày duyệt đăng:	16/8/2021