

Nghiên cứu phát triển hệ thống ly hợp lưu chất điện - từ biến dùng điều khiển tốc độ tải được truyền động bằng động cơ điện

Nguyễn Quốc Hưng¹, Lê Đại Hiệp¹, Nguyễn Minh Huy², Nguyễn Thời Trung^{3*}

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp TP Hồ Chí Minh

²Khoa Kỹ thuật, Trường Đại học Tiền Giang

³Viện Khoa học Tính toán, Trường Đại học Tôn Đức Thắng

Ngày nhận bài 30/9/2019; ngày chuyển phản biện 3/10/2019; ngày nhận phản biện 4/11/2019; ngày chấp nhận đăng 12/11/2019

Tóm tắt:

Trong nghiên cứu này, các tác giả đề xuất cấu hình ly hợp mới sử dụng lưu chất điện - từ biến (MRF) để điều khiển tốc độ đầu ra của động cơ điện. Cấu hình ly hợp mới đã khắc phục được các nhược điểm của ly hợp MRF cũ, như khắc phục được hiện tượng thắt nút cổ chai, không cần sử dụng cổ góp điện. Mô hình ứng xử lưu biến dẻo Bingham được sử dụng để tính toán mô men truyền động của ly hợp sử dụng lưu chất điện - từ biến. Từ cấu hình ly hợp được đề xuất, nghiên cứu đã tối ưu hóa đa mục tiêu để tìm ra kích thước tối ưu nhất của ly hợp sao cho khối lượng và công suất là nhỏ nhất với mô men truyền động cần thiết. Một ly hợp có mô men truyền động 10 Nm đã được thiết kế và chế tạo dựa trên kết quả thiết kế. Hệ thống thí nghiệm đo mô men của ly hợp được xây dựng để kiểm tra đặc tính của ly hợp. Bên cạnh đó, hệ thống điều khiển tốc độ đầu ra của tải với quy luật mong muốn cũng được xây dựng và kiểm chứng.

Từ khóa: điều khiển tốc độ động cơ, lưu chất điện - từ biến (MRF), ly hợp sử dụng lưu chất điện - từ biến (MRC), phanh MRF.

Chỉ số phân loại: 2.3

Đặt vấn đề

Thông thường tốc độ của động cơ điện nói chung, động cơ DC nói riêng được điều khiển bằng cách thay đổi hiệu điện thế cung cấp cho phần cứng. Tuy nhiên, phương pháp này khó đáp ứng được ở tốc độ thấp. Cùng với đó, đáp ứng cơ của hệ thống điều khiển động cơ không đủ nhanh để đáp ứng theo mô men đầu ra trong những trường hợp phát sinh những mô men đột biến. Các vấn đề này gây ra những khó khăn nhất định cho việc điều khiển tốc độ của hệ thống tải dẫn động bởi động cơ. Những năm gần đây, điều khiển tốc độ động cơ sử dụng phanh và ly hợp lưu chất điện biến (Electro-rheological Fluid - ERF) đã được nghiên cứu và áp dụng [1-2]. Tuy nhiên, trong những nghiên cứu này vẫn còn tồn tại một số vấn đề mà nguyên nhân chính là do ứng suất làm việc của ERF tương đối nhỏ, do vậy để tạo ra mô men lớn thì bản cực phải lớn, dẫn đến kích thước của hệ thống lớn. Lưu chất điện - từ biến (Magneto-rheological Fluid: MRF) là một loại lưu chất thông minh có chứa các hạt phân tử vật liệu từ tính có khả năng chuyển đổi tính chất lưu biến khá nhanh và mạnh khi chịu tác động của từ trường. Ưu điểm nổi bật của lưu chất MRF so với lưu chất ERF là ứng suất chảy dẻo cao hơn nhiều lần, ít bị lắng đọng hơn và hiệu

điện thế tác động nhỏ hơn. Do vậy, lưu chất MRF hiện đang được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong các ứng dụng khác như phanh, cơ cấu hai chiều và ly hợp [3-4].

Nghiên cứu này phát triển hệ thống điều khiển tốc độ của tải được dẫn động bởi động cơ điện thông qua ly hợp MRF. Cấu hình mới của ly hợp MRF cũng được đề xuất để giải quyết các nhược điểm tồn tại ở các nghiên cứu trước như hiện tượng thắt cổ chai, dùng cổ góp điện. Mô hình tính toán mômen truyền động của ly hợp MRF được xây dựng dựa trên ứng xử lưu biến dẻo Bingham của lưu chất MRF. Thiết kế tối ưu của ly hợp MRF được thực hiện để tìm ra những kích thước tối ưu nhằm tạo ra mô men cần thiết với khối lượng và công suất nhỏ nhất có thể. Dựa vào kết quả tối ưu, một mô hình của ly hợp MRF đã được chế tạo để thực hiện thí nghiệm nghiên cứu các đặc tính kỹ thuật và kiểm chứng với kết quả lý thuyết.

Nội dung nghiên cứu và thiết kế chế tạo

Hệ thống ly hợp MRF dùng điều khiển tốc độ quay của trục tải

Cấu hình ly hợp sử dụng lưu chất điện - từ biến truyền thống được trình bày ở hình 1. Trong ly hợp (hình 1A), cuộn

*Tác giả liên hệ: nguyenthotrung@tdtu.edu.vn

Development of a speed control system for rotary load driven by electric motors via magneto-rheological clutch

Quoc Hung Nguyen¹, Dai Hiep Le¹, Minh Huy Nguyen²,
Thoi Trung Nguyen^{3*}

¹Faculty of Mechanical Engineering,

Industrial University of Ho Chi Minh City

²Faculty of Engineering, Tien Giang University

³Institute for Computational Science, Ton Duc Thang University

Received 30 September 2019; accepted 12 November 2019

Abstract:

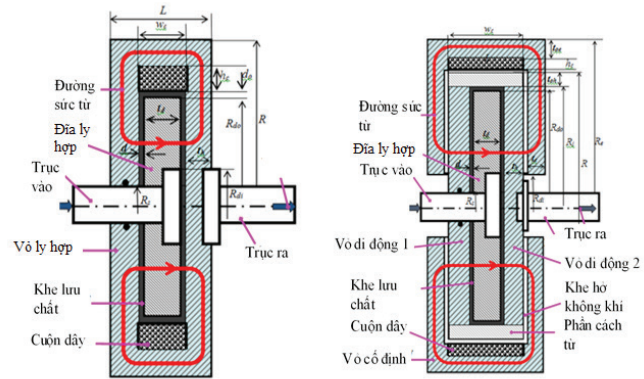
In this work, the new configuration of magneto-rheological clutch (MRC) is proposed to control the output speed of electrical motor. This configuration deals with some drawbacks in conventional configuration such as bottle-necks phenomenon, using collector with brushes (commutator). The Bingham model has been employed to analyse the transmitting torque of MRC. An optimal design of the MRC is then established to find out the optimal geometric dimensions of the clutch that can transform a required torque with the minimum mass and power consumption. Based on the results, a prototype of the MRC with 10 Nm transmitting torque has been manufactured, and its performance characteristics have been experimentally investigated. In addition, a controller has also been designed to control the output speed of the system. In order to evaluate the effectiveness of the proposed motor speed control system, experimental results of the system are obtained and presented with discussions.

Keywords: magneto-rheological fluid (MRF), MRF brake, MR clutch (MRC), speed control.

Classification number: 2.3

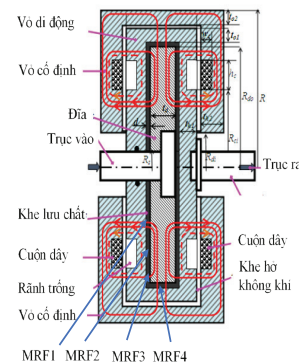
dây được lắp đặt trên vỏ của ly hợp. Vỏ này được nối với trục ra của ly hợp và có chuyển động quay trong quá trình ly hợp làm việc. Vì vậy, điện điều khiển cho ly hợp phải được cấp thông qua cổ góp điện. Cổ góp điện không những làm tăng mô men ma sát mà còn bị mài mòn theo thời gian nên cần quá trình bảo dưỡng liên tục. Hơn thế nữa, với việc đặt cuộn dây bên ngoài vỏ trụ, hiện tượng thất nút cổ chai xảy ra, làm giảm đi hiệu suất làm việc cũng như tăng kích thước của ly hợp khi yêu cầu mô men lớn. Ly hợp hình 1B được đề xuất với việc thiết kế một hộp vỏ di động đặt bên trong

vỏ cố định bên ngoài [5]. Cuộn dây được đặt trên vỏ cố định nên ly hợp không cần sử dụng cổ góp điện để cấp điện cho cuộn dây. Trong nghiên cứu này, cấu hình ly hợp mới được đề xuất ở hình 2.



(A) Cuộn dây đặt trên vỏ quay của ly hợp (B) Cuộn dây đặt trên vỏ ngoài cố định

Hình 1. Cấu hình ly hợp dùng lưu chất điện - từ biến truyền thống: (A) Cuộn dây đặt trên vỏ quay của ly hợp; (B) Cuộn dây đặt trên vỏ ngoài cố định.



Hình 2. Ly hợp được đề xuất với cuộn dây nằm 2 bên vỏ cố định.

Ở cấu hình ly hợp được đề xuất, cuộn dây được đặt ở hai bên vỏ cố định. Khi cấp điện ngược chiều cho hai cuộn dây, từ thông sinh ra đi qua thành mỏng của vỏ di động đến bảo hòa thì bắt đầu đi xuyên qua các rãnh lưu chất. Dưới ảnh hưởng của từ thông, ứng xử của lưu chất thay đổi theo công thức [3]:

$$\tau_y = \tau_{y0} + (\tau_{y\infty} - \tau_{y0}) \left(2e^{-B\alpha_{\tau y}} - e^{-2B\alpha_{\tau y}} \right) \quad (1)$$

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left(2e^{-B\alpha_{\mu}} - e^{-2B\alpha_{\mu}} \right)$$

Trong đó, τ_y , μ lần lượt là ứng suất chảy, độ nhớt của lưu chất dưới tác động của từ trường; τ_{y0} , μ_0 lần lượt là ứng suất chảy, độ nhớt của lưu chất khi không có từ trường tác động; $\tau_{y\infty}$, μ_{∞} lần lượt là giá trị bão hòa của ứng suất chảy, độ nhớt của lưu chất khi có từ trường rất lớn tác động (lưu

chất ở trạng thái bão hòa từ trường); α_{sty} , $\alpha_{s\mu}$ lần lượt là hệ số mô men bão hòa của ứng suất chảy, độ nhớt; B là mật độ từ trường được đặt vào. Các thông số cơ bản mô hình Bingham của MRF dựa trên thực nghiệm được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số lưu biến của lưu chất MR 132 DG.

Thông số	Giá trị
τ_{yo}	15 pa
$\tau_{y\infty}$	40000 pa
μ_o	0,1 pa.s
μ_{∞}	3,8 pa.s
$\alpha_{s\mu}$	4,5 T ⁻¹
α_{sty}	2,9 T ⁻¹

Hiện nay đã có nhiều nghiên cứu về việc phân tích mô men sinh ra của phanh hay ly hợp [6]. Mô men truyền động của ly hợp sử dụng lưu chất điện - từ biến chủ yếu bao gồm các lực: lực ma sát giữa lưu chất với các mặt tiếp xúc của đĩa, lực ma sát giữa lưu chất với mặt trụ viên ngoài của đĩa, ngoài ra còn có mô men sinh ra của phốt lắp trên trục có tác dụng ngăn chặn sự rò rỉ lưu chất ra bên ngoài. Mô men truyền động của ly hợp được xác định như sau:

$$T_c = \frac{\pi \mu_{ci} R^4}{d} \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_{ci}} \right)^4 \right] \Omega + \frac{4\pi \tau_{yd1}}{3} (R_{ci}^3 - R_i^3) + \frac{\pi \mu_{d2} R^4}{d} \left[1 - \left(\frac{R_{ci}}{R_{co}} \right)^4 \right] \Omega + \frac{4\pi \tau_{yd2}}{3} (R_{co}^3 - R_{ci}^3) + \frac{\pi \mu_{d3} R^4}{d} \left[1 - \left(\frac{R_{co}}{R_d} \right)^4 \right] \Omega + \frac{4\pi \tau_{yd3}}{3} (R_d^3 - R_{co}^3) + 2\pi R_d^2 t_d \left(\tau_{yd4} + \mu_{d4} \frac{\Omega R_d}{d_o} \right) + 2T_{sf} \quad (2)$$

$$T_{co} = \frac{\pi \mu_{do} R^4}{d} \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_d} \right)^4 \right] \Omega + \frac{4\pi \tau_{yo}}{3} (R_d^3 - R_i^3) + 2\pi R_d^2 t_d \left(\tau_{yo} + \mu_{do} \frac{\Omega R_d}{d_o} \right) + 2T_{sf} \quad (3)$$

$$T_{sf} = 0,65 (2R_s)^2 \Omega^{1/3} \quad (4)$$

Với T_c và T_{co} là mô men truyền động khi có từ trường và không có từ trường tác động; R_i và R_d là bán kính trong và ngoài của đĩa; t_d là chiều dày của đĩa; R_{ci} và R_{co} là bán kính trong và ngoài của cuộn dây; d là khe hở ở mặt đầu của đĩa với vỏ ly hợp; d_o là khe hở giữa mặt trụ ngoài của vỏ ly hợp và vỏ cố định; Ω là vận tốc góc tương đối giữa trục chủ động và trục bị động; τ_{yd1} , τ_{yd2} , τ_{yd3} , τ_{yd4} là giới hạn chảy của MRF1, MRF2, MRF3, MRF4; τ_{yo} là giới hạn chảy của lưu chất MRF ở trạng thái không có tác động của từ trường; μ_{d1} , μ_{d2} , μ_{d3} , μ_{d4} là độ nhớt sau chảy dẻo của MRF1, MRF2, MRF3, MRF4; μ_{do} là độ nhớt của lưu chất MRF ở trạng thái không có tác động của từ trường; T_{sf} là mô men ma sát giữa trục và phốt.

Thiết kế tối ưu ly hợp MRF

Trong thiết kế bài toán tối ưu cho ly hợp sử dụng lưu chất MRF, khối lượng và công suất của ly hợp được xem như hàm mục tiêu của bài toán tối ưu trong thiết kế. Khối

lượng càng nhỏ thì kết cấu ly hợp càng gọn gàng, phù hợp ở những nơi bị giới hạn về không gian lắp đặt. Hơn thế nữa, mô men quán tính của ly hợp sẽ được giảm đi đáng kể. Điều này ảnh hưởng nhiều trong việc điều khiển tốc độ đầu ra của ly hợp. Công suất cần thiết cho ly hợp liên quan trực tiếp đến nguồn điện cấp cho các cuộn dây. Công suất càng nhỏ, càng tiết kiệm năng lượng cũng như phù hợp với nguồn điện dùng để điều khiển mô men truyền động của ly hợp. Khối lượng của ly hợp được xác định theo công thức sau:

$$m = V_d \rho_d + V_{v1} \rho_{v1} + V_{v2} \rho_{v2} + V_{MR} \rho_{MR} + V_{tr} \rho_{tr} + V_c \rho_c \quad (5)$$

Với V_d , V_{v1} , V_{v2} , V_{MR} , V_{tr} và V_c lần lượt là thể tích của đĩa, vỏ di động, vỏ cố định, lưu chất MRF, các trục của ly hợp và cuộn dây; ρ_d , ρ_{v1} , ρ_{v2} , ρ_{MR} , ρ_{tr} , ρ_c lần lượt là khối lượng riêng của đĩa, vỏ di động, vỏ cố định, lưu chất MRF, trục của ly hợp và cuộn dây.

Công suất tiêu thụ của 2 cuộn dây của ly hợp được xác định như sau:

$$P = 2I^2 R_w = 2I^2 \frac{2R_c \varepsilon w_c h_c r}{\pi d_w^2} \quad (6)$$

Trong đó, I là cường độ dòng điện cấp cho cuộn dây và R_w là điện trở của mỗi cuộn dây, R_c là bán kính trung bình của cuộn dây; ε là hệ số điện dẫn khi quấn dây, hệ số này thiết lập là 0,8 trong thiết kế này; r là trở kháng của dây (0,01726 cho dây đồng); d_w là đường kính của dây quấn; w_c , h_c là chiều dài và rộng của cuộn dây quấn.

Để đơn giản cho quá trình tối ưu đa mục tiêu, hàm đa mục tiêu được tuyến tính hóa như sau:

$$OBJ = \alpha \frac{m_c}{m_r} + \beta \frac{P}{P_r} \quad (7)$$

Trong đó, m_c , P là khối lượng và công suất của ly hợp; m_r , P_r là khối lượng và công suất tham chiếu của ly hợp được xác định từ thiết kế ban đầu trước tối ưu; α , β là các trọng số của hàm mục tiêu có giá trị từ 0÷1,0. Trong nghiên cứu này, khối lượng và công suất được xác định là có ảnh hưởng ngang nhau nên giá trị của α , β được chọn bằng nhau và bằng 0,5.

Để phân tích mô men truyền động của ly hợp MRF, mô hình phần tử hữu hạn của ly hợp dùng phần mềm ANSYS như hình 3 được sử dụng để tính toán từ trường qua khe MRF.

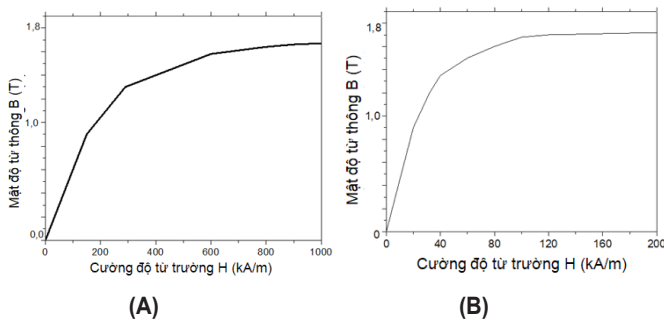


Hình 3. Mô hình phần tử hữu hạn dùng phân tích mạch từ của ly hợp.

Trong nghiên cứu này, mỗi cạnh được chia 10 phần tử. Vật liệu của các chi tiết ly hợp được trình bày trong bảng 2. Trong đó, đĩa và vỏ của ly hợp sử dụng vật liệu có khả năng dẫn từ tốt. Trục sử dụng vật liệu cách từ để ngăn chặn sự đông cứng lưu chất ở gần khu vực phốt chấn làm hư hỏng phốt. Lưu chất 132 DG được sử dụng trong tính toán thiết kế ở nghiên cứu này vì có ứng suất chảy, độ nhớt ở mức trung bình. Đường cong quan hệ giữa cường độ từ trường và từ thông đi qua được trình bày ở hình 4.

Bảng 2. Vật liệu sử dụng trong thiết kế ly hợp MRF.

Chi tiết	Vật liệu	Khối lượng riêng (kg.m^{-3})
Trục	Inox 304	7900
Đĩa và vỏ	Thép C45	7850
Cuộn dây	Đồng	8900



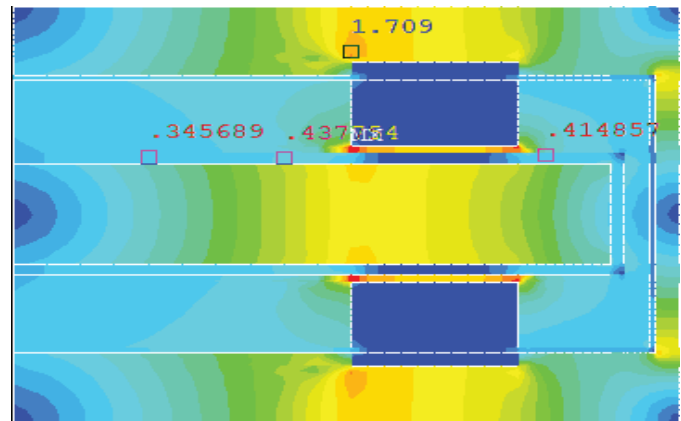
Hình 4. Đường cong B-H của vật liệu sử dụng để thiết kế ly hợp: (A) Vật liệu thép C45; (B) Lưu chất MR132DG.

Công cụ tối ưu tích hợp với mô hình phần tử hữu hạn trên phần mềm Ansys được sử dụng để tìm lời giải tối ưu. Đã có nhiều nghiên cứu trước đây trình bày quá trình tối ưu cơ cấu sử dụng lưu chất MR [7, 8]. Đầu tiên, mô hình phần tử hữu hạn cho ly hợp được xây dựng sử dụng phần tử PLANE13 của Ansys. Môi trường đa từ trường được sử dụng để giải mạch từ đi qua lưu chất. Sau đó tính lưu biến của lưu chất từ công thức (1) được xác định dựa vào từ thông trung bình của từng đoạn lưu chất. Sau đó, mô men truyền động, khối lượng và công suất của ly hợp được xác định lần lượt qua công thức (2), (5) và (6). Giá trị khối lượng và công suất tính được từ những giá trị ban đầu được xem như các tham số tham chiếu ở công thức (7). Thuật toán tối ưu First order trong Ansys được sử dụng để giải bài toán tối ưu với mô men truyền động được ràng buộc là lớn hơn hoặc bằng 10 Nm. Điều kiện hội tụ của các biến được thiết lập là 0,1%. Bên cạnh đó, kích thước khe hở không khí giữa vỏ cố định và vỏ di động được cố định là 0,3 mm. Lưu ý rằng, khe hở càng nhỏ, từ thông đi qua dễ dàng, mô men truyền động của ly hợp càng lớn, tổn thất từ trường nhỏ. Tuy nhiên, độ hở của khe không khí cần được suy xét trên phương diện khả năng, chi phí gia công và lắp ráp. Tương tự vậy, bề rộng của rãnh lưu chất cũng được cố định là 0,8 mm. Khe lưu chất càng nhỏ, hiệu suất của ly hợp càng lớn và ngược lại. Đường kính dây quấn được chọn là 0,5 mm, do đó cường độ tối đa cấp cho cuộn dây là 2,5 A để đảm bảo khả năng an toàn.

Kết quả

Lời giải bài toán thiết kế tối ưu ly hợp

Với các thông số như phần trên, bài toán tối ưu ly hợp sẽ hội tụ sau 25 vòng lặp. Kết quả giải bài toán tối ưu được trình bày trong hình 5 và bảng 3. Kết quả hình 5 cho thấy, từ thông đi qua rãnh mỏng của vỏ di động bão hòa từ nên từ thông bị ép đi qua rãnh lưu chất. Cường độ từ trường phân bố dọc theo rãnh lưu chất không đồng đều và có giá trị trung bình xấp xỉ 0,4 Tesla. Bảng 3 trình bày giá trị tối ưu của biến thiết kế và các thông số cơ bản của ly hợp tại giá trị tối ưu.



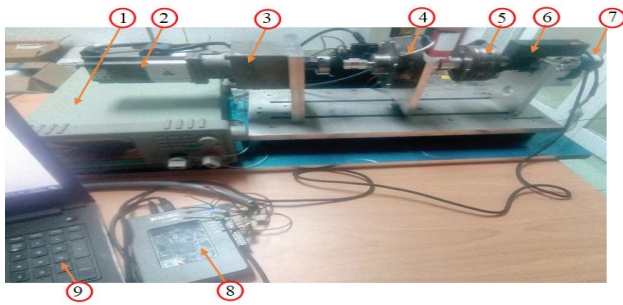
Hình 5. Phân bố từ trường của ly hợp sau khi tối ưu.

Bảng 3. Kết quả sau tối ưu của các biến thiết kế ly hợp.

Kích thước biến thiết kế (mm)	Đặc tính ly hợp
Cuộn dây: rộng $w_c=1,022$; cao $h_c=9,943$; bán kính trong $R_w=34,799$; số vòng quấn: 39 Đĩa: $R_i=14,2$, $R_o=50,3$; bề dày: $b=7,5$ Khe hở lưu chất: 0,8 Vỏ cố định: $RR=54,5$, $L_s=30,7$ Vỏ di động: $R=52,7$, $L_c=19,9$	Mô men tải tối đa (Nm): 10,33 Khối lượng ly hợp (kg): 2,235 Công suất tiêu thụ (W): 10,23 Điện trở cuộn dây (Ω): 0,818

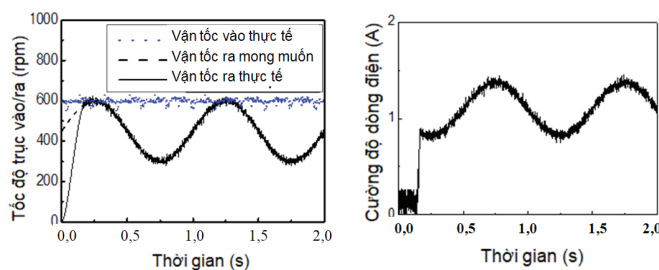
Điều khiển tốc độ động cơ dùng ly hợp MRF

Sau khi tối ưu ly hợp đề xuất với ràng buộc mô men truyền động là 10 Nm, từ dữ liệu bảng 3, ly hợp mẫu được chế tạo dựa trên kết quả các biến thiết kế đã được tối ưu. Để đánh giá khả năng làm việc của ly hợp MRF, hệ thống thí nghiệm điều khiển vận tốc đầu ra của ly hợp có tác động của tải được bố trí như hình 6. Trong đó, chuyển động quay từ động cơ AC servo qua hộp giảm tốc tới đầu vào của ly hợp. Đầu ra của ly hợp được kết nối với tải. Cảm biến mô men cũng được bố trí giữa trục ra của ly hợp và tải để đo lường mô men tải. Tốc độ quay của tải được đo bằng Encoder. Để tạo ra mô men tải mong muốn, trong nghiên cứu này phanh MRF [9] với tải trọng tối đa 10 Nm được sử dụng. Để điều khiển tốc độ mong muốn của trục tải thông qua ly hợp MRF, bộ điều khiển PID được sử dụng.

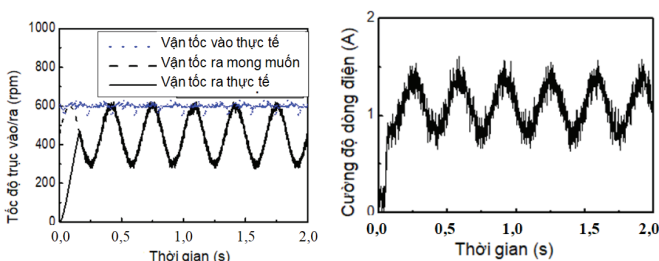


Hình 6. Hệ thống điều khiển tốc độ đầu ra của ly hợp với vận tốc mong muốn: (1) nguồn dòng, (2) động cơ servo, (3) hộp số, (4) ly hợp từ, (5) tải, (6) cảm biến mô men, (7) Encoder, (8) card thu thập dữ liệu, (9) máy tính.

Hình 7A và 7B biểu diễn kết quả thực nghiệm tốc độ đầu ra của trục ly hợp được điều khiển đáp ứng theo tốc độ mong muốn là tốc độ biến thiên hình sin với tần số lần lượt là 1 Hz và 3 Hz. Trong thí nghiệm này, mô men tải do phanh MRF tạo ra là 3 Nm. Tốc độ đầu vào của ly hợp (tốc độ động cơ AC) được giữ cố định 600 rpm bằng bộ điều khiển biến tần. Tốc độ thực tế đầu vào cũng được thể hiện trên hình 7A và 7B. Từ hình 7A và 7B ta nhận thấy, mặc dù tốc độ đầu vào được cố định ở 600 rpm, nhưng tốc độ vào thực tế có dao động khá lớn, với sai lệch lên đến 10%. Điều này cũng dễ hiểu vì tốc độ động cơ AC được điều khiển bằng bộ biến tần và không có mạch phản hồi tốc độ. Quan sát kết quả tốc độ đầu ra của ly hợp ta nhận thấy, tốc độ thực tế đầu ra rất gần với giá trị mong muốn với sai số trung bình là 6%. Sai số khá cao này có thể là kết quả không ổn định của các thông số như vận tốc góc của trục chủ động (động cơ DC), ma sát và mô men tải trọng. Trong những nghiên cứu tiếp theo, thuật toán điều khiển bền vững (robust control algorithm) được xem xét để điều khiển tốc độ trục tải với tải trọng thay đổi.



(A) đáp ứng ở tần số 1 Hz



(B) đáp ứng ở tần số 3 Hz

Hình 7. Đáp ứng điều khiển tốc độ.

Kết luận

Trong nghiên cứu này, một phương pháp mới để điều khiển tốc độ của hệ thống tải dẫn động bởi động cơ điện thông qua hệ thống ly hợp lưu chất điện - từ biến đã được đề xuất, thiết kế tối ưu, chế tạo và thực nghiệm. Thiết kế tối ưu đã xem xét tới mô men truyền động cần thiết, kích thước và khối lượng của ly hợp MRF. Mục tiêu của bài toán tối ưu là xác định kích thước hình học tối ưu của ly hợp sao cho khối lượng ly hợp nhỏ nhất trong khi mô men truyền động có thể đạt được giá trị mô men yêu cầu, trong nghiên cứu này là 10 Nm. Mô hình mẫu của ly hợp MRF đã được chế tạo để làm thí nghiệm đánh giá. Một hệ thống điều khiển tốc độ đầu ra của động cơ DC kết nối với tải thông qua ly hợp MRF và bộ điều khiển PID đã được thiết kế, chế tạo. Kết quả thí nghiệm điều khiển tốc độ thay đổi theo quy luật hình sin mong muốn với tần số 1 Hz và 3 Hz và mô men tải 3 Nm. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy tốc độ điều khiển đáp ứng tốt với tốc độ mong muốn với sai số trung bình là 6%. Sai số này có thể là do các thông số của hệ thống không ổn định như vận tốc góc của trục chủ động, ma sát và mô men tải trọng.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển KH&CN quốc gia (NAFOSTED) thông qua đề tài mã số 107.01-2018.335. Nhóm nghiên cứu xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S.B. Choi, D.Y. Lee (2005), "Rotational motion control of a washing machine using electrorheological clutches and brakes", *Journal of Mechanical Engineering Science*, **7**, pp.627-637.
- [2] Sang-Soo Han, Seung-Bok Choi, Chae-Cheon Cheong (2000), "Position control of X-Y table mechanism using electro-rheological clutches", *Mechanism and Machine Theory*, **11**, pp.1563-1577.
- [3] Quoc Hung Nguyen, Seung-Bok Choi (2014), "A new method for speed control of a DC motor using magnetorheological clutch", *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems*.
- [4] Seung-Bok Choi, Sung-Ryong Hong, Chae-Cheon Cheong, Yong-Kun Park (1999), "Comparison of field-controlled characteristics between ER and MR clutches", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **8**, pp.615-619.
- [5] Q. Hung Nguyen, H.M. Hieu Do, V. Quoc Nguyen, N. Diep Nguyen, D. Thang Le (2018), "Development of magneto-rheological fluid (MRF) based clutch for output torque control of AC motors", *Smart Structures and NDE for Industry 4.0*, 106020J.
- [6] Quoc-Hung Nguyen and Seung-Bok Choi (2012), "Optimal design of a novel hybrid MR brake for motorcycles considering axial and radial magnetic flux", *Smart Materials and Structures*, **21**, p.055003.
- [7] Q.H. Nguyen, Y.M. Han, S.B. Choi and N.M. Wereley (2007), "Geometry optimization of MR valves constrained in a specific volume using the finite element method", *Smart Materials and Structures*, **16**, p.2242.
- [8] Q.H. Nguyen and S.B. Choi (2008), "Optimal design of vehicle MR damper considering damping force and dynamic range", *Smart Materials and Structures*, **18**, p.015013.
- [9] Quoc Hung Nguyen, Ngoc Diep Nguyen, Seung Bok Choi (2015), "Design and evaluation of a novel magnetorheological brake with coils placed on the side housings", *Smart Materials and Structures*, **4**, p.047001.