

# PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN TỐC ĐỘ HỆ THỐNG TẢI ĐƯỢC TRUYỀN ĐỘNG BẰNG ĐỘNG CƠ ĐIỆN THÔNG QUA LY HỢP LƯU CHẤT ĐIỆN - TỪ BIẾN

DEVELOPMENT OF A SPEED CONTROL SYSTEM FOR ROTARY LOAD DRIVEN BY ELECTRIC MOTORS VIA MAGNETO-RHEOLOGICAL CLUTCH

Nguyễn Quốc Hưng<sup>1,\*</sup>, Nguyễn Viễn Quốc<sup>2</sup>,  
Lê Duy Tuấn<sup>2</sup>, Nguyễn Thời Trung<sup>3</sup>

## TÓM TẮT

Nghiên cứu đề xuất và xây dựng một phương pháp mới để điều khiển tốc độ của hệ thống tải dẫn động bởi động cơ điện, đó là sử dụng ly hợp lưu chất điện - từ biến (magneto-rheological fluid - MRF). Trong bài báo này, để ngăn ngọn chúng tôi dùng thuật ngữ ly hợp MRF. Sau phần giới thiệu về lưu chất MRF và các ứng dụng trong hệ thống phanh và ly hợp cũng như nhu cầu về điều khiển vô cấp tốc độ đầu ra của động cơ, cấu tạo và nguyên làm việc của ly hợp MRF để điều khiển tốc độ đầu ra của động cơ được đề xuất. Mô hình tính toán mô men truyền động của ly hợp MRF sau đó được xây dựng dựa trên ứng xử lưu biến dẻo Bingham của lưu chất MRF. Thiết kế tối ưu của ly hợp MRF sẽ được thực hiện để tìm ra những kích thước tối ưu nhằm tạo ra mô men cần thiết với khối lượng nhỏ nhất có thể. Dựa vào kết quả tối ưu, một mô hình của ly hợp MRF được chế tạo để thực hiện thí nghiệm nghiên cứu các đặc tính kỹ thuật và kiểm chứng với kết quả lý thuyết. Hệ thống điều khiển tốc độ đầu ra của động cơ sẽ được xây dựng để điều khiển tốc độ đầu ra thay đổi theo quy luật mong muốn với các mô men tải khác nhau.

**Từ khóa:** Điều khiển tốc độ động cơ, lưu chất điện - từ biến (MRF), ly hợp MRF, phanh MRF.

## ABSTRACT

In this research, a new method to control speed of a rotary load driven by electric motors via magneto-rheological clutch (MR clutch) is proposed and realized. Firstly, the configuration of a motor speed control system using MR clutch is proposed. The MR clutch configuration is then proposed and mathematically modelled based on Bingham-plastic rheological model of MR fluid. An optimal designed of the MR clutch is then conducted to find out the optimal geometric dimensions of the clutch that can transform a required torque with minimum mass. Based on optimal results, a prototype of the MR clutch is then manufactured and its performance characteristics are experimentally investigated. A controller is then 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:** Speed control, magneto-rheological fluid (MRF), MR clutch, MR brake.

<sup>1</sup>Khoa Kỹ thuật, Trường Đại học Việt - Đức

<sup>2</sup>Khoa Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp TP. Hồ Chí Minh

<sup>3</sup>Viện Khoa học Tính toán, Trường Đại học Tôn Đức Thắng

\*Email: hung.nq@vgu.edu.vn

Ngày nhận bài: 28/01/2019

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 16/4/2019

Ngày chấp nhận đăng: 10/6/2019

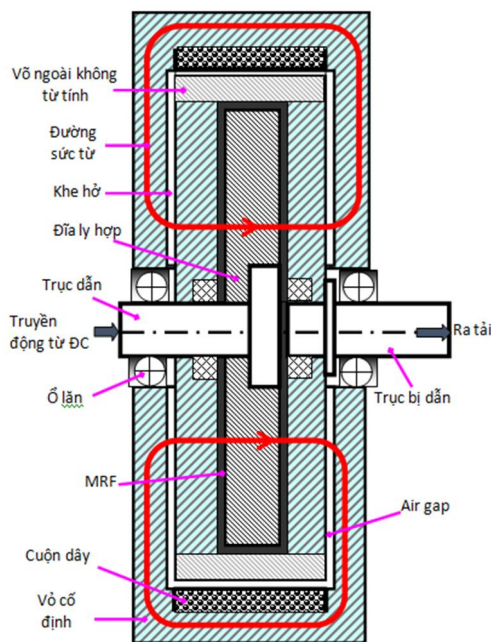
## 1. GIỚI THIỆU

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 ứng. Tuy nhiên, phương pháp này khó đáp ứng được ở tốc độ thấp. Cùng với đó thì 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 [1-3]. 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 (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. Thêm vào đó, lưu chất MRF đã được thương mại hóa rộng rãi. Do vậy, lưu chất MRF ngày càng được sử dụng rộng rãi và được quan tâm nghiên cứu bởi các nhà khoa học.

Đóng góp chính của bài báo này là phát triển hệ thống điều khiển tốc độ của tải được dẫn động bởi động cơ điện thông qua ly hợp MRF. Lý do sử dụng ly hợp mà không dùng

phanh để điều khiển tốc độ đầu ra động cơ là để giảm bớt thất thoát năng lượng do quá trình phanh gây ra. Phần còn lại của bài báo này được bố trí như sau: Trong phần tiếp theo, cấu tạo của hệ thống ly hợp MRF để điều khiển tốc độ động cơ sẽ được đề xuất. Sau đó, cấu tạo và nguyên lý làm việc của ly hợp MRF để điều khiển tốc độ đầu ra của động cơ sẽ được đề xuất. Mô hình tính toán mô men truyền động của ly hợp MRF sau đó được xây dựng dựa trên ứng xử lưu biến dẻo Bingham của lưu chất MRF. Thiết kế tối ưu của ly hợp MRF sẽ được thực hiện để tìm ra những kích thước tối ưu nhằm tạo ra mô men cần thiết với khối lượng nhỏ nhất có thể. Dựa vào kết quả tối ưu, một mô hình của ly hợp MRF được chế tạo để thực hiện thí nghiệm nghiên cứu các đặc tính kỹ thuật và kiểm chứng với kết quả lý thuyết. Hệ thống điều khiển tốc độ đầu ra của động cơ sẽ được xây dựng để điều khiển tốc độ đầu ra thay đổi theo quy luật mong muốn với các mô men tải khác nhau.

**2. HỆ THỐNG LY HỢP MRF DÙNG ĐIỀU KHIỂN TỐC QUAY CỦA ĐỘNG CƠ**



Hình 1. cấu trúc của ly hợp MRF

Phần này sẽ giới thiệu cấu trúc của ly hợp MRF dùng để điều khiển tốc tải quay được truyền động bằng động cơ và mô men truyền động của nó được phân tích dựa vào mô hình lưu biến dẻo Bringham của MRF. Hình 1 biểu diễn cấu trúc của ly hợp MRF được đề xuất. Như trong hình, một đĩa làm bằng thép từ tính được bắt vào trục truyền động làm bằng thép không từ tính. Trục truyền động được gắn vào trục của động cơ. Đĩa sẽ được bao bọc bởi vỏ ly hợp làm bằng vật liệu thép từ tính, trên vỏ này sẽ gắn trục ra của ly hợp được nối đến tải. Khoảng trống giữa đĩa và vỏ ly hợp sẽ được điền đầy MRF. Toàn bộ ly hợp được đặt bên trong một vỏ cố định làm bằng thép từ tính. Vỏ này có tác dụng đỡ các trục của ly hợp và để đặt cuộn dây tạo nên mạch từ khép kín đi qua khe lưu chất MRF khi một dòng điện được cấp cho cuộn dây. Giữa vỏ cố định và vỏ ly hợp có một khe

hở cho phép vỏ ly hợp có thể chuyển động tự do trong vỏ cố định. Khe hở này không nên quá lớn vì sẽ gây tổn thất từ trường. Trong nghiên cứu này, khe hở này được chọn là 0,25mm. Khi cuộn dây được cung cấp nguồn điện thì sẽ tạo ra từ trường và khi đó MRF trong khe giữa đĩa và vỏ ly hợp lập tức bị đông cứng lại. Từ đó có thể điều khiển được mô men truyền từ trục chủ động (trục động cơ) sang trục bị động (trục lắp trên vỏ ly hợp) bằng cách điều khiển sự đông cứng của MRF.

Khi thiết kế ly hợp MRF, việc thiết lập mối quan hệ giữa mô men truyền động và thông số kích thước của ly hợp cũng như từ trường tác động là rất cần thiết. Giả sử rằng MRF có đặc tính ứng xử lưu biến dẻo Bringham và biến thiên của tốc độ MRF trong khe ly hợp là tuyến tính, mô men sinh ra khi có từ trường tác động và mô men khi không có từ trường tác động, được tính như sau [4, 5]:

$$T = \frac{\pi \mu R_{do}^4}{d} [1 - (\frac{R_{di}}{R_{do}})^4] (\omega_i - \omega_o) + \frac{4\pi \tau_{ye}}{3} (R_{do}^3 - R_{di}^3) + 2\pi R_{do}^2 t_d (\tau_{y0} + \mu \frac{(\omega_i - \omega_o) R_{do}}{d_o}) + T_{seal} + T_{br} \tag{1}$$

$$T_o = \frac{\pi \mu R_{do}^4}{d} [1 - (\frac{R_{di}}{R_{do}})^4] (\omega_i - \omega_o) + \frac{4\pi \tau_{y0}}{3} (R_{do}^3 - R_{di}^3) + 2\pi R_{do}^2 t_d (\tau_{y0} + \mu \frac{(\omega_i - \omega_o) R_{do}}{d_o}) + T_{seal} + T_{br} \tag{2}$$

Với  $R_{di}$  và  $R_{do}$  là bán kính trong và ngoài của đĩa,  $d$  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,  $t_d$  là chiều dày của đĩa,  $\omega_i$  và  $\omega_o$  lần lượt là vận tốc góc của trục chủ động và trục bị động,  $\tau_{ye}$  là giới hạn chảy của MRF ở mặt đầu của đĩa và là hàm số của từ trường tạo ra bởi cuộn dây,  $\tau_{y0}$  là giới hạn chảy của lưu chất MRF ở trạng thái không có tác động của từ trường,  $\mu$  là độ nhớt sau chảy dẻo của MRF và được xem là hằng số trong nghiên cứu này,  $T_{seal}$  là mô men ma sát giữa trục và vòng đệm,  $T_{br}$  là mô men ma sát giữa trục và ổ lăn. Trong nghiên cứu này, mô men ma sát do ổ lăn gây ra được bỏ qua, trong khi mô men ma sát gây ra bởi vòng đệm (leaf seal) được tính bằng công thức sau:

$$T_{seal} = 0,65(2R_s)^2 (\mu (\omega_i - \omega_o))^{1/3} \tag{3}$$

Trong công thức trên,  $T_{seal}$  được tính theo đơn vị Oz-in (1Oz-in = 0,007Nm), bán kính trục  $R_s$  tính theo đơn vị inch (1inch = 0,0254m) và tốc độ quay được tính theo đơn vị (vòng/phút). Công thức (3) có thể viết lại như sau:

$$T_{seal} = 60,36(R_s)^2 (\mu (\omega_i - \omega_o))^{1/3} \tag{4}$$

Ở đây,  $T_{seal}$  được tính theo đơn vị Nm,  $R_s$  tính theo đơn vị m,  $\omega_i$  và  $\omega_o$  tính theo rad/s.

**3. THIẾT KẾ TỐI ƯU LY HỢP MRF**

Trong thiết kế ly hợp MRF, mô men truyền động và khối lượng là những thông số quan trọng cần được xem xét. Khối lượng của ly hợp MRF càng nhỏ càng tốt vì giảm kích cỡ cũng như là giá thành. Hơn nữa, khi kích thước nhỏ và khối lượng nhẹ hơn thì vỏ ly hợp sẽ có mô men quán tính

nhỏ hơn, nên sẽ thuận lợi cho việc điều khiển tốc độ của trục bị động hơn. Khối lượng cơ bản của ly hợp có thể tính bằng công thức:

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

Với  $V_d, V_{v1}, V_{v2}, V_{MR}, V_{tr}$  và  $V_c$  lần lượt là thể tích của đĩa, vỏ ly hợp, vỏ cố định, lưu chất MRF, các trục của ly hợp và cuộn dây. Những thông số này phụ thuộc vào kích thước hình học các bộ phận của ly hợp và thay đổi trong quá trình tính toán tối ưu.  $\rho_d, \rho_{v1}, \rho_{v2}, \rho_{MR}, \rho_{tr}$  và  $\rho_c$  lần lượt là khối lượng riêng của đĩa, vỏ ly hợp, vỏ cố định, lưu chất MRF, các trục của ly hợp và cuộn dây. Như vậy, bài toán thiết kế tối ưu trong nghiên cứu này có thể tóm lược như sau: *Tìm những giá trị tối ưu cho những kích thước quan trọng của ly hợp MRF sao cho mô men truyền động lớn nhất theo công thức (1) và có thể đạt được giá trị mô men truyền động cần thiết trong khi đó khối lượng của ly hợp tính theo công thức (5) là nhỏ nhất.*

Trong nghiên cứu này, thép si-lit được sử dụng để chế tạo các chi tiết có tính từ tính của ly hợp như chi tiết đĩa và vỏ ly hợp. Dây dẫn dùng cho cuộn dây là dây đồng có đường kính  $0,511\text{mm}$ . Trong suốt quá trình tối ưu, một dòng điện  $2,5\text{A}$  (dòng điện cho phép tối đa của dây quấn) được cung cấp cho cuộn dây. Lưu chất MRF được sử dụng là loại MRF132-DG được sản xuất bởi tập đoàn Lord. Độ nhớt của MRF132-DG là  $0,1\text{Pa}\cdot\text{s}$  trong khi giới hạn chảy dẻo là một hàm của mật độ từ trường và có thể tính gần đúng như sau [6]:

$$\tau_y(H_{mr}) = c_0 + c_1 H_{mr} + c_2 H_{mr}^2 + c_3 H_{mr}^3 \quad (6)$$

Trong công thức này,  $\tau_y$  tính theo đơn vị  $\text{kPa}$ , mật độ từ thông ngang qua khe MRF ( $H_{mr}$ ) được tính theo đơn vị  $\text{kA/m}$ . Giá trị của các hệ số  $c_0, c_1, c_2$  và  $c_3$  được xác định bằng phương pháp đường cong cực tiểu từ kết quả thực nghiệm và có giá trị lần lượt là  $0,30858, 2,83544\text{E-}4, -5,34429\text{E-}6$  và  $9,20846\text{E-}9$ .

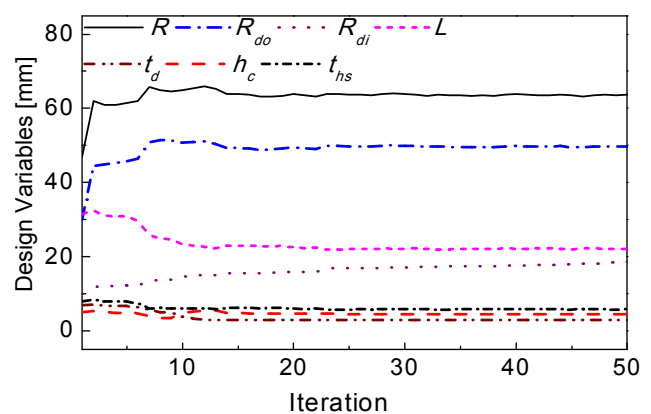
Trong quá trình tối ưu, chiều cao  $h_c$  và bề rộng  $w_c$  cuộn dây, chiều dày thành vỏ bên của ly hợp và của vỏ cố định  $t_{hl}$  và  $t_{hs}$ , bán kính trong và ngoài của đĩa ly hợp  $R_{di}$  và  $R_{dor}$ , bề dày của đĩa  $t_d$  và bán kính ngoài  $R$  của vỏ cố định được chọn làm biến thiết kế. Chú ý là khe chứa MRF  $d$  và  $d_o$  có giá trị càng nhỏ thì mô men truyền động càng lớn và khối lượng của ly hợp MRF càng nhỏ. Tuy nhiên, nếu khe hở quá nhỏ thì việc chế tạo gặp nhiều khó khăn, mô men ở trạng thái không từ trường cao (mô men không điều khiển được) dẫn đến khó điều khiển. Vì vậy, các kích thước này không được chọn là biến thiết kế mà được lựa chọn theo kinh nghiệm và tham khảo các nghiên cứu trước đây,  $d = 1\text{mm}$ . Một lưu ý nữa là vỏ ngoài không từ tính của ly hợp. Rõ ràng chiều dày vỏ này càng nhỏ thì khối lượng và kích thước của ly hợp càng nhỏ, tuy nhiên việc chế tạo sẽ khó khăn. Trong bài báo này, vỏ ngoài không từ tính của ly hợp được làm bằng thép không rỉ với chiều dày  $3\text{mm}$ . Trong nghiên cứu này, bài toán từ trường được giải bằng phần mềm ANSYS dùng phần tử đa trường, đối xứng trục PLANE 13. Bài toán tối ưu cũng được giải bằng công cụ tối ưu hóa được tích hợp trên

phần mềm ANSYS dùng phương pháp tối ưu bậc nhất với thuật toán *steepest decent*. Lưu ý rằng, để giải bài toán tối ưu trên phần mềm ANSYS, trước hết file lập trình APDL để giải bài toán từ trường trên phần mềm ANSYS phải được xây dựng. Trong file lập trình này, trước hết bài toán từ trường sẽ được giải dùng phương pháp phần tử hữu hạn, sau đó từ kết quả bài toán từ trường ta xác định được từ trường trung bình qua các khe MRF. Khi đã biết được từ trường trung bình qua các rãnh MRF, công thức (6) được sử dụng để xác định giới hạn chảy dẻo tương ứng và cuối cùng dùng công thức (1) để tính mô men truyền động. Khối lượng của ly hợp được xác định từ công thức (5) từ kích thước hình học của ly hợp.

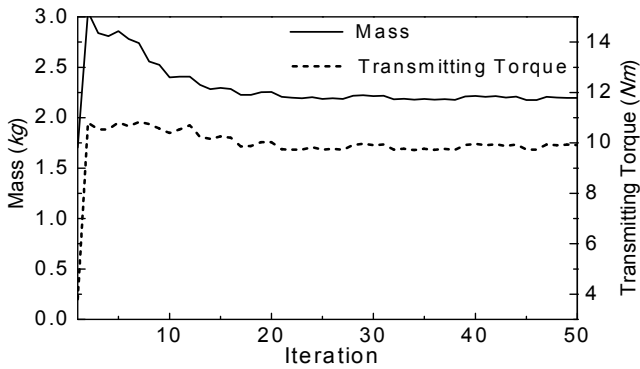
Hình 2 biểu diễn quá trình tối ưu của ly hợp được đề xuất. Trong nghiên cứu này, mô men truyền động được ràng buộc lớn hơn  $10\text{Nm}$  và điều kiện hội tụ được đặt  $0,1\%$ . Xét đến điều kiện bền, bán kính trục ly được chọn  $R_s = 6\text{mm}$ . Hệ số điền đầy của cuộn dây được chọn là  $75\%$  và tổn thất từ trường được chọn là  $10\%$ . Để tính mô men truyền động, ta xem trục vào của ly hợp quay cùng tốc độ đầu ra của động cơ là  $600$  vòng/phút, trong khi đầu ra của ly hợp có tốc độ quay  $300$  vòng/phút. Kết quả cho thấy, với điều kiện hội tụ được đặt  $0,1\%$ , kết quả tối ưu đạt được ở bước lặp lần thứ 50. Tại điểm tối ưu, các biến thiết kế có giá trị như sau (mm):  $w_c = 5,7, h_c = 2,7, t_h = 5,9, t_d = 4, R_{do} = 50$  và  $R = 59,5$ . Ở giá trị tối ưu này thì mô men truyền động có thể đạt tới  $10\text{Nm}$  như đã ràng buộc và khối lượng của toàn hệ thống ly hợp là  $2,04\text{kg}$ , số vòng của cuộn dây là  $65$  vòng. Kích thước hình học tối ưu của ly hợp MRF được tổng hợp trong bảng 1.

Bảng 1. Kích thước hình học của ly hợp MRF đã tối ưu

Thông số	Giá trị (mm)	Thông số	Giá trị (mm)
Bán kính trục	$R_s = 6$	Kích thước khe MRF	$d, d_o = 1$
Bán kính ngoài đĩa	$R_{do} = 49,8$	Chiều cao cuộn dây	$h_c = 4,6$
Bán kính trong đĩa	$R_{di} = 18,5$	Chiều rộng cuộn dây	$w_c = 9$
Bán kính vỏ cố định	$R = 63,6$	Chiều dày mặt bên vỏ cố định	$t_{hs} = 5,5$
Chiều dày ly hợp	$L = 10$	Chiều dày mặt trụ ngoài vỏ cố định	$t_{ho} = 5,3$
Chiều dày đĩa	$t_d = 3$	Chiều dày vỏ ly hợp	$t_{hl} = 3$



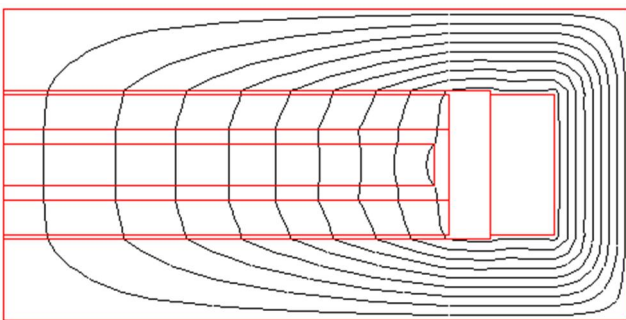
(a) Các biến thiết kế



(b) Khối lượng ly hợp và mô men truyền động

Hình 2. Kết quả tối ưu ly hợp MRF

Đường sức từ của kết cấu ly hợp tại giá trị tối ưu được trình bày trên hình 3.



Hình 3. Đường sức từ của ly hợp MRF tối ưu

**4. ĐIỀU KHIỂN TỐC ĐỘ ĐỘNG CƠ DÙNG LY HỢP MRF**

Trong phần này, động lực học của trục ra ly hợp sẽ được thiết lập và thuật toán điều khiển được sử dụng để điều khiển tốc độ trục ra của ly hợp. Từ hình 1, phương trình chuyển động của trục bị động có thể được viết như sau:

$$J\dot{\omega}_o = T - T_f - T_l \tag{7}$$

Với  $J$  là mô men quán tính khối lượng của trục bị động bao gồm cả vỏ ly hợp và tải trọng,  $T_f$  là mô men ma sát tác động trên trục bị động,  $T$  là mô men truyền động của ly hợp,  $T_l$  là mô men tải trọng và  $\omega_o$  là vận tốc góc của trục.

Kết hợp phương trình (1) và (7), phương trình chuyển động của trục có thể viết như sau

$$J\dot{\omega}_o + C_{vis}\omega_o = T_y + T_{fc} + T_{seal} - T_f - T_l \tag{8}$$

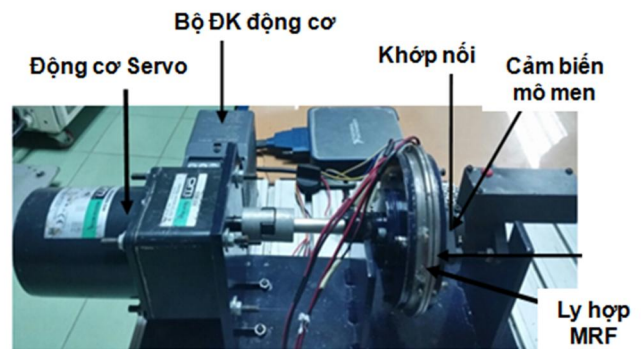
Với  $C$  là hệ số cản nhớt tương đương,  $T_y$  là mô men gây ra do giới hạn chảy dẻo (mô men có thể điều khiển) và  $T_{fc}$  là mô men phụ thuộc vào tốc độ đầu vào của ly hợp. Các đại lượng này được xác định như sau

$$C_{vis} = \frac{\pi\mu R_{do}^4}{d} \left[ 1 - \left( \frac{R_{di}}{R_{do}} \right)^4 \right] + 2\pi R_{do}^2 t_d \mu \frac{R_{do}}{d_o}$$

$$T_y = \frac{4\pi\tau_{ye}}{3} (R_{do}^3 - R_{di}^3)$$

$$T_{fc} = \frac{\pi\mu R_{do}^4}{d} \left[ 1 - \left( \frac{R_{di}}{R_{do}} \right)^4 \right] \omega_i + 2\pi R_{do}^2 t_d (\tau_{y0} + \mu \frac{\omega_i R_{do}}{d_o})$$

Giả sử tốc độ đầu vào được giữ cố định là 600 (vòng/phút), với các kích thước thiết kế ở bảng 1 và tính chất của lưu chất MRF132-DG, ta có thể tính được  $C_{vis} = 0,0026 (N.s)$ ,  $T_{fc} = 0,164Nm$ ,  $T_{seal,max} = 0,0086Nm$ . Vì giá trị của  $T_{seal}$  rất nhỏ so với các giá trị khác, nên trong thiết kế bộ điều khiển ta có thể bỏ qua. Để xác định  $T_y$  theo cường độ cấp cho cuộn dây ly hợp, ta dùng thí nghiệm như hình 4. Trong sơ đồ này thì động cơ servo DC có hộp giảm tốc và được điều khiển bằng máy tính với vận tốc góc không đổi 30rpm. Trục ra của ly hợp được nối với một cảm biến mô men tĩnh (cảm biến này được lắp cố định với bàn). Trong trường hợp này thì ly hợp làm việc giống phanh. Tín hiệu đầu ra của cảm biến mô men được đưa vào máy tính qua bộ chuyển đổi A/D để đánh giá. Khi thí nghiệm, tín hiệu điều khiển dạng nấc từ máy tính qua bộ khuếch đại (nguồn dòng) được cấp cho cuộn dây của ly hợp. Tiến hành thí nghiệm với dòng điện nấc khác nhau: 0,25A, 0,5A, 0,75A, 1,0A, 1,25A, 1,5A, 1,75A, 2,0A, 2,75A và 2,5A và xác định mô men trung bình tương ứng đo được từ cảm biến mô men ở giá trị xác lập, ta có kết quả như hình 5.



Hình 4. Sơ đồ lắp đặt thí nghiệm ly hợp MRF

Một lưu ý ở hình 5 là trong thí nghiệm này, mô men không điều khiển được đã bị loại bỏ khi cân chỉnh (calip) cảm biến mô men ở trạng thái không có dòng điện cấp cho cuộn dây của ly hợp. Từ những kết quả cho thấy mô men giới hạn dẻo của ly hợp MRF dường như bảo hòa khi dòng điện đạt tới 2,25A trong khi công suất tiêu thụ của cuộn dây tăng rất cao. Do vậy, khi sử dụng hi nên giới hạn ở dòng điện nhỏ hơn 2,25A. Để ước lượng giá trị của mô men giới hạn dẻo của ly hợp theo cường độ dòng điện cung cấp cho cuộn dây, hàm hồi quy đa thức bậc ba sau đây được sử dụng:

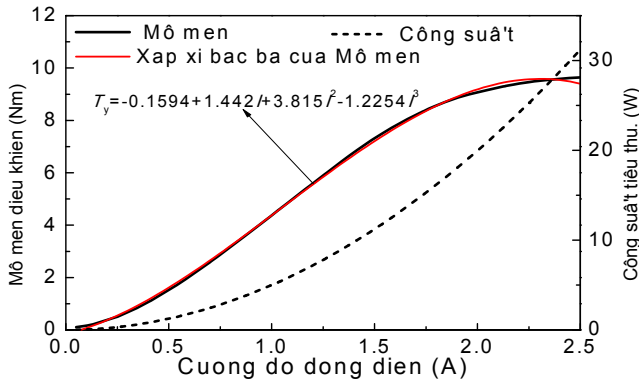
$$T_y(I) = A_0 + A_1I + A_2I^2 + A_3I^3 \tag{9}$$

Các tham số  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  và  $A_3$  được xác định bằng phương pháp bình phương cực tiểu từ kết quả thực nghiệm. Với kết quả thí nghiệm trong hình 5, mô men giới hạn đàn hồi của ly hợp thể tính như sau:

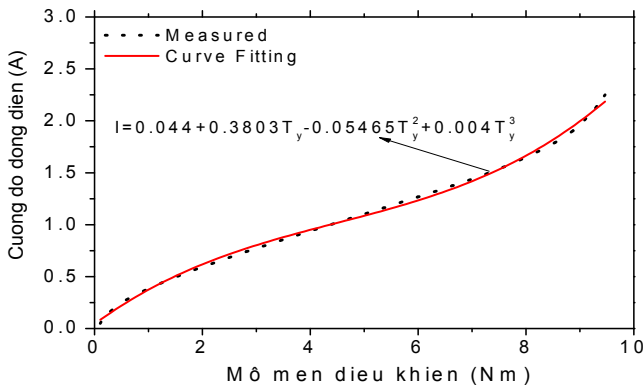
$$T_y(I) = 0,1594 + 1,442I + 3,815I^2 - 1,2254I^3 \quad (I \leq 2,25A) \tag{10}$$

Quan hệ ngược dòng điện cần cấp cho cuộn dây để đạt được mô men điều khiển như mong muốn được thể hiện trên hình 5b. Trong trường hợp này, hàm xấp xỉ như sau

$$u(V) = I(A) = 0,044 + 0,3803T_y - 0,05465T_y^2 + 0,004T_y^3 \tag{11}$$



(a)

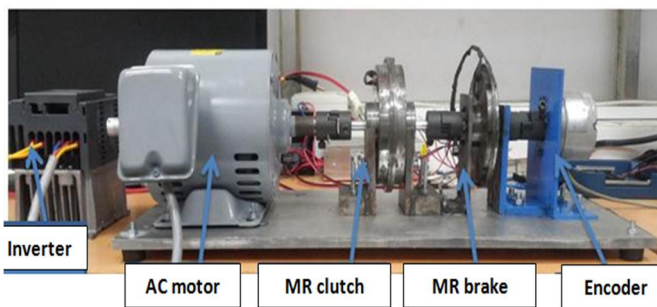


(b)

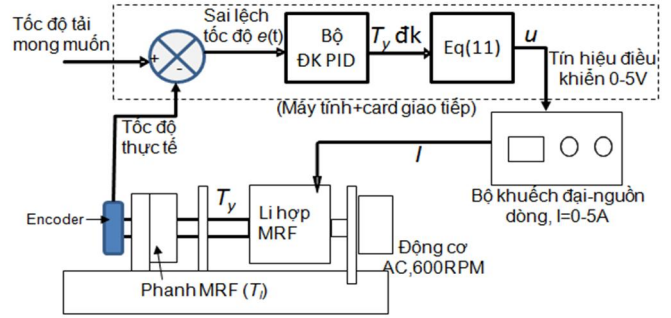
Hình 5. Đặc tính của ly hợp MRF

Lưu ý rằng trong (11),  $u$  là hiệu điện thế ở ngõ ra máy tính dùng để điều khiển dòng điện cấp cho cuộn dây  $I$  (1V  $\rightarrow$  1A). Hình 6a biểu diễn hệ thống thí nghiệm điều khiển tốc độ đầu ra của ly hợp. Tốc độ quay được đo bằng Encoder và được đưa về hệ thống điều khiển thời gian thực LABVIEW. Phanh MRF được sử dụng để tạo các mô men tải khác nhau tác dụng lên trục ra của ly hợp. Sai số giữa tốc độ đo được và tốc độ mong muốn được đưa vào bộ điều khiển để đưa ra tín hiệu dòng điện điều khiển cấp cho cuộn dây của ly hợp MRF thông qua bộ khuếch đại. Với hệ thống thí nghiệm như hình 6a, mô men quán tính ở trục ra của ly hợp là  $J = 0,0021$  (kg.m<sup>2</sup>). Như vậy, nếu bỏ qua ma sát ở trục ra ly hợp, ma sát của vòng đệm và ma sát ổ lăn, phương trình chuyển động trục ra của ly hợp có thể rút gọn như sau:

$$0,0021\dot{\omega}_o + 0,0026\omega_o = T_y + 0,164 - T_l = T(t) \quad (12)$$



(a) trang thiết bị thí nghiệm



(b) Sơ đồ hệ thống điều khiển

Hình 6. Hệ thống thí nghiệm điều khiển tốc độ đầu ra động cơ dùng ly hợp MRF

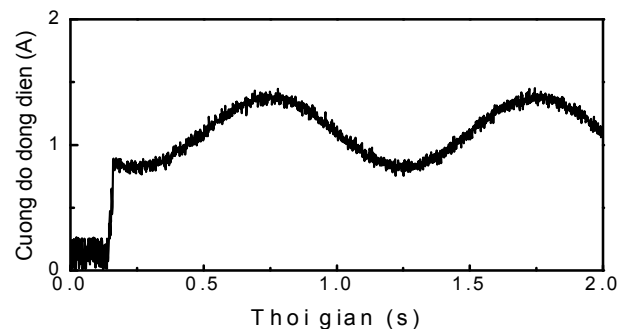
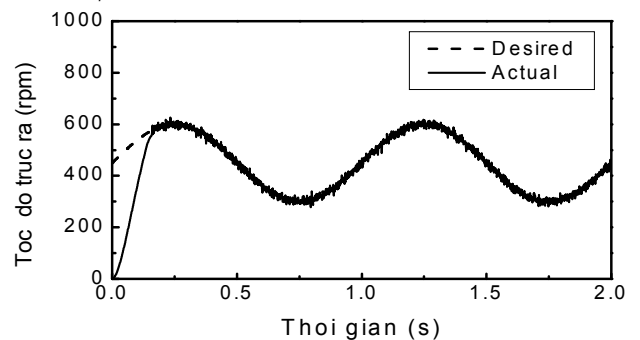
Từ phương trình (12), ta có thể nhận thấy hệ thống điều khiển tốc độ dùng ly hợp là ổn định. Trong nghiên cứu này, bộ điều khiển PID số được sử dụng. Để xây dựng bộ điều khiển, ta viết phương trình (12) dưới dạng sau:

$$0,0021\dot{\omega}_o + 0,0026\omega_o = T_y + D(t) \quad (13)$$

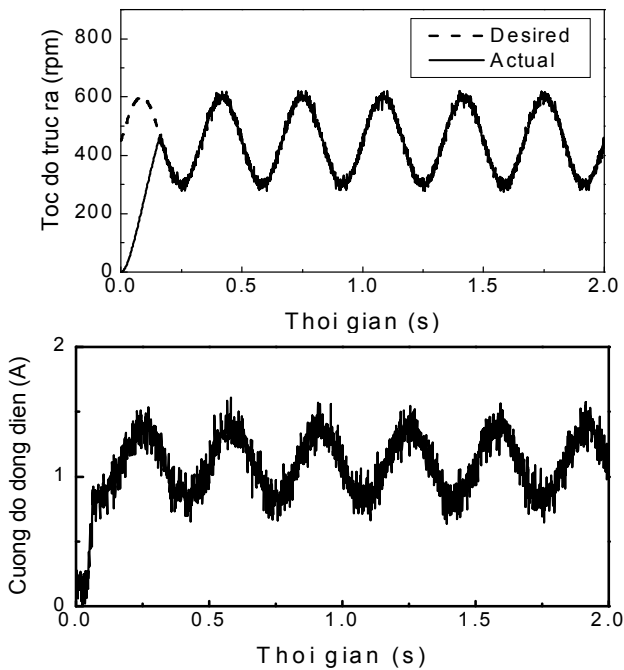
Ở đây,  $D(t) = 0,164 - T_l$ , được xem là mô men nhiễu tác động vào trục ra của ly hợp. Hình 6b mô tả sơ đồ hệ thống điều khiển tốc độ đầu ra ly hợp dùng bộ điều khiển PID được đề xuất. Tín hiệu mô men điều khiển  $T_y$  được xác định như sau:

$$T_y(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t)dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (14)$$

Với  $k_p$ ,  $k_i$  và  $k_d$  lần lượt là độ lợi tỉ lệ, độ lợi tích phân và độ lợi vi phân,  $e(t)$  là độ sai lệch tốc độ. Từ tín hiệu mô men điều khiển  $T_y$ , hiệu điện thế ngõ ra từ máy tính dùng để điều khiển cường độ cấp cho cuộn dây được xác định theo công thức (11). Trong nghiên cứu này, các giá trị  $k_p$ ,  $k_i$  và  $k_d$  được xác định theo phương pháp thử sai và có các giá trị như sau:  $k_p = 10$ ;  $k_i = 5$ ;  $k_d = 0,05$ .



(a) Đáp ứng ở tần số 1Hz



(b) Đáp ứng ở tần số 3Hz

Hình 7. Đáp ứng điều khiển tốc độ

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 1Hz và 3Hz. Trong thí nghiệm này, mô men tải do phanh MRF tạo ra là 3Nm. Như quan sát thì quỹ đạo tốc độ mong muốn đã thu được khá phù hợp và 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 của vòng đệm và ổ bi, ma sát trên trục của và mô men tải trọng. Các đại lượng này là các nhiễu gây ra sai lệch. Trong những nghiên cứu tiếp theo, các thuật toán điều khiển bền vững (robust control algorithm) được xem xét để điều khiển tốc độ của trục bị động với những tải trọng khác nhau và giảm thiểu sai số do nhiễu gây ra.

**5. 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 10Nm. 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 1Hz và 3Hz và mô men tải 3Nm đã được thực hiện và trình bày. Kết quả 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. Trong những nghiên cứu tiếp theo, thuật toán điều khiển bền vững (robust control algorithm) được sử dụng và xem xét để điều khiển tốc độ của trục bị động với những tải trọng khác nhau.

**LỜI CẢM ƠN**

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ phát triển khoa học và công nghệ quốc gia (NAFOSTED) với mã số đề tài 107.01-2016.32.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1]. Kikuchi T. and Furusho J, 2003. *Development of Isokinetic Machine Using ER Brake*. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Taipei, Taiwan, pp.214-219.

[2]. Furusho J, Sakaguchi M, Takesue N and Koyanagi K, 2002. *Development of ER Brake and Its Application to Passive Force Display*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 13, pp.425-450.

[3]. Choi S B et al., 2007. *Speed control of DC motor using electro-rheological brake system*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 18 (12), pp.1191-1196.

[4]. Brian E S, 2005. *Research for dynamic seal Friction modeling in linear motion hydraulic Piston applications*. Master of Science thesis, University of Texas at Arlington, USA.

[5]. Nguyen Q H, Lang V T, Nguyen N D, Choi S B, 2014. *Geometric optimal design of MR brake considering different shapes of the brake envelope*. Smart Matter. Struct., Vol. 23(1), pp. 01-10.

[6]. Nguyen Q H, Choi S B, Lee Y S, Han S, 2013. *Optimal design of high damping force engine mount featuring MR valve structure with both annular and radial flow paths*. Smart Matter. Struct., Vol. 22(11), pp. 01-11.

**AUTHORS INFORMATION**

**Nguyen Quoc Hung<sup>1</sup>, Nguyen Vien Quoc<sup>2</sup>, Le Duy Tuan<sup>2</sup>, Nguyen Thoi Trung<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Vietnamese - German University

<sup>2</sup>Faculty of Mechanical Technology, Industrial University of Ho Chi Minh City

<sup>3</sup>Institute for Computational Science, Ton Duc Thang University