

# Phân tích và so sánh hiệu năng bộ điều khiển PID và Fuzzy Logic cho hệ thống điều khiển tốc độ động cơ DC

ThS. Đinh Thị Trung Hiếu

Khoa Kỹ thuật và Công nghệ - Trường Đại học Hải Dương

Email: uhdhieudinh.edu@gmail.com

Ngày nhận bài: 11/3/2026

Ngày chấp nhận đăng: 31/3/2026

**Tóm tắt** - Bài báo trình bày nghiên cứu phân tích và so sánh hiệu năng hai phương pháp điều khiển cho hệ thống điều khiển tốc độ động cơ một chiều (DC): điều khiển PID và điều khiển logic mờ (Fuzzy Logic). Hệ thống được mô hình hóa từ phương trình vi phân vật lý của động cơ DC và xác định hàm truyền bậc hai từ số liệu thực nghiệm. Các thuật toán được xây dựng và mô phỏng trên Matlab/Simulink để đánh giá chất lượng đáp ứng theo nhiều tiêu chí cùng lúc: quá điều chỉnh, thời gian quá độ, sai số xác lập, khả năng chống nhiễu và khả năng thích nghi khi tải thay đổi - cả định tính lẫn định lượng. Kết quả cho thấy PID có cấu trúc đơn giản, hiệu quả tốt với đối tượng tuyến tính, song hạn chế khi tải biến đổi lớn; Fuzzy Logic cho đáp ứng trơn hơn, sai số nhỏ và khả năng chống nhiễu vượt trội, đặc biệt trong điều kiện phi tuyến.

**Từ khóa** - Động cơ DC; điều khiển PID; Fuzzy Logic; truyền động điện; điều khiển tốc độ; Mô phỏng; Matlab/Simulink.

## I. GIỚI THIỆU

Động cơ điện một chiều (DC) được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống truyền động công nghiệp nhờ cấu trúc đơn giản, dễ điều khiển, mô men khởi động lớn và khả năng điều chỉnh tốc độ linh hoạt trong dải rộng. Các ứng dụng điển hình bao gồm băng tải công nghiệp, máy cắt kim loại, robot công nghiệp, thiết bị y tế và hệ thống tự động hóa tòa nhà.

Để đảm bảo chất lượng truyền động, việc lựa chọn chiến lược điều khiển phù hợp đóng vai trò quyết định. Điều khiển PID có ưu điểm về cấu trúc đơn giản, dễ chuẩn hóa, phù hợp với hệ thống tuyến tính, song hạn chế khi đối tượng có tính phi tuyến hoặc tham số thay đổi theo thời gian [1]-[3]. Điều khiển Fuzzy Logic dựa trên lý thuyết tập mờ và luật điều khiển ngôn ngữ tự nhiên, cho phép xử lý tốt hơn các đối tượng phi tuyến và bất định [4], [5].

Bài báo này phân tích và so sánh hiệu năng hai phương pháp trên cùng đối tượng động cơ DC, sử dụng đồng thời nhiều tiêu chí đánh giá (sai số, nhiễu, thích nghi...) cả định tính và định lượng, trong các điều kiện: tải ổn định, có nhiễu và tham số thay đổi.

## II. LƯỢC SỬ NGHIÊN CỨU TRƯỚC

Điều khiển tốc độ động cơ DC đã được nghiên cứu rộng rãi trong nhiều thập kỷ. Bose [1] và Sen [2] xây dựng nền tảng lý thuyết cho điều khiển truyền động điện, trong đó PID là phương pháp kinh điển được ứng dụng phổ biến nhất. Åström và Murray [3] hệ thống hóa lý thuyết phân hồi và các kỹ thuật chỉnh định tham số PID. Skogestad [6] và O'Dwyer [9] phát triển các phương pháp chỉnh định PID phân tích.

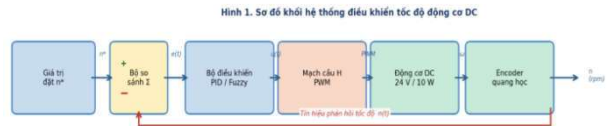
Về điều khiển Fuzzy Logic, Zadeh [4] đặt nền tảng lý thuyết tập mờ; Mamdani & Assilian [5] lần đầu ứng dụng thành công bộ điều khiển mờ kiểu Mamdani cho đối tượng công nghiệp. Ross [10] tổng hợp ứng dụng Fuzzy Logic trong kỹ thuật.

Tuy nhiên, các nghiên cứu trước thường so sánh hai phương pháp theo từng tiêu chí riêng lẻ, chưa đánh giá đồng thời đa tiêu chí (sai số, nhiễu, thích nghi) cả định tính lẫn định lượng trong điều kiện tải thay đổi và nhiễu. Bài báo này bổ sung vào khoảng trống đó.

## III. PHƯƠNG PHÁP VÀ MÔ HÌNH HỆ THỐNG ĐỘNG CƠ DC

### A. Cấu trúc hệ thống

Sơ đồ khối tổng thể của hệ thống điều khiển tốc độ động cơ DC được trình bày trong Hình 1. Hệ thống sử dụng nguồn DC 24V cấp cho mạch lực; tốc độ động cơ được đo bằng encoder quang học và đưa về bộ điều khiển (PID hoặc Fuzzy Logic) tính toán tín hiệu điều khiển, phát xung PWM điều chỉnh mạch cầu H. Nghiên cứu sử dụng Matlab/Simulink để xây dựng mô phỏng và đánh giá kết quả.



Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển tốc độ động cơ DC

Hệ thống bao gồm các thành phần chính được tóm tắt trong Bảng I.

BẢNG I. CẤU HÌNH CHÍNH CỦA HỆ THỐNG

Thành phần	Chức năng
Động cơ DC nam vĩnh cửu 24V/10W	Đối tượng điều khiển, chuyển điện năng thành cơ năng quay
Encoder quang học 500 xung/vòng	Đo tốc độ quay, cung cấp tín hiệu phản hồi cho bộ điều khiển
Mạch cầu H - MOSFET IRF3205	Điều chỉnh công suất qua điều chế độ rộng xung PWM
Vi điều khiển STM32F103	Thực hiện thuật toán PID / Fuzzy Logic, phát xung PWM
Màn hình LCD 16x2	Hiển thị tốc độ, giá trị đặt và trạng thái hoạt động
Phím nhấn	Nhập tốc độ đặt, điều chỉnh tham số điều khiển

B. Mô hình toán học động cơ DC

Động cơ DC được mô tả bởi hệ phương trình vi phân thiết lập từ các phương trình mạch điện phân ứng và phương trình động lực học cơ học [1], [2]:

$$\text{Phương trình mạch điện: } L(di/dt) + Ri = u(t) - Ke \cdot \omega(t) \quad (1)$$

$$\text{Phương trình cơ học: } J(d\omega/dt) + B\omega = Kt \cdot i(t) - TL \quad (2)$$

Trong đó:  $u(t)$  là điện áp phân ứng [V];  $i(t)$  là dòng điện [A];  $\omega(t)$  là tốc độ góc [rad/s];  $R$  là điện trở phân ứng [ $\Omega$ ];  $L$  là điện cảm [H];  $Ke$  là hệ số sức phản điện động;  $Kt$  là hệ số mô men;  $J$  là mô men quán tính [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ];  $B$  là hệ số ma sát nhớt;  $TL$  là mô men tải [ $\text{N} \cdot \text{m}$ ].

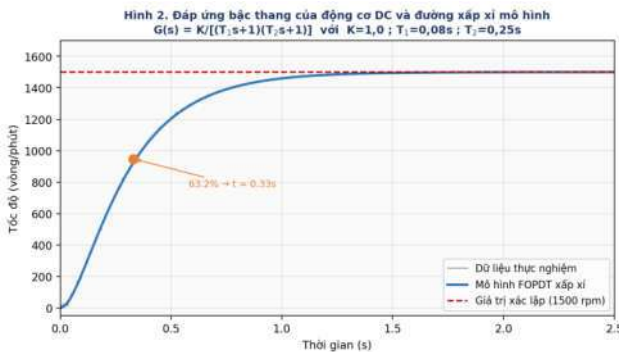
Áp dụng biến đổi Laplace với điều kiện đầu bằng không và bỏ qua mô men tải ( $TL = 0$ ), hàm truyền đạt của động cơ DC từ điện áp  $U(s)$  đến tốc độ  $\Omega(s)$  là:

$$G(s) = Kt / [(Ls+R)(Js+B) + Ke \cdot Kt] \quad (3)$$

Với động cơ DC công suất nhỏ (24V/10W), hàm truyền (3) được xấp xỉ thành dạng chuẩn bậc hai xác định từ thực nghiệm bằng phương pháp đáp ứng bậc thang:

$$G(s) = K / [(T_1s+1)(T_2s+1)] \quad (4)$$

Trong đó  $K = 1,0$  là hệ số khuếch đại tĩnh;  $T_1 = 0,08$  s là hằng số thời gian điện ( $L/R$ );  $T_2 = 0,25$  s là hằng số thời gian cơ học ( $J/B$ ). Kết quả nhận dạng thực nghiệm trình bày trong Hình 2.



Hình 2. Đáp ứng bậc thang thực nghiệm và đường xấp xỉ mô hình  $G(s)$ ; trục hoành: thời gian (s), trục tung: tốc độ (vòng/phút)

IV. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

A. Thiết kế và kết quả điều khiển PID

Bộ điều khiển PID tạo ra tín hiệu điều khiển theo luật:

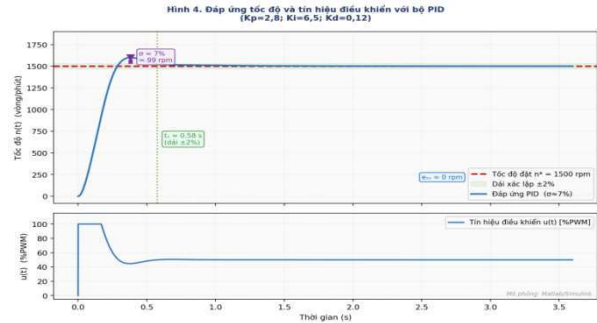
$$u(t) = Kp \cdot e(t) + Ki \int e(t)dt + Kd \cdot (de/dt) \quad (5)$$

Tham số được chỉnh định theo phương pháp Ziegler-Nichols kết hợp điều chỉnh thực nghiệm:  $Kp = 2,8$ ;  $Ki = 6,5$ ;  $Kd = 0,12$ . Cấu trúc hệ thống điều khiển PID được minh họa trong Hình 3.



Hình 3. Cấu trúc hệ thống điều khiển tốc độ động cơ DC sử dụng bộ PID

Kết quả mô phỏng trên Matlab/Simulink (Hình 4) cho thấy tốc độ hội tụ về 1500 vòng/phút với quá điều chỉnh khoảng 8 - 12%, thời gian xác lập 0,8 - 1,2 giây. Sai số xác lập gần như bằng không nhờ thành phần tích phân. Nguyên nhân quá điều chỉnh cao là do tham số PID cố định, không thích nghi với tính phi tuyến của đối tượng. Khi tải thay đổi đột ngột 50%, hệ thống mất 0,5 - 0,8 giây để phục hồi.



Hình 4. Đáp ứng tốc độ và tín hiệu điều khiển với bộ PID ( $Kp=2,8$ ;  $Ki=6,5$ ;  $Kd=0,12$ ) - Mô phỏng Matlab/Simulink

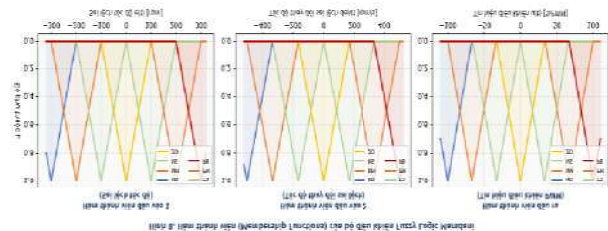
B. Thiết kế và kết quả điều khiển Fuzzy Logic

Bộ điều khiển Fuzzy Logic kiểu Mamdani được thiết kế với hai đầu vào là sai lệch tốc độ  $e(t)$  [rpm] và tốc độ thay đổi sai lệch  $de(t)/dt$  [rpm/s], một đầu ra là tín hiệu PWM  $u(t)$  [%]. Mỗi biến có 7 giá trị ngôn ngữ (NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB) với hàm thành viên tam giác; hệ thống gồm 49 luật mờ. Giải mờ theo phương pháp trọng tâm (Centroid) [5]. Cấu trúc được minh họa trong Hình 5.



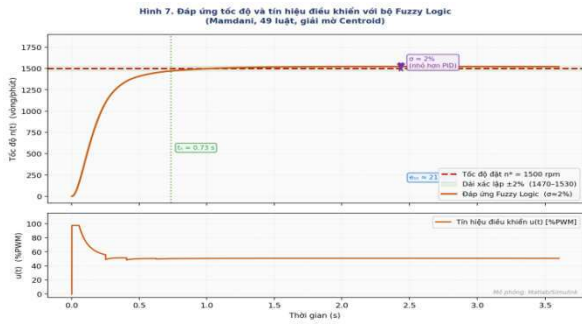
Hình 5. Cấu trúc hệ thống điều khiển tốc độ động cơ DC sử dụng bộ Fuzzy Logic (Mamdani)

Hàm thành viên của ba biến vào/ra được trình bày trong Hình 6.



Hình 6. Hàm thành viên (Membership Functions): (a) sai lệch  $e(t)$ , (b)  $de/dt$ , (c) tín hiệu ra  $u(t)$

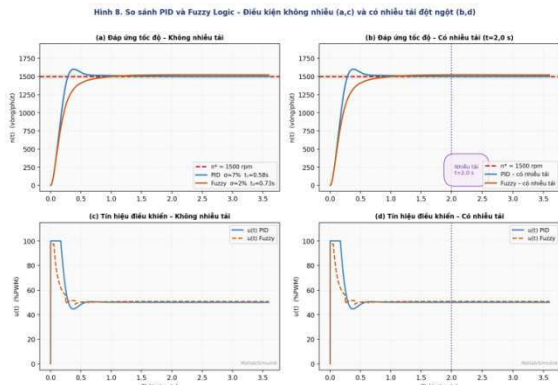
Kết quả mô phỏng (Hình 7) cho thấy quá điều chỉnh chỉ khoảng 3 - 5%, nhỏ hơn đáng kể so với PID. Đáp ứng trơn hơn và ít dao động hơn do bộ Fuzzy xử lý đồng thời sai lệch  $e(t)$  và tốc độ thay đổi  $de/dt$ , phát hiện và điều chỉnh xu hướng vọt ngay trước khi xảy ra. Khi tải thay đổi đột ngột, thời gian phục hồi ngắn hơn PID nhờ khả năng xử lý phi tuyến của thuật toán mờ.



Hình 7. Đáp ứng tốc độ và tín hiệu điều khiển với bộ Fuzzy Logic (Mamdani, 49 luật) - Mô phỏng Matlab/Simulink

C. So sánh và thảo luận

Hình 8 trình bày so sánh trực tiếp đáp ứng tốc độ của hai bộ điều khiển trong cùng điều kiện mô phỏng, bao gồm cả điều kiện không nhiễu và có nhiễu tải đột ngột. Bộ Fuzzy Logic cho quá điều chỉnh nhỏ hơn (~3 - 5% so với ~8 - 12%), đáp ứng trơn hơn và tín hiệu điều khiển ít dao động hơn so với PID.



Hình 8. So sánh đáp ứng PID và Fuzzy Logic - Không nhiễu (a,c) và có nhiễu tải đột ngột (b,d) - Mô phỏng Matlab/Simulink

Bảng II tổng hợp đặc điểm của hai phương pháp theo các tiêu chí kỹ thuật quan trọng, bao gồm phân tích nguyên nhân của sự khác biệt.

BẢNG II. SO SÁNH CHẤT LƯỢNG ĐIỀU KHIỂN PID VÀ FUZZY LOGIC

Tiêu chí	Điều khiển PID	Fuzzy Logic
Cơ sở lý thuyết	Mô hình toán học tuyến tính	Luật mờ + kinh nghiệm chuyên gia
Yêu cầu mô hình	Cần mô hình chính xác	Không cần mô hình chính xác
Quá điều chỉnh $\sigma$	~8 - 12%	~3-5%
Sai số xác lập	$\approx 0$ (nhờ thành phần I)	Rất nhỏ, triệt tiêu với luật mờ tốt
Trung bình; tham số cố định $\rightarrow$ kém thích nghi với nhiễu phi tuyến	Trung bình; tham số cố định $\rightarrow$ kém thích nghi với nhiễu phi tuyến	Tốt hơn, xử lý nhiễu phi tuyến hiệu quả
Khả năng thích nghi	Thấp - tham số cố định	Cao - đáp ứng hệ phi tuyến

Độ phức tạp	Đơn giản, dễ chuẩn hóa	Phức tạp hơn, cần xây dựng 49 luật mờ
Phạm vi ứng dụng	Hệ tuyến tính, ổn định	Hệ phi tuyến, bất định, tải thay đổi

**Nhận xét tổng hợp:** PID phù hợp với hệ tuyến tính, ổn định, yêu cầu chi phí triển khai thấp và sai số xác lập bằng không. Fuzzy Logic vượt trội trong môi trường nhiễu, phi tuyến và tải thay đổi lớn - đặc biệt khi không có mô hình chính xác của đối tượng.

V. KẾT LUẬN

Bài báo đã phân tích và so sánh hiệu năng hai phương pháp điều khiển PID và Fuzzy Logic cho hệ thống điều khiển tốc độ động cơ DC công suất nhỏ, trên cơ sở mô hình toán học được thiết lập từ phương trình vi phân vật lý và xác nhận bằng dữ liệu thực nghiệm. Kết quả mô phỏng trên Matlab/Simulink được đánh giá đồng thời theo nhiều tiêu chí định tính và định lượng.

Điều khiển PID phù hợp khi: hệ thống có đặc tính tuyến tính, ổn định; tải ít thay đổi; yêu cầu sai số xác lập bằng không; chi phí triển khai thấp. Ưu điểm nổi bật là cấu trúc đơn giản, dễ chuẩn hóa tham số.

Điều khiển Fuzzy Logic phù hợp khi: hệ thống có tính phi tuyến cao; tải biến đổi lớn hoặc có nhiễu không xác định; không có mô hình toán học chính xác của đối tượng. Fuzzy Logic mang lại quá điều chỉnh nhỏ hơn (~3-5% so với ~8-12%), đáp ứng trơn hơn và khả năng chống nhiễu vượt trội.

Trong nghiên cứu tiếp theo, có thể mở rộng theo hướng áp dụng bộ điều khiển lai Fuzzy-PID, hoặc tích hợp tối ưu hóa tham số bằng các thuật toán thông minh (Genetic Algorithm, PSO, Deep Reinforcement Learning) nhằm nâng cao hiệu năng trong điều kiện vận hành phức tạp. Đồng thời, cần bổ sung kiểm chứng thực nghiệm trên phần cứng thực để xác nhận kết quả mô phỏng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- [2] P. C. Sen, *Principles of Electric Machines and Power Electronics*, 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1997.
- [3] K. J. Åström and R. M. Murray, *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2008.
- [4] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, 1965.
- [5] E. H. Mamdani and S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller," *Int. J. Man-Machine Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1-13, 1975.
- [6] S. Skogestad, "Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning," *J. Process Control*, vol. 13, no. 4, pp. 291-309, 2003.
- [7] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, 7th ed. Pearson, 2015.
- [8] R. Isermann, *Digital Control Systems*, 2nd ed. Berlin: Springer, 2018.
- [9] A. O'Dwyer, *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*, 3rd ed. London: Imperial College Press, 2009.
- [10] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2010.