

ỨNG DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PID CẢI TIẾN KẾT HỢP HỌC LẬP CHO HỆ TRUYỀN ĐỘNG QUAY CƠ ĐIỆN THỦY LỰC

IMPROVED PID CONTROL COMBINED WITH ITERATIVE LEARNING FOR ELECTRO-HYDRAULIC ROTARY ACTUATORS

Nguyễn Minh Trí

Trường Đại học Nguyễn Tất Thành

Email: nmtri@ntt.edu.vn

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này giới thiệu một phương pháp điều khiển mới cho việc theo dõi quỹ đạo trong bộ điều khiển điện thủy lực quay (EHRA), nổi bật với sự kết hợp của bộ điều khiển tỷ lệ tích phân đạo hàm (PID) đã chỉnh sửa với cơ chế học tập lặp lại. Mục tiêu là thực hiện nhiệm vụ điều khiển theo dõi thích ứng cho EHRA điều khiển bằng bơm đối xứng. Mặc dù bộ điều khiển PID thông thường được biết đến với độ bền vững và dễ sử dụng, chúng thường gặp khó khăn trong việc duy trì hiệu suất điều khiển tốt đối với các hệ thống có độ phi tuyến cao và các thông số động lực không xác định. Với việc cải tiến bộ điều khiển PID truyền thống với một cơ chế học tập lặp lại, cho phép điều khiển bám vị trí tốt hơn cho hệ EHRA hoạt động bởi bơm đối xứng. Hiệu quả của bộ điều khiển nâng cao này được xác nhận thông qua mô phỏng kết hợp phần mềm AMESim và MATLAB, làm nổi bật khả năng cải thiện độ chính xác điều khiển trong các ứng dụng thực tế.

Từ khóa: Hệ thống thủy lực; Bộ truyền động điện thủy lực xoay; Bộ điều khiển PID; Bộ điều khiển học tập lặp lại; Bộ điều khiển bám.

ABSTRACT

This research presents an effective control algorithm for trajectory tracking of Electro-Hydraulic Rotary Actuators (EHRA) that combines a non-linear modified Proportional-Integral-Derivative (PID) controller with an iterative learning scheme. The key feature of this study is intended to improve adaptive tracking performance for symmetrical pump-controlled EHRA. While conventional PID controllers are known for their robustness and simplicity, they often struggle with systems characterized by high nonlinearity and unknown dynamics. To resolve these issues, an iterative learning mechanism for periodic trajectory tracking is merged into the traditional PID structure. The results will be validated through various co-simulations performed in AMESim and MATLAB, proving the effectiveness of the control strategy compared to conventional PID control, having better performance.

Keywords: Hydraulic system; Electro – hydraulic rotary actuator; PID control; Iterative learning; Tracking control. 

1. GIỚI THIỆU

Các hệ thống thủy lực đã đóng một vai trò quan trọng trong ngành công nghiệp hiện đại nhờ tính bền bỉ, công suất lớn và độ tin cậy cao của chúng. Trong hầu hết các ứng dụng công nghiệp trước đây, các bộ truyền động thủy lực thường được vận hành thông qua các hệ thống điều khiển van (VHS) đã được sử dụng như các thiết bị cung cấp công suất cho nhiều ứng dụng nhờ khả năng tạo ra công suất rất lớn so với kích thước của chúng [1]. Tuy nhiên, VHS gặp phải một số vấn đề như ô nhiễm môi trường do rò rỉ chất làm việc, gánh nặng bảo trì, khối lượng nặng và không gian lắp đặt hạn chế [2]. Để khắc phục những hạn chế của hệ thống VHS, các hệ thống chấp hành điện thủy lực (EHA) đã được phát triển và ứng dụng rộng rãi trong những năm gần đây. Mỗi EHA được coi như một hệ thống chuyển đổi công suất, chuyển từ tốc độ cao của động cơ điện sang lực lớn của xy lanh thủy lực. Nói chung, một hệ thống EHA bao gồm động cơ điện, bơm hai chiều, các van, bể chứa và bộ một xy lanh. Vì bộ chấp hành cuối được điều khiển trực tiếp bởi hoạt động của bơm cung cấp, các hệ thống EHA tạo lực mạnh mẽ với thiết kế gọn, sạch sẽ, hiệu quả năng lượng cao, và độ ổn định hơn so với VHS [3]. Các bộ chấp hành quay thủy lực (RAs) được ứng dụng phổ biến trong công nghiệp hiện đại, chẳng hạn như trong máy công cụ, rô-bốt, thiết bị vận chuyển, máy uốn ống, máy uốn tấm... ở những nơi đòi hỏi tải trọng lớn và momen xoắn cao.

Đối với các hệ thống điện thủy lực quay (EHRA) điều khiển bằng bơm, các vấn đề điều khiển còn gặp nhiều thách thức hơn hệ thống điều khiển van. Do phải xem xét cùng nhau các hành vi động lực của bơm hai chiều, van cùng với xi lanh xoay thủy lực. Để có được khả năng điều khiển bám sát vị trí cho một hệ EHRA dựa

trên chiều và vận tốc bơm, bộ điều khiển như PID truyền thống (tỷ lệ – tích phân – vi phân), PID mờ [4] đã được áp dụng. Tuy nhiên, bộ điều khiển PID không thể đạt được hiệu suất hợp lý dưới nhiều điều kiện tải khác nhau vì các hệ số điều khiển là không thay đổi. Do sự phát triển của cấu trúc điều khiển mờ phụ thuộc nhiều vào kinh nghiệm của chuyên gia, những bộ điều khiển PID mờ này có thể không đủ đáng tin cậy trong một số ứng dụng. Bài báo này trình bày sự phát triển của một phương pháp điều khiển bám vị trí mới được ứng dụng trong môi trường công nghiệp. Hệ thống truyền động được xây dựng dựa trên EHRA thương mại của Bosch Rexroth kết hợp với xy lanh thủy lực xoay KNR.

Với bộ điều khiển PID truyền thống được sử dụng để tính toán chỉnh sửa tín hiệu điều khiển, trong khi một cơ chế học tập lặp lại được áp dụng để thực hiện thích ứng trong hiệu suất theo dõi. Lý thuyết học lặp lại lần đầu tiên được giới thiệu bởi Arimoto et al. vào năm 1984 [5], [6]. Lý thuyết lặp lại là một trong những lược đồ học tập tốt cho việc theo dõi các quỹ đạo định kỳ và đã được áp dụng trong một số lĩnh vực như robot, sản xuất, hệ thống điều khiển, v.v. Trong bài báo này, sự kết hợp của học tập lặp lại và thuật toán PID lần đầu tiên được áp dụng vào nhiệm vụ điều khiển bám vị trí của một hệ thống EHRA điều khiển bằng bơm. Các kết quả mô phỏng trên phần mềm chuyên dụng AMESim và MATLAB với độ chính xác cao trong các điều kiện làm việc khác nhau hỗ trợ mạnh mẽ cho khả năng áp dụng phương pháp điều khiển được đề xuất trong các ứng dụng thủy lực hiện đại.

2. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Trong nghiên cứu này, để đạt được mục tiêu điều khiển, nghiên cứu tập trung vào việc

xác định lệnh tốc độ đầu vào của động cơ DC, ký hiệu là ω , nhằm đảm bảo đầu ra vị trí của hệ thống theo dõi quỹ đạo mong muốn với độ chính xác cao nhất. Sai số theo dõi được định nghĩa như sau:

$$d \triangleq y_d - y \quad (1)$$

Trong đó, y là vị trí thực tế của hệ thống.

Hệ thống điều khiển được thiết kế bao gồm ba thành phần chính: (i) Bộ điều khiển PID, (ii) Bộ điều khiển học tập lặp lại, và (iii) Giải thuật điều chỉnh tham số dựa trên dự báo mờ.

2.1. Bộ điều khiển PID

Bộ điều chỉnh tín hiệu điều khiển trong bài báo này được tính toán bởi bộ điều khiển PID thông thường:

$$\omega^* \triangleq K_p e + K_d \frac{de}{dt} + K_i \int e dt \quad (2)$$

Với K_p , K_i , K_d là các hệ số điều khiển của bộ điều chỉnh.

2.2. Bộ điều khiển học tập lặp lại

Áp dụng giải thuật điều khiển học tập lặp lại, tín hiệu điều khiển của hệ thống EHRA trong lần lặp thứ k^{th} được định nghĩa như sau:

$$\omega_{(k)} = \Gamma \omega_{(k-1)} + \omega_{(k)}^* \quad (3)$$

Γ là hệ số thích nghi, $\omega_{(k-1)}$ là lần lặp trước, và $\omega_{(k)}^*$ là thông số sửa đổi của tín hiệu điều khiển. Hệ số thích nghi của bộ điều khiển được cập nhật như sau:

$$\Gamma_k = \Gamma_{(k-1)} + \alpha |e| \quad (4)$$

Trong đó, α là hệ số thích nghi, $|e|$ là sai số tuyệt đối.

2.3. Giải thuật dự báo mờ

Nhằm nâng cao khả năng thích ứng của bộ điều khiển, một mô hình dự báo sai số đơn giản được sử dụng:

$$e_{pred} = e + \tau \frac{de}{dt} \quad (5)$$

với τ là thời gian dự báo.

Các hệ số K_p , K_i , K_d được điều chỉnh dựa vào hệ thống mờ với đầu vào e_{pred} và $\frac{de}{dt}$:

$$K_p = K_{p0} + f_1(e_{pred}, \dot{e}) \quad (6)$$

$$K_i = K_{i0} + f_2(e_{pred}, \dot{e}) \quad (7)$$

$$K_d = K_{d0} + f_3(e_{pred}, \dot{e}) \quad (8)$$

Các hàm f_1 , f_2 , f_3 là các hàm điều chỉnh tham số điều khiển dựa trên sai số dự báo e_{pred} và đạo hàm sai số $\dot{e}$ được tính như sau:

$$f_1(e_{pred}, \dot{e}) = \lambda_1 \tanh(\gamma_1 e_{pred}) \quad (9)$$

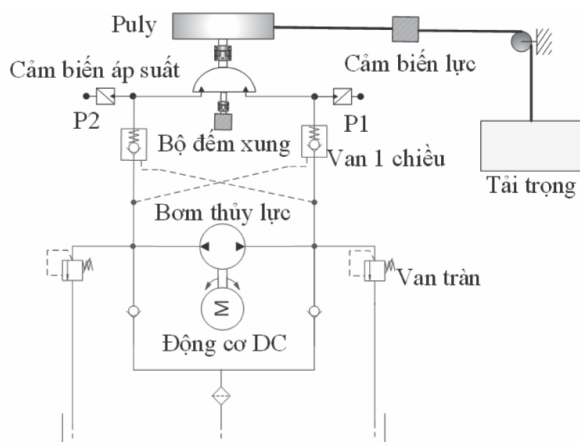
$$f_2(e_{pred}, \dot{e}) = \lambda_2 \text{sigmoid}(\gamma_2 e_{pred}) \quad (10)$$

$$f_3(e_{pred}, \dot{e}) = \lambda_3 \text{sign}(\dot{e}) \quad (11)$$

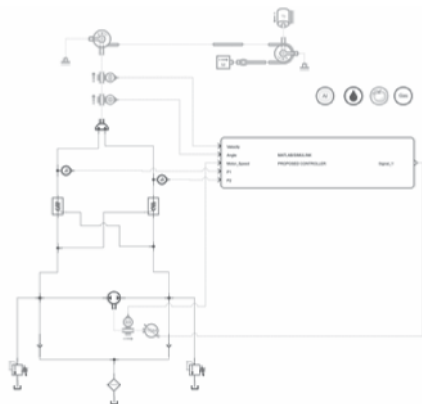
Với: λ_i , γ_i là các hệ số điều chỉnh.

Lưu ý rằng bộ điều khiển dựa trên học tập lặp lại được thiết kế chỉ cho các quỹ đạo mong muốn định kỳ. 

3. SƠ ĐỒ HỆ THỐNG THỦY LỰC



Hình 1. Cấu trúc hệ thống EHRA



Hình 2. Hệ thống điều khiển EHRA trên nền tảng đồng mô phỏng.

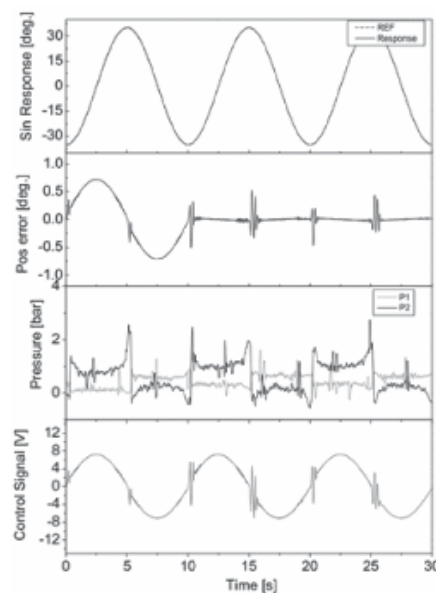
Hệ thống EHRA được xem xét trong bài báo này bao gồm bơm răng, hệ thống van hỗ trợ và một xy lanh xoay thủy lực đối xứng hai chiều. Toàn bộ hệ thống được dẫn động bởi một động cơ một chiều (DC motor) có điện áp 24V và dòng điện 20A. Ở cấu hình này, chuyển động của xy lanh xoay được điều chỉnh trực tiếp bằng tốc độ của động cơ servo. Một bộ mã hóa tuyến tính, hai cảm biến áp suất và một cảm biến lực được lắp đặt vào hệ thống để đo vị trí của xy lanh xoay, áp suất trong hai buồng chính của cơ cấu chấp hành điện thủy lực và lực tải tác động lên hệ thống. Phần giả lập tải là

một cơ cấu tải trọng trọng lực, có thể dễ dàng điều chỉnh lực tải. Đây là phương pháp đơn giản nhưng hiệu quả để mô phỏng sự thay đổi điều kiện làm việc của hệ thống truyền động EHRA. Cấu hình của EHRA được minh họa ở Hình 1. Các thông số cài đặt của hệ thống EHRA được trình bày trong Bảng 1, trong khi cấu trúc của hệ thống điều khiển trên nền tảng đồng mô phỏng được thể hiện như Hình 2.

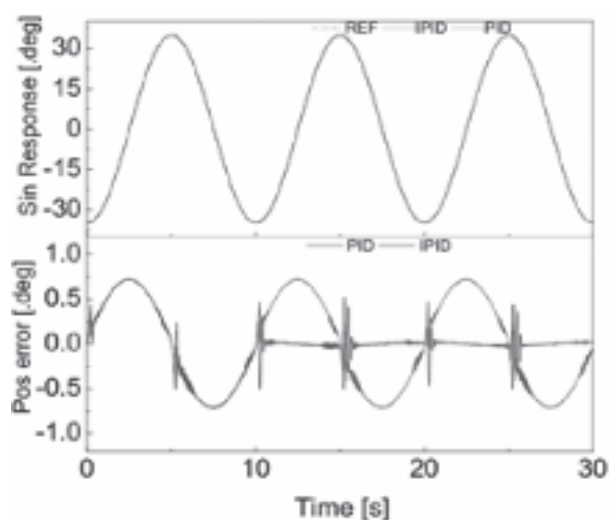
Bảng 1. Các thông số thiết bị

Thiết bị	Thông số	Giá trị
Bơm thủy lực	Dung tích	0.97 [cc/rev]
	Tốc độ xoay	3000 [rpm]
	Áp suất van tràn	120 [bar]
Xylanh thủy lực xoay	Dung tích	27.54 [cc/2700]
	Vòng xoay	100 [deg.]
	Lực sinh ra	120 [Nm]
Dầu thủy lực	Mô đun đàn hồi	1.5×10^9 [Pa]
	Trọng lượng riêng	0.87

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ PHÂN TÍCH



Hình 3. Phản hồi của hệ thống đối với quỹ đạo hình sin tần số 0.1Hz, điều kiện không tải.



Hình 4. So sánh đối với quỹ đạo hình sin tần số 0.1Hz, điều kiện không tải.

Các mô phỏng được tiến hành và kết quả so sánh được thể hiện trong các đồ thị từ Hình 3 đến Hình 6. Các đồ thị này hiển thị sự thay đổi về vị trí của xy lanh xoay tương ứng với các bộ điều khiển khác nhau trong các trường hợp nghiên cứu ứng với hàm mục tiêu dạng sóng hình sin (có tần số thay đổi từ 0.1 Hz đến 0.2 Hz).

Để đánh giá bộ điều khiển đã thiết kế, hiệu năng của bộ điều khiển PID thông thường so với bộ điều khiển học lặp. Các thông số của bộ điều khiển PID được lựa chọn bằng phương pháp thực nghiệm ($K_p = 9$, $K_i = 0.3$ và $K_d = 0.012$).

Trường hợp 1: Trong trường hợp này, không có tải trọng được áp dụng $F=0KN$. Quỹ đạo mong muốn được chọn là tín hiệu hình sin có biên độ 35 deg. và tần số 0,1 Hz.

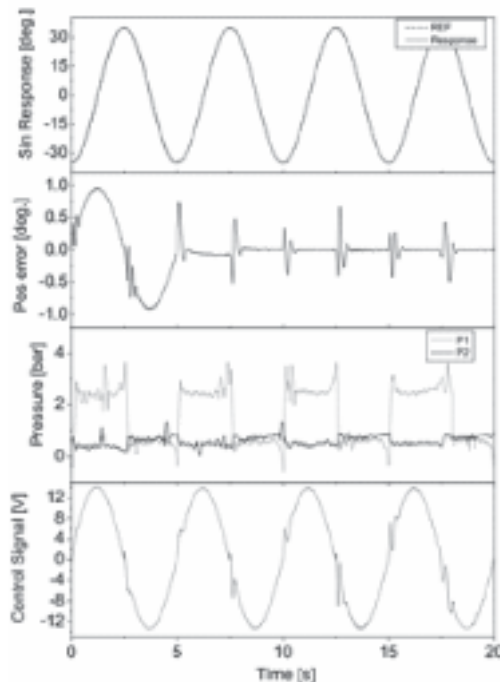
Khi áp dụng phương pháp điều khiển được đề xuất, đáp ứng của hệ thống truyền động điện thủy lực (EHRA), tín hiệu điều khiển đầu vào và các trạng thái của hệ thống được thể hiện ở Hình 3. Từ hình này có thể thấy, bộ

điều khiển PID học lặp lại cho kết quả bám quỹ đạo rất tốt. Sau hai lần học lặp, đáp ứng bám đã được điều chỉnh với sai số bám chủ yếu nằm trong khoảng 0,05 deg. Hiện tượng rung động của tín hiệu điều khiển xảy ra khi xy lanh xoay đổi hướng chuyển động. Điều này có thể được giải thích bởi sự thay đổi của các yếu tố bất định hệ thống trong quá trình đảo chiều của bơm. Tuy nhiên, tín hiệu điều khiển nhanh chóng được điều chỉnh về giá trị tối ưu một cách trơn tru.

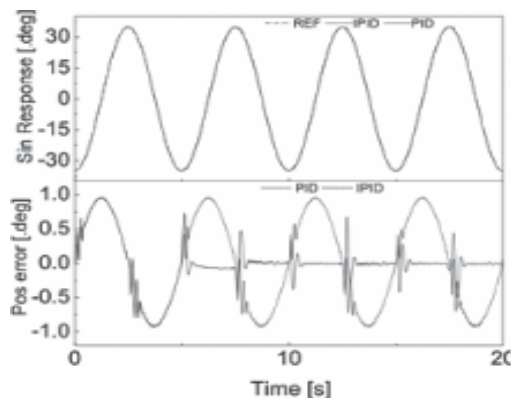
Kết quả so sánh giữa bộ điều khiển đề xuất và các kỹ thuật khác được trình bày ở Hình 4. Có thể thấy rằng bộ điều khiển PID thông thường cho đáp ứng kém hơn. Do sự xuất hiện của các yếu tố phi tuyến và bất định, bộ điều khiển PID không thể đảm bảo độ chính xác bám quỹ đạo tham chiếu hình sin. So với bộ điều khiển PID, bộ điều khiển đề xuất PID học lặp đã đạt được kết quả bám rất tốt chỉ sau hai lần cập nhật.

Trường hợp 2: Trường hợp nghiên cứu này tiến hành nhiệm vụ bám theo quỹ đạo dạng hình sin có tần số 0,2 Hz, biên độ 35 deg. trong điều kiện tải trọng 300 N. Kết quả đáp ứng của bộ truyền động điện thủy lực (EHRA), các trạng thái của hệ thống và tín hiệu điều khiển đầu vào khi áp dụng bộ điều khiển đề xuất được thể hiện trong Hình 5 và Hình 6. Kết quả từ các hình này cho thấy, ngay cả trong điều kiện làm việc khó khăn hơn, bộ điều khiển đề xuất với cơ chế học lặp lại vẫn duy trì được hiệu suất bám rất tốt. Trong khi đó, bộ điều khiển PID không thể đảm bảo độ chính xác cao khi bám theo quỹ đạo tham chiếu.





Hình 5. Phản hồi của hệ thống đối với quỹ đạo hình sin tần số 0.2Hz, điều kiện tải trọng 30 kgf



Hình 6. So sánh đối với quỹ đạo hình sin tần số 0.2Hz, điều kiện tải trọng 30 kgf.

5. KẾT LUẬN

Bài báo này đã đề xuất và thiết kế một hệ thống điều khiển dựa trên bộ điều khiển PID truyền thống kết hợp với cơ chế học lặp để áp dụng vào điều khiển quỹ đạo của hệ thống EHRA mới. Việc tích hợp cơ chế học lặp vào bộ điều khiển PID truyền thống cho thấy khả

năng cải thiện hiệu suất điều khiển với thuật toán đơn giản và ổn định. Cuối cùng, kết quả mô phỏng đã chứng minh rõ ràng tính khả thi của phương pháp đề xuất. Với độ chính xác cao trong việc bám quỹ đạo và khả năng triển khai dễ dàng trên hệ thống EHRA điều khiển bằng bơm, nghiên cứu này là cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo của chúng tôi trong việc phát triển hệ thống định vị tuần hoàn ứng dụng trong công nghiệp.

Lời cảm ơn:

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 08/4/2025

Ngày phản biện: 20/4/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Dao Thanh Liem, “Bộ điều khiển trượt PID thích nghi ứng dụng trong điều khiển vị trí hệ thống thủy lực”. Tạp chí Khoa học Công nghệ Giao thông vận tải, tập 12, số 4, trang 26-33. [https://www.doi.org/10.55228/JTST.12\(4\).26-33](https://www.doi.org/10.55228/JTST.12(4).26-33)
- [2]. Brecher, C., Jasper, D., and Fey, M., “Analysis of New, Energy-Efficient Hydraulic Unit for Machine Tools”. International Journal of Precision and Manufacturing-Green technology, Vol. 4, No. 1, pp. 5-11, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27290-5_28
- [3]. Tri, N.M., Ba, D.X. & Ahn, K.K., “A Gain-Adaptive Intelligent Nonlinear Control for an Electrohydraulic Rotary Actuator”. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 19, 665-673 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12541-018-0080-5>
- [4]. Truong DQ, Ahn K.K., “Force control for press machines using an online smart tuning fuzzy PID based on a robust extended Kalman filter”. Expert Systems with Applications 2011; 38(5); 5879-5894.
- [5]. S. Arimoto, et al., “Bettering operation of Robots by learning”. Journal of Robotic Systems Vol. 1(2) 123-140, 1984. <https://doi.org/10.1002/rob.4620010203>
- [6]. A. Madady, “An Extended PID Type Iterative Learning Control”. International Journal of Control, Automation, and Systems Vol. 11(3) 470-481, 2013.