

ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG CHÍNH LƯU CẦU 3 PHA THYRISTOR – ĐỘNG CƠ ĐIỆN MỘT CHIỀU CÓ THÔNG SỐ THAY ĐỔI ỨNG DỤNG LOGIC MỜ

CONTROL OF THREE- PHASE THYRISTOR BRIDGE RECTIFIER - DC MOTOR SYSTEM USING FUZZY LOGIC

Võ Khánh Thoại

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng; vkthoai@ute.udn.vn

Tóm tắt - Hiện nay, động cơ điện một chiều vẫn đang được ứng dụng rất phổ biến trong các lĩnh vực kinh tế và khoa học kỹ thuật như ở các nhà máy cán thép, tàu điện ngầm, các cánh tay robot... Để thực hiện các nhiệm vụ trong công nghiệp, trong các dây chuyền sản xuất, yêu cầu tốc độ của động cơ điện một chiều phải ổn định và đòi hỏi độ chính xác cao. Đối với động cơ điện một chiều, các thông số thường bị thay đổi nên việc sử dụng các bộ điều khiển kinh điển gặp nhiều hạn chế làm ảnh hưởng chất lượng điều chỉnh. Bài báo đưa ra kết quả mô phỏng điều khiển hệ thống truyền động chỉnh lưu cầu ba pha Thyristor – Động cơ điện một chiều theo giải thuật mờ nhằm ổn định tốc độ của động cơ điện một chiều khi thông số của hệ thống thay đổi.

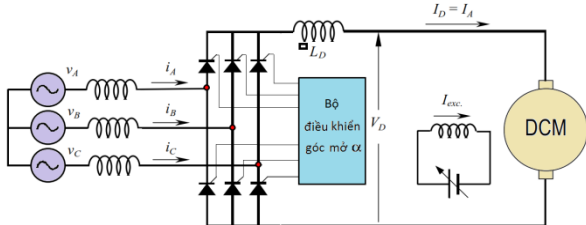
Từ khóa - PID; điều khiển mờ; chỉnh lưu cầu ba pha Thyristor; động cơ DC.

Abstract - Currently, DC motors are still widely used in the fields of economy and science such as steel rolling mills, subways, robotic arms. In the production line, the speed of DC motors must be stable and highly precise. For DC motors, the parameters are often altered, so the use of PID controllers is limited to compromising tuning quality. The paper presents simulation results of the Three -phase Thyristor Bridge Rectifier - DC motors Control System in a fuzzy algorithm to stabilize the speed of DC motors when the system parameters change. The simulation results obtained from Matlab/Simulink and SimPowerSystems library prove the advantages of the used method over traditional approaches.

Key words - PID; Fuzzy Controller; Three phase Thyristor Bridge Rectifier; intelligent controller; DC motor.

1. Đặt vấn đề

Hệ truyền động gồm Bộ chỉnh lưu cầu ba pha Thyristor với điện áp đầu ra điều khiển được để điều chỉnh tốc độ động cơ điện một chiều có sơ đồ như hình 1.



Hình 1. Bộ chỉnh lưu cầu ba pha Thyristor - Động cơ DC

Bộ chỉnh lưu Thyristor với chuyển mạch tự nhiên và có điện áp (dòng điện) ra là một chiều điều khiển được. Hoạt động của mạch do nguồn xoay chiều quyết định vì nhờ đó mà có thể thực hiện được chuyển mạch dòng điện giữa các phần tử lực. Phần mạch quan trọng của chỉnh lưu là phần điều khiển, tại đó các xung mở Thyristor được phát ra theo một trật tự đã định. Điện áp đầu ra sau chỉnh lưu được dùng để điều chỉnh tốc độ của động cơ điện.

Trong các hệ thống truyền động điện chất lượng cao động cơ điện một chiều được dùng rất phổ biến vì tính đa dụng và linh hoạt, với phạm vi điều khiển tốc độ lớn và yêu cầu đảo chiều nhanh. Để điều khiển ổn định tốc độ động cơ, bộ điều khiển kinh điển tỉ lệ - đạo hàm - tích phân PID luôn là sự lựa chọn vì cấu trúc đơn giản và dễ cài đặt [1], [2], nhưng việc tính chỉnh PID sẽ gặp khó khăn khi hệ thống có các thông số thay đổi, khi có nhiễu tác động hay tín hiệu đặt thay đổi khác nhau.

Các phương pháp dùng bộ điều khiển mờ trong điều khiển [3], [4], [7], [8] là những hướng nghiên cứu để cải thiện nhược điểm của bộ PID. Hệ thống điều khiển ứng dụng logic mờ được đề xuất để khắc phục những tính năng trên.

Nguyên lý của bộ điều khiển mờ là dựa vào giao diện đầu vào gồm các khâu mờ hóa, hiệu chỉnh như đạo hàm, tích phân... để đưa thông tin cho thiết bị hợp thành. Thiết bị hợp thành chứa các luật điều khiển được thiết kế với những kinh nghiệm của chuyên gia, đây là trung tâm của bộ điều khiển mờ. Thông qua các luật điều khiển này, đầu ra của bộ điều khiển mờ (khâu giải mờ) sẽ tạo các tín hiệu điều khiển cho hệ thống.

Nội dung của bài báo là ứng dụng thuật toán điều khiển mờ để điều khiển hệ thống gồm Chỉnh lưu cầu ba pha Thyristor – Động cơ điện một chiều, với việc thay thế bộ điều khiển PI kinh điển bằng bộ điều khiển mờ nhằm cải thiện chất lượng điều khiển của hệ thống khi các thông số của hệ thống thay đổi. Các kết quả mô phỏng trên Matlab/Simulink và thư viện SimPowerSystems, cho thấy được các ưu điểm của phương pháp điều khiển mờ so với phương pháp điều khiển kinh điển.

2. Mô hình hệ thống truyền động Chỉnh lưu Thyristor – Động cơ DC

2.1. Bộ chỉnh lưu cầu 3 pha Thyristor

Để điều chỉnh điện áp cấp cho phần ứng của động cơ điện một chiều (qua đó điều chỉnh tốc độ động cơ) chúng ta cần có bộ biến đổi. Ở đây, ta sử dụng bộ biến đổi chỉnh lưu cầu 3 pha điều khiển đối xứng dùng 6 Thyristor có sơ đồ cấu trúc như Hình 2, với tín hiệu điều khiển được cấp từ điện áp điều khiển đầu vào U_{dk} . Điện áp một chiều ở đầu ra đặt vào phần ứng của động cơ (U_d). U_{dk} có nhiệm vụ thay đổi góc mở α của các van Thyristor và có giá trị rất bé so với U_d , nên bộ chỉnh lưu chính là bộ khuếch đại với hệ số khuếch đại K_{cl} .

Chọn hàm truyền của bộ chỉnh lưu có dạng:

$$W_d(s) = K_{cl} e^{-rs} = \frac{K_{cl}}{e^{rs}} = \frac{K_{cl}}{1 + \frac{T_d s}{1!} + \frac{(T_d s)^2}{2!} + \frac{(T_d s)^3}{3!} + \dots + \frac{(T_d s)^k}{k!}} \approx \frac{K_{cl}}{T_d s + 1} \quad (1)$$

(do $T_{cl} \ll 1$). Với $U_{dm} = 100$ (V), do đó $K_{cl} = U_{dm}/10 = 10$; $T_{cl} \approx 0,00167$ (s), khi đó bộ chỉnh lưu: $W_{cl} = \frac{10}{0,00167s + 1}$

Tính chất của bộ biến dòng tương tự với bộ chỉnh lưu, ta có hàm truyền bộ biến dòng là:

$$W_{bd} = \frac{K_{bd}}{T_{bd}s + 1}, \text{ chọn } K_{bd} = I_{dm}/10 = 0,6; T_{bd} = 0,001(s). \quad (2)$$

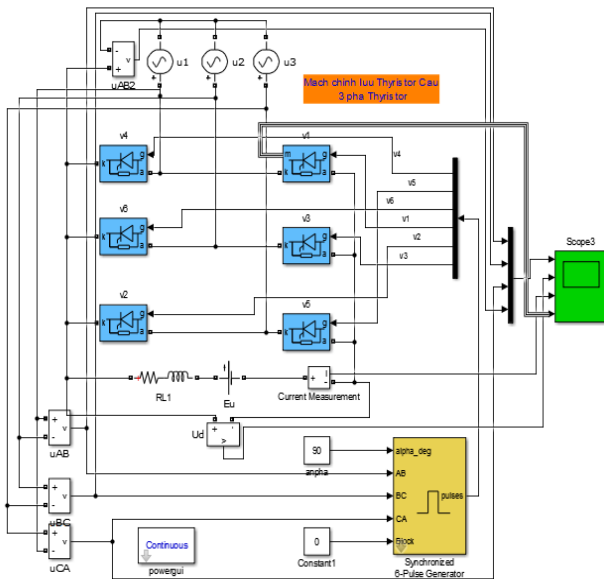
$$\text{Bộ biến dòng: } W_{bd} = \frac{0,6}{0,001s + 1}$$

Hàm truyền của bộ đo tốc độ có dạng:

$$W_{ft} = \frac{K_{ft}}{T_{ft}s + 1} \text{ với } K_{ft} = \omega_{dm}/10 = 2\pi n_{dm}/600 \approx 31,4 \quad (3)$$

Chọn $T_{ft} = 0,001(s)$; Khi đó, bộ đo tốc độ:

$$W_{ft} = \frac{3,14}{0,001s + 1} \quad (4)$$



Hình 2. Cấu trúc bộ chỉnh lưu cầu ba pha Thyristor trong Matlab – Simulink

Bảng 1. Thông số động cơ DC [6], [7]

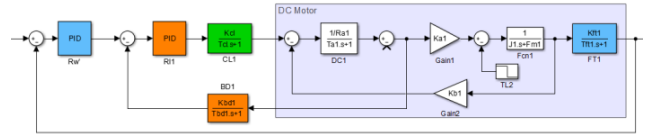
Thông số	Ký hiệu	Động cơ	Đơn vị tính
Công suất danh định	P_{dm}	220	W
Tốc độ định mức	n_{dm}	314	rad/s
Điện áp định mức	U_{dm}	100	V
Dòng điện định mức	I_{dm}	6,0	A
Mô men quán tính	J_1	$10,2 \times 10^{-2}$	kg.m ²
Hằng số từ thông động cơ	K_a	0,284	N.m/A
Điện trở phản ứng	R_a	0.5	Ω
Điện cảm phản ứng	L_a	0,0049	H
Khả năng mang tải	M	89	N

2.2. Mô hình hóa động cơ DC

Muốn điều khiển tốc độ, ta cần phải mô hình hóa động

cơ DC như sơ đồ khối ở Hình 3. Đầu vào là tín hiệu điện áp U_a ; đầu ra là tốc độ w ; R_a là điện trở phản ứng; $T_a = L_a/R_a$ là hằng số thời gian điện; K_a , K_b là các hệ số; T: mômen tổng trên trục động cơ; s toán tử Laplace.

Nhiệm vụ của người thiết kế là tìm bộ điều khiển sao cho tốc độ của động cơ luôn ổn định hoặc bám theo tín hiệu đặt, khử nhiễu tốt.

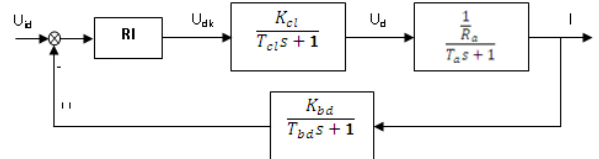


Hình 3. Sơ đồ khối điều khiển hệ thống Chỉnh lưu cầu 3 pha Thyristor – động cơ điện DC

3. Thiết kế các bộ điều khiển và kết quả mô phỏng

3.1. Thiết kế bộ điều khiển hệ thống dùng PID

Các bộ điều khiển vị trí đơn giản và thường dùng (hơn 90%) là bộ điều khiển tỉ lệ P - đạo hàm D - tích phân (PI, PD, PID). Vòng điều khiển cấp trong cùng là bộ điều khiển dòng điện, giả sử $e_a \approx 0$, ta có sơ đồ cấu trúc mạch vòng điều khiển dòng điện như Hình 4.



Hình 4. Sơ đồ cấu trúc mạch vòng điều khiển dòng điện

Từ sơ đồ ta có hàm truyền hệ hở (khi chưa có RI) là:

$$W_{hl}(s) = \frac{K_{cl}}{(T_{cl}s + 1)} \cdot \frac{R_a}{(T_a s + 1)} \cdot \frac{K_{bd}}{(T_{bd}s + 1)} \approx \frac{K_l}{(T_{cl}s + 1)(T_{bd}s + 1)} \quad (5)$$

Áp dụng các nguyên tắc các hằng số thời gian nhỏ,

$$(T_a \gg T_{cl} + T_{bd} = T_\Sigma).$$

Đây là một khâu quán tính bậc 2, áp dụng tiêu chuẩn tối ưu độ lớn, chọn bộ điều khiển PI có dạng:

$$W_{RI} \approx \frac{R_a T_a}{(2K_{cl} K_{bd} T_\Sigma)(1 + \frac{1}{T_a s})} \quad (6)$$

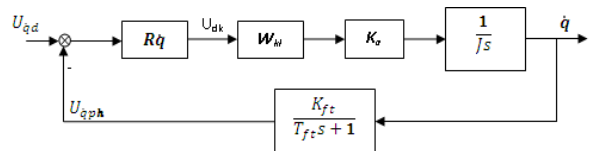
Thay số [6], [7] vào ta được:

$$W_{RI} \approx 0,1392(1 + \frac{1}{0,0027s})$$

Hàm truyền hệ kín có dạng:

$$W_{kl} \approx \frac{1,67(0,001s + 1)}{0,00534s(0,00267s + 1) + 1}$$

Vòng điều khiển tiếp theo Hình 5 là tốc độ:



Hình 5. Sơ đồ cấu trúc mạch vòng điều khiển tốc độ

$$W_{hq}(s) = W_{kd} K_a \cdot \frac{1}{Js} \frac{K_{ft}}{(T_{ft}s + 1)}$$

$$W_{hq}(s) = \frac{K_a K_{ft} (T_{bd}s + 1)}{[Js(2T)]_{\Sigma I} s (T_{cl}s + 1) (T_{bd}s + 1) + 1} (T_{ft}s + 1). \quad (7)$$

với $T_{ft} = T_{bd} = 0,001(s)$ và bỏ qua các thành phần bậc cao, ta có:

$$W_{hq} \approx \frac{K_a K_{ft}}{[Js(2T)]_{\Sigma I} s + 1} \quad (8)$$

Áp dụng tiêu chuẩn tối ưu đối xứng với đối tượng có hàm truyền dạng tích phân quán tính bậc nhất, chọn bộ điều khiển PI có dạng:

$$W_{Rq} \approx K_{pq} \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{T_{Iq}s}} \right) \quad (9)$$

trong đó, $T_{Iq} \approx 2aT_{\Sigma I}$; $K_{pq} \approx \frac{JK_{bd}}{2K_a K_{ft} T_{\Sigma I} \sqrt{a}}$ (10)

khí đó:

$$W_{Rq} \approx \left(\frac{JK_{bd}}{2K_a K_{ft} T_{\Sigma I} \sqrt{a}} \right) \left(1 + \frac{1}{2aT_{\Sigma I}s} \right) \quad (11)$$

chọn $a = 9$ và thay số vào ta được:

$$T_{Iq} \approx 0,048; K_{pq} = 0,0039$$

Nên: $W_{Rq} \approx 0,0039 \left(1 + \frac{1}{0,048s} \right)$

3.2. Thiết kế bộ điều khiển dùng logic mờ

Điều khiển mờ [4] được đề xuất khi hệ thống có tham số thay đổi, không xác định chính xác hoặc sử dụng kinh nghiệm vận hành hệ thống của chuyên gia để thiết kế. Ngôn ngữ sử dụng trong điều khiển mờ gần với suy nghĩ con người, đây là một dạng điều khiển thông minh đôi khi còn gọi là tính toán mềm.

Khi tham số của động cơ thay đổi thì bộ điều chỉnh tốc độ Rq' cũng thay đổi. Vì vậy để đảm bảo chất lượng điều chỉnh không đổi, thì bộ điều chỉnh phải có khả năng tự động chỉnh định lại các tham số. Điều này không thể thực hiện với bộ điều chỉnh PI kinh điển. Chính vì vậy bộ điều khiển mờ được đề xuất để thay thế cho bộ PI. Đầu vào bộ điều khiển mờ là sai lệch tốc độ ($e_\omega = \omega_{đặt} - \omega_{thực}$) và tốc độ sai lệch ($de_\omega = e_\omega(k+1) - e_\omega(k)$). Ngõ ra bộ điều khiển mờ là điện áp đưa vào bộ chỉnh lưu (u).

3.2.1. Xác định tập mờ

Số lượng tập mờ ở đầu vào được chia làm 7, bao gồm những tập giống suy nghĩ con người: thấp nhiều NL; thấp vừa NM; thấp ít NS; vừa ZE; cao ít PS; cao vừa PM; cao nhiều PL. Đầu ra của bộ điều khiển mờ cũng được chia làm 7 tập với các ngôn ngữ tương ứng như đầu vào. Các tập mờ được xây dựng theo kinh nghiệm như Hình 6a, b, c.

3.2.2. Xác định tập mờ hàm liên thuộc

Có rất nhiều cách chọn kiểu tập mờ hàm liên thuộc. Thuật toán điều khiển này chọn hàm liên thuộc kiểu hình tam giác vì kiểu này phù hợp trong kỹ thuật điều khiển

đồng thời tính toán cũng dễ dàng.

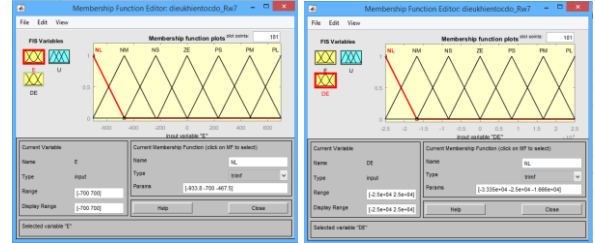
3.2.3. Xây dựng các luật điều khiển

Dựa vào đặc tính động học, quá độ thường gặp, bộ số liệu vào ra khi sử dụng bộ điều khiển truyền thống PI, ta xây dựng luật điều khiển đối với hệ thống này như sau:

If ET is PL and DE is ZE then U is PL.

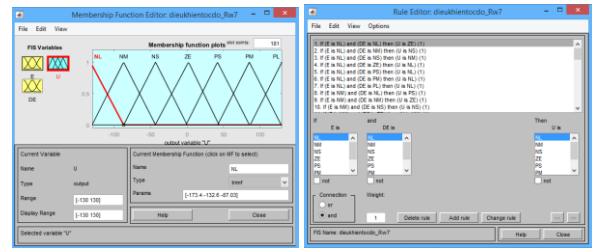
If ET is ZE and DE is PL then U is NM.

Ta có tổ hợp của $7 \times 7 = 49$ luật điều khiển được thiết kế trong luật hợp thành như Hình 6d. Đầu ra rõ ràng phụ thuộc vào sai lệch ET, đạo hàm DE và luật điều khiển này.



a. Đầu vào ET

b. Đầu vào DE



c. Đầu ra U

d. Luật điều khiển

Hình 6. Các hàm liên thuộc và luật điều khiển

Dùng luật hợp thành Sum-Prod, giải mờ theo phương pháp trọng tâm, Khi đó hệ số u được tính toán lúc điều khiển là:

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^{49} y_p^{-i} \mu_{A_i}(e(t)) \cdot \mu_{B_i}(du/dt)}{\sum_{i=1}^{49} y_p^{-i} \mu_{A_i}(e(t)) \cdot \mu_{B_i}(du/dt)} \quad (12)$$

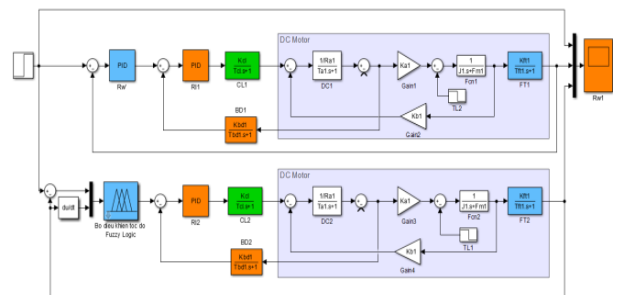
Trong đó, y_p^{-i} là tâm của các tập mờ tương ứng.

3.3. Kết quả mô phỏng

Kết quả mô phỏng điều khiển hệ thống Chỉnh lưu cầu 3 pha Thyristor – Động cơ điện một chiều như sau:

3.3.1. Mô phỏng trên Simulinks

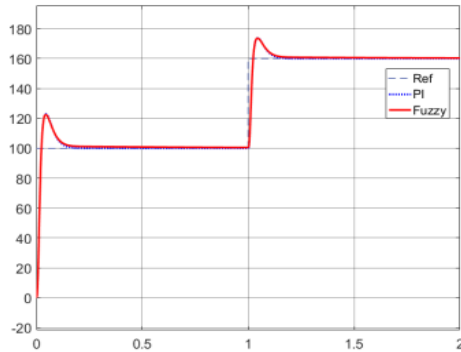
Mô phỏng hệ thống trên Simulink có sơ đồ như Hình 7. Sơ đồ có hệ thống Chỉnh lưu – Động cơ một chiều ở hai nhánh như nhau.



Hình 7. Mô hình điều khiển hệ thống trên Simulink

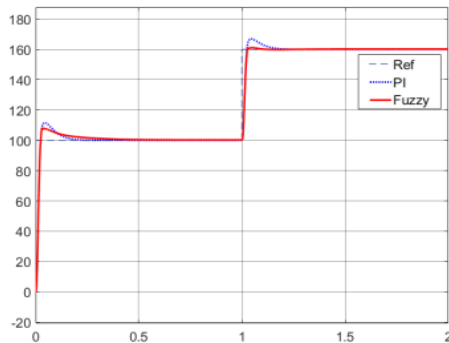
Bằng cách thay thế bộ điều khiển tốc độ PI ở nhánh trên bằng bộ điều khiển mờ Fuzzy ở nhánh dưới để so sánh các kết quả.

Từ Hình 8 ta thấy rằng khi dùng bộ điều khiển PI và bộ Fuzzy, cho đáp ứng tốc độ động cơ xác lập ổn định gần như nhau, thời gian quá độ khoảng 0,2s, sai lệch nhỏ không đáng kể. Cả PI và Fuzzy đều hiệu quả khi các thông số hệ thống không thay đổi.

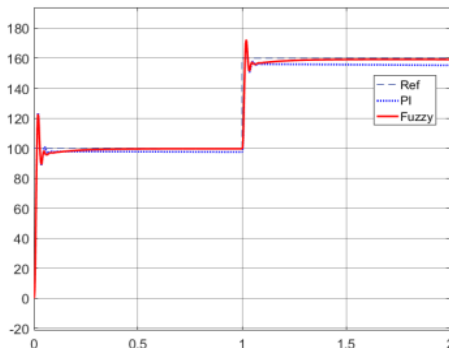


Hình 8. Tốc độ động cơ DC khi tham số không đổi.

Khi điện trở phản ứng động cơ R_a thay đổi từ 0.2Ω lên 0.5Ω , lúc đó bộ điều khiển mờ Fuzzy và bộ PI cho đáp ứng nhanh gần như nhau, nhưng bộ Fuzzy chính xác hơn, ít vọt lố hơn PI (Hình 9).



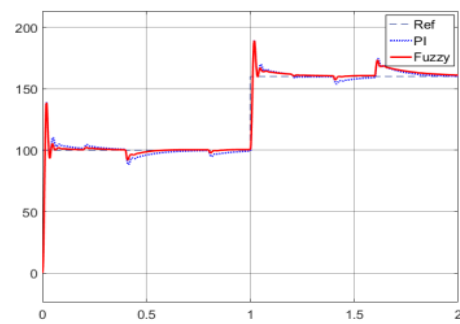
Hình 9. Tốc độ động cơ khi thay đổi điện áp phản ứng R_a



Hình 10. Tốc độ động cơ khi thay đổi mômen quán tính J

Khi mômen quán tính J thay đổi từ giá trị 0.05 đến giá trị 0.08 kg.m^2 thì bộ PI cho đáp ứng có sai số xác lập là 1.5 rad/s tại giá trị đặt 100 rad/s và 4 rad/s tại 160 rad/s trong khi đó sai số xác lập khi dùng Fuzzy nhỏ không đáng kể (Hình 10).

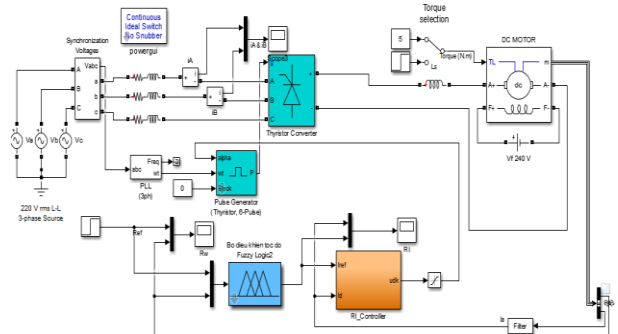
Trường hợp khi cho nhiều mômen cản M_c trong tầm $[-0.2; 0.2]$, thời gian lấy mẫu 0.2, bộ điều khiển dùng Fuzzy cho đáp ứng khá nhanh nhạy và ít sai lệch hơn so với bộ PI (Hình 11).



Hình 11. Tốc độ động cơ khi nhiều mômen cản M_c

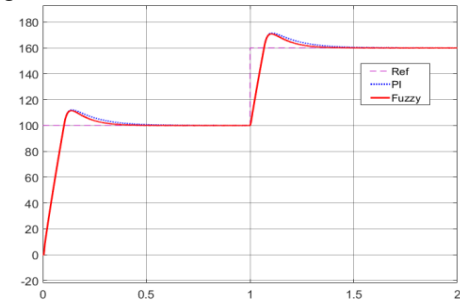
3.3.2. Mô phỏng trên thư viện Sim Power Systems

Mô phỏng hệ thống trên thư viện Sim Power Systems. Thư viện này cũng sử dụng môi trường Simulink nhưng ưu điểm là dùng các khối chức năng có sẵn (với các thông số có thể thay đổi) để kết nối thành mạch điện – điện tử một cách nhanh chóng, hiệu quả. Ngoài ra, mô hình mô phỏng trên Sim Power System có cấu trúc giống với thực tế hơn. Hệ thống điều khiển được xây dựng như sơ đồ như Hình 12.

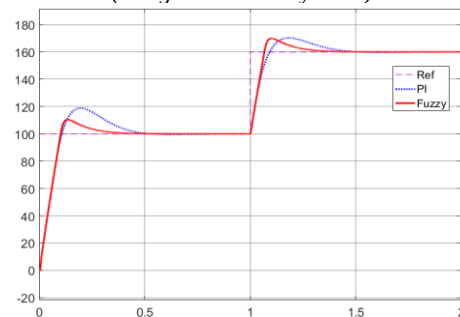


Hình 12. Mô hình điều khiển hệ thống trong Sim Power Systems

Mô phỏng hệ thống trong Sim Power Systems, khi các thông số của hệ thống không đổi, dùng bộ PI và Fuzzy cho đáp ứng gần như nhau thể hiện ở đáp ứng trên Hình 13.

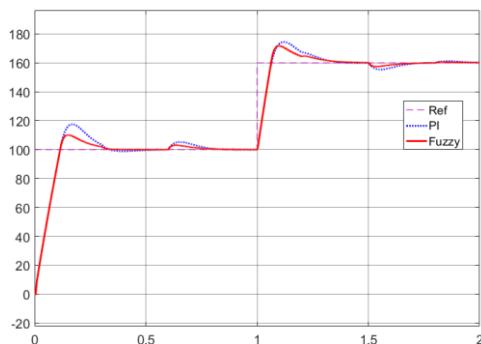


Hình 13. Tốc độ động cơ DC khi tham số không đổi (trong Sim Power Systems)



Hình 14. Tốc độ động cơ DC khi R_a thay đổi

Khi điện trở phản ứng của động cơ R_a thay đổi từ 0.2Ω lên 0.5Ω , đáp ứng tốc độ thể hiện trên Hình 14. Bộ Fuzzy cho đáp ứng xác lập với sai số 2% lúc 0.2s, trong khi đó bộ PI là 0.5s, độ quá điều chỉnh 9% cũng ít hơn PI 20%. Hình 15 thể hiện trường hợp nhiễu ngẫu nhiên dòng điện trong tầm $[-0.5; 0.5]$ thời gian lấy mẫu 0.3s, bộ điều khiển PI không hiệu quả bằng Fuzzy, đáp ứng hệ thống chậm hơn, độ quá điều chỉnh (18%) cũng nhiều hơn Fuzzy (9%).



Hình 15. Tốc độ động cơ DC khi nhiễu dòng điện

Bàn luận: Qua các kết quả mô phỏng, rõ ràng rằng nếu như thông số của hệ thống không đổi thì chỉ cần sử dụng bộ PI để điều khiển, nhưng khi thông số hệ thống có các thông số thay đổi, bộ PI do thiết kế tại một điểm làm việc nên tỏ ra không hiệu quả cần phải chỉnh định lại các tham số. Việc đề xuất Fuzzy trong trường hợp này để khắc phục những hạn chế trên.

4. Kết luận

Từ thực tế khảo sát lý thuyết và ứng dụng logic mờ vào đối tượng gồm Bộ chỉnh lưu cầu ba pha Thyristor - Động cơ điện một chiều DC và so sánh với điều khiển kinh điển PID, ta thấy rằng khả năng thích nghi của hệ thống được nâng lên rất nhiều: độ quá điều chỉnh khá ít, thời gian đáp ứng nhanh và sai số vị trí nhỏ, góp phần nâng cao chất

lượng điều khiển khi hệ thống có những thông số thay đổi. Các kết quả có được từ mô phỏng trên Matlab/Simulink và thư viện SimPowerSystems, chứng tỏ được các ưu điểm của phương pháp điều khiển mờ so với phương pháp điều khiển truyền thống.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ phát triển tiềm lực Khoa học Công nghệ của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng trong đề tài có mã số T2018-06-90.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Karl Johan Åström, Tore Hägglund, ISA-The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2006.
- [2] Ashwaq Abdulameer, Marizan Sulaiman Mohd Shahrieel Mohd Aras, Tuning Methods of PID Controller for DC Motor Speed Control, 2016.
- [3] Cheng-Jian Lin, Cheng-Hung Chen, Chi-Yung Lee, "A TSK-Type Quantum Neural Fuzzy Network for Temperature Control", *International Mathematical Forum*, 1, no. 18, 853-866, 2006.
- [4] Kevin M. Passino, Stephen Yurkovich (1998), *Fuzzy control*, Addison Wesley Longman, Inc.
- [5] KT Võ, Sliding table position control using neural networks, B2017-478, Page 118 - 122, *Journal of Science and Technology - Danang University (JST-UD)*, No 11(120).2017.
- [6] KT Võ, Adaptive control of sliding table position using feedback linearization neural networks, B2017-478, Page 85- 89, *Journal of Science and Technology - Danang University (JST-UD)*, No 1(122).2018.
- [7] M. Önder Efe, O. Hasan Dagci, Okyay Kaynak, Fuzzy Control of a 2-DOF Direct Drive Robot Arm by Using a Parameterized T-Norm, Bogazici University, Mechatronics Research and Application Center, Bebek, 80815, Istanbul, Turkey.
- [8] Nikos C.Tsourveloudis, Ramesh Kolluru, Kimon P. Valavanis and Denis Gracanin, "Suction Control of a Robotic Gripper: A Neuro Fuzzy Approach", Robotics and Automation Laboratory, The Center for Advanced Computer Studies and A-CIM Center, University of Louisiana at Lafayette, Lafayette, LA, USA, 1999.
- [9] Y. W. Chu, H. Y. Chung, "A fuzzy controller with the Grey prediction model for the motion of a robot" M.S. thesis in Electrical Engineering, National Central University, 2000.
- [10] <https://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/two-quadrantthreephaserectifierdcdrive.html>

(BBT nhận bài: 10/10/2018, hoàn tất thủ tục phản biện: 24/10/2018)