



CONTROL METHOD OF ELECTRIC TRAIN POWER SUPPLY SYSTEM USING IMPROVED FUZZY TAKAGI-SUGENO MODEL

Le Hung Lan, Nguyen Van Tiem*

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 30/01/2023

Revised: 04/04/2023

Accepted: 14/04/2023

Published online: 15/04/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.3.10>

* *Corresponding author*

Email: nguyenvantiem@utc.edu.vn; Tel: +84904226592

Abstract. A contact force control system in the pantograph-catenary system play important role for the train electrical power supply in motion. The task of the control system is to ensure that the contact force between the electric contact rod and the line is stable in the condition that the stiffness of the electric contact rod is changed when sliding along the line. The paper presents a new control method based on the improved fuzzy Takagi-Sugeno model. The proposed method has several advantages: first, the stability of the control system can be assessed; second, the ability to suppress oscillations, follow the set value of the contact force very well and thirdly, ensure a stable control quality when there is an uncertain change in the system parameters. The effectiveness of the proposed method was evaluated using Matlab software. The simulation results show that the stability of the system is confirmed, and the control efficiency has been improved.

Keywords: pantograph-catenary system, PI controller, Moradi-Zirkohi-Lin (MZL) algorithm, TS fuzzy controller.



PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG CUNG CẤP ĐIỆN CHO TÀU ĐIỆN SỬ DỤNG MÔ HÌNH TAKAGI-SUGENO MỜ CẢI TIẾN

Lê Hùng Lân, Nguyễn Văn Tiềm*

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 30/01/2023

Ngày nhận bài sửa: 04/04/2023

Ngày chấp nhận đăng: 14/04/2023

Ngày xuất bản Online: 15/04/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.3.10>

* Tác giả liên hệ

Email: nguyenvantiem@utc.edu.vn; Tel: +84904226592

Tóm tắt. Hệ thống điều khiển tiếp xúc giữa cần tiếp điện và dây điện lưới có vai trò quan trọng trong đảm bảo chất lượng cung cấp điện cho tàu đường sắt khi chuyển động. Nhiệm vụ của hệ thống điều khiển là đảm bảo lực tiếp xúc giữa cần và dây được ổn định trong điều kiện độ cứng của cần thay đổi khi trượt theo dây. Bài báo đưa ra phương pháp điều khiển mới dựa trên mô hình Takagi-Sugeno mờ cải tiến. Phương pháp đề ra có một số ưu điểm: thứ nhất, đánh giá được tính ổn định của hệ thống điều khiển; thứ hai, khả năng dập tắt dao động, bám theo giá trị đặt của lực tiếp xúc rất tốt và thứ ba, đảm bảo chất lượng điều khiển bền vững khi có sự thay đổi bất định trong các tham số hệ thống. Hiệu quả của phương pháp đã được đánh giá thông qua mô phỏng trên máy tính bằng phần mềm Matlab. Kết quả mô phỏng cho thấy tính ổn định của hệ thống được khẳng định, đồng thời hiệu quả điều khiển đã được nâng cao.

Từ khóa: hệ thống cần-dây, bộ điều khiển PI, thuật toán MZL, bộ điều khiển mờ TS.

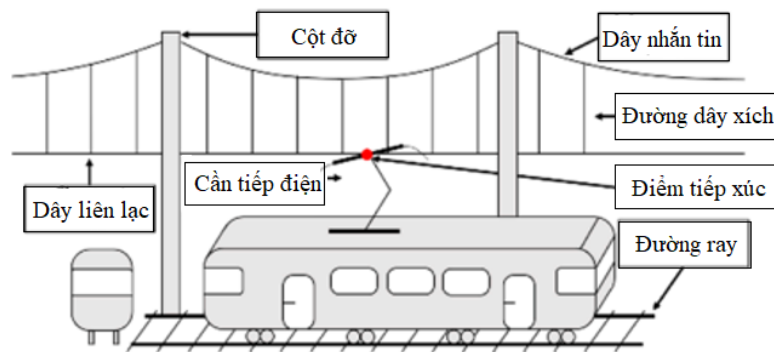
© 2023 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống cung cấp điện đóng vai trò quan trọng cho tàu điện. Có hai phương án tiếp điện: trên cao và dưới mặt đường. Ưu điểm của hệ thống lấy điện trên cao [1] là an toàn do phần tử mang điện đặt ở trên cao, dùng điện áp cao nên dòng tải nhỏ, tổn thất đường dây thấp, khoảng cách giữa các trạm điện do đó có thể lớn hơn, có nghĩa là số lượng trạm điện cần thiết ít hơn.

Hệ thống cấp điện trên cao bao gồm ba bộ phận: bộ phận cột và xà đỡ, bộ phận treo dây dẫn điện và bộ phận cần lấy điện trên nóc toa xe (hình 1), trong đó vấn đề kỹ thuật chủ yếu là

bộ phận treo dây tiếp xúc và cơ cấu cần lấy điện và tương tác giữa chúng. Dây dẫn điện dương được hệ thống cột xà đỡ và dây căng treo bên trên tìm đường sắt ở độ cao nhất định. Thanh trượt của cần lấy điện áp vào mặt dưới dây dẫn điện, khi tàu chạy, thanh trượt sẽ dọc theo đường dây để duy trì tiếp xúc điện. Hệ thống trên cao tối thiểu phải bao gồm các bộ phận sau đây: cơ cấu cách điện, dây căng chịu lực, dây treo đỡ dây dẫn điện, các bộ căng dây tự động, các bộ chuyển tiếp giữa hai đường dây liền kề, các bộ phận giao cắt hai đường dây. Cần lấy điện bao gồm cơ cấu khung có điều khiển nâng hạ và thanh trượt gắn trên khung. Bề mặt trên của thanh trượt làm bằng graphít để lấy điện, tương tự như chổi than. Tiếp xúc giữa dây dẫn điện và cần lấy điện ổn định, kể cả khi tàu chạy tốc độ cao. Để có sự tiếp xúc tốt giữa dây dẫn trên cao và cần lấy điện đòi hỏi sự ổn định về vị trí tương quan và áp lực giữa dây dẫn điện và thanh trượt của cần lấy điện. Do ảnh hưởng của gió, sự mất ổn định của bản thân hệ thống treo dây và do dao động của đoàn tàu, tốc độ đoàn tàu càng cao thì hệ thống càng mất ổn định làm cho việc cấp điện không trơn tru, liên tục, gây hậu quả xấu cho hoạt động của đoàn tàu. Mặt khác, lực tiếp xúc quá cao có thể dẫn đến mài mòn quá mức và đẩy dây tiếp xúc lên cao. Do vậy lực tiếp xúc cần phải được duy trì ở mức cố định một cách liên tục [2-4].



Hình 1. Cần (Pantograph) – dây (Catenary) tiếp điện [1].

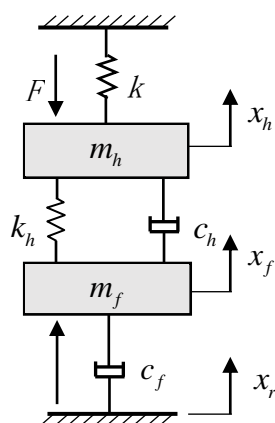
Do có tầm quan trọng như vậy nên bài toán điều khiển lực tiếp xúc giữa cần lấy điện và dây dẫn điện (gọi tắt là hệ thống cần-dây) đã thu hút được nhiều sự chú ý trong nghiên cứu về hệ thống cần-dây này. Một số các kỹ thuật điều khiển khác nhau đã được đề ra trong [5-14]. Mỗi phương pháp đề ra đều có ưu, nhược điểm riêng. Các phương pháp điều khiển kinh điển, được sử dụng như PI [7], PID [14] hay phản hồi trạng thái [6, 10, 11] đơn giản, nhưng đều bỏ qua tính biến thiên của độ cứng của cần trong thiết kế hệ thống điều khiển, chỉ sử dụng giá trị trung bình để tính toán. Thuật toán điều khiển thích nghi [13] có tính đến sự thay đổi tham số, tuy nhiên với bản chất phương pháp, đòi hỏi mô hình hệ thống phải chính xác. Các thuật toán bền vững [5,8] chưa đề cập trực tiếp đến thông tin dài biến thiên độ cứng của cần (bất định tham số). Ứng dụng logic mờ trong điều khiển hệ thống cần-dây là một hướng đi được quan tâm, với mô hình mờ dạng 1 đơn giản trong [9], [12]. Để mở rộng khả năng xử lý bất định trong thực tế của logic mờ, các nhà nghiên cứu từ khá lâu đã đưa ra khái niệm hệ thống logic mờ dạng 2, trong đó các hàm thuộc cũng mang tính bất định (trong dạng 1 là xác định). Nhưng khi đưa vào áp dụng thực tế, hệ thống logic mờ dạng 2 thường gặp trở ngại không nhỏ, đó là chi phí tính toán rất lớn do phải sử dụng thuật toán lặp. Để giải quyết vấn đề này, mới đây, các tác giả Moradi-Zirkohi-Lin trong [15] đã đưa ra thuật toán mới, không lặp, mang tên MZL. Thuật toán có ưu điểm giảm khối lượng tính toán và đảm bảo độ chính xác mà không cần tính trọng tâm của hệ logic mờ dạng 2 bằng sàng lọc trọng lượng. Trong [1] các tác giả đã sử dụng thuật toán này xây dựng cấu trúc hiệu chỉnh thích nghi hệ mờ khi đối tượng cần – dây có bất định phức tạp. Kết quả mô phỏng trong [1] cho thấy ưu điểm vượt trội của phương

pháp này so với một số các thuật toán tính toán mờ khác về khối lượng tính toán và chỉ tiêu nén dao động. Tuy nhiên với bản chất là hệ thống điều khiển thích nghi hiệu chỉnh các hàm thuộc, cấu trúc hệ thống và hoạt động rất phức tạp. Nói chung, chưa có phương pháp điều khiển nào xử lý trực tiếp bất định dạng khoảng của độ cứng cần trong thiết kế hệ thống, ngoài ra riêng các phương pháp điều khiển mờ đã nêu có chung nhược điểm là không có được chứng minh toán học chặt chẽ về ổn định hệ thống. Trong [16] các tác giả đã đưa ra phương pháp đánh giá tính bền vững của hệ thống điều khiển lực tiếp xúc cần-dây này.

Trong bài báo này đề xuất thuật toán điều khiển mờ dựa trên mô hình mờ Takagi-Sugeno (T-S) cải tiến đưa lại hiệu quả cao trong nén dao động của lực tiếp xúc, đồng thời có tính ổn định được khẳng định và tính bền vững với các khả năng tham số hệ thống thay đổi.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC HỆ THỐNG CẦN – DÂY TIẾP ĐIỆN

Hệ thống cần-dây tiếp điện có thể được mô hình hóa với sơ đồ cấu trúc treo hai vật như trên hình 2.



Hình 2. Mô hình hệ thống cần – dây.

Trong đó ký hiệu:

m_h - khối lượng đầu; m_f - khối lượng giá; x_h - độ chuyển dịch của đầu

x_f - độ chuyển dịch của giá; k_h - độ cứng của đầu; c_h - hệ số giảm chấn của đầu

c_f - hệ số giảm chấn của giá; k_{pan} - độ cứng của cần; k_{cat} - độ cứng của dây

u - lực nâng chủ động

Từ các định luật vật lý xây dựng các phương trình vi phân

$$m_h \ddot{x}_h + c_h (\dot{x}_h - \dot{x}_f) + k_h (x_h - x_f) + k_{pan} (x_h - x_{cat}) = 0 \quad (1)$$

$$k_{pan} (x_{cat} - x_h) + k_{cat} x_{cat} = 0$$

$$m_f \ddot{x}_f - c_h (\dot{x}_h - \dot{x}_f) + c_f \dot{x}_f - k_h (x_h - x_f) = u \quad (2)$$

hay

$$m_h \ddot{x}_h + c_h (\dot{x}_h - \dot{x}_f) + k_h (x_h - x_f) + k_0 x_h = 0 \quad (3)$$

$$m_f \ddot{x}_f - c_h (\dot{x}_h - \dot{x}_f) + c_f \dot{x}_f - k_h (x_h - x_f) = u \quad (4)$$

với

$$k_0 = \frac{k_{pan} k_{cat}}{k_{pan} + k_{cat}}. \quad (5)$$

Biến đổi Laplace hai vế các phương trình trên ta được

$$\left[m_h s^2 + c_h s + (k_h + k_0) \right] X_h(s) - (c_h s + k_h) X_f(s) = 0 \quad (6)$$

$$-(c_h s + k_h) X_h(s) + \left[m_f s^2 + (c_f + c_h) s + k_h \right] X_f(s) = U(s) \quad (7)$$

Từ phương trình (6) rút ra

$$X_f(s) = \frac{\left[m_h s^2 + c_h s + (k_h + k_0) \right] X_h(s)}{(c_h s + k_h)},$$

thế vào phương trình (7) và để ý rằng $X_h(s) = \frac{F(s)}{k}$ ta tìm được hàm truyền đối tượng

$$P(s) = \frac{F(s)}{U(s)} = \frac{k(c_h s + k_h)}{M(s)} \quad (8)$$

trong đó

$$\begin{aligned} M(s) &= \left[m_f s^2 + (c_f + c_h) s + k_h \right] \left[m_h s^2 + c_h s + (k_h + k_0) \right] - (c_h s + k_h)^2 \\ &= m_f m_h s^4 + \left[m_f c_h + (c_f + c_h) m_h \right] s^3 + \left[m_f (k_h + k_0) + m_h k_h + c_h c_f \right] s^2 \\ &\quad + \left[k_0 (c_f + c_h) + k_h c_f \right] s + k_h k_0 \end{aligned} \quad (9)$$

Thực tế khi tàu chuyển động, hệ số k không còn cố định mà thay đổi theo thời gian

$$k = k_0 \left(1 + \alpha \cos\left(\frac{2\pi V}{L} t\right) \right) \quad (10)$$

Trong đó V - vận tốc tàu [m/s], L - chiều dài cung đoạn [m], α - hệ số thay đổi độ cứng của cung.

Để thấy khi xuất hiện hệ số $\alpha \neq 0$ thì k sẽ thay đổi $k \in [k_{min}, k_{max}]$, với

$$k_{min} = k_0(1 - \alpha), \quad k_{max} = k_0(1 + \alpha) \quad (11)$$

3. THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN DỰA TRÊN MÔ HÌNH MỜ T-S CẢI TIẾN

Trong số các mô hình mờ, mô hình Takagi-Sugeno [17] là thông dụng nhất, được sử dụng nhiều trong điều khiển. Có nhiều sơ đồ cấu trúc điều khiển sử dụng mô hình mờ T-S, trong đó phương pháp thiết kế bộ bù song song (Parallel Distributed Compensation - PDC) [18] có nhiều ưu điểm. Khi đó bộ điều khiển mờ có chung các luật mờ và tập mờ như mô hình đối tượng. Bộ điều khiển tuyến tính được thiết kế cho từng đối tượng tuyến tính để đảm bảo ổn định và chất lượng hệ thống kín tuyến tính cục bộ. Sau đó bộ điều khiển phi tuyến cuối cùng

là kết hợp mờ từ các tín hiệu điều khiển theo từng luật riêng. Nhược điểm của phương pháp là để chứng minh tính ổn định hệ thống cần công cụ toán học rất phức tạp. Trong [19] có đưa ra ý tưởng tách hệ quả luật điều khiển thành hai phần: tử số và mẫu số riêng để làm đơn giản phương trình đặc trưng hệ kín. Ý tưởng này được thử nghiệm với hệ rời rạc trong [19] và phát triển cho hệ liên tục trong [20]. Ở đây tiếp tục triển khai cho bài toán điều khiển lực tiếp xúc cần-dây.

Đầu tiên, khoảng $[k_{min}, k_{max}]$ được chia làm r khoảng con chồng lấn nhau, từ đó xây dựng $r + 2$ hàm thuộc dạng tam giác cho từng khoảng con đó như trên hình 4. Với mỗi khoảng thứ i chọn một giá trị tiêu biểu k_i và biến mờ M_i có hàm thuộc μ_i tương ứng. Ngoài ra, bổ sung thêm hai giá trị giới hạn toàn khoảng k_{min}, k_{max} .

Tiếp theo, định nghĩa ứng với mỗi khoảng thứ i đối tượng được mô tả bằng có hàm truyền cục bộ

$$P_i(s) = \frac{F(s)}{U(s)} = \frac{k_i(c_h s + k_h)}{M(s)}, \quad i = 1, \dots, r + 2 \quad (12)$$

trong đó

$$M(s) = m_f m_h s^4 + [m_f c_h + (c_f + c_h) m_h] s^3 + [m_f (k_h + k_0) + m_h k_h + c_h c_f] s^2 + [k_0 (c_f + c_h) + k_h c_f] s + k_h k_0 \quad (13)$$

Nếu định nghĩa

$$c_1^i = \frac{k_i c_h}{m_h m_f}, \quad c_0^i = \frac{k_i k_h}{m_h m_f}, \quad d_3^i = \frac{m_f c_h + (c_f + c_h) m_h}{m_h m_f}$$

$$d_2^i = \frac{[m_f (k_h + k_0) + m_h k_h + c_h c_f]}{m_h m_f}, \quad d_1^i = \frac{k_0 (c_f + c_h) + k_h c_f}{m_h m_f}, \quad d_0^i = \frac{k_h k_0}{m_h m_f}$$

Thì hàm truyền cục bộ (12) có dạng

$$P_i(s) = \frac{F(s)}{U(s)} = \frac{c_1^i s + c_0^i}{s^4 + d_3^i s^3 + d_2^i s^2 + d_1^i s + d_0^i} \quad (14)$$

hay dưới dạng phương trình vi phân sau

$$f^{(5)}(t) = -d_3^i f^{(4)}(t) - d_2^i f^{(3)}(t) - d_1^i f''(t) - d_0^i f'(t) + c_1^i u''(t) + c_0^i u'(t) \quad (15)$$

Giả sử các bộ điều khiển cục bộ có cấu trúc PI thông dụng với hàm truyền (16)

$$C_i(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p^i + \frac{K_I^i}{s} = \frac{K_p^i s + K_I^i}{s}, \quad i = 1, \dots, r + 2 \quad (16)$$

hay dưới dạng phương trình vi phân

$$c_1^i u''(t) + c_0^i u'(t) = -K_p^i c_1^i f''(t) - (K_p^i c_0^i + K_I^i c_1^i) f'(t) - K_I^i c_0^i f(t) + K_I^i c_0^i f_r. \quad (17)$$

Các tham số bộ điều khiển PI có thể được xác định từ các phương pháp tổng hợp PID truyền thống.

Sử dụng mô hình T-S mờ cải tiến [19] luật mờ IF-THEN thứ i mô tả đối tượng có dạng

Luật mô hình đối tượng R_i : $i = 1, \dots, r + 2$

$$\text{IF } k(t) \text{ is } M_i \text{ THEN } f^{(5)}(t) = -d_3^i f^{(4)}(t) - d_2^i f^{(3)}(t) - d_1^i f''(t) - d_0^i f'(t) + c_1^i u''(t) + c_0^i u'(t) \quad (18)$$

trong đó R_i là luật suy diễn mờ thứ i , $r+2$ là số luật suy diễn, $M_i, i \in \Omega_r$ là các tập mờ.

Tùy theo tiên đề của mỗi luật mờ T-S cho đối tượng kỹ thuật thiết kế PDC đưa ra luật điều khiển tương ứng với chính tiên đề đó. Tuy nhiên ở đây hai hệ quả cho mỗi luật được thiết lập: tử số và mẫu số của tín hiệu điều khiển [20].

Luật điều khiển R_i : $i = 1, \dots, r+2$

IF $k(t)$ is M_i THEN

$$\begin{aligned} \text{num}u'(t) &= -K_p^i c_1^i f''(t) - (K_p^i c_0^i + K_I^i c_1^i) f'(t) - K_I^i c_0^i f(t) + K_I^i c_0^i f_r - c_1^i u''(t) \\ \text{den}u'(t) &= c_0^i \end{aligned} \quad (19)$$

trong đó $\text{num}u'(t)$ là tử số của $u'(t)$, $\text{den}u'(t)$ là mẫu số của $u'(t)$.

Hàm truyền hệ thống kín có dạng:

$$\begin{aligned} s^5 + \sum_{i=1}^r h_i(k) d_3^i s^4 + \sum_{i=1}^r h_i(k) d_2^i s^3 + \sum_{i=1}^r h_i(k) (d_1^i + K_p^i c_1^i) s^2 + \\ + \sum_{i=1}^r h_i(k) (d_0^i + K_p^i c_0^i + K_I^i c_1^i) s + \sum_{i=1}^r h_i(k) K_I^i c_0^i = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

trong đó $h_i(k)$ là hàm thuộc chuẩn hóa. Lưu ý là các hàm thuộc chuẩn hóa thỏa mãn tính tổng lồi sau

$$0 \leq h_i(k) \leq 1, i = 1, \dots, r+2, \sum_{i=1}^{r+2} h_i(k) = 1. \quad (21)$$

Về trái phương trình (20) hay đa thức đặc trưng hệ thống thực chất là đa giác các đa thức:

$$H(s) = \sum_{i=1}^{r+2} h_i(z) H_i(s), \quad 0 \leq h_i(z) \leq 1, i = 1, \dots, r+2, \sum_{i=1}^{r+2} h_i(z) = 1. \quad (22)$$

trong đó

$$H_i(s) = s^5 + d_3^i s^4 + d_2^i s^3 + (d_1^i + K_p^i c_1^i) s^2 + (d_0^i + K_p^i c_0^i + K_I^i c_1^i) s + K_I^i c_0^i \quad (23)$$

Do đó, để phân tích ổn định hệ thống có thể sử dụng các tiêu chuẩn ổn định bền vững [19], cụ thể hóa trong [20].

Định lý [20]. Hệ kín mờ (18-19) ổn định khi và chỉ khi:

- Các đa thức $H_i(s)$, $i = 1, \dots, r+2$ ổn định,
- Tất cả $\frac{(r+1)(r+2)}{2}$ đồ thị $z_{ij}(\omega) = \frac{H_i(j\omega)}{H_j(j\omega)}$, $i, j = 1, \dots, r+2$, $i < j$ không cắt bán trục thực âm.

4. MÔ PHỎNG ĐÁNH GIÁ

Giả sử hệ thống cần-dây có các tham số sau [1]:

$$m_h = 9,1 \text{ kg}; m_f = 17,2 \text{ kg}; k_h = 7 \times 10^3 \text{ N/m}; c_h = 130 \text{ Ns/m}; c_f = 30 \text{ Ns/m};$$

$$k_{cat} = 1,535 \times 10^6 \text{ N/m}; k_{pan} = 8,23 \times 10^4 \text{ N/m};$$

$$V = 70 \text{ km/h}; L = 80 \text{ m}; \alpha = 0,3.$$

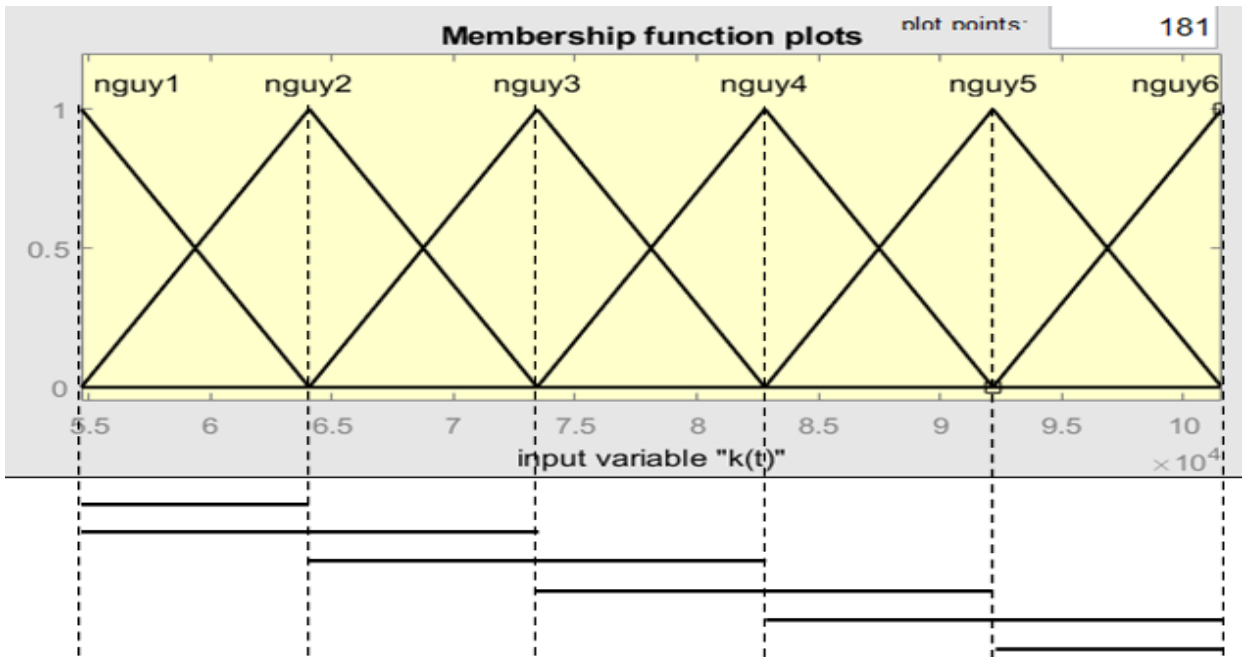
Khi đó dễ dàng tìm được các giới hạn $k_{\min} = 54678$, $k_{\max} = 101550$.

Xét hệ thống điều khiển kín với đối tượng (8) và bộ điều khiển mờ (19). Để so sánh chất lượng điều khiển trong bài báo sử dụng chỉ số hiệu quả nén dao động (Vibration Suppression Efficiency - VSE) [1]:

$$VSE = \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_0}\right) 100\% , \quad (24)$$

với Φ là biên độ dao động ở trạng thái xác lập, $\Phi_0 = 2\alpha f_r(t)$ là biên độ dao động ở trạng thái xác lập khi không có điều khiển.

Trước tiên, khoảng $[k_{\min}, k_{\max}]$ được chia thành 6 khoảng con ($r = 6$) chồng lấn với các hàm thuộc tam giác như trên hình 3.



Hình 3. Các hàm liên thuộc tam giác.

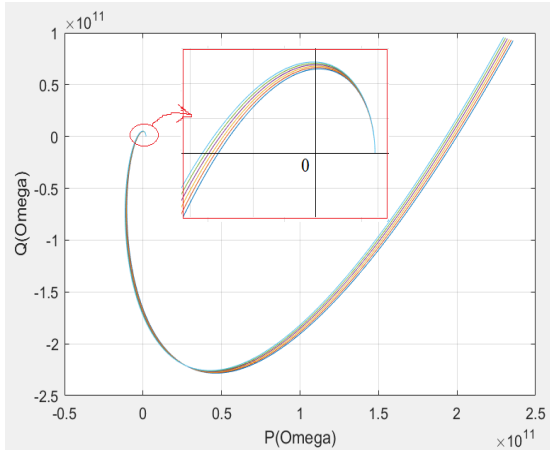
Với mỗi khoảng con có thể thiết kế bộ điều khiển PI cục bộ, chẳng hạn với các tham số sau:

$$K_p^1 = K_p^2 = K_p^3 = K_p^4 = K_p^5 = K_p^6 = 0,1;$$

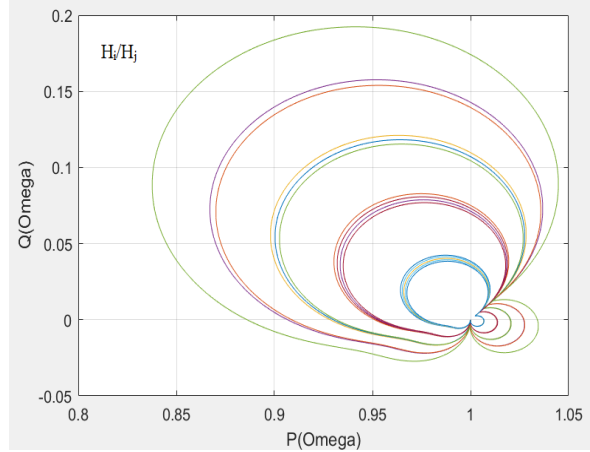
$$K_I^1 = 4,968; K_I^2 = 4,241; K_I^3 = 3,7; K_I^4 = 3,281; K_I^5 = 2,947; K_I^6 = 2,675.$$

Sau đó hai điều kiện trong định lý ở trên được kiểm tra qua việc dựng 6 đồ thị Mikhailov $H_i(j\omega)$ (hình 4) và 15 đồ thị $z_{ij}(j\omega)$ trên hình 5.

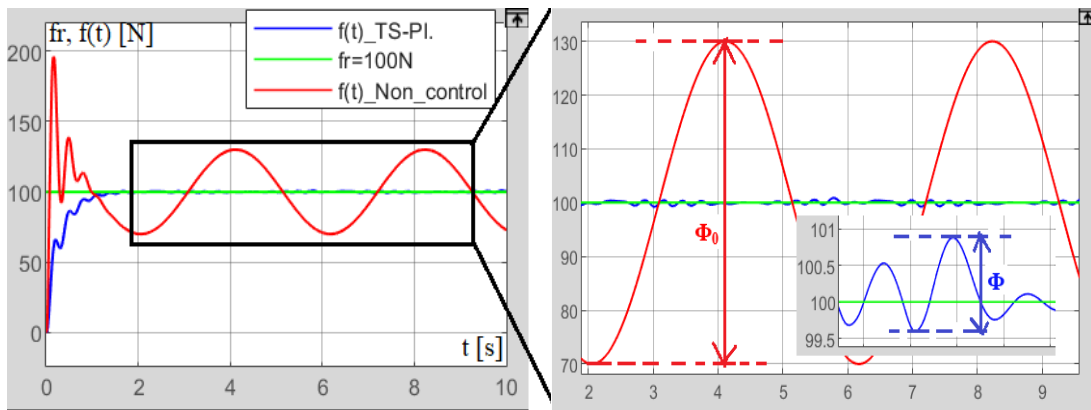
Kết quả mô phỏng lực tiếp xúc trên hình 6 cho thấy chỉ số $VSE = 97,68\%$.



Hình 4. Các đồ thị Mikhailov.



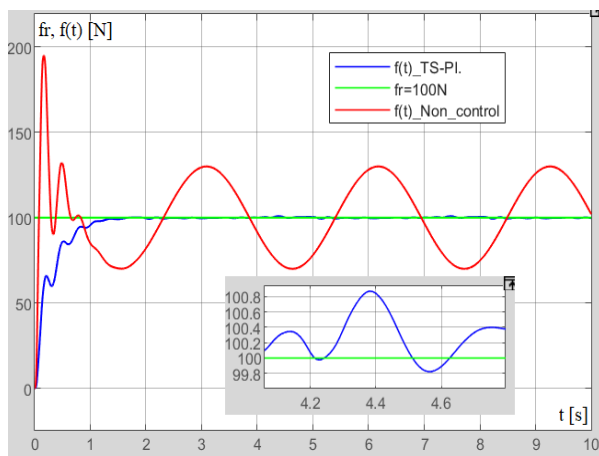
Hình 5. Các đồ thị $z_{ij}(j\omega)$.



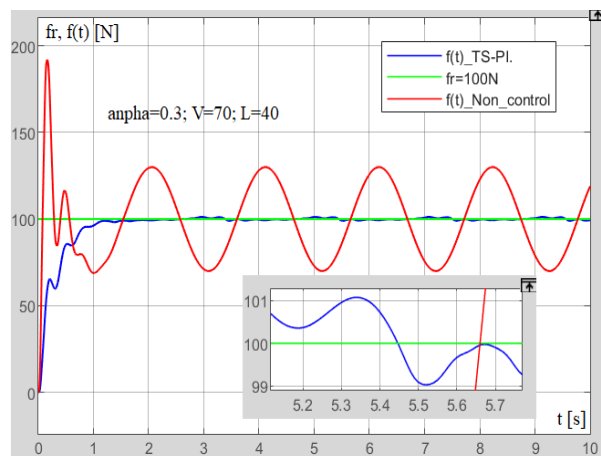
Hình 6. Chất lượng điều chỉnh lực tiếp xúc.

So sánh với thuật toán mới tốt nhất MZL trong [1] có $VSE = 83,59\%$ ta thấy chất lượng điều chỉnh lực tiếp xúc của thuật toán T-S mờ cải tiến đề ra tốt hơn nhiều, hầu như dao động bị triệt tiêu sau 1,7s.

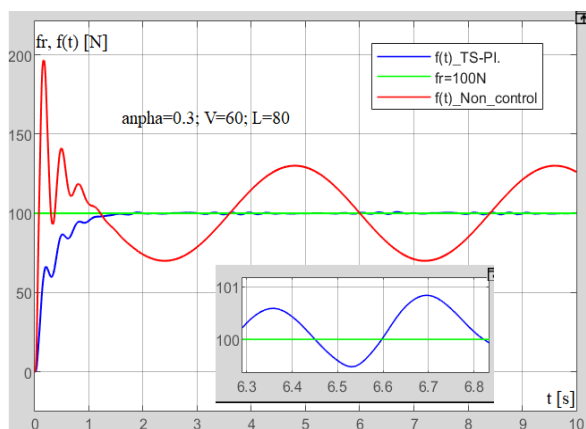
Bây giờ kiểm tra tính bền vững của hệ thống khi có một số tham số thay đổi. Trường hợp thứ nhất, khi vận tốc tàu chạy V và chiều dài cung đoạn thay đổi (hình 7 – hình 11).



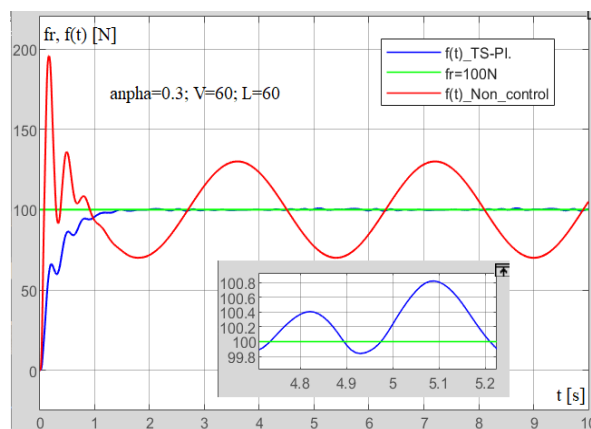
Hình 7. Lực tiếp xúc khi $V=70, L=60$.



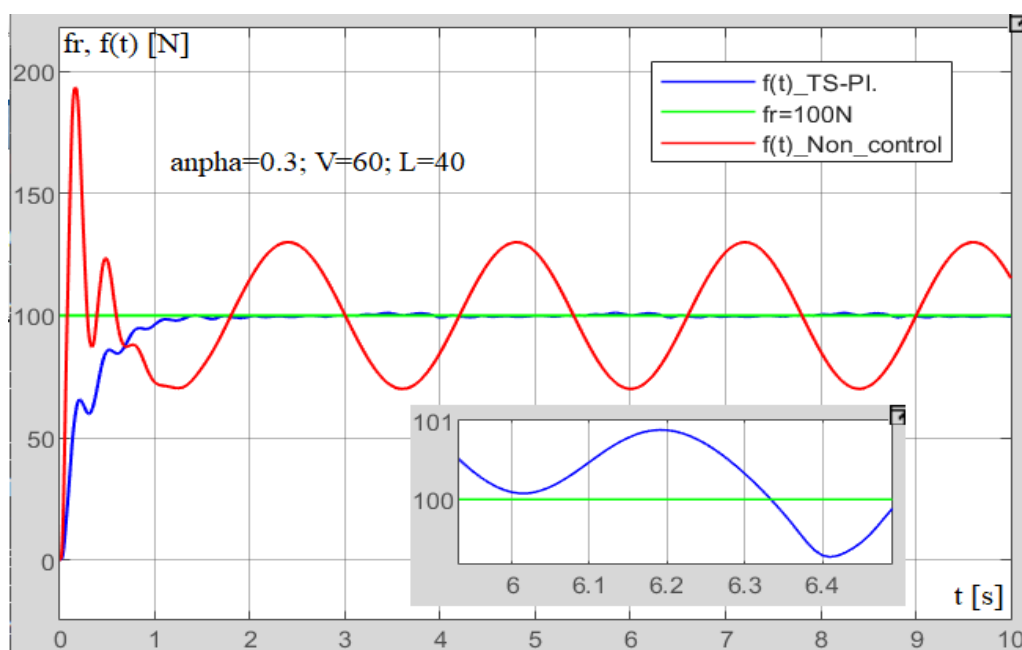
Hình 8. Lực tiếp xúc khi $V=70, L=40$.



Hình 9. Lực tiếp xúc khi $V=60, L=80$.



Hình 10. Lực tiếp xúc khi $V=60, L=60$.



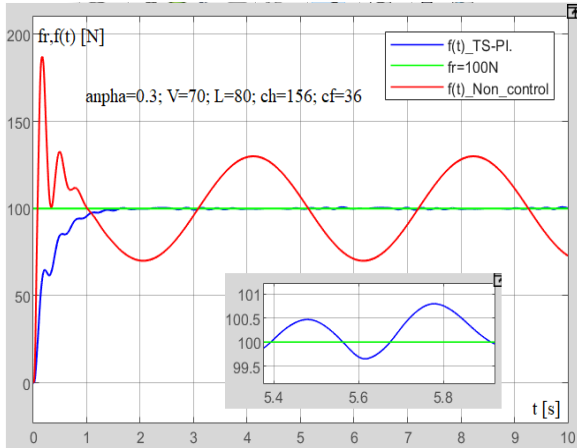
Hình 11. Lực tiếp xúc khi $V=60, L=40$.

Các kết quả mô phỏng được tổng hợp trên bảng 1 cho thấy chỉ số VSE của thuật toán T-S mờ cải tiến cao và ít thay đổi (bền vững) hơn so với thuật toán MZL [1].

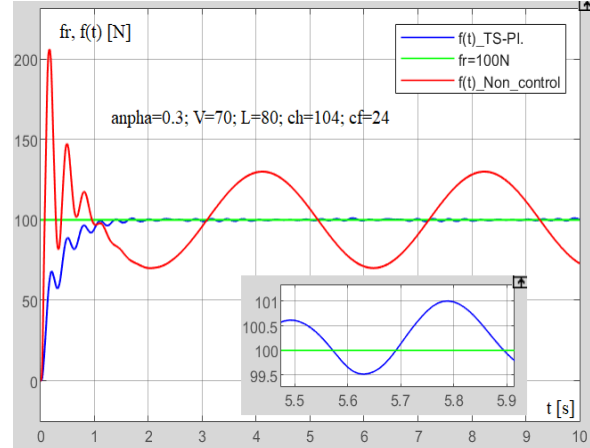
Bảng 1. Kết quả độ nén dao động khi V và L thay đổi.

Các tham số α, V, L	α	0,3					
		V	60			70	
	L		40	60	80	40	60
MZL[1]	VSE (%)	78,93	82,31	84,85	75,95	81,22	83,59
TS-PI	VSE (%)	97,35	98,36	97,74	96,58	98,25	97,68

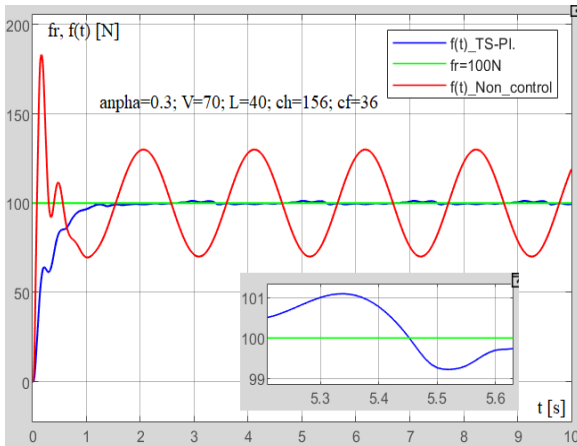
Xét trường hợp thứ hai, khi các hệ số giảm chấn của thanh trượt c_h và của giá c_f thay đổi từ 80% đến 120% giá trị danh định đã nêu. Các kết quả mô phỏng được trình bày trên các hình 12 đến hình 15.



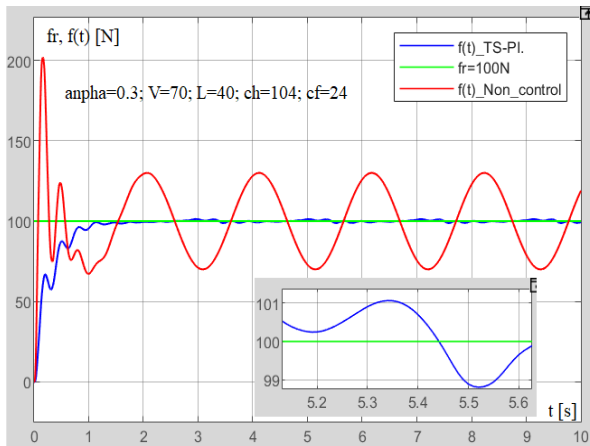
Hình 12. $V = 70, L = 80, c_h + 20\%, c_f + 20\%$.



Hình 13. $V = 70, L = 80, c_h - 20\%, c_f - 20\%$.



Hình 14. $V = 70, L = 40, c_h + 20\%, c_f + 20\%$.



Hình 15. $V = 70, L = 40, c_h - 20\%, c_f - 20\%$.

Bảng 2. Kiểm tra chất lượng bền vững.

		VSE ($\alpha = 0,3; V = 70; L = 80$)		VSE ($\alpha = 0,3; V = 70; L = 40$)
Hệ số giảm chấn c_h, c_f	TS-PI	+20%	98,0967%	96,8567%
		-20%	97,5241%	96,2175%

Bảng 2 tổng hợp sự thay đổi chất lượng hệ thống khi các hệ số giảm chấn thay đổi $\pm 20\%$. Kết quả cho thấy chỉ số nén dao động thay đổi rất ít, chứng tỏ thuật toán đề ra có tính bền vững.

6. KẾT LUẬN

Bài báo đưa ra một thuật toán mới dựa trên mô hình mờ T-S cải tiến để điều khiển lực tiếp xúc của hệ thống cần-dây cung cấp điện cho đoàn tàu. Mục đích điều khiển là sao cho lực tiếp xúc bám theo giá trị yêu cầu dù có sự thay đổi có tính tuần hoàn của hệ số cứng của cần. Thuật toán đề ra có một số ưu điểm: thứ nhất, đánh giá được tính ổn định của hệ thống điều khiển; thứ hai, khả năng dập tắt dao động, bám theo giá trị đặt của lực tiếp xúc rất tốt và thứ

ba, đảm bảo chất lượng điều khiển bền vững khi có sự thay đổi bất định trong các tham số hệ thống. Trong tương lai, thuật toán sẽ được cài đặt, kiểm nghiệm trên mô hình vật lý.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. T.C. Lin, C.W. Sun, Y.C. Lin, M.M. Zirkohi, Intelligent Contact Force Regulation of Pantograph–Catenary Based on Novel Type-Reduction Technology, *Electronics*, 11 (2022) 132, <https://doi.org/10.3390/electronics11010132>
- [2]. W. Zhou, M. Patel, D. Ross, An overview on the control of fast train pantograph, *Conference on Intelligent Systems*, (2012) 519-523.
- [3]. G. Long et al., A survey on pantograph-catenary system, *International Journal of Science, Technology and Engineering*, 2 (2017) 111-118.
- [4]. G. Ramirez, A. Castillo, R. Simpson, F. James, D. Brooks, Analysis of contact force quality in a pantograph-catenary system, *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers*, 25 (2017) 111-118.
- [5]. Y.C. An, C. Collins, Robust controller design for pantograph-catenary system, *International journal of vehicular systems*, 15 (2010) 120-132.
- [6]. S. Walters, A. Rachid, A. Mpanda, On Modelling and Control of Pantograph Catenary Systems, *PACIFIC'2011*, 8th dec 2011, Amiens – France, *IEEE France Selection*, (2011) 1-10.
- [7]. I. Omar, E. Aziz, M. Ali, M.T. Abboud, A proportional integral-based control approach for railway pantograph system, *IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*, 2014, pp.43-51.
- [8]. G. Hughes, A. Reddy, Designing a robust controller for pantograph-catenary system, *American International Journal of Applied Sciences*, 211 (2015) 4-15.
- [9]. W. Flips, Tuning of a fuzzy controller for a train pantograph system, in *International Conference on Knowledge-Based Systems*, Springer, 2016, pp. 512-520.
- [10]. T.X. Wu, M.J. Brennan, Active vibration control of a railway pantograph, *Journal of Rail and Rapid Transit*, 211 (1997) 117–130. <https://doi.org/10.1243/0954409971530969>
- [11]. J. Wang, Active Control of Contact Force for a Pantograph-Catenary System, *Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration*, (2016) 1-7, <https://doi.org/10.1155/2016/2735297>
- [12]. Y. Bankole, Fuzzy structure for pantograph position control, *Electrical Engineering*, 5 (2017) 101-115.
- [13]. M. Fischer, S. Hossain, H. Khatoun, Adaptive control of a train pantograph system, *Journal of Physics and Modelling*, 1 (2017) 15-41.
- [14]. J. Ros, S. Lain, PID Controller Tuning in Tram Pantograph Systems, *HAL open science*, Submitted on 26 Oct 2020. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02977763>
- [15]. M. Moradi Zirkohi, T.C. Lin, An efficient non-iterative method for computing the centroid of an interval type-2 fuzzy set, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 41 (2021) 2879-2889, <https://doi.org/10.3233/JIFS-202913>
- [16]. Lê Hùng Lân, Nguyễn Văn Tiềm, Phân tích tính bền vững của hệ thống điều khiển tương tác cần lầy điện – dây điện trong cung cấp điện đường sắt, *Hội nghị toàn quốc về Tự động hóa VCCA 2021*, TP. HCM, 8-9 tháng 4/2022, 640-646.
- [17]. T. Takagi, M. Sugeno, Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. B, Cybern.*, 15 (1985) 116-132, <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>
- [18]. H.O. Wang, K. Tanaka, M. Griffin, An approach to fuzzy control of nonlinear systems: Stability and design issues, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 4 (1996) 14-23.

- [19]. L.K. Wong, F.H.F. Leung, P.K.S. Tam, Design of fuzzy logic controllers for Takagi-Sugeno model-based system with guaranteed performance, *International Journal of Approximated Reasoning*, 30 (2002) 41-55, [https://doi.org/10.1016/S0888-613X\(02\)00062-2](https://doi.org/10.1016/S0888-613X(02)00062-2)
- [20]. L.H. Lan, P.V. Lam, N.V. Hai, An Approach to Analysis and Design of Fuzzy Control System. The 3rd International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering, RCAE 2020, (2020) 36-40, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9294179>