

ỨNG DỤNG LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN MỜ TRONG ĐIỀU KHIỂN BÁN CHỦ ĐỘNG HỆ CẢN MR

Lê Văn Thắng, Chu Quốc Thắng

Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa – Đại Học Quốc Gia Tp.HCM
(Bài nhận ngày 18 tháng 8 năm 2005, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 20 tháng 9 năm 2005)

TÓM TẮT: Bài báo trình bày thuật giải thuật giải điều khiển mờ hệ cản MR trong kết cấu dân dụng. Các tác giả đánh giá hiệu quả của thuật giải điều khiển so với một thuật giải điều khiển hiện đại khác, thuật giải điều khiển *Clipped-Optimal*. Với thuật giải này, bài báo không sử dụng điều khiển tối ưu LQG như Spencer [2]. Thay vào đó, các tác giả sử dụng điều khiển tối ưu LQR. Công cụ hỗ trợ cho nghiên cứu là phần mềm mô phỏng Simulink và Fuzzy Logic Tool trong Matlab.

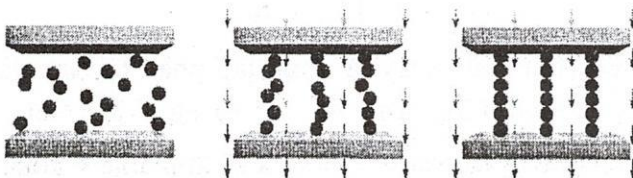
1. GIỚI THIỆU

Việc giảm chấn cho công trình khi chịu tải trọng động (gió, động đất) là rất cần thiết. Điều khiển (ĐK) bị động và chủ động là hai giải pháp đã được ứng dụng trong nhiều năm qua. Tuy nhiên, cả hai giải pháp trên có những hạn chế nhất định. ĐK bị động hạn chế về khả năng; trong khi ĐK chủ động lại cần một nguồn năng lượng lớn, nguồn năng lượng này thường không ổn định trong một trận động đất mạnh. Giải pháp ĐK bán chủ động ra đời đã khắc phục được nhược điểm này.

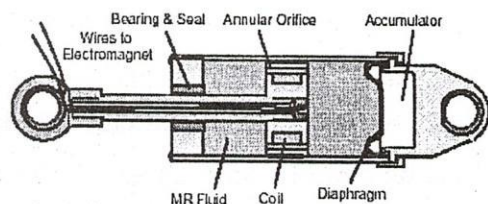
ĐK bán chủ động được ứng dụng cho nhiều loại hệ cản, trong đó hệ cản MR là thể hệ ĐK tiên tiến nhất cho đến nay, còn được gọi là hệ cản thông minh. Với hệ cản này, nhiều thuật giải điều khiển (TGĐK) đã được nghiên cứu và đưa vào ứng dụng thực tế. Trong đó, TGĐK *Clipped-Optimal* là một thuật giải (TG) hiện đại, thể hiện tính ưu việt của nó thông qua điều khiển tối ưu LQG. Trong bài báo này, tác giả sử dụng ĐK mờ để khảo sát hiệu quả của ĐK bán chủ động hệ cản MR. Tác giả so sánh so sánh hiệu quả của TG này với TG *Clipped-Optimal*. Tác giả không sử dụng ĐK tối ưu LQG (có xét đến yếu tố ồn) mà sử dụng ĐK tối ưu LQR cổ điển.

2. MÔ HÌNH CƠ HỌC

MR là chữ viết tắt của thuật ngữ *Magneto-Rheological*, tạm dịch là *lưu biến từ*. Chất lưu MR thuộc loại chất lưu điều khiển được. Nó được Jacob Rabinow khám phá và phát triển đầu tiên vào năm 1948 tại Mỹ. Nó gồm 2 thành phần cơ bản. Thành phần đầu tiên là các hạt có kích thước nhỏ tới vài micron (3 tới 5 micron), có thể bị từ hóa. Thành phần thứ hai là dung môi chứa các hạt trên, làm môi trường cho các hạt di chuyển.



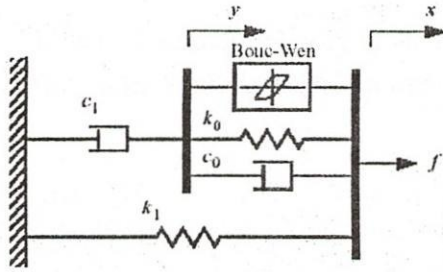
Hình 1. Mô hình chất lưu MR



Hình 2. Cấu tạo hệ cản MR

Khi có từ trường đi qua chất lưu MR, các hạt sẽ sắp xếp lại thành các chuỗi hạt. Khi đó, đặc tính cơ học của chất lưu sẽ thay đổi, làm hạn chế sự chuyển động của chất lưu, kéo theo khả năng tiêu tán năng lượng của hệ cản MR cũng thay đổi theo.

Tác giả sử dụng mô hình Bouc-Wen với ứng xử hysteresis (hiện tượng trễ) để khảo sát khả năng giảm chấn ứng với các thuật giải điều khiển. Mô hình này do Spencer đề xuất năm 1997 [2], có các thông số thể hiện trên hình vẽ như sau.



$$f = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) \quad (1)$$

$$f = c_1\dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (2)$$

Với z là biến tiến hóa thỏa phương trình vi phân sau

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (3)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)} [\alpha z + c_0\dot{x} + k_0(x - y)] \quad (4)$$

Hình 3. Mô hình Bouc-Wen

Với k_1 đại diện cho độ cứng của accumulator (bộ phận nén khí); c_0 là hệ số cản được quan sát ở những vận tốc lớn; c_1 là hệ số cản ở những vận tốc nhỏ; k_0 là độ cứng ở những vận tốc lớn; x_0 là chuyển vị ban đầu của lò xo k_1 (accumulator). Kí hiệu Bouc-Wen trên mô hình: xét đến ứng xử phi tuyến đa trị ở vùng vận tốc nhỏ (hysteresis). Các thông số α, β, A được hiệu chỉnh từ thực nghiệm. Để kể đến sự phụ thuộc của lực trên vào điện thế áp vào MR Damper v , Spencer [4] đã đề nghị các quan hệ:

$$\alpha = \alpha(v) = \alpha_a + \alpha_b v$$

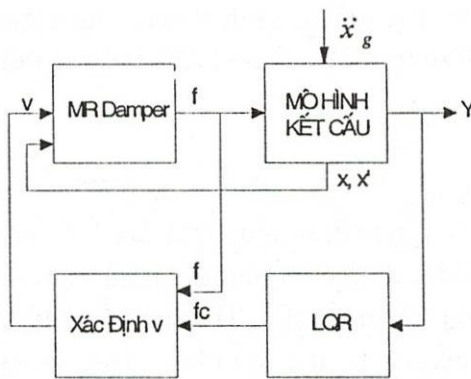
$$c_1 = c_1(v) = c_{1a} + c_{1b} v \quad (5)$$

$$c_0 = c_0(v) = c_{0a} + c_{0b} v$$

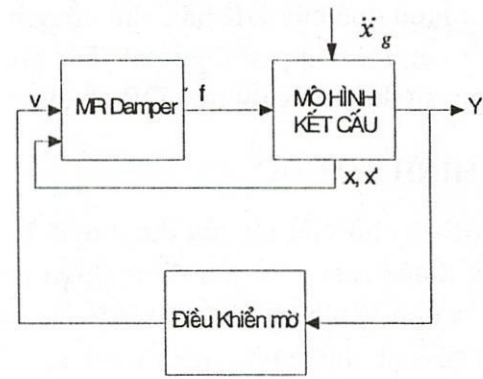
$$v \text{ là đầu ra của bộ lọc bậc 1, được xác định theo công thức sau: } \dot{v} = -\eta(v - u) \quad (6)$$

3. THUẬT GIẢI ĐIỀU KHIỂN

TGĐK Clipped-Optimal có thể được tóm tắt theo sơ đồ 1 sau:



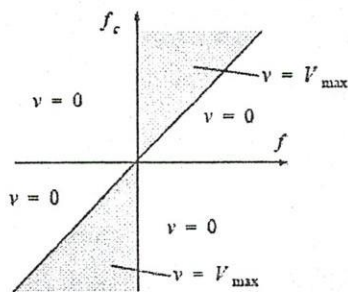
Sơ đồ 1. TGĐK Clipped-Optimal



Sơ Đồ 2. TGĐK mờ

Sơ đồ 1 trên thể hiện lặp vòng đóng ĐK kết cấu. Đây là vòng lặp phản hồi lực và phản hồi trạng thái. Kết cấu chịu tác động của kích động động đất \ddot{x}_g và lực f (lực tương tác giữa hệ cản MR và kết cấu) sẽ phát sinh đáp ứng đầu ra là Y . Lực f và đáp ứng Y được các sensor đo đạc. Với tín hiệu Y nhận được, thông qua ĐK LQR sẽ phân tích ra lực ĐK tối ưu f_c . Cùng với tín hiệu f , ta xác định điện thế thông qua luật ĐK tối ưu đơn giản hóa:

$$v = v_{\max} H \left\{ (f_c - f) / f \right\} \quad (7)$$



Với v_{max} là điện thế lớn nhất, tương ứng với giá trị này là độ từ hóa của chất lưu MR. $H(.)$ là hàm bậc Heaviside. Cũng có thể biểu diễn quy luật trên ở dạng đồ họa (hình 4).

Hình 4. Đồ thị xác định điện thế

TGDK trên có những hạn chế nhất định. ĐK LQR giả định hệ thống là tuyến tính, thực tế giả định này không chính xác. Hơn nữa, có sự không chắc chắn của tải động đất và sai số do các sensor đo đạc. Trong bài báo này, tác giả sử dụng điều khiển mờ do Liu (2001) lập ra cho hệ cản MR, đã được ứng dụng cho hệ một bậc tự do.

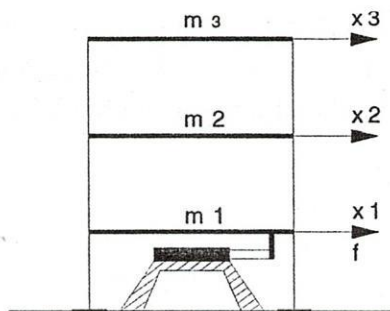
Ta sử dụng Logic mờ cho bài toán điều khiển vì những lợi điểm sau: dữ liệu đầu vào không cần tính chính xác cao; điều khiển logic mờ xử lý những quy luật do người thiết kế định nghĩa để chi phối mục tiêu điều khiển, nên nó có thể được thay đổi dễ dàng để cải tiến mạnh mẽ ứng xử của kết cấu; Logic mờ có thể điều khiển hệ thống phi tuyến; sự không chắc chắn của dữ liệu đầu vào được xử lý dễ dàng hơn so với lý thuyết điều khiển cổ điển; việc thực thi điều khiển mờ thông qua tổng hợp các biến ngôn ngữ, vì thế điều khiển mờ không bị ảnh hưởng bởi việc chọn mô hình toán học.

ĐK mờ hệ cản MR được thể hiện trên sơ đồ 2. Sơ đồ trên thể hiện lập vòng đóng điều khiển kết cấu. Đây là vòng lặp phản hồi trạng thái. Kết cấu chịu tác động của kích động động đất \ddot{x}_g và lực f sẽ phát sinh đáp ứng với đầu ra là Y . Lực f và đáp ứng Y được các sensor đo đạc. Với tín hiệu Y nhận được, thông qua điều khiển mờ sẽ phân tích ra điện thế v . Khi đó, khả năng tiêu tán năng lượng hay khả năng giảm chấn của hệ cản thông minh sẽ thay đổi. Cùng với đáp ứng chuyển vị tương đối và vận tốc của piston ở vị trí có gắn thiết bị, hệ cản sẽ phát sinh một lực f , lực này lại tác động vào kết cấu. Quá trình như thế diễn ra liên tục tạo thành vòng lặp điều khiển kín. Hệ thống điều khiển mờ tổng quát, gồm các thành phần sau: Mờ hóa; Cơ sở kiến thức; Tạo ra quyết định; Giải mờ [3, 6].

4. VÍ DỤ TÍNH TOÁN

Ví dụ tính toán minh họa là mô hình thí nghiệm kết cấu nhà 3 tầng, được mô phỏng tại phòng thí nghiệm “Kỹ Thuật Động Đất / Điều Khiển và Động Lực Học Kết Cấu” tại Đại Học Notre Dam. Mô hình kết cấu có hệ cản được thể hiện trên hình 5.

Phương trình vi phân mô tả chuyển động của kết cấu như sau: $M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = P_f F - M P_g \ddot{x}_g$ (8)



Hình 5. Mô hình kết cấu với hệ cản MR

x là vectơ chuyển vị tương đối của các tầng tại thời điểm t , chúng $\in \mathbb{R}^n$.

$F = f$, lực điều khiển đặt tại tầng 1; $P_f = [1 \ 0 \ 0]^T$; $P_g = [-1 \ -1 \ -1]^T$

$$M = \begin{bmatrix} 98.3 & 0 & 0 \\ 0 & 98.3 & 0 \\ 0 & 0 & 98.3 \end{bmatrix} \text{kg} \quad K = \begin{bmatrix} 12 & -6.84 & 0 \\ -6.84 & 13.7 & -6.84 \\ 0 & -6.84 & 6.84 \end{bmatrix} 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad C = \begin{bmatrix} 175 & -50 & 0 \\ -50 & 100 & -50 \\ 0 & -50 & 50 \end{bmatrix} \frac{\text{N}\cdot\text{sec}}{\text{m}}$$

Ở dạng không gian trạng thái, các ma trận xác định hệ kết cấu là:

$$\dot{X} = AX + Bu \quad X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x'_1 \ x'_2 \ x'_3]^T, \quad u = [\ddot{x}_g \ f]^T$$

$$Y = CX + Du$$

Với x_i, x'_i lần lượt là chuyển vị tương đối và vận tốc các tầng
 Đầu ra được chọn là $Y = X$. Khi đó, A, B, C, D có dạng sau:

$$A = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ -M^{-1}K_{3 \times 3} & -M^{-1}C_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \\ -P_f & M^{-1}P_f \end{bmatrix}$$

Hệ cản MR được chọn có các thông số thực nghiệm như sau:

Thông số	Giá Trị	Thứ nguyên
c_{0a}	21	N.sec/cm
c_{0b}	3.5	N.sec/cm.V
k_0	46.9	cm^{-2}
c_{1a}	283	N.sec/cm
c_{1b}	2.95	N.sec/cm.V
k_1	5	N/cm
x_0	0	cm
α_a	140	N/cm
α_b	695	N/cm.V
γ	363	cm^{-2}
β	363	cm^{-2}
A	301	
η	80	1/s
n	2	

Bảng 1. Các thông số thực nghiệm của hệ cản MR (Spencer 1996a) [2]

Bài báo sẽ mô phỏng hệ kết cấu với các trường hợp sau:

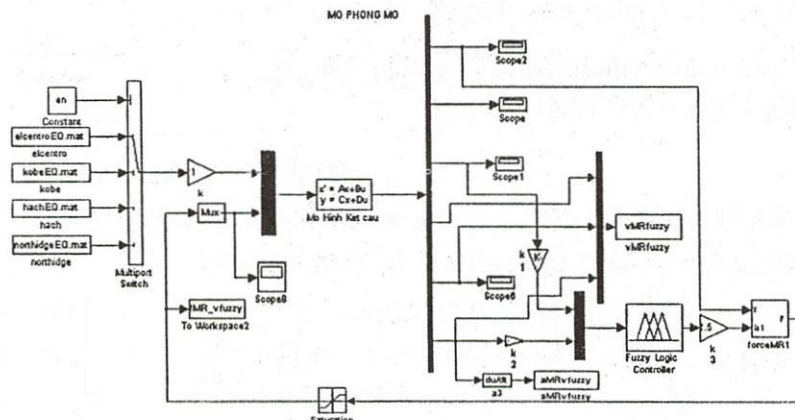
TH1: kết cấu lắp đặt hệ cản MR, chịu kích động động đất. Để tiện cho việc so sánh ta đặt tên cho trường hợp này là *Uncontrolled*.

TH2: có lắp đặt hệ cản MR, chịu kích động động đất. Điện thế bằng 0. Ở trường hợp này, hệ cản làm việc như hệ cản bị động. Tên của trường hợp này là *Passive-Off*.

TH3: hệ cấu có lắp đặt hệ cản MR, chịu kích động động đất. Điện thế tác động được thay đổi theo quy luật điều khiển đã đề cập bên trên. Tên gọi là *SemiActive-LQR*.

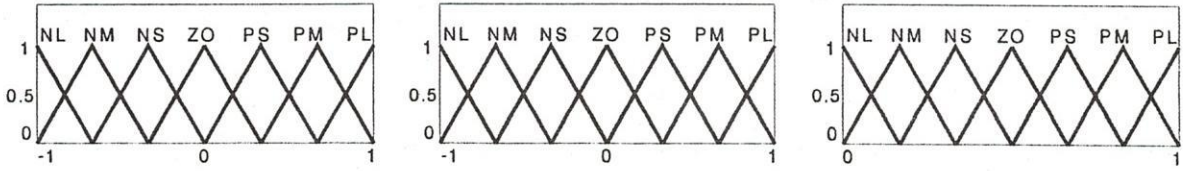
TH4: phân tích hệ kết cấu với điều khiển mờ. Tên gọi là *SemiActive-Fuzzy*.

Để mô phỏng các trường hợp trên, ta thiết lập các mô hình tính toán dạng khối. Trong khuôn khổ cho phép của bài báo, tác giả chỉ trình bày sơ đồ ĐK mờ (sơ đồ 3)



Sơ đồ 3. Sơ đồ mô phỏng ĐK mờ

Gán hàm thuộc cho các biến trên, các hàm thuộc (HT) có dạng sau



Hình 6. HT của chuyển vị ($K_x=33.33$), vận tốc ($K_v=2$), điện thế ($K_v=2.5$)
 Các biến mờ được dùng để định nghĩa không gian mờ được mô tả trong bảng sau

Biến đầu vào	
NL	Lớn và Âm
NM	Trung Bình và Âm
NS	Nhỏ và Âm
ZO	Zero
PS	Nhỏ và Dương
PM	Trung Bình và Dương
PL	Lớn và Dương

Biến đầu ra	
ZO	Zero
PS	Nhỏ và Dương
PM	Trung Bình và Dương
PL	Lớn và Dương

Bảng 2. Các biến mờ (đầu vào)

Bảng 3. Các biến mờ (đầu ra)

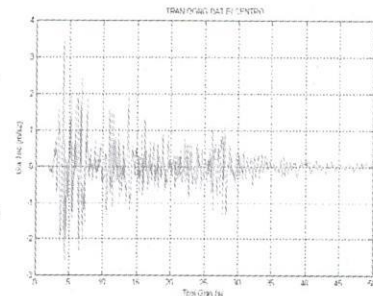
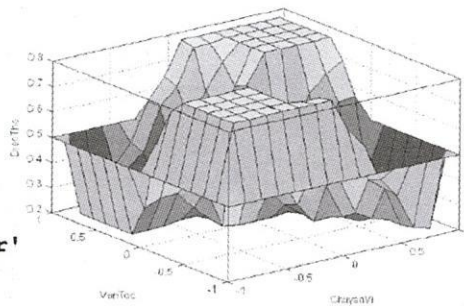
Với hệ thống suy luận mờ, tác giả sử dụng quy luật do Liu, đề xuất năm 2001. Hệ thống này gồm 49 quy luật, được xây dựng dựa trên mô hình mờ Mamdani.

	Vận Tốc							
	NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL	
Chuyển Vị	NL	PL	PL	PL	PM	ZO	ZO	ZO
	NM	PL	PL	PL	PS	ZO	ZO	PS
	NS	PL	PL	PL	ZO	ZO	PS	PM
	ZO	PL	PM	PS	ZO	PS	PM	PL
	PS	PM	PS	ZO	ZO	PL	PL	PL
	PM	PS	ZO	ZO	PS	PL	PL	PL
	PL	ZO	ZO	ZO	PM	PL	PL	PL

Bảng 4. Các quy luật ĐK (Liu 2001)

Bước thiết kế tiếp theo là giải mờ. Trong bài báo này, tác giả sử dụng phương pháp giải mờ zbisector [3]. Vì tính toán điều khiển khá phức tạp, có nhiều quy luật, rất khó khăn để giải mờ một cách thủ công. Ta sử dụng công cụ Fuzzy Logic Control để hỗ trợ cho việc giải mờ công tác mô phỏng. Các thông số khai báo hệ thống mờ trong Matlab là

```
Type='mamdani'
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=49
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='prod'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='bisector'
```



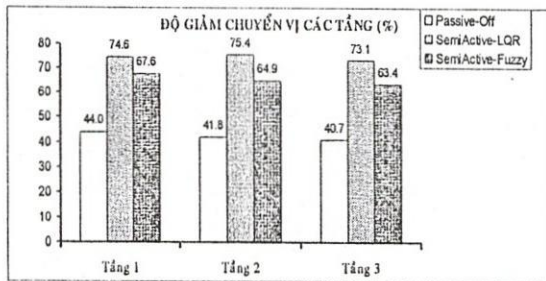
Hình 7. Mặt giải mờ

Hình 8

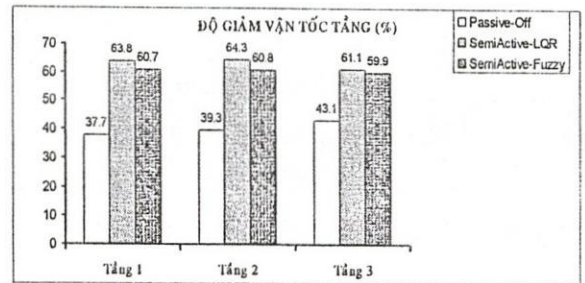
Tác giả sử dụng trận động đất Elcentro (1946) (hình 8) để mô phỏng động học kết cấu.

	Uncontrolled	Passive-Off	SemiActive LQR	SemiActive Fuzzy
x1 (cm)	0.5781	0.3235	0.1466	0.1876
x2 (cm)	0.8858	0.5152	0.2179	0.3113
x3 (cm)	1.0372	0.6150	0.2795	0.3792
d1 (m)	0.0058	0.0032	0.0018	0.0019
d2 (m)	0.0031	0.0020	0.0015	0.0014
d3 (m)	0.0016	0.0011	0.0009	0.0007
v1 (m/s)	0.1567	0.0976	0.0568	0.0617
v2 (m/s)	0.2489	0.1510	0.0889	0.0975
v3 (m/s)	0.3210	0.1825	0.1250	0.1288
a3 (m/s ²)	10.9440	7.0829	4.2891	4.0117

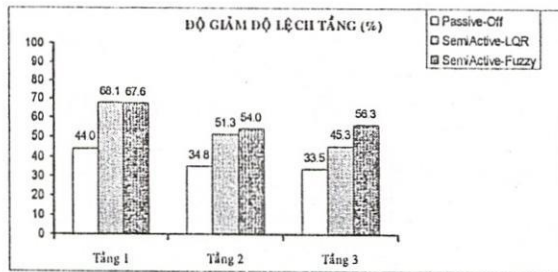
Bảng 5



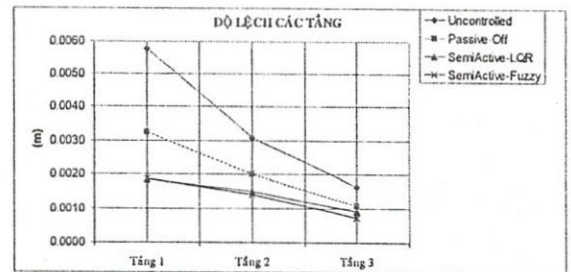
Hình 9



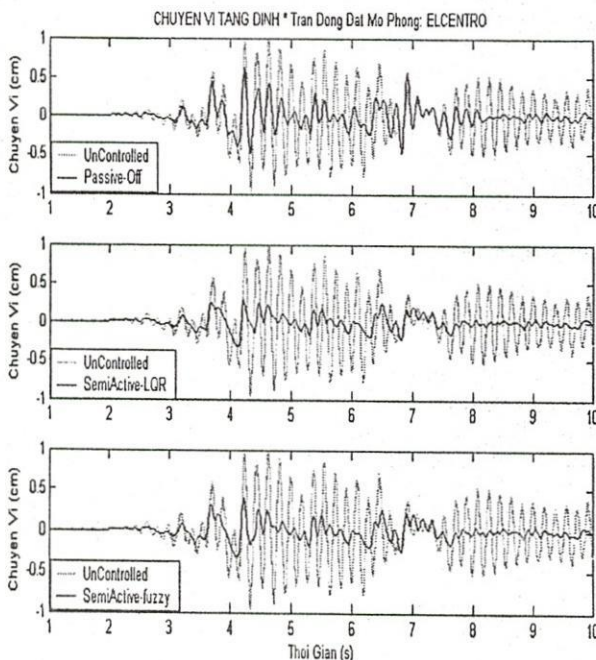
Hình 10



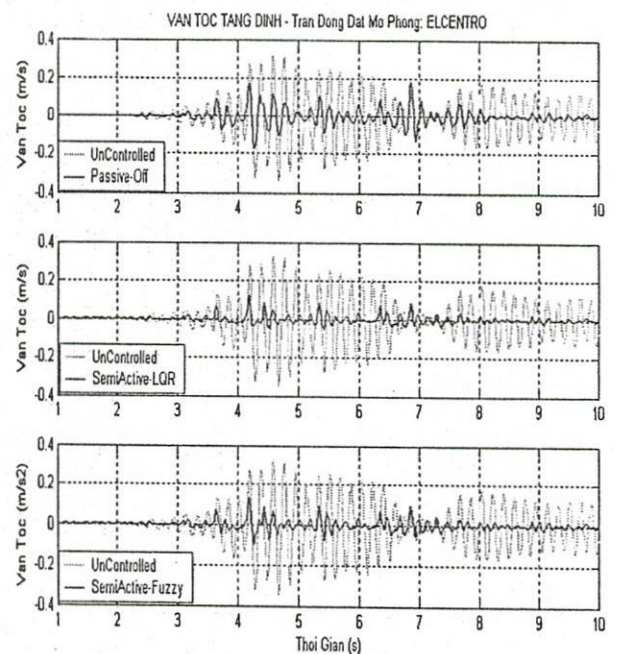
Hình 11



Hình 12



Hình 13



Hình 14

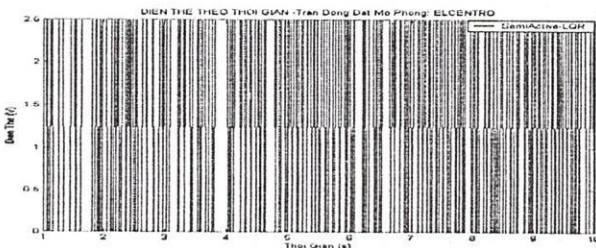
Trên hình 9, ta nhận thấy độ giảm chuyển vị của các tầng trong các trường hợp là rất đáng kể. Xét tầng 3, khi hệ cản làm việc ở trạng thái hoàn toàn bị động, chuyển vị giảm 40.7% so với trường hợp không ĐK. Với trường hợp SemiActive-LQR thì độ giảm chuyển vị tăng lên nhiều so với trường hợp Passive-Off, giảm tới 73.1%. Tương tự, trường hợp SemiActive-Fuzzy, độ giảm chuyển vị tới 63.4 %. Điều này cho thấy hiệu quả giảm chấn rõ nét của ĐK bán chủ động với ĐK mờ. So với trường hợp SemiActive-LQR, thì hiệu quả giảm chấn của trường hợp SemiActive-Fuzzy thấp hơn nhưng không đáng kể, thậm chí gần bằng nhau. Với ĐK chủ động, để đạt được khả năng như vậy thì cần một năng lượng lớn từ bên ngoài cung cấp cho kết cấu. Với hệ cản MR, ta chỉ cần một năng lượng không đáng kể.

Trên hình 10, ta thấy độ giảm vận tốc các tầng đều lớn. Cũng như chuyển vị, độ giảm này tăng dần từ ĐK Passive-Off sang SemiActive. Xét vận tốc ở tầng 3, ở trường hợp Passive-Off, vận tốc giảm tới 43.1%, giá trị này là khá lớn. Khi chuyển sang ĐK Semiactive-Fuzzy, thì độ giảm gia tốc tăng lên 59.9%. Như vậy, vận tốc của kết cấu với hệ cản MR được ĐK Semiactive-Fuzzy đã giảm đáng kể. Cũng như chuyển vị, độ giảm vận tốc cũng nhỏ hơn trường hợp SemiActive-LQR, nhưng không đáng kể.

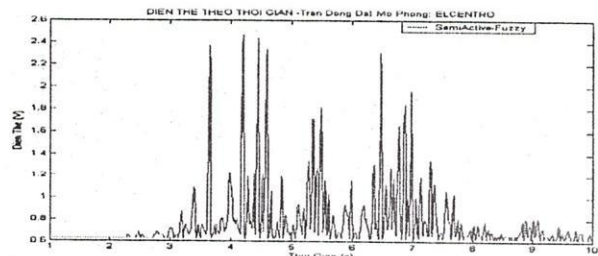
Tương tự như vận tốc, ta thấy độ giảm gia tốc tầng đỉnh đều lớn ở các trường ĐK. Bảng 5 cho thấy độ giảm gia tốc ở trường hợp Semiactive-LQR là 58.6%; trong khi đó ở trường hợp SemiActive-Fuzzy, con số này là 61.4%, giá trị này lớn hơn một ít so với trường hợp Semiactive-LQR.

Trên hình 11 và 12, ta thấy độ lệch tầng ở các trường hợp ĐK giảm rất đáng kể so với trường hợp ĐK Passive-Off. Hiệu quả của TGĐK mờ không cao hơn TG Clipped-Optimal. Đặc biệt, hiệu quả giảm chấn thể hiện rõ nét nhất ở tầng 1 và tầng 2 trong cả 3 trường hợp điều khiển. Ta có thể giải thích như sau: tầng 1 và 2 là các vị trí gần hệ cản MR nhất, độ lệch tầng sẽ bị MR Damper cản trở trực tiếp.

5. KHẢO SÁT SỰ THAY ĐỔI ĐIỆN THẾ THEO THỜI GIAN



Hình 15



Hình 16

Hình 15 cho thấy điều khiển Clipped-Optimal cho trường điện thế rất đơn điệu, hoặc bằng 0, hoặc bằng giá trị lớn nhất 2.5V. Trong khi đó, điều khiển Fuzzy Control (hình 16) cho trường điện thế rất linh động bởi giá trị điện thay đổi liên tục từ 0 tới 2.5 V. Đây là một đặc điểm khác nhau rõ nét giữa 2 thuật giải điều khiển.

6. KẾT LUẬN

Kết quả đã cho thấy hiệu quả giảm chấn rõ nét của TGĐK mờ hệ cản MR so với trường hợp Passive-Off. Hiệu quả trong một số trường hợp thấp hơn thuật giải Clipped – Optimal, nhưng không đáng kể. ĐK mờ không phải là TGĐK tối ưu. Trong khi đó, TG Clipped-Optimal bắt nguồn từ lời giải tối ưu; kết quả mô phỏng từ TG này liên quan tới sự chính xác của mô hình toán học, liên quan sai số do các cảm biến đo đạc, sự không chắc chắn của tải trọng kích động. Với ĐK mờ, quá trình ĐK lại không cần tính chính xác của mô hình

toán, các số liệu đo đạc. Khi ứng dụng vào thực tế, TG Clipped-Optimal với ĐK LQR không thể giải quyết các yếu tố này. ĐK mờ cho giá trị của biến mờ dao động trong một phạm vi nhất định, ví dụ sai số do các cảm biến đo đạc. Đó là đặc điểm hết sức linh động của ĐK logic mờ.

SEMI-ACTIVELY CONTROLLING MR DAMPER WITH FUZZY CONTROL THEORY

Le Van Thang, Chu Quoc Thang

Department of Civil Engineering, University of Technology – VNU-HCM

ABSTRACT: *This paper performs Fuzzy Logic Control in controlling semi-actively MR Damper in civil structures. This algorithm is compared with another modern one, that is Clipped-Optimal Control. With this algorithm, the research does not use LQG Optimal Control as done by Spencer (1996a). Instead, classical LQR Optimal Control is employed. The tool for the research is Simulink and Fuzzy Logic Control Tool in Matlab Programming Software.*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Clough, R.W., Penzien, J., *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill Inc., New York, 1992.
- [2]. Dyke, S.J., B.F. Spencer, Jr., M.K. Sain and J.D. Carlson, *Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction*, Smart Mat. and Struct., in press.
- [3]. Heikki Koivo, *Soft Computing In Dynamical Systems*, 2000.
- [4]. J. Connor, *Introduction to Structural Motion Control*, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [5]. L. Sun and Y. Goto, *Application of Fuzzy Theory to Variable Dampers for Bridge Vibration Control*, Proc. 1st World Conf. on Struct. Control, Los Angeles, California, pp. WP1:31–40, August, 1994.
- [6]. Timothy J. Ross, *Fuzzy Logic With Engineering Applications*, McGraw-Hill, Singapore, 1997.