

**HOÀN THIỆN PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN TRỰC TIẾP
MÔ MEN ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ DÙNG BIẾN TẦN KIỂU MA TRẬN**
IMPROVEMENT OF DIRECT TORQUE CONTROL
FOR ASYNCHRONOUS MOTOR DRIVES BY USING MATRIX CONVERTER

Bùi Quốc Khánh, Trần Trọng Minh, Phạm Văn Bách
Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Biến tần ma trận (Matrix Converter – MC) đem lại những khả năng mới trong hệ truyền động động cơ không đồng bộ với phương pháp điều khiển trực tiếp mô men (Direct Torque Control – DTC). Bằng cách khai thác MC như một biến tần đa mức (multi-level), làm giảm mức thăng giáng của điện áp đầu ra, do đó giảm được độ đập mạch của mô men. Bài báo đưa ra cấu trúc điều khiển DTC – MC với bộ điều chỉnh có ngưỡng, đặc trưng của DTC, nhưng với năm mức so sánh, thay vì chỉ có hai hay ba mức ở DTC thông thường. Các kết quả thử nghiệm trên mô hình mô phỏng và trên mô hình thí nghiệm đã chứng tỏ khả năng áp dụng thực tế của cấu trúc này. Hiệu quả đặc biệt thể hiện rõ ở độ đập mạch mô men thấp, kể cả ở vùng tốc độ thấp, trong khi vẫn đảm bảo tất cả các đặc tính năng lượng của biến tần ma trận như trao đổi năng lượng hai chiều với lưới điện, dòng đầu vào hình sin, hệ số công suất điều chỉnh được đến gần một.

ABSTRACT

Using Matrix Converter (MC) in Direct Torque Control (DTC) of asynchronous machine makes it possible to improve general performance, especially the torque ripple reduction. The favorable feature is obtained by controlling MC as a multilevel converter that decreases output voltage steps, leads to much more smooth torque wave form. This paper presents a control structure for DTC – MC with the controller of five thresholds instead of only two or three levels in normal DTC. The simulations as well as experimental results demonstrate the validity of the actual control structure and its application feasibility. The effectiveness is particularly found in the low torque ripple levels, even in low speed region, while ensuring all special capability of the MC as bidirectional energy exchange, sine-wave input current and closed-to-unity power factor.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Với đáp ứng nhanh, bộ điều chỉnh đơn giản, DTC đã được ứng dụng phổ biến với các biến tần trên cơ sở các bộ nghịch lưu nguồn áp (DTC – VSI). Nhược điểm của DTC – VSI là độ đập mạch mô men lớn, nhất là ở vùng tốc độ thấp, tần số đóng cắt của van bán dẫn thay đổi dẫn tới tổn thất tăng. Biến tần kiểu ma trận (Matrix Converter – MC) là dạng biến tần trực tiếp [1, 2], có số vector đóng cắt nhiều hơn, ứng với nhiều mức điện áp ra, tạo nên nhiều khả năng lựa chọn vector trong điều khiển DTC, có thể khắc một cách hiệu quả các vấn đề của DTC – VSI [3]. Bài viết này đưa ra một cấu trúc điều khiển MC – DTC, đặc biệt khai thác MC như một biến tần đa mức (multi-level), với mục tiêu giảm độ đập mạch mô men động cơ ở vùng tốc độ thấp mà không làm tăng đáng kể tần số đóng cắt của van, trong khi vẫn đảm bảo các tính năng ưu việt của MC là trao đổi năng lượng với

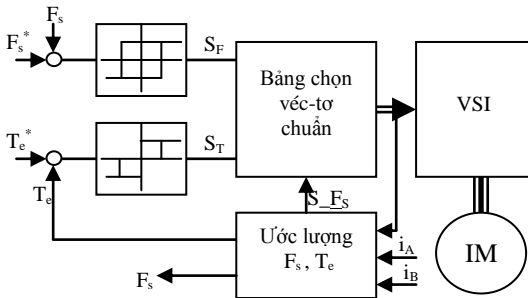
lưới hai chiều, dòng đầu vào hình sin với hệ số công suất gần bằng một.

Trong phần I sẽ phân tích các đặc điểm của DTC với phương pháp điều chế vec-tơ không gian (Space Vector Modulation – SVM), cho thấy rõ sự khác nhau giữa SVM – VSI và SVM – MC. Phần thứ II trình bày cách thức xây dựng hệ thống điều khiển DTC – MC với đặc tính được cải thiện hơn nhiều so với cấu trúc cơ bản. Phần thứ III là các kết quả thử nghiệm cho thấy tính đúng đắn của giải pháp điều khiển đưa ra.

1.1 Cấu trúc DTC trong biến tần gián tiếp nguồn áp (DTC-VSI)

Nguyên lý DTC – VSI, cấu trúc thể hiện trên hình 1, dựa trên việc lựa chọn các vec-tơ điện áp chuẩn áp đặt lên stato của động cơ tùy thuộc vào giá trị, độ biến thiên sai lệch mô men và từ thông stato và vị trí vec-tơ từ thông stato,

trong đó T_e^* , F_s^* là mô men đặt và từ thông đặt, T_e và F_s là giá trị mô men và từ thông stato ước lượng. Bộ điều khiển từ thông là khâu so sánh hai mức, bộ điều khiển mô men là khâu so sánh ba mức, đầu ra các bộ điều khiển này, S_F và S_T , được đưa tới bảng chọn vec-tơ chuẩn theo bảng 1. Bảng 1 được lập dựa trên cơ sở phân tích ảnh hưởng của các vec-tơ chuẩn được chọn theo số gia vec-tơ từ thông và theo vị trí của nó trên mặt phẳng vec-tơ không gian, minh họa trên hình 2.a và 2.b. Các vec-tơ chuẩn có biên độ không đổi, 0 hoặc $\pm 2/3U_{dc}$, với U_{dc} là điện áp một chiều trung gian.



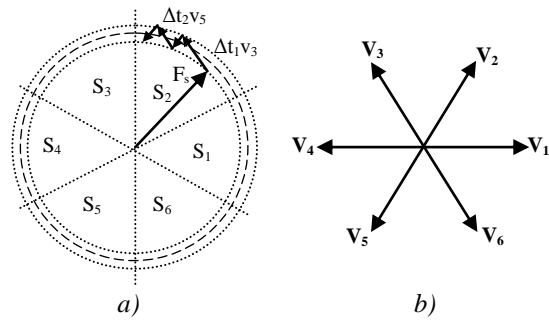
Hình 1. Cấu trúc DTC-VSI cơ bản.

1.2 Cấu trúc DTC trong MC

Trên hình 3 thể hiện cấu tạo của MC. Sơ đồ cấu trúc cơ bản hệ thống DTC-MC cho trên hình 4 [3], bao gồm 3 khâu điều khiển có ngưỡng, hai khâu cho từ thông và cho mô men như ở DTC-VSI cơ bản, khâu thứ ba cho giá trị trung bình của $\sin(\psi_i)$. ψ_i là góc lệch pha giữa vec-tơ dòng điện và điện áp đầu vào.

Trong sơ đồ trên hình 4 các đại lượng cần đo bao gồm các giá trị điện áp đầu vào u_i , điện áp đầu ra u_o và các dòng điện ra tải i_o . Từ thông và mô men được tính theo các giá trị đo được u_o , i_o . Các giá trị dòng đầu vào được xác định qua các giá trị đo dòng đầu ra và trạng thái của các van, từ đó tính được vector dòng \bar{I}_1 . So sánh góc pha giữa vector dòng đầu vào với vector đồng bộ $\bar{\psi}$, như phương pháp đề ra trong [1], sẽ xác định được góc lệch pha ψ_i giữa dòng điện thực và vector đồng bộ, đưa đến đầu vào của bộ điều chỉnh $\sin(\psi_i)$. Bộ điều chỉnh sẽ đảm bảo $\psi_i \approx 0$, nghĩa là làm cho hệ số công suất gần bằng một. Các vec-tơ chuẩn của MC cho trong bảng 2. Trong DTC – MC tác động của các bộ điều chỉnh có ngưỡng từ thông và mô men giống như trong DTC – VSI, nếu chỉ xét

trên hệ thống vec-tơ không gian điện áp đầu ra của MC \underline{v}_0 (xem hình 5.a).

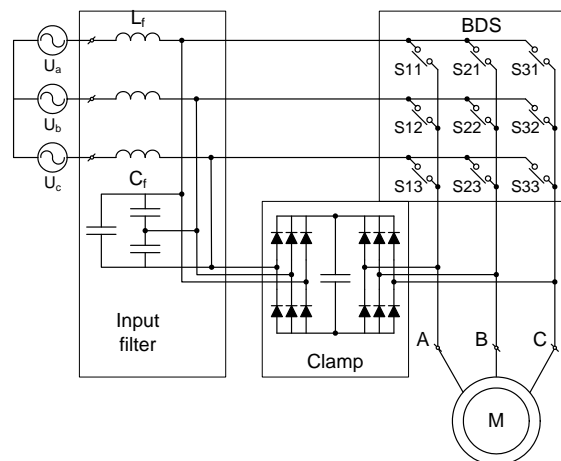


Hình 2. a) Vec-tơ từ thông stato.

b) Vec-tơ điện áp chuẩn \underline{v}_0 .

Bảng 1. Bảng chọn vec-tơ trong DTC-VSI cơ bản.

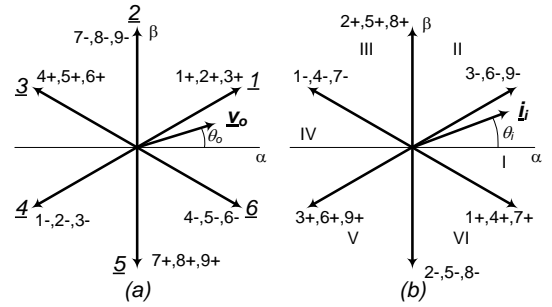
		Sector \underline{v}_0					
		S I	S II	S III	S IV	S V	S VI
$S_F = 1$	$S_T = 1$	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>1</u>
	$S_T = 0$	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>
	$S_T = -1$	<u>6</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>
$S_F = -1$	$S_T = 1$	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>1</u>	<u>2</u>
	$S_T = 0$	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>
	$S_T = -1$	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>



Hình 3. Sơ đồ cấu trúc cơ bản MC.

Bảng 2. Bảng các véc-tơ không gian trong MC.

No	A	B	C	U_o	θ_o	I_i	α_i
1+	a	b	b	$2/3u_{ab}$	$\pi/6$	$2/\sqrt{3} i_A$	$-\pi/6$
1-	b	a	a	$-2/3u_{ab}$	$-5\pi/6$	$-2/\sqrt{3} i_A$	$-\pi/6$
2+	b	c	c	$2/3u_{bc}$	$\pi/6$	$2/\sqrt{3} i_A$	$\pi/2$
2-	c	b	b	$-2/3u_{bc}$	$-5\pi/6$	$-2/\sqrt{3} i_A$	$\pi/2$
3+	c	a	a	$2/3u_{ca}$	$\pi/6$	$2/\sqrt{3} i_A$	$7\pi/6$
3-	a	c	c	$-2/3u_{ca}$	$-5\pi/6$	$-2/\sqrt{3} i_A$	$7\pi/6$
4+	b	a	b	$2/3u_{ab}$	$5\pi/6$	$2/\sqrt{3} i_B$	$-\pi/6$
4-	a	b	a	$-2/3u_{ab}$	$-\pi/6$	$-2/\sqrt{3} i_B$	$-\pi/6$
5+	c	b	c	$2/3u_{bc}$	$5\pi/6$	$2/\sqrt{3} i_B$	$\pi/2$
5-	b	c	b	$-2/3u_{bc}$	$-\pi/6$	$-2/\sqrt{3} i_B$	$\pi/2$
6+	a	c	a	$2/3u_{ca}$	$5\pi/6$	$2/\sqrt{3} i_B$	$7\pi/6$
6-	c	a	c	$-2/3u_{ca}$	$-\pi/6$	$-2/\sqrt{3} i_B$	$7\pi/6$
7+	b	b	a	$2/3u_{ab}$	$-\pi/2$	$2/\sqrt{3} i_C$	$-\pi/6$
7-	a	a	b	$-2/3u_{ab}$	$\pi/2$	$-2/\sqrt{3} i_C$	$-\pi/6$
8+	c	c	b	$2/3u_{bc}$	$-\pi/2$	$2/\sqrt{3} i_C$	$\pi/2$
8-	b	b	c	$-2/3u_{bc}$	$\pi/2$	$-2/\sqrt{3} i_C$	$\pi/2$
9+	a	a	c	$2/3u_{ca}$	$-\pi/2$	$2/\sqrt{3} i_C$	$7\pi/6$
9-	c	c	a	$-2/3u_{ca}$	$\pi/2$	$-2/\sqrt{3} i_C$	$7\pi/6$
0 _a	a	a	a	0	-	0	-
0 _b	b	b	b	0	-	0	-
0 _c	c	c	c	0	-	0	-



Hình 5. Véc-tơ không gian của MC

Tuy nhiên MC còn có hệ thống véc-tơ dòng đầu vào nên các véc-tơ chuẩn được chọn theo bảng 3 [3], trong đó các cột đánh số I, II, ..., VI chỉ các sec-tơ của véc-tơ dòng đầu vào, các hàng đánh số 1, 2, ..., 6 chỉ các véc-tơ điện áp ra, nêu được chọn theo DTC.

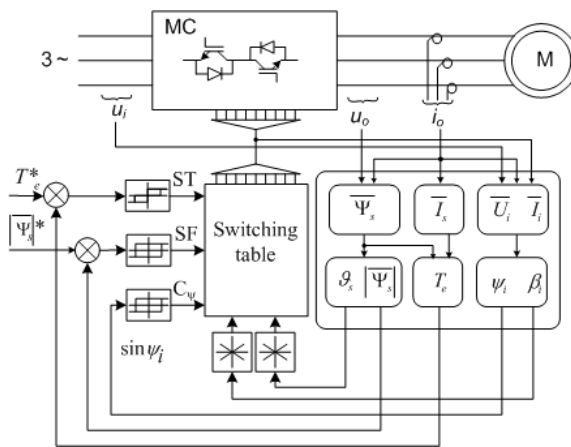
Bảng 3. Bảng chọn véc-tơ trong DTC-MC cơ bản.

	I	II	III	IV	V	VI
c_{ψ}	+	-	+	-	+	-
i_1	-3	1	2	-3	-1	2
i_2	9	-7	-8	9	7	-8
i_3	-6	4	5	-6	-4	5
i_4	3	-1	-2	3	1	-2
i_5	-9	7	8	-9	-7	8
i_6	6	-4	-5	6	4	-5

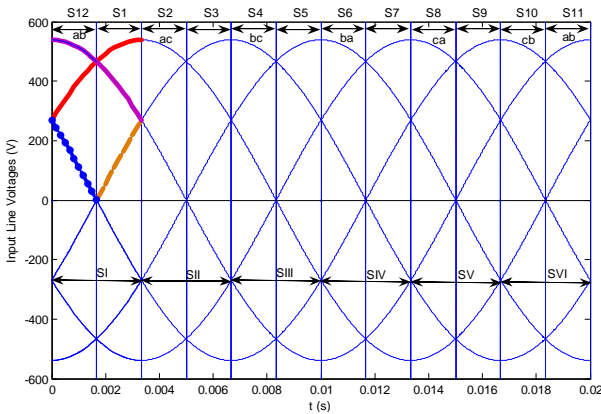
II. HOÀN THIỆN DTC CHO MC

2.1 Đặc điểm của vector trong MC

Như biểu diễn trên hình 5.a và 5.b, mặt phẳng biểu diễn véc-tơ không gian điện áp đầu ra và véc-tơ dòng điện đầu vào đều được chia thành 6 sec-tơ. Độ dài của một véc-tơ u_o (khác không) trên hình 5.a sẽ phụ thuộc vào véc-tơ dòng đầu vào đang ở đâu trong 6 sec-tơ trên hình 5.b. Có thể thấy rõ điều này qua biểu diễn hình 5.b nhưng trái đồ thị véc-tơ quay trên hình 5.b thành đồ thị chữ nhật như hình 6. Ví dụ, véc-tơ 1 (hình 5.a) theo bảng 2 có thể tương ứng với các véc-tơ $1\pm$, $2\pm$ và $3\pm$. Khi đó nếu véc-tơ dòng điện đầu vào đang nằm trong sec-tơ SI thì véc-tơ 1 có thể được chọn tương ứng với một trong 4 véc-tơ $1+$, $3-$, và $2+$, $2-$. Theo hình 6, véc-tơ $1+$ có độ dài $2/3u_{ab}$, $3-$ có độ dài $2/3u_{ac}$, $2+$ dài $2/3u_{bc}$, $2-$ dài $2/3u_{cb}$. Như vậy $1+$, $3-$ gọi là véc-tơ lớn, $2+$, $2-$ gọi là véc-tơ nhỏ.



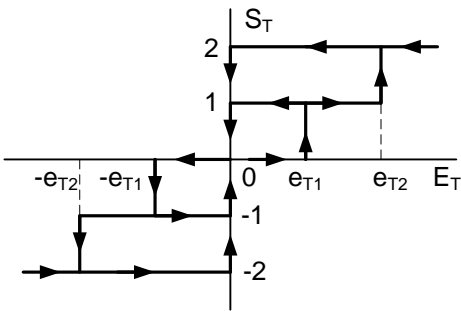
Hình 4. Sơ đồ cấu trúc cơ bản DTC-MC.



Hình 6. Điện áp dây đầu vào MC.

2.2 Xây dựng bảng chọn véc-tơ chuẩn

Trong MC có thể lựa chọn véc-tơ có độ dài phù hợp theo biên độ thay đổi của mô men, được phát hiện chính xác hơn nhờ bộ so sánh 5 ngưỡng, cho trên hình 7. Bảng lựa chọn véc-tơ cho phương án DTC-MC tiên tiến được xây dựng như trong bảng 4. Bảng 4 chỉ rõ với biên độ mô men thay đổi lớn ($S_T = \pm 2$) cần chọn áp đặt véc-tơ lớn (\underline{u}_l), với biên độ nhỏ ($S_T = \pm 1$) chọn véc-tơ nhỏ (\underline{u}_s), với $S_T = 0$ chọn véc-tơ không $\underline{0}$. Ví dụ, nếu véc-tơ dòng điện đầu vào đang ở séc-tơ SI, để giảm góc ψ_i thì chọn 3-, để tăng góc thì chọn 1+. 1+, 3- đều là véc-tơ lớn trong séc-tơ SI.



Hình 7. Khâu so sánh 5 ngưỡng.

Với vector nhỏ ta sẽ cần làm rõ hơn một số chi tiết. Trên hình 5.b phải chia séc-tơ dòng điện đầu vào thành 12 séc-tơ S1-S12. Trong mỗi séc-tơ này chỉ có một véc-tơ nhỏ sẵn có để làm tăng hoặc giảm góc ψ_i , véc-tơ nhỏ còn lại được tạo bằng $\frac{1}{2}$ véc-tơ lớn trong cùng séc-tơ (được thực hiện bằng phần mềm). Ví dụ nếu $\underline{1}_s$ được chọn và véc-tơ dòng điện đầu vào đang nằm trong S1 thì véc-tơ 2+ làm giảm ψ_i và $\frac{1}{2}$ 1+ làm tăng ψ_i . Tương tự cho các trường hợp

khác, ta được bảng 5 là bảng chọn véc-tơ chuẩn, chi tiết hóa bảng 4.

2.3 Mô phỏng

Mô hình mô phỏng đã được xây dựng trên Matlab/Simulink cho cả hai cấu trúc DTC-MC cơ bản và DTC-MC tiên tiến. Các kết quả đáp ứng mô-men cho DTC-MC cơ bản thể hiện trên hình 9, của DTC-MC tiên tiến cho trên hình 10. Theo đó DTC-MC tiên tiến thể hiện độ đáp mạch mô-men ít hơn hẳn.

Bảng 4. Bảng chọn véc-tơ trong DTC-MC.

		Sector \underline{v}_0					
		S I	S II	S III	S IV	S V	S VI
$S_F = 1$	$S_T = 2$	$\underline{2}_l$	$\underline{3}_l$	$\underline{4}_l$	$\underline{5}_l$	$\underline{6}_l$	$\underline{1}_l$
	$S_T = 1$	$\underline{2}_s$	$\underline{3}_s$	$\underline{4}_s$	$\underline{5}_s$	$\underline{6}_s$	$\underline{1}_s$
	$S_T = 0$	$\underline{0}$	$\underline{0}$	$\underline{0}$	$\underline{0}$	$\underline{0}$	$\underline{0}$
	$S_T = -1$	$\underline{6}_s$	$\underline{1}_s$	$\underline{2}_s$	$\underline{3}_s$	$\underline{4}_s$	$\underline{5}_s$
	$S_T = -2$	$\underline{6}_l$	$\underline{1}_l$	$\underline{2}_l$	$\underline{3}_l$	$\underline{4}_l$	$\underline{5}_l$
$S_F = -1$	$S_T = 2$	$\underline{3}_l$	$\underline{4}_l$	$\underline{5}_l$	$\underline{6}_l$	$\underline{1}_l$	$\underline{2}_l$
	$S_T = 1$	$\underline{3}_s$	$\underline{4}_s$	$\underline{5}_s$	$\underline{6}_s$	$\underline{1}_s$	$\underline{2}_s$
	$S_T = 0$	$\underline{0}$	$\underline{0}$	$\underline{0}$	$\underline{0}$	$\underline{0}$	$\underline{0}$
	$S_T = -1$	$\underline{5}_s$	$\underline{6}_s$	$\underline{1}_s$	$\underline{2}_s$	$\underline{3}_s$	$\underline{4}_s$
	$S_T = -2$	$\underline{5}_l$	$\underline{6}_l$	$\underline{1}_l$	$\underline{2}_l$	$\underline{3}_l$	$\underline{4}_l$

Bảng 5. Bảng chọn các véc-tơ chuẩn đảm bảo

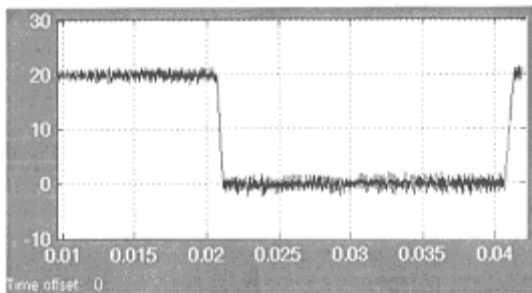
$$\sin(\psi_i) = 0.$$

		Sector điện áp đầu vào MC											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
c_ψ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\underline{1}_l$	-3	2	2	-1	-1	3	3	-2	-2	1	1	-3	
	1	-3	-3	2	2	-1	-1	3	3	-2	-2	1	
$\underline{1}_s$	2	$\frac{1}{2}$	-1	$\frac{1}{2}$	3	$\frac{1}{2}$	-2	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	-3	$\frac{1}{2}$	
	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	-3	$\frac{1}{2}$	2	$\frac{1}{2}$	-1	$\frac{1}{2}$	3	$\frac{1}{2}$	-2	
$\underline{2}_l$	9	-8	-8	7	7	-9	-9	8	8	-7	-7	9	
	-7	9	9	-8	-8	7	7	-9	-9	8	8	-7	
$\underline{2}_s$	-8	$\frac{1}{2}$	7	$\frac{1}{2}$	-9	$\frac{1}{2}$	8	$\frac{1}{2}$	-7	$\frac{1}{2}$	9	$\frac{1}{2}$	
	$\frac{1}{2}$	-7	$\frac{1}{2}$	9	$\frac{1}{2}$	-8	$\frac{1}{2}$	7	$\frac{1}{2}$	-9	$\frac{1}{2}$	8	
$\underline{3}_l$	-6	5	5	-4	-4	6	6	-5	-5	4	4	-6	

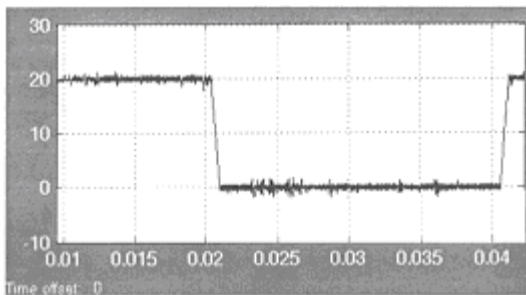
	4	-6	-6	5	5	-4	-4	6	6	-5	-5	4
3 _s	5	½	-4	½	6	½	-5	½	4	½	-6	½
	½	4	½	-6	½	5	½	-4	½	6	½	-5
4 _l	3	-2	-2	1	1	-3	-3	2	2	-1	-1	3
	-1	3	3	-2	-2	1	1	-3	-3	2	2	-1
4 _s	-2	½	1	½	-3	½	2	½	-1	½	3	½
	½	-1	½	3	½	-2	½	1	½	-3	½	2
5 _l	-9	8	8	-7	-7	9	9	-8	-8	7	7	-9
	7	-9	-9	8	8	-7	-7	9	9	-8	-8	7
5 _s	8	½	-7	½	9	½	-8	½	7	½	-9	½
	½	7	½	-9	½	8	½	-7	½	9	½	-8
6 _l	6	-5	-5	4	4	-6	-6	5	5	-4	-4	6
	-4	6	6	-5	-5	4	4	-6	-6	5	5	-4
6 _s	-5	½	4	½	-6	½	5	½	-4	½	6	½
	½	-4	½	6	½	-5	½	4	½	-6	½	5

III. CÁC KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

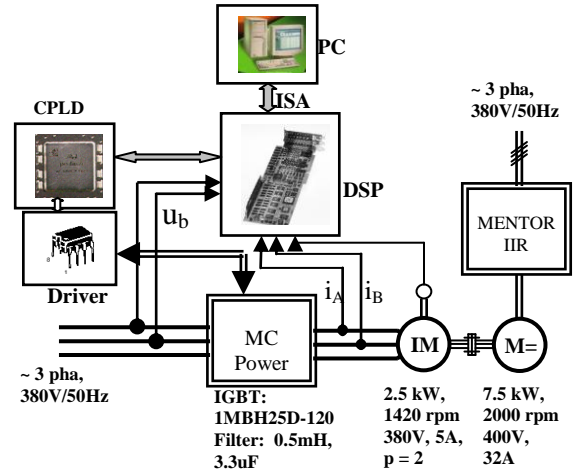
Mô hình thiết bị thí nghiệm MC – DTC tiên tiến cho trên hình 11. Các kết quả ghi nhận được thể hiện trên các hình 12, 13 đã cho thấy đáp ứng tốt của mô-men động cơ ở chế độ ổn định và quá độ (đảo chiều mô-men), dòng điện và điện áp pha đầu vào MC trùng pha.



Hình 9. Đáp ứng mô-men động cơ T_m [N.m] Với cấu trúc DTC-MC cơ bản, $T=50\mu s$.



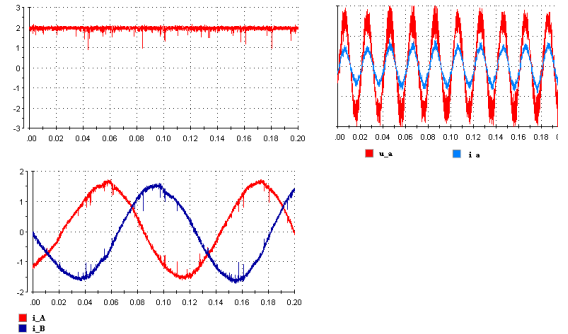
Hình 10. Đáp ứng mô-men động cơ T_m [N.m] Với cấu trúc DTC-MC tiên tiến, $T=50\mu s$.



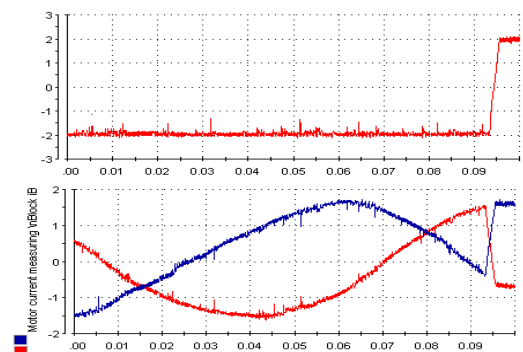
Hình 11. Cấu trúc DTC-MC thí nghiệm.

IV. KẾT LUẬN

Cấu trúc điều khiển tiên tiến DTC – MC với khâu so sánh năm ngưỡng cho phép tận dụng tối đa các véc-tơ điện áp chuẩn, đảm bảo độ đập mạch mô men nhỏ, đặc biệt khi động cơ làm việc ở vùng tốc độ thấp. Cấu trúc này đã được thử nghiệm trên hệ xử lý tín hiệu số hiện hành nên hoàn toàn có thể triển khai ra ứng dụng thực tế.



Hình 12. Mô-men điện, dòng điện đầu ra MC và dòng điện/điện áp pha đầu vào MC ổn định.



Hình 13. Mô-men điện từ, dòng điện đầu ra MC khi đảo chiều mô-men.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. *Bùi Quốc Khánh, Trần Trọng Minh*; Đảm bảo chất lượng dòng đầu vào của Matrix Converter trong điều kiện điện áp lưới mất cân bằng; Tạp chí Khoa học & Công nghệ các trường ĐHKHT, số 57, (2006).
2. *Trần Trọng Minh*; Nghiên cứu xây dựng biến tần kiểu ma trận; Luận văn Tiến sỹ kỹ thuật, ĐHBK Hà nội, (tháng 6/2007).
3. *Casadei D., Serra G., Tani A.*; The Use of Matrix Converters in Direct Torque Control of Induction Machines; Industrial Electronics. IEEE Trans. on, volume: 48 Issue: 6, Page(s): 1057 – 1064, (Nov 2000).
4. *Casadei D., Serra G., Tani A., Zarri L.*; Matrix Converter Modulation Stragies: A New General Approach Basedd on Space Vector Representation of the Switchstate; Industrial Electronics, IEEE Trans. on, volume: 49 Issue: 2, Page(s): 370 – 381, (Feb 2002).

Địa chỉ liên hệ: Trần Trọng Minh - Tel: 0903.432.245, E-mail: minhtrantrong@mail.hut.edu.vn.
Trung tâm Nghiên cứu và triển khai công nghệ cao
Trường Đại học Bách khoa Hà Nội - Số 1, Đại Cồ Việt, Hà Nội