

**ĐIỀU BIẾN VECTƠ KHÔNG GIAN CHO
BIẾN TẦN MA TRẬN GIÁN TIẾP 3 PHA - 4 DÂY**
SPACE VECTOR MODULATION FOR
THREE - PHASE FOUR - LEG INDIRECT MATRIX CONVERTER - TFMC

PGS.TS. BÙI QUỐC KHÁNH
Khoa Điện, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội
ThS. ĐẶNG HỒNG HẢI, KS. ĐOÀN VĂN TUẤN
Khoa Điện - ĐTTB, Trường ĐHHH

Tóm tắt

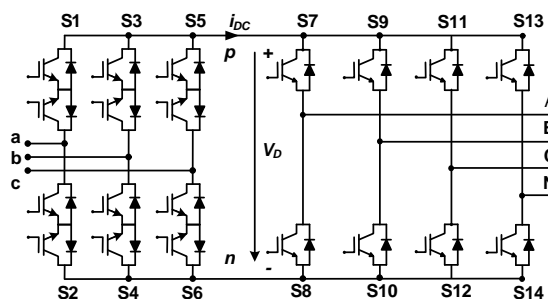
Bài báo đề cập đến cấu trúc của biến tần ma trận gián tiếp 3 pha-4 dây (TFIMC). Cấu trúc này đáp ứng được cho các tải có sử dụng dây trung tính. Phương pháp điều chế PWM được áp dụng cho phía lưới, điều biến vectơ không gian 3D được áp dụng cho phía tải. Quá trình chuyển mạch phía lưới diễn ra khi dòng một chiều bằng không đã làm đơn giản hóa vấn đề chuyển mạch của TFIMC.

Abstract

Presented in this paper is a structure of three-phase four-leg indirect matrix converter (TFIMC). It provides a neutral connection for three-phase four-wire systems. The PWM method is utilized at line side, the 3-dimensional SVM method is applied to load side. The switching of the input side converter only takes place during instant of zero DC link current, this feature largely simplifies the commutating problems always associated with matrix converters.

1. Đặt vấn đề

Biến tần ma trận (Matrix Converter - MC) là một bộ biến đổi trực tiếp AC-AC, có nhiều ưu điểm như có thể trao đổi công suất theo hai chiều, dòng điện đầu vào hình sin, hệ số công suất đầu vào gần bằng một [1]. MC có vai trò là bộ biến đổi công suất khi làm việc với động cơ thì đặc điểm của tải là đối xứng. MC có vai trò là bộ nguồn thì đặc điểm và tính chất của tải sẽ rất đa dạng, có thể là một, hai, ba pha, động cơ, R, L, C, tuyến tính hoặc phi tuyến. Ở đây đề cập đến một trong nhiều phương án có thể đáp ứng được các yêu cầu trên, cấu trúc mạch lực đề cập được chỉ ra trên hình 1, nó bao gồm hai phần, phần nối với lưới sử dụng chỉnh lưu hai cực tính nối theo kiểu ma trận với sáu van bán dẫn hai chiều BSD, phần nối với tải sử dụng mạch nghịch lưu bốn nhánh thông thường.



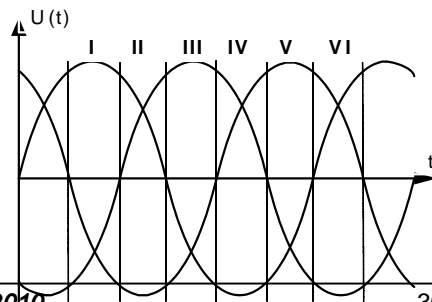
Hình 1. Cấu trúc biến tần ma trận 3 pha - 4 dây.

Yêu cầu đặt ra khi thực hiện điều biến vectơ không gian cho TFIMC là đảm bảo được đầy đủ các tính chất của biến tần thông thường. Quá trình điều biến được thực hiện ở cả hai phía, phía lưới, phía tải và phải kết hợp chặt chẽ với nhau. Phía lưới sẽ tổng hợp dòng điện vào hình sin, cùng pha với điện áp vào. Phía tải sẽ tổng hợp điện áp ra hình sin.

2. Điều biến vectơ không gian cho TFIMC

2.1. Điều biến cho phía lưới

Giả thiết các van bán dẫn là lý tưởng, tần số cắt mẫu lớn hơn rất nhiều so với tần số cơ bản của nguồn áp vào và nguồn đầu vào là nguồn cứng. Khi đó điện áp ở phần trung gian được quyết định bởi luật chuyển mạch của các van phía lưới và điện áp lưới, còn dòng điện ở đây được xác định bởi quy luật điều biến phía tải và dòng đầu ra của bộ biến đổi. Hệ thống điện áp ba



Hình 2. Các sector điện áp vào.

pha đầu vào đối xứng và có dạng như biểu thức (1) dưới đây.

$$\begin{cases} V_a = V_m \cos \theta_a = V_m \cos(\omega_1 t) \\ V_b = V_m \cos \theta_b = V_m \cos(\omega_1 t - 2\pi/3) \\ V_c = V_m \cos \theta_c = V_m \cos(\omega_1 t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

Mục đích của việc điều biến phía lưới là nhằm tạo ra dòng vào sin và duy trì hệ số công suất đầu vào bằng một. Khi điện áp đầu vào là đối xứng, theo dấu của điện áp pha sẽ có hai trường hợp của điện áp lưới, được thể hiện trên hình 2.

a. Trường hợp thứ nhất: Hai điện áp pha có giá trị dương và một điện áp pha có giá trị âm. Giả sử rằng điện áp pha A và pha B mang giá trị dương, pha C mang giá trị âm. Khi đó $|V_{sc}| = |V_{sa}| + |V_{sb}|$. Trong trường hợp này, khoá bán dẫn S_{cn} phải được duy trì ở trạng thái dẫn trong khi S_{ap} , S_{bp} sẽ được điều chế.

- Khi S_{ap} dẫn, điện áp ở phần trung gian bằng V_{ac} và có cực tính như trên hình 1, tỷ số điều biến của khoá bán dẫn S_{ap} được tính như biểu thức (2) dưới đây [2]:

$$d_{ac} = -\frac{\cos \theta_a}{\cos \theta_c} \quad (2)$$

- Khi S_{bp} dẫn, điện áp ở phần trung gian bằng V_{bc} và có cực tính như trên hình 1, tỷ số điều biến của khoá bán dẫn S_{bp} được tính như biểu thức (3) dưới đây [2]:

$$d_{bc} = -\frac{\cos \theta_b}{\cos \theta_c} \quad (3)$$

b. Trường hợp thứ hai: Hai điện áp pha có giá trị âm và một điện áp pha có giá trị dương. Giả thiết rằng điện áp pha A và pha B mang giá trị âm, pha C mang giá trị dương. Khi đó $|V_{sc}| = |V_{sa}| + |V_{sb}|$. Trong trường hợp này, khoá bán dẫn S_{cp} phải được duy trì ở trạng thái dẫn trong khi S_{an} , S_{bn} sẽ được điều chế.

- Khi S_{an} dẫn, điện áp ở phần trung gian bằng V_{ca} và có cực tính như trên hình 1, tỷ số điều biến của khoá bán dẫn S_{an} được tính như biểu thức (4) dưới đây [2]:

$$d_{ac} = -\frac{\cos \theta_a}{\cos \theta_c} \quad (4)$$

- Khi S_{bn} dẫn, điện áp ở phần trung gian bằng V_{cb} và có cực tính như trên hình 1, tỷ số điều biến của khoá bán dẫn S_{bn} được tính như biểu thức (5) dưới đây [2]:

$$d_{bc} = -\frac{\cos \theta_b}{\cos \theta_c} \quad (5)$$

Tương tự, có thể xác định được trạng thái đóng cắt của các van và tỉ số điều biến tương ứng cho tất cả các sector cụ thể. Giá trị trung bình của điện áp ở phần trung gian trong mỗi một chu kỳ cắt mẫu được tính như biểu thức (6) dưới đây [2]:

$$V_D = \frac{3.V_m}{2.\cos \theta_m} \quad (6)$$

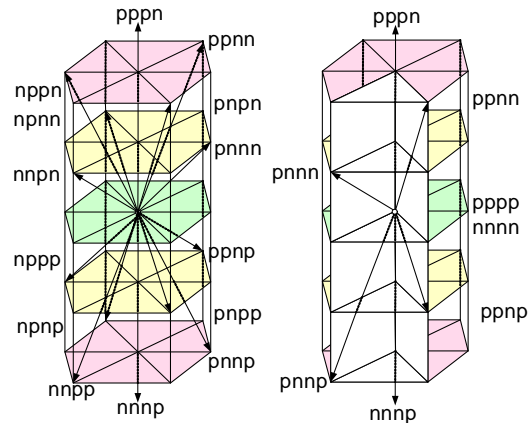
trong đó: $\cos(\theta_m) = \max(|\cos(\theta_a)|, |\cos(\theta_b)|, |\cos(\theta_c)|)$

2.2. Điều biến vectơ không gian ba chiều (SVM-3D) cho phía tải

Tương tự như phương pháp điều biến vectơ 2D, trong phương pháp điều biến vectơ 3D một vectơ bất kỳ cũng được tổng hợp từ các vectơ chuẩn.

2.2.1. Tổ hợp van của phía tải

Yêu cầu của quá trình đóng cắt phía tải là không được ngắt mạch điện áp một chiều, do vậy hai van trên cùng một nhánh không được dẫn đồng thời. Như vậy sẽ có tất cả mười sáu trạng thái, trong đó mười bốn trạng thái là tích cực, điện áp ra khác không và hai trạng thái không tích cực, điện áp ra bằng không. Mỗi trạng thái được xác định bởi một vectơ $[S_A S_B S_C S_N]$ gọi là vectơ chuẩn, trong đó S_j ($j = A, B, C, N$) nhận một trong hai giá trị. Nếu $S_j = "p"$ nghĩa là pha j của đầu ra được nối với cực dương của điện áp ở phần trung gian, nếu $S_j = "n"$ nghĩa là pha j của đầu ra được nối với cực âm của điện áp ở phần trung gian. Các trạng thái của mạch van phía tải được thể hiện trong bảng 1.



Hình 3. Các vectơ chuẩn trong hệ tọa độ $\alpha\beta$ và lăng trụ I.

Ứng với mỗi trạng thái của mạch van phía tải, điện áp pha đầu ra sẽ có một giá trị xác định. Điện áp pha đầu ra sẽ nhận một trong hai giá trị hoặc là bằng không hoặc là bằng giá trị điện áp ở phần trung gian V_D . Ví dụ với tổ hợp van pnpn thì các điện áp pha đầu ra sẽ là: $V_A = 0, V_B = -V_D, V_C = -V_D$.

Việc điều chế vectơ không gian cho phía tải được thực hiện trong hệ $\alpha\beta$. Việc chuyển đổi từ hệ abc sang $\alpha\beta$ được thực hiện theo biểu thức $[X]_{\alpha\beta} = T \cdot [X]_{abc}$, trong đó T là ma trận chuyển đổi có giá trị như sau:

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

Bảng 1. Tổ hợp van của tải.

pppp	nnnp	pnpn	ppnp	npnp	nppp	nnpp	pnpp
pppn	nnnn	pnnn	ppnn	npnn	nppn	nnpn	pnpn

Biểu diễn hình học của mười sáu vectơ chuẩn trong hệ tọa độ $\alpha\beta$ được một hình lục lăng. Các vectơ chuẩn chia hình lục lăng thành sáu hình lăng trụ, được đánh số lần lượt từ I đến VI theo chiều ngược chiều kim đồng hồ, hình lục lăng và lăng trụ I được biểu diễn trên hình 3. Trong mỗi hình lăng trụ có sự tham gia của tám vectơ, trong đó có sáu vectơ tích cực và hai vectơ không. Trong mỗi hình lăng trụ có chứa bốn tứ diện, như vậy trong hình lục lăng sẽ có tất cả 24 tứ diện và được bố trí theo bảng 2. Vị trí của vectơ điện áp đặt trong không gian được xác định bằng phương pháp xét dấu của điện áp pha đầu ra trong hệ tọa độ abc.

Bảng 2. Bố trí các tứ diện trong lăng trụ.

Lăng Trụ	Td	Td	Td	Td	Lăng Trụ	Td	Td	Td	Td		
I	1	2	14	13	IV	7	8	20	19		
	V1	pnnn	pnnn	pnnn		nnnp	V1	nnpn	nnpn	nnpn	nnnp
	V2	pnpn	ppnn	ppnn		pnpn	V2	nppn	nnpp	nppn	nnpp
	V3	ppnp	ppnp	pppn		ppnp	V3	nppp	nppp	pppn	nppp
II	3	4	16	15	V	9	10	22	21		
	V1	npnn	npnn	npnn		nnnp	V1	nnpn	nnpn	nnpn	nnnp
	V2	ppnn	npnp	ppnn		npnp	V2	nnpp	pnpn	pnpn	nnpp
	V3	ppnp	ppnp	pppn		ppnp	V3	pnpp	pnpp	pppn	pnpp
III	5	6	18	17	VI	11	12	24	23		

	V1	npnn	npnn	npnn	nnnp		V1	pnnn	pnnn	pnnn	nnnp
	V2	npnp	pppn	pppn	npnp		V2	pnpn	pnnp	pnpn	pnnp
	V3	nppp	nppp	pppn	nppp		V3	pnpp	pnpp	pppn	pnpp

2.2.2. Hệ số điều biến phía tải

Một vectơ bất kỳ được tổng hợp từ các vectơ chuẩn. Tỷ số điều biến phía tải $d_i = [d_{1i} \ d_{2i} \ d_{3i}]^T$ thỏa mãn phương trình (7) sau:

$$V_{ref} = d_{1i} \cdot V_1 + d_{2i} \cdot V_2 + d_{3i} \cdot V_3 \tag{7}$$

$$d_{0i} = 1 - d_{1i} - d_{2i} - d_{3i} \tag{8}$$

trong đó: V_1, V_2, V_3 là các vectơ chuẩn; V_{ref} là vectơ điện áp cần được điều chế.

Bằng các phép toán vectơ và ma trận, các tỷ số điều biến phía tải được xác định theo biểu thức (9) dưới đây [3]:

$$d_i = \frac{1}{V_D} \cdot M \cdot V_{ref_abc} \tag{9}$$

trong đó: $M_{3 \times 3}$ là ma trận phụ thuộc vào từng tứ diện.

Vectơ điện áp đặt trong hệ abc như sau: $V_{ref_abc} = [V_A \ V_B \ V_C]_{abc}^T$ (10)

trong đó:

$$V_A = V_0 \cdot \cos(\omega_0 t); \ V_B = V_0 \cdot \cos(\omega_0 t - 2\pi / 3); \ V_C = V_0 \cdot \cos(\omega_0 t + 2\pi / 3) \tag{11}$$

Thay (6),(10), (11) vào (9) và biến đổi nhận được (12):

$$d_i = \frac{4}{9} \cdot k \cdot \cos(\theta_{in}) \cdot A \cdot V_{ref_abc} \tag{12}$$

trong đó: $k = \frac{V_0}{V_m}$ là tỷ số truyền áp; $A = M \cdot T$

2.3. Kết hợp giữa phía lưới và phía tải

2.3.1. Hệ số điều biến khi kết hợp phía lưới và phía tải

Khi thực hiện điều biến cho phía lưới sẽ cho ra một giá trị điện áp một chiều xác định. Mặt khác quy luật điều biến phía tải phụ thuộc vào giá trị điện áp một chiều để tính toán các hệ số biến điệu. Nhằm đảm bảo điện áp ra có dạng gần sin, với độ méo là nhỏ nhất, cần phải kết hợp đồng thời quy luật điều biến cho cả phía lưới và tải. Quy ước tỉ số điều biến phía lưới là d_{1r}, d_{2r} .

Trong khoảng thời gian điều biến phía lưới $d_{1r} \cdot T_s$, sẽ phải thực hiện việc tổng hợp vectơ điện áp ra từ các vectơ tích cực V_1, V_2, V_3 , và vectơ không phía tải tương ứng với các tỉ số điều biến $d_{1i}, d_{2i}, d_{3i}, d_{0i}$. Như vậy khoảng thời gian thực hiện các vectơ tương ứng phía tải sẽ là $(d_{1r}, d_{1i}) \cdot T_s$, $(d_{1r}, d_{2i}) \cdot T_s$, $(d_{1r}, d_{3i}) \cdot T_s$, $(d_{1r}, d_{0i}) \cdot T_s$. Tương tự, trong khoảng thời gian biến điệu phía lưới $d_{2r} \cdot T_s$, thời gian thực hiện các vectơ tương ứng phía tải sẽ là: $(d_{2r}, d_{1i}) \cdot T_s$, $(d_{2r}, d_{2i}) \cdot T_s$, $(d_{2r}, d_{3i}) \cdot T_s$, $(d_{2r}, d_{0i}) \cdot T_s$. Hệ số điều biến khi kết hợp phía lưới và phía tải được biểu diễn như sau:

$$d_{1r} d_i = [d_{1r} d_{1i} \ d_{1r} d_{2i} \ d_{1r} d_{3i}]^T; \ d_{2r} d_i = [d_{2r} d_{1i} \ d_{2r} d_{2i} \ d_{2r} d_{3i}]^T \tag{13}$$

$$d_{1r} d_{0i} = d_{1r} \cdot (1 - d_{1i} - d_{2i} - d_{3i}); \ d_{2r} d_{0i} = d_{2r} \cdot (1 - d_{1i} - d_{2i} - d_{3i})$$

Do giá trị của d_{1r} và d_{2r} thay đổi theo từng sector điện áp vào, nên tỉ số điều biến của biến tần ma trận khi kết hợp phía lưới và phía tải cũng thay đổi theo từng sector điện áp vào, được chỉ ra trong bảng 3 dưới đây.

Bảng 3. Hệ số điều biến khi kết hợp phía lưới và phía tải.

Sector	d_{1r}	d_{2r}	$d_{1r}.d_i$	$d_{2r}.d_i$
1	$\frac{\cos\theta_b}{\cos\theta_a}$	$\frac{\cos\theta_c}{\cos\theta_a}$	$\frac{4}{9}.k.\cos(\theta_b).A.V_{ref_abc}$	$\frac{4}{9}.k.\cos(\theta_c).A.V_{ref_abc}$
2	$\frac{\cos\theta_b}{\cos\theta_c}$	$\frac{\cos\theta_a}{\cos\theta_c}$	$\frac{4}{9}.k.\cos(\theta_b).A.V_{ref_abc}$	$\frac{4}{9}.k.\cos(\theta_a).A.V_{ref_abc}$
3	$\frac{\cos\theta_c}{\cos\theta_b}$	$\frac{\cos\theta_a}{\cos\theta_b}$	$\frac{4}{9}.k.\cos(\theta_c).A.V_{ref_abc}$	$\frac{4}{9}.k.\cos(\theta_a).A.V_{ref_abc}$
4	$\frac{\cos\theta_c}{\cos\theta_a}$	$\frac{\cos\theta_b}{\cos\theta_a}$	$\frac{4}{9}.k.\cos(\theta_c).A.V_{ref_abc}$	$\frac{4}{9}.k.\cos(\theta_b).A.V_{ref_abc}$
5	$\frac{\cos\theta_a}{\cos\theta_c}$	$\frac{\cos\theta_b}{\cos\theta_c}$	$\frac{4}{9}.k.\cos(\theta_a).A.V_{ref_abc}$	$\frac{4}{9}.k.\cos(\theta_b).A.V_{ref_abc}$
6	$\frac{\cos\theta_a}{\cos\theta_b}$	$\frac{\cos\theta_c}{\cos\theta_b}$	$\frac{4}{9}.k.\cos(\theta_a).A.V_{ref_abc}$	$\frac{4}{9}.k.\cos(\theta_c).A.V_{ref_abc}$

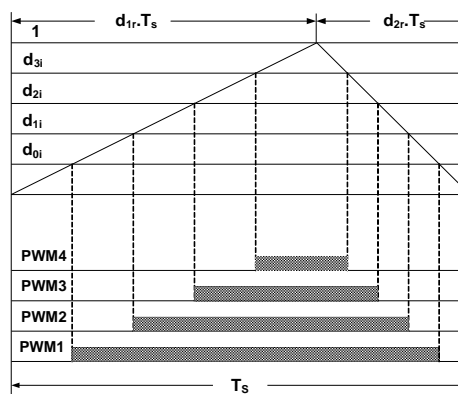
2.3.2. Trật tự thực hiện các vector khi kết hợp phía lưới với phía tải

Trật tự thực hiện các vector phải đảm bảo được các yêu cầu đặt ra cho việc điều biến, đồng thời tổn thất chuyển mạch là nhỏ nhất, mỗi lần chuyển mạch chỉ có một van chuyển trạng thái. Trật tự thực hiện các vector khi kết hợp phía lưới và phía tải được thực hiện như sau:

$$(d_0.d_{1r}) \rightarrow (d_{1r}.d_{1i}) \rightarrow (d_{1r}.d_{2i}) \rightarrow (d_{1r}.d_{3i}) \rightarrow (d_0.d_{1r})$$

$$\rightarrow (d_0.d_{2r}) \rightarrow (d_{2r}.d_{3i}) \rightarrow (d_{2r}.d_{2i}) \rightarrow (d_{2r}.d_{1i}) \rightarrow (d_0.d_{2r})$$

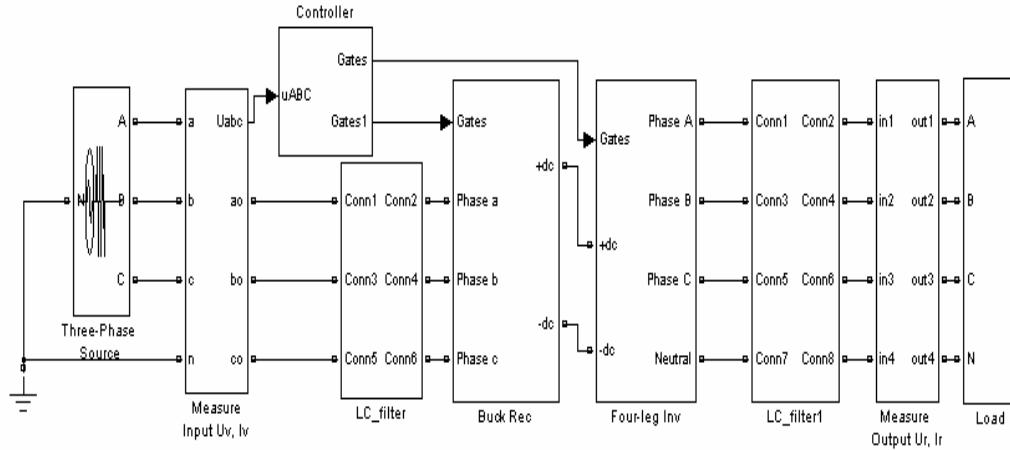
Trật tự thực hiện các vector nêu trên còn cho thấy phía lưới chỉ xảy ra chuyển mạch hai lần trong mỗi chu kỳ cắt mẫu. Quá trình chuyển mạch giữa các BSD diễn ra khi phía tải đang thực hiện vector không, điều này đồng nghĩa với dòng một chiều lúc này bằng không và do đó tất cả dòng điện ở các nhánh phía lưới lúc này cũng phải bằng không. Điều này sẽ làm đơn giản hóa vấn đề chuyển mạch trong TFIMC. Ngoài ra còn làm giảm được tổn thất chuyển mạch của phía lưới. Phương pháp PWM với xung răng cưa chéo được áp dụng để đảm bảo được trật tự chuyển mạch nêu trên, độ chéo của xung răng cưa phụ thuộc vào giá trị của d_{r1} và d_{r2} , được thể hiện trên hình 4.



Hình 4. Trật tự thực hiện vector.

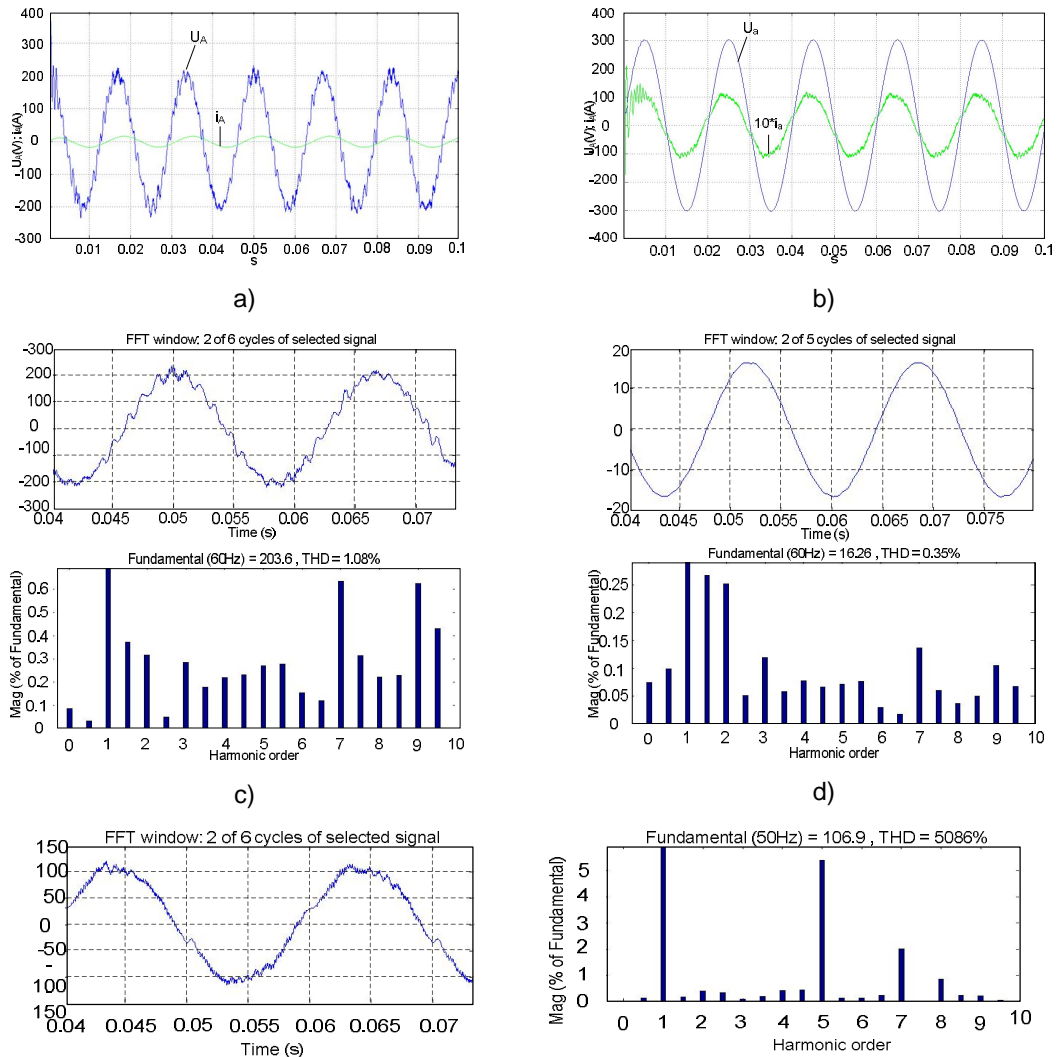
3. Mô phỏng TFIMC

3.1. Mô hình mô phỏng TFIMC trên Matlab



Hình 5. Mô hình mô phỏng TFIMC trên Matlab-Simulink.

3.2. Kết quả mô phỏng



e)

Hình 6. Kết quả mô phỏng khi tải RL, $R = 10\Omega$, $L = 0,02H$, $f_i = 50Hz$, $f_o = 60Hz$.. Điện áp pha và dòng điện: đầu vào (a), đầu ra (b) và phân tích phổ FFT của chúng: điện áp pha đầu ra (c), dòng điện đầu ra (d), dòng điện đầu vào (e).

Nhận xét: Các kết quả mô phỏng cho thấy chất lượng điện áp ra và dòng điện vào đã được đảm bảo, có dạng sin, ổn định. Dòng điện và điện áp trên các pha đầu vào gần trùng pha nhau, chúng tỏ hệ số công suất gần bằng một. Tần số của điện áp đầu ra đạt đúng giá trị mong muốn.

4. Kết luận

Các kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp điều biến vector không gian áp dụng cho TFIMC đã đáp ứng được yêu cầu đặt ra. Trật tự thực hiện các vector đã đơn giản hóa vấn đề chuyển mạch của biến tần ma trận. Kỹ thuật PWM với xung răng cưa chéo được áp dụng cho phía lưới đã giảm tối đa số công PWM phải sử dụng. Một số vấn đề sẽ còn cần thảo luận thêm ở đây như độ cứng của đặc tính ngoài của bộ biến đổi khi tải không đối xứng, độ ổn định, tính chính xác và đáp ứng động của nó trong chế độ làm việc không bình thường.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bùi Quốc Khánh, Trần Trọng Minh, Đặng Hồng Hải, *Xây dựng cấu trúc bộ nguồn biến đổi tần số 50/60Hz kiểu ma trận*, Tuyển tập công trình khoa học Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ 8, Hà Nội 2007.
- [2] Lixiang Wei, Thomas. A Lipo, *A Novel Matrix Converter Topology With Simple Commutation*, IEEE 2001.
- [3] Richard Zhang, *High performance power converter systems for nonlinear and unbalanced load/source*, 1998.

Người phản biện: TS. Trần Anh Dũng