

ĐÁNH GIÁ CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN BIẾN TẦN BA PHA VÀ SỬ DỤNG FPGA TRONG ĐIỀU CHẾ VECTOR KHÔNG GIAN

EVALUATION OF THE METHOD OF THREE-PHASE INVERTER CONTROL AND FPGA USE IN SPACE VECTOR MODULATION

Đoàn Quang Vinh¹, Nguyễn Hữu Việt Siêu²

¹Đại học Đà Nẵng; dqvinhdn@ac.udn.vn

²Công ty Điện tử Foster, Đà Nẵng; sieunguyendn1989@gmail.com

Tóm tắt - Ngày nay các bộ biến tần ba pha được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp... Từ nguồn cung cấp xoay chiều đầu vào, thông qua bộ biến tần cho ra nguồn xoay chiều ba pha với biên độ, tần số và góc pha có thể thay đổi được. Với cấu trúc phần cứng bộ biến đổi giống nhau thông qua các phương pháp điều khiển khác nhau: “điều khiển theo phương pháp độ rộng xung (PWM), điều khiển theo phương pháp hình sao (SPWM), điều khiển theo phương pháp điều chế vector không gian (SVPWM)” sẽ mang lại các kết quả khác nhau. Bài báo này trình bày và đánh giá một số phương pháp điều khiển biến tần ba pha. Các kỹ thuật này được kiểm chứng thông qua kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink và thực nghiệm trên card FPGA Spartan 3E ứng dụng phương pháp điều chế vector không gian điều khiển biến tần ba pha.

Từ khóa - phương pháp vector không gian; điều biến độ rộng xung; điều biến độ rộng xung theo nguyên tắc hình sao; mạch công lập trình dạng trường; mạch tích hợp.

1. Đặt vấn đề

Mục đích chính của bộ biến tần ba pha nguồn áp là biến đổi dạng sóng xoay chiều (dòng điện, điện áp...) đầu vào thành dạng sóng xoay chiều ba pha (lệch nhau 120°) đầu ra với biên độ, tần số và góc pha thay đổi được. Những bộ biến đổi này được ứng dụng rộng rãi trong thực tế như bộ điều khiển tốc độ. Bộ cung cấp nguồn dự phòng (Uninterruptible Power Supplies - UPS), bộ bù công suất phản kháng tĩnh (Static Var Compensator), bộ lọc tích cực (Active Filter), hệ thống truyền tải điện xoay chiều linh hoạt (Flexible Ac Transmission System-FACTS).

Với cấu trúc vật lý giống nhau, thông qua các phương pháp điều khiển khác nhau sẽ mang đến các kết quả khác nhau. Từ các ứng dụng thực tiễn trên, lý thuyết điều khiển biến tần trở thành một vấn đề chính được nghiên cứu, phát triển và cải tiến nhằm giảm biên độ méo dạng sóng hài, tăng biên độ sóng ra ứng với tần số mong muốn.

2. Các phương pháp điều khiển biến tần hiện đại

2.1. Phương pháp điều biến độ rộng xung

2.1.1. Nguyên lý [5, tr.255 - 256]

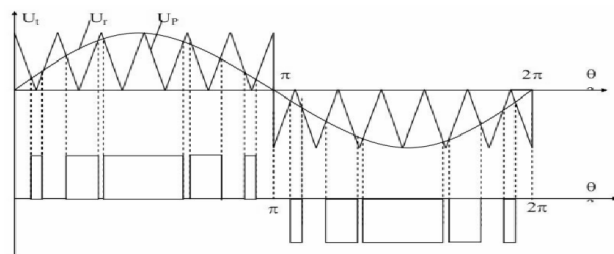
Nội dung của phương pháp này là tạo ra một tín hiệu sin chuẩn có tần số bằng tần số ra của điện áp nghịch lưu mong muốn. Tín hiệu này sẽ được so sánh với tín hiệu răng cưa có tần số lớn hơn rất nhiều so với tần số sin chuẩn ($f_p \geq 10 \text{ kHz}$). Giao điểm của hai tín hiệu này sẽ xác định thời điểm đóng mở van công suất. Điện áp ra có dạng xung với độ rộng thay đổi theo từng chu kỳ.

U_r : là thành phần sin cơ bản, U_p điện áp xung răng cưa, U_o điện áp ra bộ nghịch lưu.

Abstract - Today, three-phase inverters are widely used in industry. From AC input, via inverters for AC three-phase source output with amplitude, frequency and phase angle can be changed. The hardware structure with the same change through various control methods such as control by pulse width modulation (PWM), control by start- pulse width modulation (SPWM), control by space vector pulse width modulation (SVPWM) will produce different results. The paper presents some modulation methods of three-phase inverter control. These techniques are verified through simulation results using Matlab-Simulation software and experimental results using Spartan 3E card FPGA based on Space vector PWM (SVPWM) controller for three-phase inverters.

Key words - space vector PWM (SVPWM); pulse width modulation (PWM); start shape-pulse width modulation (SPWM); field programmable gate array (FPGA); application specific integrated circuit (ASIC).

Trong quá trình điều chế người ta có thể tạo ra xung hai cực hoặc xung một cực, điều biến theo độ rộng xung đơn cực hoặc độ rộng xung lưỡng cực.

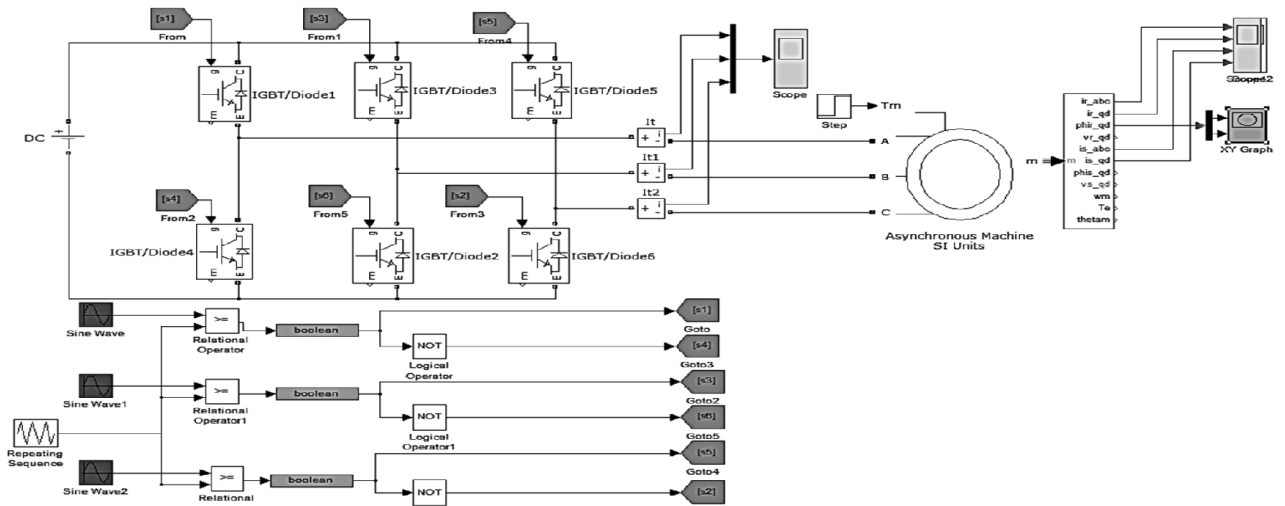


Hình 1. Dạng sóng đầu ra theo phương pháp điều chế độ rộng xung

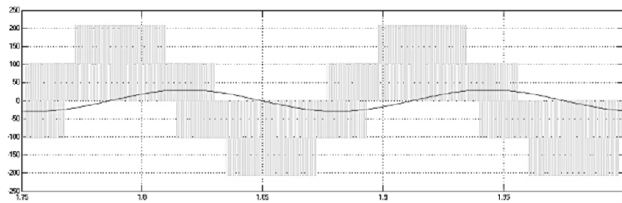
2.1.2. Mô hình và kết quả

Thông qua bộ biến tần ba pha nguồn áp, nguồn xoay chiều đầu vào (tần số f_1) qua bộ chỉnh lưu tạo thành nguồn một chiều (tần số $f=0$), sau đó qua bộ nghịch lưu ba pha tạo ra nguồn xoay chiều ba pha đầu ra (tần số f_2). Do đó phần sau sẽ trình bày mô hình nghịch lưu ba pha với nguồn DC đầu vào cho trước, mô hình được mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink. Kết quả mô phỏng được thể hiện trên các Hình 2, 3, 4.

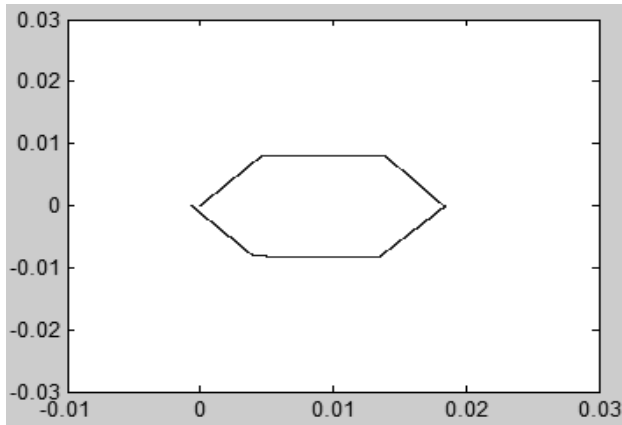
- $U_{dc} = 220 \text{ V}$;
- $U_1 = 220\sin(t)$;
- $U_2 = 220\sin(t - 2\pi/3)$;
- $U_3 = 220\sin(t - 4\pi/3)$;
- Tần số điện áp răng cưa $f = 100 \text{ Hz}$;
- Động cơ không đồng bộ ba pha;
- Công suất $P = 750 \text{ W}$;
- Số đôi cực $p = 4$;
- $R_s = 0,62 \text{ ohm}$, $R_r = 0,022 \text{ ohm}$.



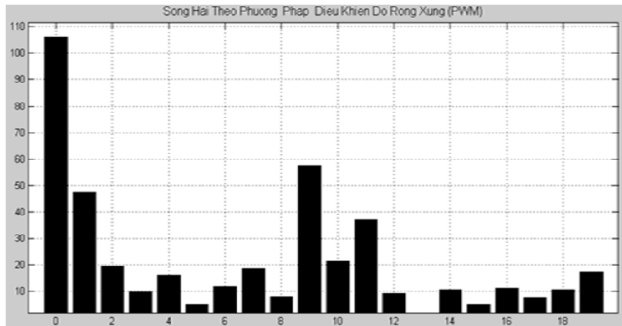
Hình 2. Mô hình biến tần ba pha điều khiển theo phương pháp độ rộng xung



Hình 3. Dòng điện và điện áp pha



Hình 4. Từ thông động cơ ba pha



Hình 5. Phổ sóng hài điện áp pha

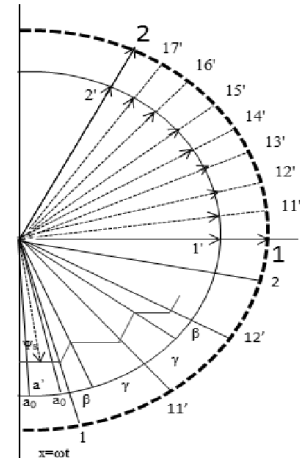
Kết quả

Bằng cách thay đổi hình dạng áp chuẩn, chất lượng của Sin PWM có thể cải thiện. Đây là một phương pháp điều khiển truyền thống có số lần đóng mở các van lớn, thành phần sóng hài bậc cao lớn. Quỹ tích đầu mút vector không gian từ thông động cơ ba pha có dạng hình lục giác. Chất lượng điều khiển theo nguyên lý này thường không cao

2.2. Phương pháp điều chế hình sao

2.2.1. Nguyên lý [7, tr.59 - 64]

Từ kết quả trên, khi bộ nghịch lưu áp điều khiển theo nguyên tắc PWM truyền thống, vector không gian điện áp stator $\vec{u}_s$ nhảy từ vị trí 1 đến vị trí 6, từ thông ψ_s là một đa giác đều 6 cạnh. Tuy nhiên ta có thể làm cho $\vec{u}_s$ di chuyển, thay vì trên một hình sao 6 đỉnh mà là một hình sao n đỉnh thì ψ_s cũng sẽ là một đa giác n cạnh, khi n lớn thì ψ_s sẽ có dạng gần giống đường tròn.



Hình 6. Điều khiển theo phương pháp hình sao

Ví dụ: Xét tổng số đỉnh của hình sao $q=48$, như vậy ngoài 6 vị trí thực đã có của $\vec{u}_s$ ta phải thêm vào một số vị trí ảo của $\vec{u}_s$. Ở đây với $q=48$ ta cần thêm vào giữa hai vị trí thực "1" và "2" bảy vị trí ảo 11', 12', 13', 14', 15', 16', 17'. Góc giữa các vị trí $\sigma=2\pi/q$, vector sẽ lưu lại ở mỗi vị trí một khoảng thời gian $t_\sigma = \sigma/\omega$.

Vị trí ảo 1' được tạo thành bằng cách: vector $\vec{u}_s$ tồn tại trong khoảng thời gian t' mà tại đó ψ_R vẽ được cung $\alpha' = \alpha$. Trong khi ψ_R vẽ tiếp các cung α_0 tổ hợp các van V_1, V_3, V_5 (trạng thái l) hoặc V_2, V_4, V_6 (trạng thái c) được mở, điều này làm cho điện áp trên tải bằng không.

Vị trí ảo 11' được thực hiện bằng cách trong khoảng thời gian t_σ ta sẽ cho các van V_1, V_2, V_3 mở (vị trí thực 2) trong khoảng β là các van V_1, V_2, V_6 mở (vị trí thực 1)

trong khoảng γ . Kết quả dịch chuyển cuối cùng $\overline{\psi}_s$ của động cơ ba pha được biểu diễn trên Hình 6.

Các vị trí còn lại cũng được thực hiện một cách tương tự:

$$\beta = \frac{2\tau \cdot \text{tgt}}{\sqrt{3} - \text{tgt}}$$

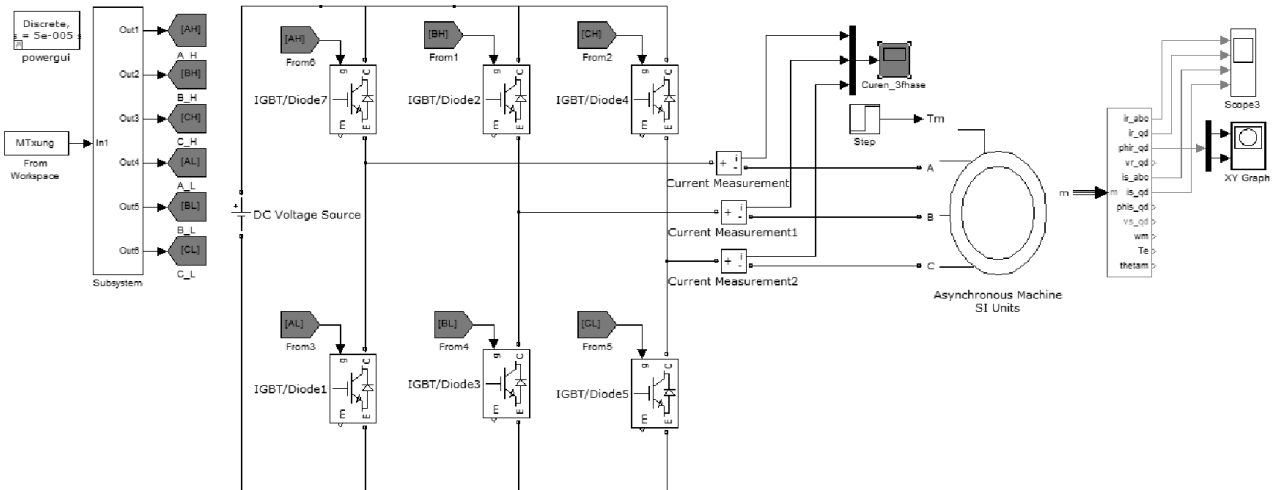
$$\gamma = \sigma - \beta$$

$$\tau = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}\cos\sigma + \sin\sigma}$$

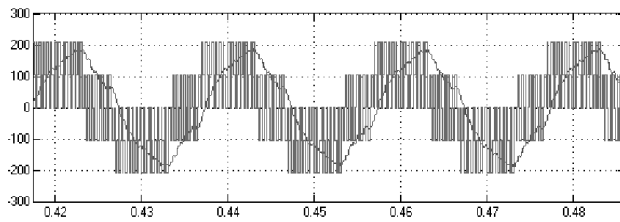
$$\alpha' = \tau \alpha$$

2.2.2. Mô hình và kết quả (thông số như trên)

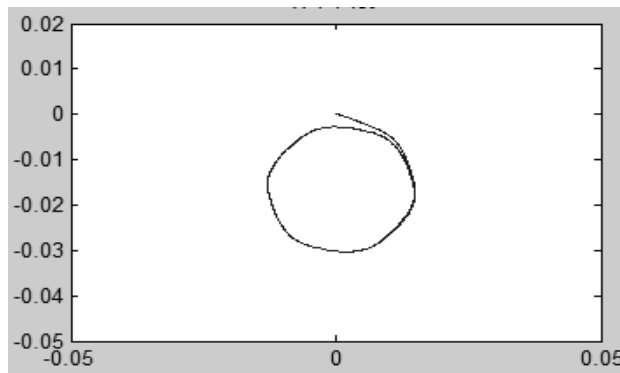
- Số đỉnh hình sao $q=48$;
- Tần số điều khiển $f=50\text{Hz}$.



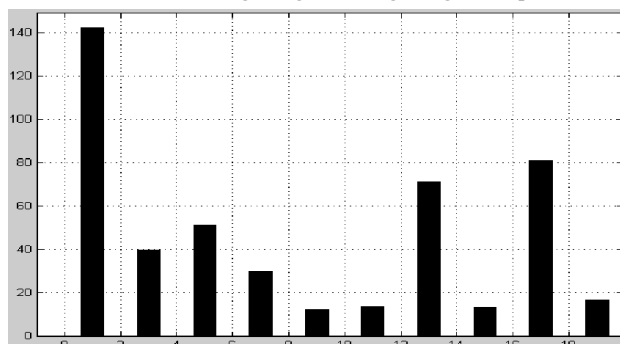
Hình 7. Mô hình điều khiển biến tần theo phương pháp hình sao



Hình 8. Điện áp và dòng điện một pha



Hình 9. Từ thông động cơ không đồng bộ ba pha



Hình 10. Phổ sóng hài điện áp pha

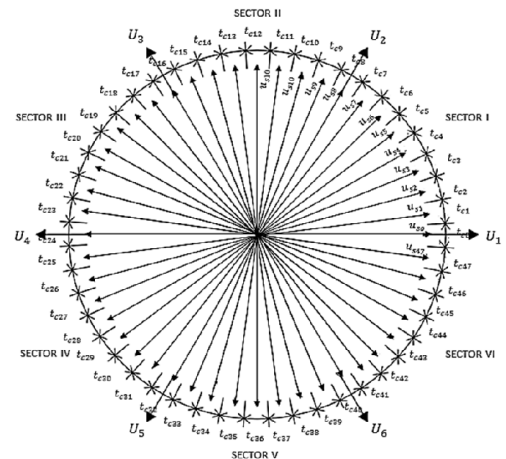
Nhận xét

So với phương pháp điều khiển truyền thống, phương pháp này mang nhiều ưu điểm hơn, quỹ tích đầu mút vector không gian từ thông động cơ có dạng gần giống đường tròn. Chất lượng điều khiển theo nguyên lý này cao hơn và dễ dàng thành lập mối quan hệ giữa trị hiệu dụng điện áp trên tải và điện áp mạch một chiều.

2.3. Phương pháp điều chế vector không gian

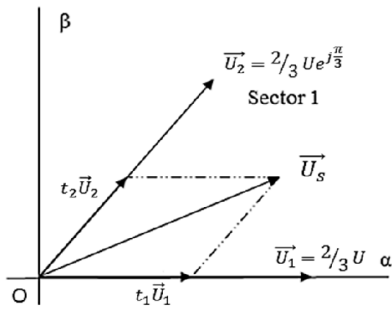
2.3.1. Nguyên lý [6, tr.32 - 52], [10, tr.10 - 21]

Ý tưởng của phương pháp điều chế vector không gian là tạo nên sự dịch chuyển liên tục của vector trên mặt phẳng phức từ các vector ứng với từng trạng thái của bộ nghịch lưu.



Hình 11. Mặt phẳng phức với $q=48$

Để thực hiện điều này ta chia một chu kỳ ra thành nhiều khoảng thời gian bằng nhau, điều này tương đương chia mặt phẳng phức thành các góc bằng nhau. Sau đó cho lần lượt chuyển đổi qua các trạng thái của bộ nghịch lưu. Do vậy, nếu ta chia một chu kỳ đủ nhỏ thì có thể xem đang quay đều.



Hình 12. Cách tạo vector $\vec{u}_s$

Ví dụ, với tổng số khoảng chia $q=48$, trong một chu kỳ lấy mẫu điện áp ba pha (t), ta sẽ chia chu kỳ thành 48 khoảng thời gian bằng nhau (t_c), tương ứng với chia mặt phẳng phức thành 48 góc bằng nhau là $7,5^\circ$. Trong mỗi khoảng thời gian lấy mẫu t_{ci} ta sẽ tạo ra vector điện áp U_{Si} ở chính giữa góc đó $\rightarrow$ ta sẽ có 48 vector U_s .

Trong chu kỳ lấy mẫu t_c , (xét trong sector 1) bộ nghịch lưu ba pha ở trạng thái U_1 trong khoảng thời gian t_1 , trạng thái U_2 trong khoảng thời gian từ $t_1 \rightarrow t_1 + t_2$ và trong khoảng

thời gian còn lại $t_0 = t_c - (t_1 + t_2)$ ở trạng thái 0 (U_0 hoặc U_7).

$$\vec{u}_s = \frac{1}{T_c} \left(\int_0^{t_1} \vec{U}_1 dt + \int_{t_1}^{t_1+t_2} \vec{U}_2 dt + \int_{t_1+t_2}^{t_c} \vec{U}_1 dt \right)$$

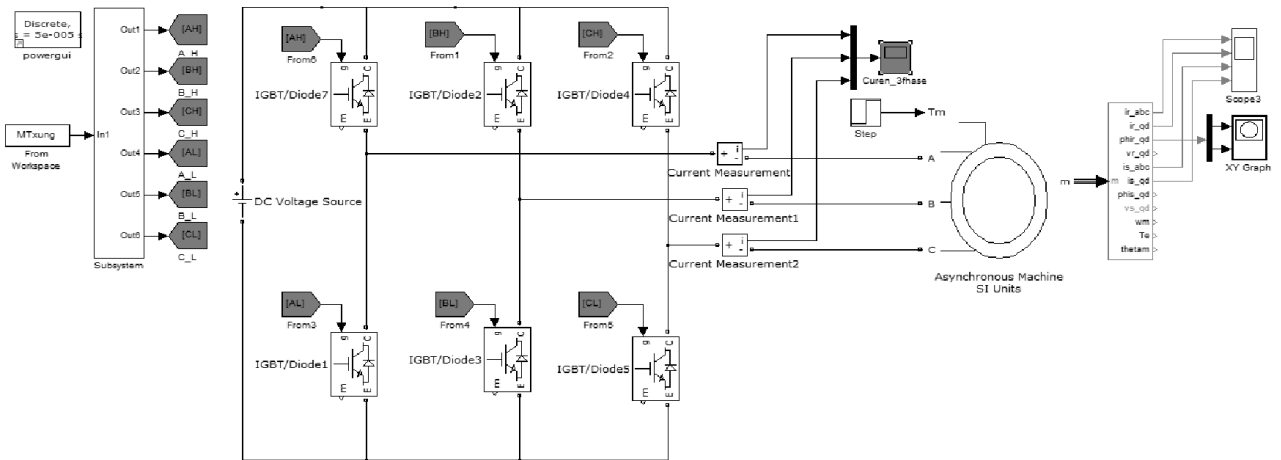
Các van được chuyển mạch theo trình tự có lợi nhất sẽ là trình tự buộc các nhánh van ít phải chuyển mạch nhất. Đó là trình tự đòi hỏi mỗi nhánh chỉ phải chuyển mạch một lần trong cả khoảng t_c .

Bảng 1. Trình tự chuyển mạch các van

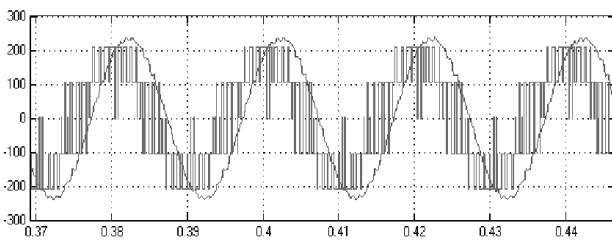
Sector	1	2	3	4	5	6	7
I	U_0	U_1	U_2	U_7	U_2	U_1	U_0
II	U_0	U_3	U_2	U_7	U_2	U_3	U_0
III	U_0	U_3	U_4	U_7	U_4	U_3	U_0
IV	U_0	U_5	U_4	U_7	U_4	U_5	U_0
V	U_0	U_5	U_6	U_7	U_6	U_5	U_0
VI	U_0	U_1	U_6	U_7	U_6	U_1	U_0

2.3.2. Mô hình và kết quả (thông số như trên)

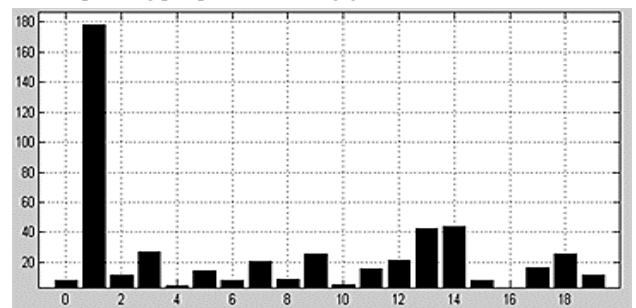
- Số khoảng chia $q=48$;
- Tần số điều khiển $f=50$ Hz.



Hình 13. Mô hình điều khiển biến tần ba pha theo phương pháp vector không gian



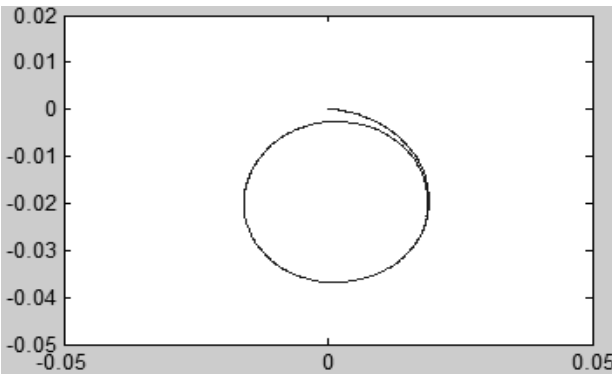
Hình 14. Dòng điện và điện áp pha



Hình 16. Phổ sóng hài điện áp pha

Nhận xét

Phương pháp điều chế vector không gian về cơ bản là phương thức thay thế vector điện áp ba pha đối xứng thành một vector quay trong không gian. Như vậy thay vì phải tính toán trên ba pha ta chỉ cần tính toán trên hệ trục hai pha theo độ lớn và góc pha của đại lượng vector quay. Là một phương pháp có tính hiện đại, phương pháp này có giá trị điện áp tốt nhất và dạng sóng dòng điện tải gần sin nhất trong các phương pháp. Quỹ tích đầu mút động cơ ba pha gần giống hình tròn. Giá trị sóng hài điện áp so với hai phương pháp còn lại thấp hơn.



Hình 15. Từ thông động cơ không đồng bộ ba pha

2.4. Phân tích phổ sóng hài

Bảng 2. Phân tích phổ sóng hài

Bậc	Biên độ sóng hài (V)		
	PWM	Start PWM	SVPWM
DC	152,95	0	0
1	45,62	135,5	203,5
2	28,1	0	14,11
3	5,09	16,03	20,87
4	8,39	0	1,22
5	12,52	32,8	5,61
6	4,77	0	12,5
7	4,42	85,3	16,34
8	8	0	3,77
9	4,18	30,22	6,04
10	5,19	0	14,67
11	5,48	37,06	16,2
12	3,21	0	21,97
13	7,28	22,38	13,77
14	3,67	0	37,96
15	2,15	32,8	13,55
16	11,14	0	15,96
17	2,33	61,4	8,3
18	9,4	0	26,02
19	33,2	17,68	7,61

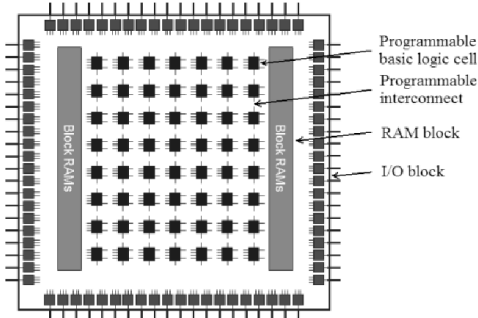
Từ kết quả ở Bảng 2 và các Hình 5, 10, 16 ta nhận thấy rằng phổ sóng hài nhận được khi điều khiển biến tần ba pha theo phương pháp điều chế vector không gian tốt hơn hai phương pháp còn lại. Phương pháp này đặc biệt hiệu quả khi áp dụng cho hệ thống truyền động công suất lớn và tốc độ quay thấp.

Từ các kết quả phân tích trên, ta tiến hành thiết kế và điều khiển biến tần ba pha nguồn áp. Đó là sự kết hợp giữa phương pháp điều khiển hiện đại (SVPWM) và công nghệ tiên tiến hiện nay (FPGA)

2.5. Ứng FPGA điều khiển biến tần ba pha

2.5.1. Lợi ích khi sử dụng FPGA

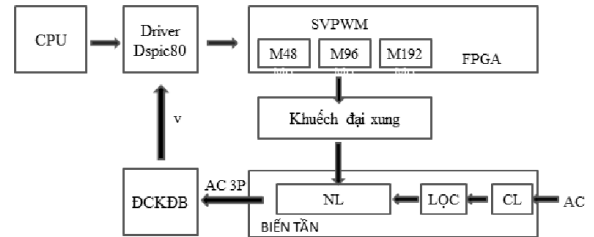
Các bộ xử lý tín hiệu số (Digital Signal Processor) và vi điều khiển là những cỗ máy “tuần tự”, thực thi nhiệm vụ một cách tuần tự, thế nên cần thời gian để hoàn thành các nhiệm vụ. Các thiết bị này đã không còn theo kịp với những ứng dụng đòi hỏi hiệu suất cao và tính linh hoạt hơn mà không cần tăng chi phí tài nguyên.



Hình 17. Cấu trúc cơ bản của FPGA

Công nghệ FPGA (Field -Programmable Gate Array) đã xuất hiện như một giải pháp cơ bản cho vấn đề tranh thủ thời gian và chi phí thấp, tạo nên sức cạnh tranh lớn trên thị trường. FPGA là một thiết bị cấu trúc logic có thể được người sử dụng lập trình trực tiếp mà không phải sử dụng bất kỳ một công cụ chế tạo mạch tích hợp nào.

2.5.2. Mô hình điều khiển và kết quả



Hình 18. Sơ đồ hệ thống

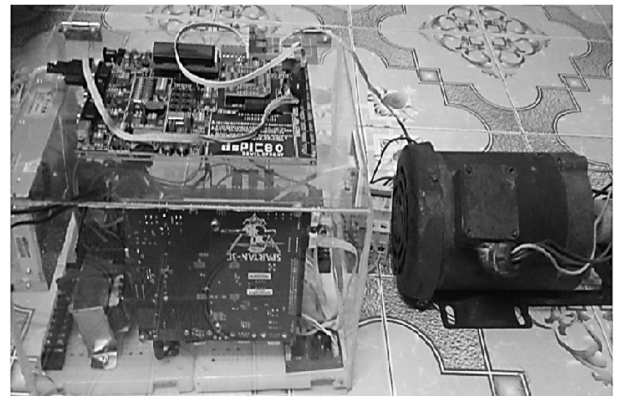
Sử dụng phương pháp “vector không gian” điều khiển biến tần ba pha nguồn áp nhằm điều khiển động cơ không đồng bộ ba pha hoạt động trong dải công suất từ 0 đến 50Hz, được chia làm ba chế độ khác nhau:

- Mode 1: $0 < f < 20$ q=192;
- Mode 2: $20 < f < 35$ q= 96;
- Mode 3: $f > 35$ q=48.

Cấu trúc điều khiển gồm:

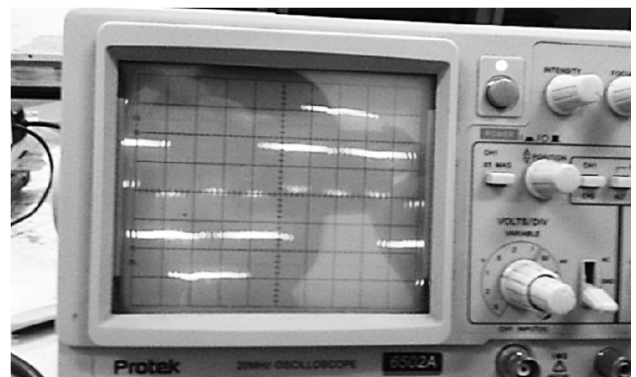
- 1: CPU cài đặt tần số điều khiển (f);
- 2: Driver dspic18 nhận tần số điều khiển (f) từ CPU → xác định chế độ điều khiển biến tần (Mode), gửi dữ liệu (2 byte) tới FPGA;
- 3: Card FPGA nhận tín hiệu điều khiển và chế độ hoạt động, xuất xung điều khiển biến tần ba pha;
- 4: Mạch lái nhận tín hiệu từ FPGA lái các van IGBT của mạch nghịch lưu;
- 5: Mạch nghịch lưu ba pha;
- 6: Động cơ không đồng bộ ba pha.

Mô hình

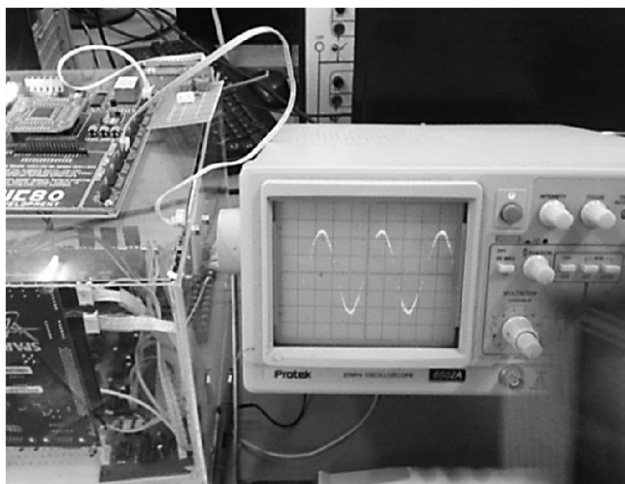


Hình 19. Mô hình thực tế

Kết quả



Hình 20. Điện áp pha



Hình 21. Dòng điện pha

Nhận xét

Mô hình thực nghiệm đã cho kết quả về dòng điện và điện áp đúng với trong mô phỏng. Khi thay đổi tần số điều khiển từ 0 đến 50 Hz tốc độ động cơ thay đổi đúng theo yêu cầu thiết kế.

3. Kết luận

Việc kết hợp giữa công nghệ mới tiên tiến hiện nay với phương pháp điều khiển hiện đại, nâng cao khả năng ổn

định, hiệu quả, dễ điều khiển của hệ thống. So sánh các kết quả mô phỏng trên Matlab-Simulink và kết quả nhận được trên thực tế đã cho thấy tính đúng đắn của thiết kế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Phùng Quang, *Điều khiển tự động truyền động điện xoay chiều ba pha*, (tái bản lần thứ 1), Nxb Giáo dục, Hà Nội, 1998.
- [2] Nguyễn Phùng Quang, *Truyền động điện thông minh*, Nxb Khoa học và Kỹ thuật, 2009.
- [3] Nguyễn Phùng Quang, *Matlab & Simulink dành cho kỹ sư điều khiển tự động*, (tái bản lần thứ 5), Nxb Khoa học và Kỹ thuật, 2008.
- [4] Lê Văn Doanh, Nguyễn Thế Công, Trần Văn Thịnh, *Điện tử công suất lý thuyết - Thiết kế - Mô phỏng - Ứng Dụng*, Nxb Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2008.
- [5] Trần Trọng Minh, *Giáo trình điện tử công suất*, Nxb Giáo dục Việt Nam, 2012.
- [6] Nguyễn Anh Tuấn, *Ứng dụng FPGA điều khiển động cơ không đồng bộ ba pha theo phương pháp Vector không gian trên mô hình thí nghiệm ASCM-62200*, Đại học Đà Nẵng, 2012.
- [7] Đoàn Quang Vinh, Nguyễn Mạnh Hà, Nguyễn Công Hiền, “Điều biến độ rộng xung (PWM) theo nguyên tắc hình sao”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, (số 17), tr.59 – tr.64, 1998.
- [8] Phạm Quốc Hải, *Hướng dẫn thiết kế điện tử công suất*, Nxb Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2009.
- [9] Thavali, *Spartan – 3E Starter Kit*, Đại học Khoa học Tự nhiên HCM, 2012.
- [10] Nguyễn Huỳnh Quang, *Điều khiển động cơ không đồng bộ ba pha sử dụng vi điều khiển pic 18F4431 theo phương pháp Vector không gian*, Đại học Bách khoa HCM, 2007.

(BBT nhận bài: 17/08/2014, phản biện xong: 06/12/2014)