

NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP THIẾT KẾ BỘ BIẾN TẦN CHO HỆ TRUYỀN ĐỘNG TỐC ĐỘ CAO DÙNG ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU

RESEARCHING SOLUTIONS OF DESIGNING INVERTERS FOR HIGH-SPEED ELECTRIC DRIVER SYSTEM USING PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Nguyễn Đức Quang^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.245>

TÓM TẮT

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM) sử dụng nam châm vĩnh cửu nên có khối lượng nhỏ, mômen quán tính thấp giúp cho đáp ứng mômen nhanh hơn, cường độ từ trường lớn, thể tích giảm nên PMSM có hiệu suất cao giảm chi phí và kích thước biến tần. Ngoài ra, rotor PMSM không sinh nhiệt, giúp quá trình tản nhiệt trong động cơ tốt hơn, một số PMSM được thêm mômen từ trở trong dải điều khiển giảm từ thông nên có dải công suất rộng. Bài báo này tập trung nghiên cứu giải pháp thiết kế bộ biến tần cho hệ truyền động tốc độ cao dùng động cơ PMSM gồm các nội dung: Cấu trúc biến tần, giải pháp điều chế, đánh giá chất lượng điện áp, phân tích lựa chọn phần cứng, đánh giá tổn hao và hiệu năng của biến tần khi làm việc ở tần số cao.

Từ khóa: Động cơ đồng bộ, PMSM, biến tần, truyền động điện tốc độ cao.

ABSTRACT

Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) uses permanent magnets, so it has small mass, low moment of inertia for faster torque response, large magnetic field strength, and reduced volume, so PMSM has high performance reduces the cost and size of the inverter. In addition, the PMSM rotor does not generate heat, which helps to dissipate heat in the motor better, some PMSMs have added reluctance torque in the flux reduction control range, so they have a wide power range. This paper focuses on researching solutions to design inverters for high-speed electric driver system using PMSM motors, including the following contents: Inverter structure, modulation solutions, voltage quality assessment, analysis and selection, hardware selection, loss assessment and inverter performance when working at high frequency.

Keywords: Synchronous motor, PMSM, inverter, high speed electric driver.

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: nguyenducquang@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 21/02/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 26/6/2023

Ngày chấp nhận đăng: 25/12/2023

KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
U_p	V	Điện áp hiệu dụng pha

U_d	V	Điện áp hiệu dụng dây
u_{sa}	V	Điện áp tức thời pha A
u_{sb}	V	Điện áp tức thời pha B
u_{sc}	V	Điện áp tức thời pha C
V_{in}	V	Điện áp nguồn một chiều đầu vào
V_{dc}	V	Điện áp một chiều trên tụ lọc nguồn
Z_a	Ω	Tổng trở tải pha A
Z_b	Ω	Tổng trở tải pha B
Z_c	Ω	Tổng trở tải pha C
ω	Rad/s	Tần số góc
M_c	Nm	Mô men cần đặt lên trục động cơ
n	v/p	Tốc độ động cơ

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các ứng dụng truyền động điện đã được áp dụng trên toàn thế giới trong nhiều lĩnh vực khác nhau như: Hệ thống truyền động điện công nghiệp, máy sản xuất, robot công nghiệp, giao thông vận tải. Hiện nay, cùng với sự phát triển của kỹ thuật vi xử lý, máy tính, và kỹ thuật điện tử, điện tử công suất. Truyền động điện tốc độ cao được triển khai ứng dụng và ngày càng phát triển như trong một số lĩnh vực xe điện, xuống máy tốc độ cao, phương tiện bay chạy điện, máy li tâm lạnh..., đặt ra nhiều vấn đề cần phải nghiên cứu, thiết kế, nâng cao chất lượng và hiệu năng của các bộ biến đổi.

Hệ thống truyền động điện được cấu thành bởi hai thành phần chính: Bộ chuyển đổi điện tử công suất và máy điện. Trong bài báo này, tác giả trình bày giải pháp điều khiển và thiết kế biến tần cho hệ truyền động điện tốc độ cao sử dụng động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM), tập trung vào các nội dung chính bao gồm: Đặc điểm của động cơ PMSM, phương pháp điều khiển PMSM, cấu trúc biến tần cho hệ PMSM tốc độ cao, giải pháp điều chế inverter đồng bộ PWM, tính toán thiết kế mạch van và tính toán tổn hao, hiệu năng của bộ biến đổi khi làm việc ở tần số cao.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (Permanent Magnet Synchronous Motor)

- PMSM sử dụng nam châm vĩnh cửu nên có khối lượng nhỏ, mômen quán tính thấp giúp cho đáp ứng mômen nhanh hơn.

- Cường độ từ trường lớn, thể tích giảm nên PMSM có hiệu suất cao hơn động cơ đồng bộ kích từ bằng cuộn dây (Wound Field Synchronous Machine - WFSM) và động cơ không đồng bộ (Induction Motor - IM), giảm chi phí và kích thước biến tần.

- Không có tổn thất đồng ở rotor, nên rotor PMSM không sinh nhiệt, giúp quá trình tản nhiệt trong động cơ tốt hơn.

- Một số PMSM được thêm mômen từ trở trong dải điều khiển giảm từ thông nên có dải công suất rộng.

2.2. Phương pháp điều khiển Vector động cơ PMSM

Tư tưởng của phương pháp điều khiển vector xuất phát từ nguyên lý điều khiển của động cơ điện một chiều (Direct Current - DC). Động cơ điện DC có đặc tính điều khiển đơn giản, từ thông được sinh ra bởi dòng điện kích từ và mômen được sinh ra nhờ dòng điện phần ứng của động cơ. Hai dòng điện này là độc lập và có thể điều khiển dễ dàng, do đó ta có thể điều khiển độc lập từ thông và mômen của động cơ.

- Công thức chuyển đổi Clarke biểu diễn vector dòng điện stator i_s gồm i_a, i_b, i_c trong hệ tọa độ stator cố định a - b - c thành một vector gồm hai thành phần xoay chiều i_α, i_β trong hệ tọa độ trục giao đứng yên α - β , trục α trùng với trục dây quấn pha a của động cơ.

+ Hai dòng điện i_α, i_β là hai dòng điện xoay chiều hình sin.

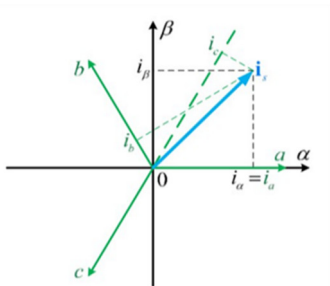
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

- Công thức chuyển đổi Park

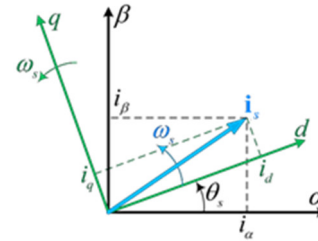
+ Vector dòng điện trong hệ tọa độ α - β là vector vẫn quay với tần số góc của từ trường quay stator, vì vậy, dòng điện i_α, i_β là các dòng xoay chiều.

+ Để đơn giản trong điều khiển, các dòng điện xoay chiều này được biểu diễn thành hai dòng điện một chiều i_d, i_q .

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$



Hình 1. Vector dòng điện stator trên hai hệ tọa độ cố định stator và α - β



Hình 2. Vector dòng điện stator trên hệ tọa độ cố định α - β và hệ tọa độ quay d - q

2.3. Truyền động điện tốc độ cao

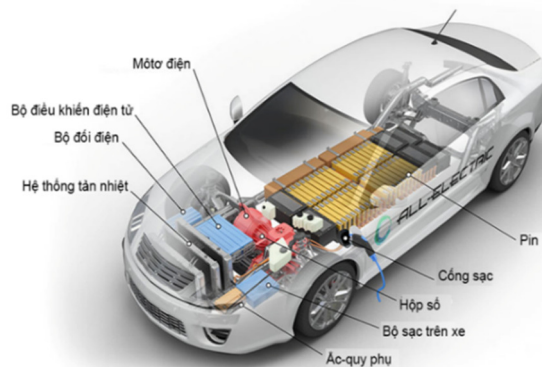
Các ứng dụng truyền động điện đã được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau như: Hệ thống truyền động điện công nghiệp, máy sản xuất, robot công nghiệp, giao thông vận tải. Hiện nay, cùng với sự phát triển của kỹ thuật vi xử lý, máy tính, và kỹ thuật điện tử, điện tử công suất. Truyền động điện tốc độ cao đặt ra nhiều vấn đề cần phải nghiên cứu, thiết kế, nâng cao chất lượng và hiệu năng của các bộ biến đổi.

- Ứng dụng của truyền động điện tốc độ cao: Hệ truyền động điện tốc độ cao ứng dụng trên xe ô tô điện.

Ví dụ:

+ Ô tô điện vinfast VF8: Thời gian tăng tốc 0 - 100km/h: < 5,5s; Công suất tối đa: 300kW - 402hp; Mô-men xoắn cực đại: 640Nm

+ Máy ly tâm lạnh thể tích lớn ZK 496: Tốc độ ly tâm tối đa: 10.500 vòng/phút; Lực ly tâm tối đa: 16,022 xg; Khoảng tốc độ: 200 - 10.500 vòng/phút; Nguồn điện: 230V, 50 - 60Hz; Công suất: 2,3kW.



Hình 3. Bố trí thiết bị trên ô tô điện



Hình 4. Máy ly tâm lạnh thể tích lớn ZK 496

Bảng 1. Thông số ô tô điện sử dụng động cơ PMSM làm việc ở tốc độ cao

STT	Model	Type	DC-Link (V)	Max. f_1 (Hz)	Max. speed (r/min)	Power (kW)
1	Nissan Leaf (2012)	BEV	345	693	10.390	80
2	Tesla Model S 70D (2015)	BEV	375	493	-	193
3	Chevy Volt (2016)	PHEV	430	800	12.000	180
4	Cadillac CT6 (2016)	PHEV	360 - 430	667	-	215
5	Toyota Prius (2016)	HEV	600	1133	-	162
6	Tesla Model 3 (2017)	BEV	375/400	900	18.000	192
7	Nissan Leaf (2017)				10.390	80
8	BMW iX3 (2020)	-	-	-	15.000	210

Nguồn: *Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles, Explore IEEE [7]*

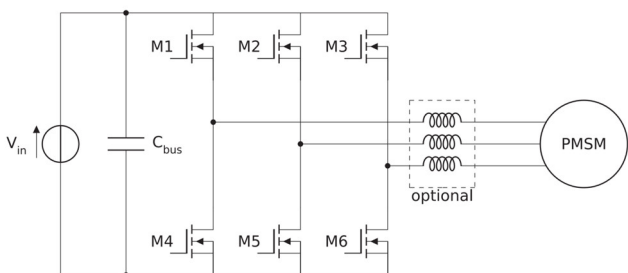
2.4. Giải pháp thiết kế inverter tần số cao

2.4.1. Kiểu biến tần

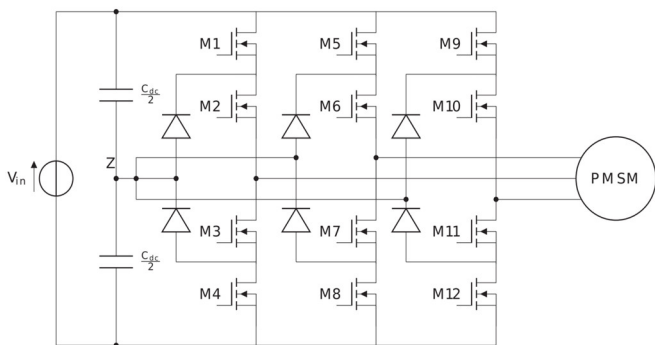
Có ba kiến trúc khác nhau được đưa ra [5]:

- Biến tần nguồn điện áp (VSI)
- Biến tần nguồn dòng (CSI) thường chỉ được sử dụng trong các cài đặt công suất rất cao vì khả năng làm méo dòng điện thấp hơn
- Biến tần có điểm kẹp trung tính (NPC).

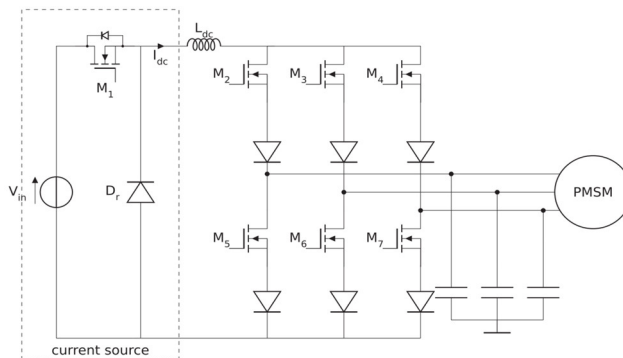
Chế độ hoạt động của ba bộ chuyển đổi cơ bản giống nhau: Nguồn điện, được lọc thích hợp để tạo thành nguồn DC, được đưa vào một mạch nghịch lưu để tạo ra các dạng sóng đầu ra mong muốn. Tần số của biến tần sẽ quyết định tốc độ động cơ PMSM



Hình 5. Sơ đồ nghịch lưu nguồn áp



Hình 6. Sơ đồ nghịch lưu NPC



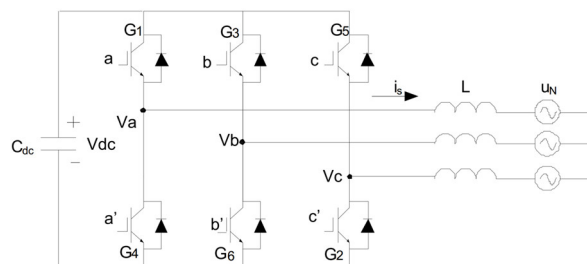
Hình 7. Sơ đồ nghịch lưu nguồn dòng CSI

Mỗi sơ đồ có các ưu điểm khác nhau, kết quả và các đánh giá chi tiết được trình bày ở các nghiên cứu khác. Tùy theo mục tiêu sử dụng, tiêu chuẩn của hệ thống để lựa chọn bộ biến đổi phù hợp. Trong nghiên cứu này, nhóm nghiên cứu lựa chọn cấu trúc biến tần nguồn áp VSI.

2.4.2. Giải pháp điều chế vector

Các phương pháp điều chế gồm: Phương pháp điều chế chuẩn, phương pháp điều chế đồng bộ, phương pháp điều chế ngẫu nhiên. Giải pháp điều chế sẽ ảnh hưởng đến dạng điện áp, dòng điện trên tải, tổng méo hài TDH, tổn hao và hiệu năng của bộ biến đổi, tiếng ồn của hệ thống khi vận hành ở tốc độ cao. Trong phạm vi bài báo này, tác giả thực hiện giải pháp điều chế Vector SVM điều chế chuẩn, các giải pháp điều chế khác tác giả sẽ tiếp tục phát triển trong các nghiên cứu tiếp theo.

- Cấu trúc bộ nghịch lưu nguồn áp sử dụng phương pháp điều chế SVM như sau:

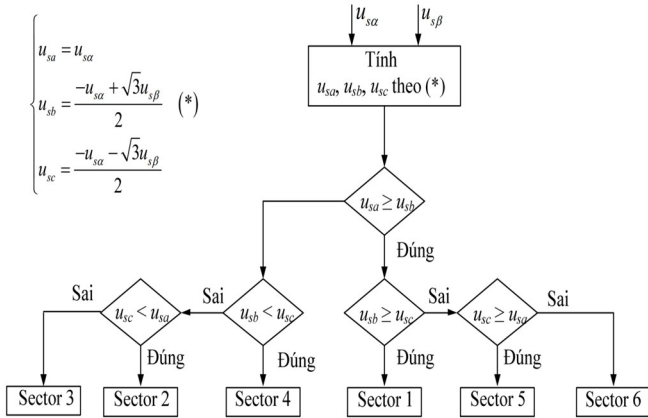


Hình 8. Cấu trúc bộ nghịch lưu nguồn áp

- Quy ước trạng thái logic 1 tương ứng với van nhánh trên nối với cực dương, 0 van nhánh dưới nối với cực âm nguồn 1 chiều.

Bảng 2. Bảng giá trị điện áp các trạng thái đóng cắt van

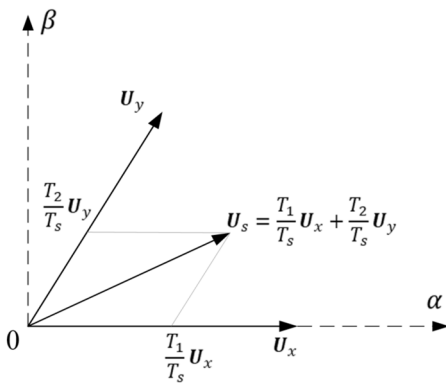
NO	Van dẫn	u_a	u_b	u_c	u_{ab}	u_{bc}	\bar{u}
\bar{u}_0	V_2, V_4, V_6	0	0	0	0	0	0
\bar{u}_1	V_6, V_1, V_2	$2/3 V_{dc}$	$-1/3 V_{dc}$	$-1/3 V_{dc}$	V_{dc}	0	$2/3 V_{dc} \angle 0$
\bar{u}_2	V_1, V_2, V_3	$1/3 V_{dc}$	$1/3 V_{dc}$	$-2/3 V_{dc}$	0	V_{dc}	$2/3 V_{dc} \angle (\pi/3)$
\bar{u}_3	V_2, V_3, V_4	$-1/3 V_{dc}$	$2/3 V_{dc}$	$-1/3 V_{dc}$	$-V_{dc}$	V_{dc}	$2/3 V_{dc} \angle (2\pi/3)$
\bar{u}_4	V_3, V_4, V_5	$-2/3 V_{dc}$	$1/3 V_{dc}$	$1/3 V_{dc}$	$-V_{dc}$	0	$2/3 V_{dc} \angle (-\pi)$
\bar{u}_5	V_4, V_5, V_6	$-1/3 V_{dc}$	$-1/3 V_{dc}$	$2/3 V_{dc}$	0	$-V_{dc}$	$2/3 V_{dc} \angle (-2\pi/3)$
\bar{u}_6	V_5, V_6, V_1	$1/3 V_{dc}$	$-2/3 V_{dc}$	$1/3 V_{dc}$	V_{dc}	$-V_{dc}$	$2/3 V_{dc} \angle (-\pi/3)$
\bar{u}_7	V_1, V_3, V_5	0	0	0	0	0	0



Hình 9. Thuật toán xác định vector điện áp đặt trong mỗi sector

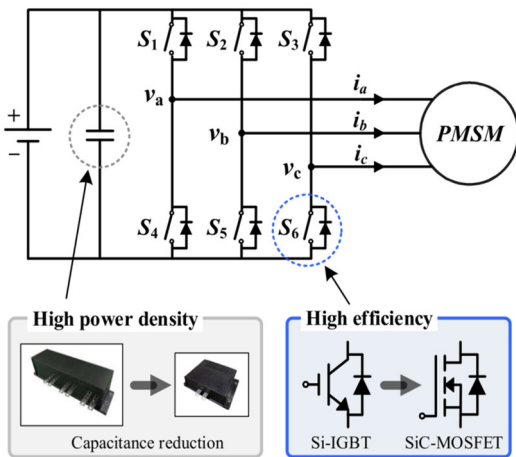
Ngoài ra phương pháp SVM, còn có phương pháp SinPWM có hàm điều chế dạng hình sin với tần số bằng tần số điện áp mong muốn sau khi nghịch lưu, và hàm điều chế được so sánh với sóng mang tam giác cân có biên độ từ -1 đến 1.

Tuy nhiên, nếu so sánh phương pháp này với phương pháp SVM, thì phương pháp SVM có nhiều ưu điểm hơn so với phương pháp SinPWM. Do đó, tác giả sẽ sử dụng phương pháp SVM để tạo các xung chuyển mạch cho các van của mạch nghịch lưu nguồn áp ba pha.

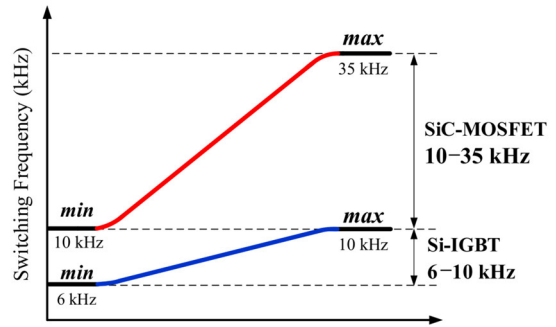


Hình 10. Nguyên tắc điều chế vector điện áp

2.4.3. Chọn van công suất cho bộ inverter



Hình 11. Mạch nghịch lưu và van công suất [6]

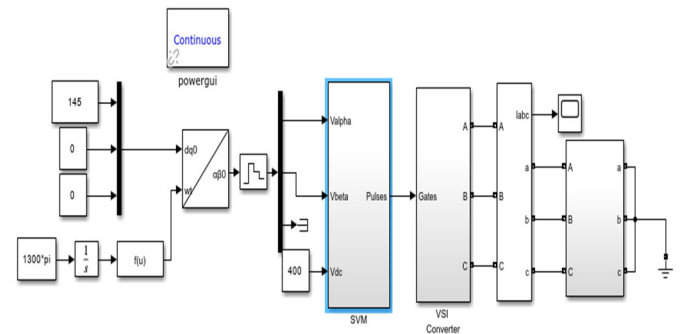


Hình 12. Vùng làm việc của van Si-IGBT và SiC MOSFET [6]

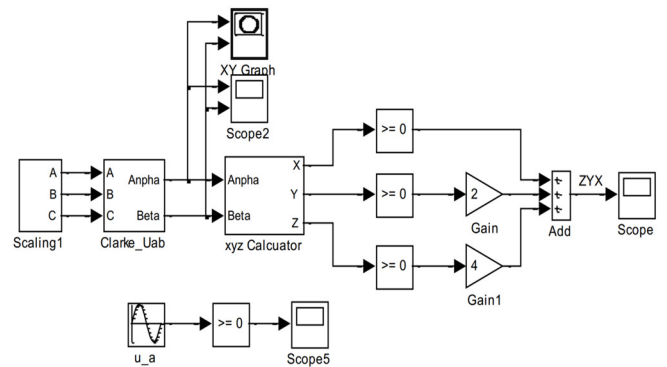
Trong nghiên cứu này, tần số PWM đến 10kHz nên chọn van là Si-IGBT.

2.4.4. Mô phỏng trên Matlab Simulink

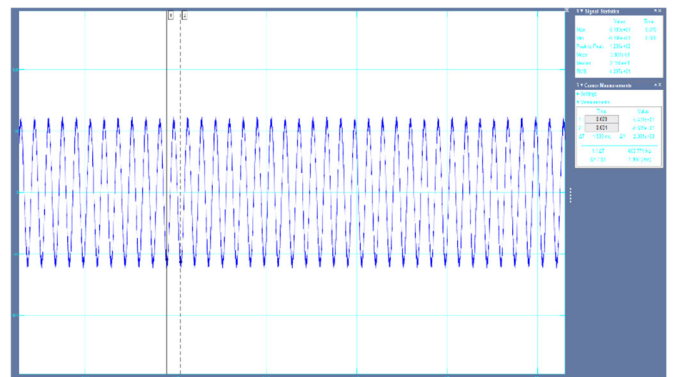
Thực hiện mô phỏng theo phương pháp điều chế chuẩn [1] với sơ đồ, mô hình mô phỏng như hình 13, 14.



Hình 13. Sơ đồ mô phỏng nghịch lưu nguồn áp bằng Matlab Simulink

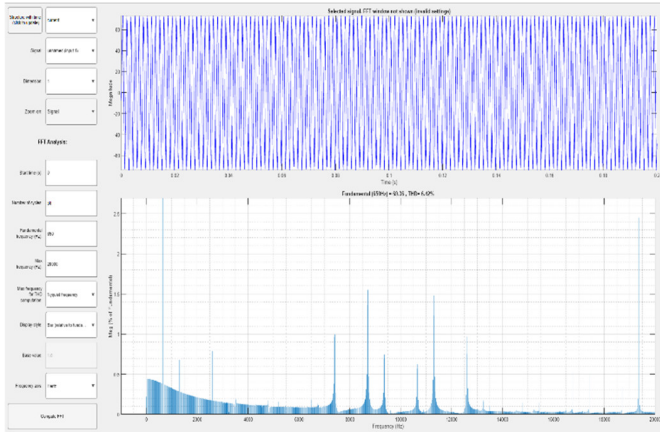


Hình 14. Mô hình mô phỏng khối lựa chọn sector



Hình 15. Đồ thị dạng dòng điện pha ở tần số 653Hz

Nhận xét: Phương pháp điều chế chuẩn cho đáp ứng dạng dòng điện xấp xỉ hình sin ở tần số 653Hz như phân tích trên cơ sở lý thuyết.



Hình 16. Đồ thị dạng dòng điện pha và nhiễu hài THD ở tần số 650Hz

Nhận xét: Tổng nhiễu hài THD là 6,42% với bộ inverter là kết quả tương đối tốt.

2.4.5. Tính toán tổn hao trên van

Tổn hao trên van gồm 2 loại: Tổn hao dẫn P_{cond} và tổn hao đóng cắt P_{sw}

$$P_I = P_{cond} + P_{sw} \tag{1}$$

a) Tính toán tổn hao dẫn trên van IGBT

Điện áp qua van IGBT được xác định theo phương trình sau:

$$u_{CE}(i_C) = u_{CE0} + r_C \cdot i_C \tag{2}$$

Với u_{CE0} , r_C được xác định từ datasheet của van.

Công suất tiêu tán qua van IGBT được xác định:

$$P_{CT}(t) = u_{CE}(t) \cdot i_C(t) = u_{CE0} \cdot i_C(t) + r_C \cdot i_C^2(t) \tag{3}$$

$$P_{CT} = \frac{1}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} P_{CT}(t) dt \tag{4}$$

$$= \frac{1}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} u_{CE0} \cdot i_C(t) + r_C \cdot i_C^2(t) dt = u_{CE0} \cdot I_{cav} + r_C \cdot i_{Crms}^2$$

Trong đó, I_{cav} , i_{Crms} là giá trị dòng trung bình và giá trị dòng hiệu dụng qua van IGBT.

- Tính toán tổn hao dẫn trên van diode

Điện áp qua van diode được xác định theo phương trình sau:

$$u_D(i_D) = u_{D0} + r_D \cdot i_D \tag{5}$$

Công suất tiêu tán qua van diode được xác định:

$$P_{CD}(t) = u_D(t) \cdot i_D(t) = u_{D0} \cdot i_D(t) + r_D \cdot i_D^2(t) \tag{6}$$

$$P_{CD} = \frac{1}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} P_{CD}(t) dt \tag{7}$$

$$= \frac{1}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} u_{D0} \cdot i_D(t) + r_D \cdot i_D^2(t) dt = u_{D0} \cdot I_{Dav} + r_D \cdot i_{Drms}^2$$

Trong đó, I_{Dav} , i_{Drms} lần lượt là giá trị dòng trung bình và giá trị dòng hiệu dụng qua van diode.

Thông số tính toán tổn hao với động cơ 3 pha có các thông số tính toán như bảng 3.

Bảng 3. Thông số động cơ mô phỏng

Tên thông số	Giá trị	Tên thông số	Giá trị
Điện áp DC	$U_{DD} = 400V$	Trở kháng tương đương của động cơ	$L = 2,3 \cdot 10^{-4}H$
Điện áp dây đầu ra	$U_o = 177V$	Tần số đóng cắt	$f_{sw} = 10kHz$
Dòng hiệu dụng đầu ra	$I_{orms} = 57,56A$	Tần số cơ bản điện áp ra	$f_0 = 650Hz$
Hệ số công suất của động cơ	$\cos\varphi = 0,85$	Hệ số điều chế biên độ	$m_a = 0,723$

Xác định các thông số từ datasheet:

$$U_{CE0} = 1,3V$$

$$r_C = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} = \frac{2,2 - 1,73}{30 - 15} = 0,031\Omega$$

$$U_{D0} = 1,7V$$

$$r_D = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D} = \frac{2,5 - 2,1}{30 - 15} = 0,027\Omega$$

Tổn hao dẫn trên 1 van IGBT:

$$P_{CT} = u_{CE0} \cdot I_{cav} + r_C \cdot i_{Crms}^2$$

$$= u_{CE0} \cdot I_o \cdot \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{m_a \cdot \cos\Phi_1}{8} \right) + r_C \cdot I_o^2 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{m_a \cdot \cos\Phi_1}{3\pi} \right)$$

$$= 64,04(W)$$

Tổn hao dẫn trên 1 van diode:

$$P_{CD} = u_{D0} \cdot I_{Dav} + r_D \cdot i_{Drms}^2$$

$$= u_{D0} \cdot I_o \cdot \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{m_a \cdot \cos\Phi_1}{8} \right) + r_D \cdot I_o^2 \cdot \left(\frac{1}{8} - \frac{m_a \cdot \cos\Phi_1}{3\pi} \right) = 22,11(W)$$

b) Tính toán tổn hao đóng cắt trên van

- Giá trị DC tương đương được tính:

$$I_{DC} = \frac{1}{\pi} \cdot I_o = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{rms} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot 57,56 = 25,91(A)$$

Chọn $t_{on} = t_{off} = 0,3\mu s$, $t_{rr} = 0,4 \mu s$. Tổn hao đóng cắt trên 1 van IGBT:

$$P_{swT} = (E_{onT} + E_{offT}) \cdot f_{sw} = \frac{1}{2} \cdot I_{DC} \cdot U_{DD} \cdot f_{sw} \cdot (t_{on} + t_{off}) = 31,092(W)$$

- Tổn hao đóng cắt trên 1 van diode:

$$P_{swD} = \frac{1}{2} \cdot (E_{onD} + E_{offD}) \cdot f_{sw} \approx \frac{1}{2} \cdot E_{onD} \cdot f_{sw} = 20,73(W)$$

c) Tính toán tổng tổn hao trên van

- Theo định luật bảo toàn năng lượng, ta có tổng tổn hao trên 1 van:

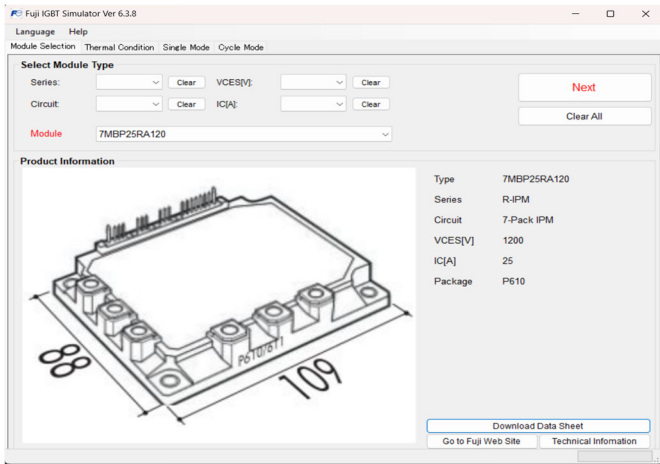
$$P_I = P_{cond} + P_{sw} = P_{CT} + P_{CD} + P_{swT} + P_{swD} = 137,97(W)$$

- Giả sử tổn hao trên các van là như nhau, như vậy tổng tổn hao trên 6 van:

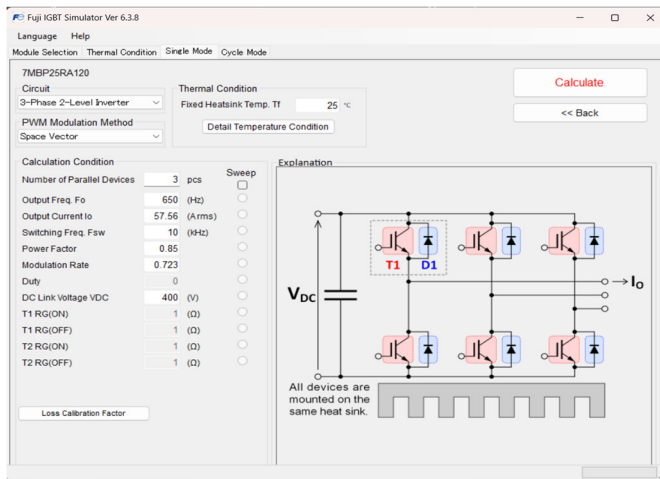
$$P_{It} = 6 \cdot P_I = 6 \cdot 137,97 = 827,82(W)$$

2.4.6. Mô phỏng xác định tổn hao trên phần mềm của hãng Fuji

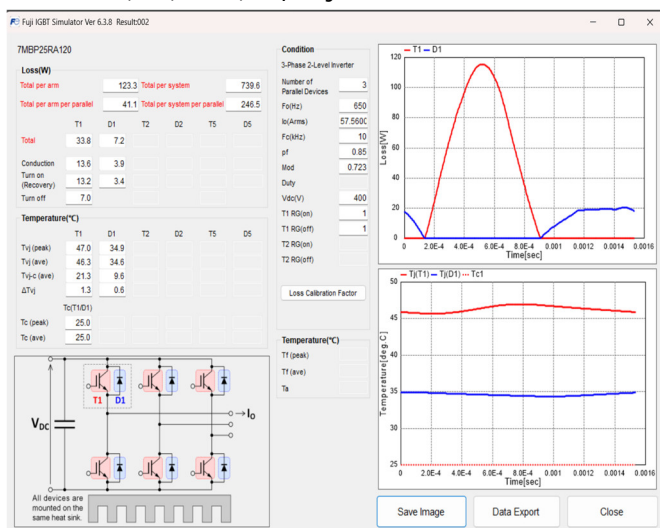
Thiết lập kiểu van và các thông số mô phỏng [8] như trên hình 17, 18.



Hình 17. Lựa chọn van 7MBP25RA120



Hình 18. Lựa chọn chế độ mô phỏng



Hình 19. Kết quả mô phỏng tổn hao tại tần số phát xung 10kHz

Chế độ 3 pha 2 mức Inverter: Phương pháp điều chế PWM (Điều chế vector không gian).

Thông số mô phỏng: Tần số cơ bản: 650Hz; Dòng điện đầu ra: 57,56A; Tần số đóng cắt của van: 10kHz; DC-link Voltage: 400V

Kết quả mô phỏng tổn hao trên phần mềm của hãng Fuji như thể hiện trên hình 19.

Tổn hao trên 1 nhánh van: 123,3W. Tổng tổn hao trên các van: 739,5W tương ứng 4,93% tổng công suất. Kết quả mô phỏng trên phần mềm, tổn hao trên van là 739,5W, còn kết quả tính toán tổn hao là 827,82W. Kết quả này có thể do sai số trong quá trình xác định các thông số từ datasheet của van, tuy nhiên giá trị này là phù hợp với hệ truyền động biến tần động cơ.

3. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày nghiên cứu về giải pháp thiết kế hệ truyền động điện tốc độ cao, lĩnh vực nghiên cứu này là nhu cầu cần thiết và có nhiều hướng phát triển trong tương lai. Trong đó, tác giả đã hoàn thành các nghiên cứu về giải pháp điều khiển động cơ PMSM, giải pháp thiết kế biến tần nguồn áp tần số đến 650Hz trên cơ sở lý thuyết chặt chẽ và kiểm nghiệm bằng mô phỏng dạng dòng điện, điện áp, nhiều bài dùng Matlab Simulink, kiểm nghiệm đánh giá tổn thất bằng phần mềm của hãng Fuji cho thấy tổn hao nằm trong phạm vi giá trị cho phép, mở ra nhiều cơ hội cho các nghiên cứu tiếp theo về cải thiện chất lượng, nâng cao hiệu năng, giảm tiếng ồn và giải pháp kiểm soát nguồn cho các nghiên cứu tiếp theo về lĩnh vực điều khiển quan trọng này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyen Phung Quang, 2002. *Giao trình Truyền động điện thông minh*. Science and Technics Publishing House, Hanoi.
- [2]. Vo Minh Chinh, Pham Quoc Hai, Tran Trong Minh, 2007. *Điện tu công suất*. Science and Technics Publishing House, Hanoi.
- [3]. Tran Van Thinh, 2008. *Thiết kế thiết bị điện tu công suất*. Vietnam Education Publishing House, Hanoi.
- [4]. Le Van Doanh, 1997. *Điện tu công suất và điều khiển động cơ điện*. Science and Technics Publishing House, Hanoi.
- [5]. Savi F., Barater D., Nardo M. D., Degano M., Gerada C., Wheeler P., Buticchi G., 2020. *High-Speed Electric Drives: A Step Towards System Design*. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 1, 10-21. doi:10.1109/ojies.2020.2973883
- [6]. Jung-Dae Lee, Dong-Hwan Park, Rae-Young Kim, 2022. *Novel Variable Switching Frequency PWM Strategy for a SiC-MOSFET-Based Electric Vehicle Inverter to Increase Battery Usage Time*. IEEE Access, 21929-21940, doi:10.1109/ACCESS.2022.3152779
- [7]. Husain I., Ozpinceli B., Islam M. S., Gurpinar E., Su G.J., Yu W., Sahu R., 2021. *Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles*. Proceedings of the IEEE, 109(6), 1039-1059. doi:10.1109/jproc.2020.3046112
- [8]. https://www.fujielectric.com/products/semiconductor/model/igbt/simulation_ev_hev/

AUTHOR INFORMATION

Nguyen Duc Quang
Hanoi University of Industry, Vietnam