MCA

Measurement, Control, and Automation

Website: https:// mca-journal.org

ISSN 1859-0551

Nâng cao độ tin cậy của biến tần đa mức cấu trúc cầu H nối tầng trong hệ truyền động cho động cơ không đồng bộ

Reliability Improvement of the Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter for Induction Motor Drive Applications

Mai Văn Chung[1,2], Trương Việt Hoàng[1], Nguyễn Văn Cao[1], Vũ Hoàng Phương[1*], Nguyễn Văn Liễn[1]

[1]Đại học Bách Khoa Hà Nội
[2]Đại học Hùng Vương
[*]Corresponding author E-mail: phuong.vuhoang@hust.edu.vn

Abstract

To increase the reliability of electrical drives system FOC-IM which is supplied by the cascaded H bridge multilevel inverters in faulty conditions, this paper uses new detecting method based on the differences between output voltage and control signal of each H bridge, and proposes new improved SVM algorithm for cascaded H bridge multilevel inverters when the open-circuit problem occurs. By analyzing the effect of the faulty H bridge, the switching states that creating standard voltage vectors are chosen precisely to achieve following objectives: Output voltage is maximum, three phases are balanced, and the common mode voltage is optimized. This algorithm can be applied to H bridge inverters at any level. Besides, the affect of the open-circuit issues is evaluated with and without proposed algorithm, based on the simulation results of electrical drives system FOC-IM model supplied by 11-level cascaded H-Bridge Inverters on MATLAB – Simulink.

Keywords: *Cascaded H-Bridge Inverter; Space Vector Modulation (SVM); Fault Tolerant Operation of CHB Multilevel Inverters*

Từ viết tắt

SVM	Space Vector Modulation
CHB	Cascaded H-Bridge
CMV	Common mode voltage
FOC	Field orient control
IM	Induction motor (động cơ KBĐ-RLS)
MLI	Multilevel Inverters

Tóm tắt

Để nâng cao độ tin cậy cho hệ truyền động FOC – IM được cấp nguồn bởi biến tần cấu trúc cầu H nối tầng, bài báo đưa ra phương án khắc phục sự cố hở mạch van bán dẫn. Bằng việc phát hiện lỗi dựa trên sai lệch giữa điện áp đầu ra và tín hiệu điều khiển của mỗi cầu H, sau đó đề xuất thuật toán SVM cải tiến để hệ truyền động hoạt động chủ động. Trên cơ sở phân tích ảnh hưởng của các cầu H bị lỗi, phối hợp đóng cắt tạo vector điện áp chuẩn được lựa chọn một cách tối ưu sao cho đạt được đồng thời các mục tiêu: Điện áp ra lớn nhất có thể, cân bằng giữa ba pha, common mode tối ưu; Có thể áp dụng với bộ nghịch lưu cầu H nối tầng có số mức bất kỳ. Từ đó, bài báo sẽ tiến hành đánh giá ảnh hưởng của lỗi khi có và không có thuật toán khắc phục lỗi. Các đánh giá dựa trên kết quả mô phỏng bằng phần mềm MATLAB - Simulink hệ truyền động FOC – IM được cấp nguồn bởi biến tần cấu trúc cầu H nối tầng 11 mức.

1. Giới thiệu

Biến tần đa mức đã được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng công nghiệp với dải điện áp cao, công suất lớn nhờ các ưu điểm: dạng sóng đầu ra có độ méo sóng hài (THD) thấp hơn, giảm điện áp đặt lên các linh kiện bán dẫn công suất, tốc độ biến thiên điện áp dv/dt thấp hơn [1], [2]...Đặc biệt, cấu trúc biến tần đa mức cầu H nối tầng (CHB) được mô tả chi tiết trong tài liệu [3], [4], [5], có tính modul hóa cao, không cần thêm các phần tử phụ trợ như đi ốt, tụ điện [6]. Do đó, CHB - MLI được sử dụng rộng rãi hơn trong công nghiệp cho các ứng dụng khác nhau: Bộ bù đồng bộ tĩnh [7], Bộ biến đổi cấp nguồn cho động cơ công suất lớn [8], Bộ biến đổi cho nguồn năng lượng tái tạo nối lưới [9]. Trong số các phương án điều chế cho CHB, điều chế vector không gian (SVM), dù tương đối phức tạp với khối lượng tính toán lớn, tỏ ra ưu việt hơn cả. Đặc biệt, nhờ giải thuật điều chế vector không gian được khái quát hóa [10], [11] việc tổ chức thực hiện SVM cho bộ nghịch lưu cầu H với số mức bất kỳ trên nền tảng thiết bị điều khiển số đã trở nên dễ dàng hơn rất nhiều.

Với việc tăng số mức, khả năng lỗi một hoặc nhiều van bán dẫn hoàn toàn có thể xảy ra [6] và chiếm 38% nguyên nhân xảy ra lỗi của biến tần đa mức [12]. Thông thường thiết bị bảo vệ sẽ tác động để ngắt biến tần ra khỏi lưới điện nếu bị lỗi, dẫn đến động cơ dừng làm việc. Việc dừng đột ngột động cơ trong thực tế đôi khi có thể gây ra sự cố nghiêm

Received: 2 December 2020. Accepted: 28 December 2020

trọng, ví dụ như hiện tượng búa nước trong hệ thống bơm cột áp cao. Mặt khác, nếu tiếp tục làm việc trong điều kiện lỗi có thể dẫn đến điện áp đầu ra mất cân bằng gây nguy hiểm cho động cơ nếu chạy liên tục trong một thời gian dài. Do đó, kỹ thuật xử lí trong điều kiện xảy ra lỗi để duy trì hoạt động chủ động của biến tần là rất quan trọng.

Để khắc phục lỗi cần phát hiện lỗi sau đó xử lí lỗi [13]. Đã có khá nhiều nghiên cứu về khắc phục lỗi cho biến tần. Phát hiện lỗi: dựa vào điện áp trung bình đầu ra [14], phân tích THD của dòng điện đầu ra [15], sử dụng mạng neural [16],…Tuy nhiên nhìn chung còn phức tạp, cần phần cứng xử lý mạnh nên rất khó triển khai thực tế. Xử lí lỗi: Sử dụng SVM sau khi "bypass" số cầu H lỗi tương ứng ở các pha [17], tuy đơn giản nhưng điện áp có thể điều chế bị sụt giảm lớn. Để khắc phục nhược điểm này, phương pháp dịch điểm trung tính đã được đề xuất ở tài liệu [18], [19]. Với phương pháp này, chỉ cầu H lỗi bị loại bỏ dẫn đến điện áp ra thường lớn hơn so với phương pháp "bypass cầu H". Kỹ thuật điều chế vector không gian cũng được đề xuất ở [20] và mang lại hiệu quả tương đương với phương pháp dịch điểm trung tính. Tuy nhiên, cả hai phương pháp trên đều khá phức tạp, đặc biệt là khi số mức tăng cao. Đồng thời phép lựa chọn phối hợp đóng cắt dẫn đến hệ thống xuất hiện điện áp common - mode lớn, gây ảnh hưởng xấu khi vận hành lâu dài.

Trong nghiên cứu này, phát hiện lỗi dựa trên sai lệch tín hiệu điều khiển và thực trên mỗi cầu H đảm bảo: dễ thực hiện, nhanh, chính xác. Sau đó, đề xuất thuật toán SVM cải tiến cho biến tần đa mức đảm bảo đồng thời các mục tiêu: dễ dàng áp dụng được với CHB- MLI với số mức bất kì; đảm bảo hoạt động được khi có lỗi với điện áp pha, dây cân bằng, biên độ điện áp tạo ra lớn nhất; giảm giá trị điện áp CMV.

2. Phân tích ảnh hưởng của điện áp ra khi lỗi van và phương pháp cấu hình lại mạch lực

2.1. Ảnh hưởng của điên áp khi xảy ra lỗi.

Hở mạch van bán dẫn công suất được xác định là van không thể dẫn dòng khi có tín hiệu điều khiển. Lỗi xảy ra làm các vector chuẩn mất đi một hoặc nhiều phối hợp đóng cắt để tạo ra vector điện áp. Tùy theo vị trí cầu H xảy ra lỗi mà ảnh hưởng đến không gian vector của CHB-MLI là khác nhau. Khi vector chuẩn mất hết các phối hợp đóng cắt, sẽ trở thành lỗi. Lớp vector chứa vector chuẩn lỗi gọi là lớp vector lỗi.

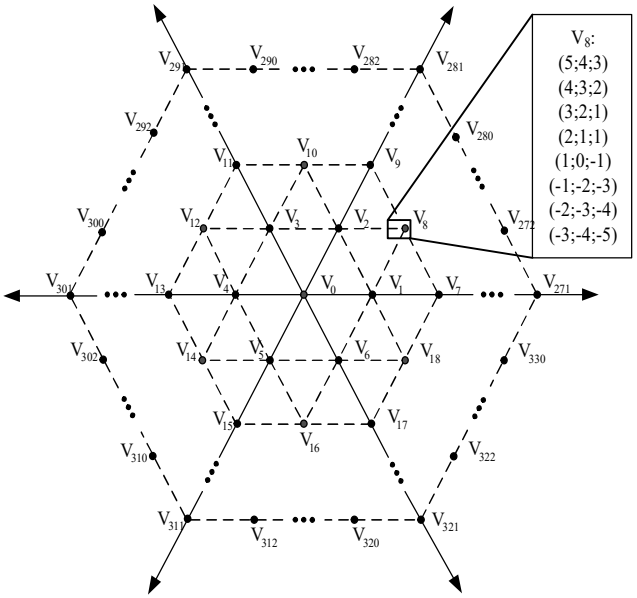
Hình 1 thể hiện không gian vector điện áp của biến tần 11 mức, sẽ có 331 vector điện áp gọi là vector điện áp chuẩn, có nhiều phối hợp đóng cắt để tạo ra cùng 1 vector điện áp chuẩn. Ví dụ, vector điện áp chuẩn số 8 sẽ có 8 phối hợp đóng cắt, tùy thuộc vào mục tiêu của điều chế để lựa chọn phối hợp đóng cắt. Phối hợp đóng cắt màu đỏ cho điện áp common mode nhỏ nhất là lựa chọn trong nghiên cứu này.

Hình 2 minh họa một số ví dụ cho ảnh hưởng của lỗi hở mạch van lên không gian vector của CHB-MLI. Hình ▲ đại diện các vector chuẩn không thể sử dụng do đã mất hết phối hợp đóng cắt. Có thể thấy khi một cầu H trong pha A bị lỗi sẽ dẫn đến một số vector chuẩn ở sector I, III, IV và VI bị ảnh hưởng, nhưng nó không ảnh hưởng đến các vector khác ở sector II và V. Sự tác động của lỗi ở cầu H trong các pha lên không gian vector được mô tả ở Bảng 1.

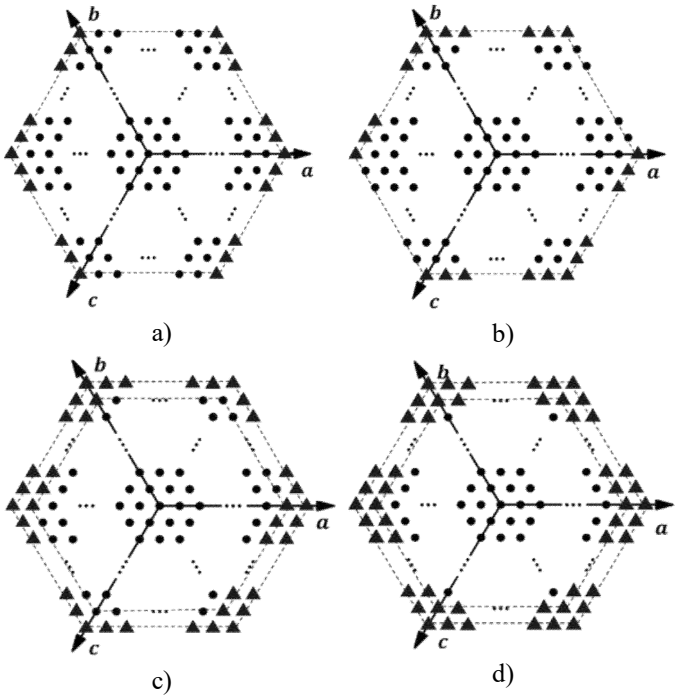
2.2. Cấu hình lại biến tần khi bị lỗi

Sơ đồ CHB- MLI cấp nguồn cho động cơ IM được thể hiện như Hình 3. Việc nối tầng nhiều cầu H trong mỗi nhánh pha tạo ra bộ CHB.

Một cầu H chứa van bán dẫn lỗi cần phải được loại bỏ khỏi hệ thống. Để thực hiện việc đó, mỗi cầu H trong biến tần được bổ xung 1 contactor ở đầu ra. Khi bình thường, cầu H được kết nối với hệ thống, tuy nhiên, nếu 1 trong các van bán dẫn của cầu H bị hở mạch, tín hiệu điều khiển tác động đến contactor của cầu H và loại bỏ nó khỏi hệ thống bằng cách nối 2 dây đầu ra lại với nhau, như trên Hình 4..



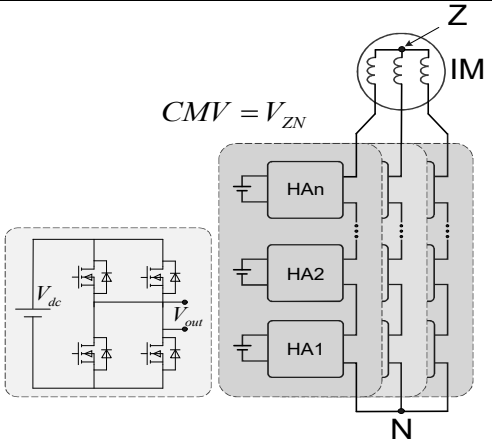
Hình 1. Vector không gian điện áp của biến tần 11 mức CHB



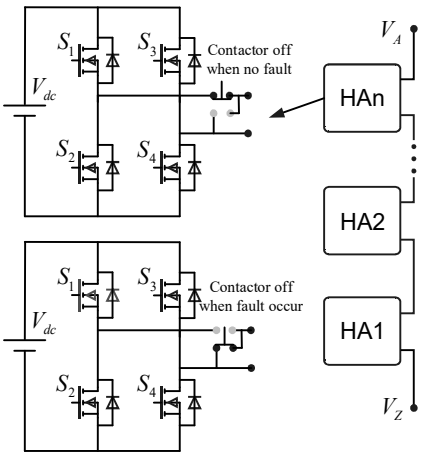
Hình 2. Ảnh hưởng của lỗi lên vector không gian ở các trường hợp a) pha A có 1 cầu H lỗi, b) pha B có 1 cầu H lỗi, c) pha A có 1, pha B có 1 Cầu H lỗi, d) pha A có 1, pha B có 1, pha C có 1 cầu H lỗi

Bảng 1. Vị trí không gian vector bị ảnh hưởng do lỗi

Sector bị ảnh hưởng	Pha của CHB-MLI có lỗi		
	Pha A	Pha B	Pha C
I	Có	Không	Có
II	Không	Có	Có
III	Có	Có	Không
IV	Có	Không	Có
V	Không	Có	Có
VI	Có	Có	Không



Hình 3. CHB-MLI với phụ tải IM



Hình 4. Cấu hình cầu H có thêm contactor ở đầu ra

3. Khắc phục lỗi của biến tần đa mức cấu trúc cầu H nối tầng

Khi biến tần cấp nguồn cho hệ truyền động FOC – IM bị lỗi, để khắc phục cần thực hiện 2 bước:

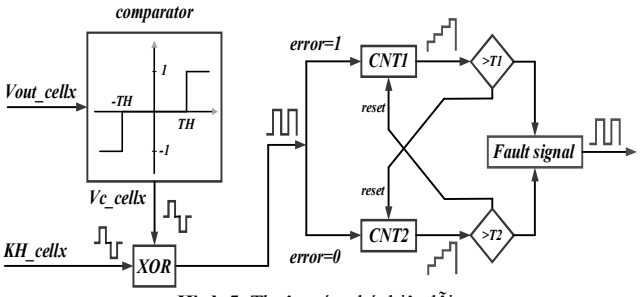
- Phát hiện lỗi
- Xử lí lỗi

3.1. Phát hiện lỗi hở mạch van trong biến tần

Xác định vị trí lỗi trong biến tần cần đảm bảo tiêu chí: chính xác, nhanh, đơn giản. Điện áp đầu ra của cầu H thứ x (*Vout_cellx*) được đo về để chuẩn hóa. Tín hiệu đầu ra sau chuẩn hóa được so sánh với tín hiệu điều khiển (*KH_cellx*) của cầu H đó. Khi theo dõi 2 tín hiệu, nếu có sự sai khác bất thường vượt qua những điều kiện cho trước, cầu H đó được coi là là có lỗi và bị loại khỏi hệ thống. Hình 5 mô tả cấu trúc của thuật toán phát hiện lỗi.

Vout_cellx và khối *comparator: điện áp đầu ra của cầu H thứ x* (*Vout_cellx*) được đo về, nó có thể nhận các giá trị -V_{dc}, 0, V_{dc}. *Vout_cellx* đi qua *comparator* được so sánh với một ngưỡng *TH* cho trước và chuẩn hóa thành các tín hiệu *Vc_cellx* có giá trị -1, 0, 1 tương ứng. thể hiện qua (1):

$$\begin{cases} Vout_cellx \geq TH \Rightarrow Vc_cellx = 1 \\ Vout_cellx \leq -TH \Rightarrow Vc_cellx = -1 \\ -TH \leq Vout_cellx \leq TH \Rightarrow Vc_cellx = 0 \end{cases} \quad (1)$$



Hình 5. Thuật toán phát hiện lỗi

Thực thực tế, điện áp nguồn 1 chiều đầu vào có thể bị giao động, sụt áp. Giá trị ngưỡng TH phải được tính toán để bù được những sai lệch này, đảm bảo tín hiệu sau chuẩn hóa phải chính xác. Do đó, giá trị *TH* phù hợp được lựa chọn là $V_{dc}/2$ [14].

KH_cellx và *error*: khi điều chế, một tín hiệu điều khiển KH_cellx được gửi tới cầu H thứ x để tạo ra mức điện áp mong muốn trên cầu đó.

Bảng 2 thể hiện quan hệ giữa KH_cellx và Vout_cellx khi hoạt động ổn định. Theo [10], mỗi vector chuẩn sẽ sử dụng trang thái $[k_{AN}, k_{BN}, k_{CN}]$ của nó để điều chế các các mức điện áp tương ứng trên các pha A, B, C. Từ đó ta có (2):

$$\begin{cases} k_{AN} = \sum_{i=1}^{n} KH_cell_{HAi} \\ k_{BN} = \sum_{i=1}^{n} KH_cell_{HBi} \\ k_{CN} = \sum_{i=1}^{n} KH_cell_{HCi} \end{cases} \quad (2)$$

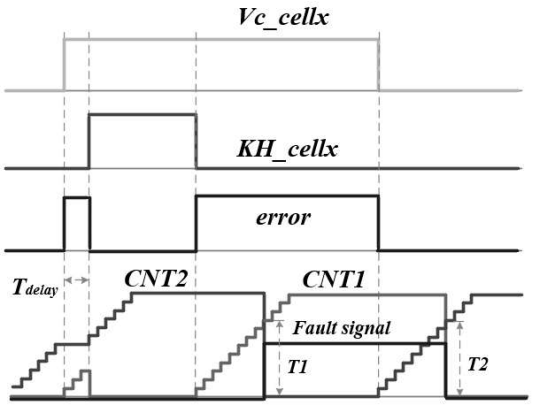
Vc_cellx được so sánh với *KH_cellx*, Tín hiệu *error* được đặt lên 1 khi *Vc_cellx* khác *KH_cellx*, ngược lại *error* bằng 0 nếu *Vc_cellx* và *KH_cellx* bằng nhau:

$$\begin{aligned} Vc_cellx = KH_cellx \Rightarrow error = 0 \\ Vc_cellx \neq KH_cellx \Rightarrow error = 1 \end{aligned} \quad (3)$$

CNT1 và *CNT2*: Thực tế, do tín hiệu cảm biến đo về bị trễ, thời gian đóng/mở van không phải là tức thời và luôn cần deadtime, bộ điều khiển bị trễ,… sẽ tồn tại khoảng thời gian sai lệch giữa *Vc_cellx* và *KH_cellx* ngay cả khi hoạt động bình thường, gọi là T_{delay}. Giải quyết vấn đề trên, 2 bộ đếm thời gian *CNT1* và *CNT2* được sử dụng để *set* hoặc *reset* tín hiệu *Fault signal*. *CNT1* đếm khi *error*=1, khi vượt quá ngưỡng *T1*, *Fault signal* được *set, CNT2* bị *reset* và lỗi được phát hiện. Việc lựa chọn *T1* phụ thuộc vào T_{delay}. Giả sử T_{delay} =10us ta cần chọn $T_1 \geq 10us$. Việc lựa chọn T1 nhằm đảm bảo trắng hiện tượng báo lỗi giả không xảy ra. Một cách tương tự, *CNT2* đếm khi *error*=0, khi giá trị bộ đếm vượt quá *T2*, *Fault signal* và *CNT1* được *reset* về 0. Một cách đơn giản, ta chọn *T2=T1*.

Bảng 2. Quan hệ giữa điện áp đầu ra và tín hiệu điều khiển của cầu H thứ x

STT	Trạng thái van				*Vout_cellx*	*KH_cellx*
	S_1	S_2	S_3	S_4		
1	1	0	1	0	0	0
2	1	0	0	1	V_{dc}	1
3	0	1	1	0	$-V_{dc}$	-1
4	0	1	0	1	0	0



Hình 6. Vc_cellx, KH_cellx, error, CNT1, CNT2 và fault signal khi hệ thống có lỗi

$$CNT1 > T1 \Rightarrow faultsignal = 1$$
$$CNT2 > T2 \Rightarrow faultsignal = 0 \quad (4)$$

Mối quan hệ của các tín hiệu trong thuật toán được thể hiện ở Hình 6.

3.2. Xử lí lỗi hở mạch van bán dẫn công suất với thuật toán SVM cải tiến

Nhằm đảm bảo biến tần tiếp tục làm việc ổn định khi có lỗi, bài báo đề xuất sử dụng phương pháp SVM được cải tiến từ phương pháp điều chế tổng quát [10] gồm các bước sau:

- Tìm vector điện áp đặt.
- Xác định vị trí của điện áp đặt
- Tìm phối hợp đóng cắt của các vector chuẩn.
- Hệ số điều chế và thứ tự chuyển mạch.
- Chuyển thành tín hiệu điều khiển van

Trong phương pháp SVM cải tiến, các bước thực hiện số (1),(3),(4) có sự thay đổi so với [10]. Báo cáo này sẽ tập trung phân tích những thay đổi trong các bước tiến hành đó.

3.2.1. *Điện áp đặt và giới hạn điên áp đặt*

Do ảnh hưởng của sự cố, hình thành nên lớp vector lỗi, việc điều chế sẽ không thể thực hiện nếu 1 trong 3 vector chuẩn nằm trên lớp lỗi này. Do vậy, mục đích của phần này nhằm giới hạn giá trị điện áp đặt, sao cho các vector chuẩn mà nó sử dụng không nằm trên lớp lỗi.

Với thông tin số cầu H bị lỗi e_A, e_B, e_C ở từng pha từ bộ phát hiện. Số lớp lỗi được xác định bởi

$$e_{\max} = \max(e_A + e_B, e_B + e_C, e_A + e_C) \quad (5)$$

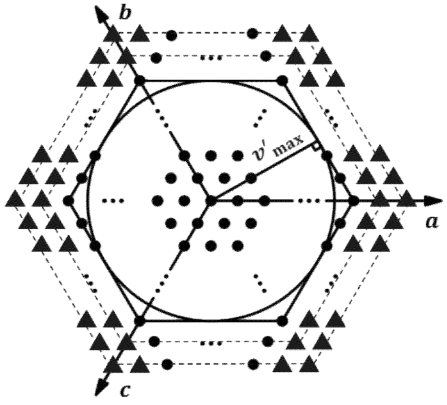
Biên độ điện áp đặt lớn nhất mà bộ CHB m mức có thể đạt được tương ứng với bán kính của đường tròn nội tiếp của phần lục giác không chứa lớp lỗi minh họa trên Hình 7, được xác định bởi (6)

$$v'_{\max} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{dc}.(m - 1 - e_{\max}) \quad (6)$$

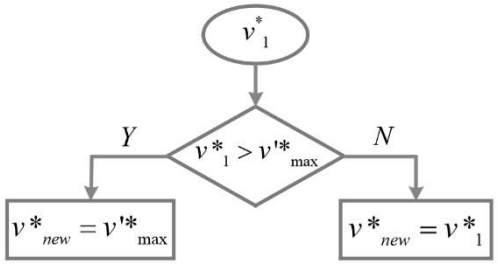
Việc giới hạn giá trị điện áp đặt thông qua thuật toán Hình 8.

3.2.2. *Xác định phối hợp đóng cắt của vector chuẩn*

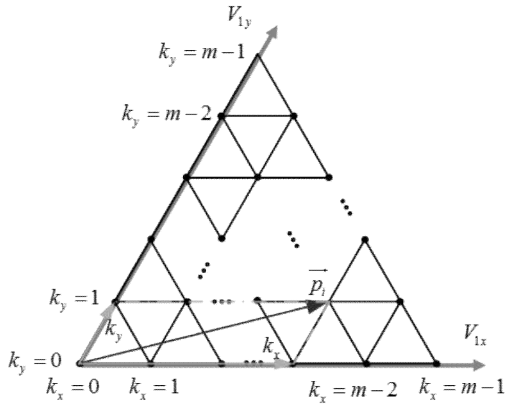
Khi xuất hiện lỗi, contactor của cầu H tương ứng sẽ kích hoạt để loại bỏ cầu H lỗi đó khỏi hệ thống. Như vậy điện áp mà biến tần có thể tạo ra là:



Hình 7. Biên độ điện áp lớn nhất



Hình 8. Sơ đồ thuật toán xác định giá trị điện áp đặt mới khi có lỗi



Hình 9. Minh họa một vector chuẩn trên sector I

$$\begin{cases} V_{AN} = k_{AN}.V_{dc} \\ V_{BN} = k_{BN}.V_{dc} \\ V_{CN} = k_{CN}.V_{dc} \end{cases} \quad (7) \text{ với } \begin{cases} k_{AN} \in \overline{-n + e_A; n - e_A} \\ k_{BN} \in \overline{-n + e_B; n - e_B} \\ k_{CN} \in \overline{-n + e_C; n - e_C} \end{cases} \quad (8)$$

Với sector 1, xét 1 vector chuẩn có tọa độ minh họa trên Hình 9.

Theo [10], mối liên hệ giữa (k_x, k_y) và phối hợp đóng cắt của vector chuẩn p_i như sau:

$$\begin{cases} k_{AN} - k_{BN} = k_x \\ k_{BN} - k_{CN} = k_y \end{cases} \quad (9)$$

Loại tam giác D_1	p_x	p_y	p_z
$[k_x, k_y]$	$[k_x, k_y]$	$[k_x+1, k_y]$	$[k_x, k_y+1]$
	$d_1 = 1 - m_x - m_y$	$d_2 = m_x$	$d_3 = m_y$
Loại tam giác D_2	p_y	p_z	p_u
$[k_x, k_y]$	$[k_x+1, k_y]$	$[k_x, k_y+1]$	$[k_x+1, k_y+1]$
d	$d_1 = 1 - m_y$	$d_2 = 1 - m_x$	$d_3 = m_x + m_y - 1$
t	$t_1 = d_1 T_s$	$t_2 = d_2 T_s$	$t_3 = d_3 T_s$

Coi k_{AN} là tham số (đặt $k_{AN} = k$), ta có

$$\begin{cases} k_{AN} = k \\ k_{BN} = k - k_x \\ k_{CN} = k - k_x - k_y \end{cases} \quad (10)$$

Với (10), thấy rằng, thực chất việc lựa chọn phối hợp đóng cắt của vector chuẩn được thực hiện bằng việc lựa chọn k. Do đó, nhằm mục đích khắc phục lỗi và triệt tiêu CMV, ta thực hiện phép lựa chọn sau:

- Để CHB-MLI có thể làm việc khi có lỗi, thì phối hợp đóng cắt của vector chuẩn phải thỏa mãn (8), hay

$$\begin{cases} -n + e_A \le k \le n - e_A \\ -n + e_B \le k - k_x \le n - e_B \\ -n + e_C \le k - k_x - k_y \le n - e_C \end{cases} \quad (11)$$

Nói cách khác, nếu đặt $k_o = k_x + k_y$ thì

$$\max\begin{Bmatrix} -n + e_A \\ -n + k_x + e_B \\ -n + k_o + e_C \end{Bmatrix} \le k \le \min\begin{Bmatrix} n - e_A \\ n + k_x - e_B \\ n + k_o - e_C \end{Bmatrix} \quad (12)$$

- Mặt khác: $V_{CMV} = CMV.V_{dc}$ trong đó

$$CMV = \frac{k_{AN} + k_{BN} + k_{CN}}{3} = \frac{3k - 2k_x - k_y}{3} \quad (13)$$

Như vậy, với k_x, k_y đã biết, dễ dàng tìm được giá trị k thỏa mãn (12) đồng thời làm giá trị $|CMV|$ ở (13) nhỏ nhất. Từ đó, phối hợp đóng cắt của vector chuẩn được xác định như (14):

$$\begin{bmatrix} k_{AN} \\ k_{BN} \\ k_{CN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & 1 \\ -\frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 \\ -\frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ CMV \end{bmatrix} \quad (14)$$

Việc tìm mối quan hệ ở các sector khác hoàn toàn tương tự, ma trận thể hiện trong Bảng 3.

Bảng 3. Ma trận chuyển đổi giữa $[k_{AN}, k_{BN}, k_{CN}]$ và $[k_x, k_y, CMV]$

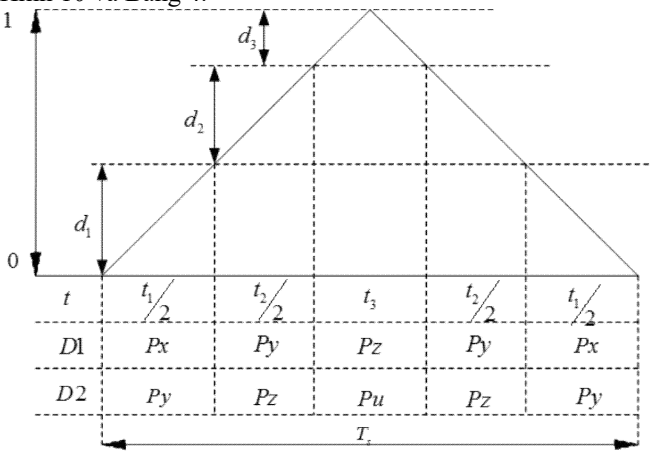
Sector 1	$X_1 = \begin{bmatrix} 2/3 & 1/3 & 1 \\ -1/3 & 1/3 & 1 \\ -1/3 & -2/3 & 1 \end{bmatrix}$	Sector 4	$X_4 = \begin{bmatrix} -2/3 & -1/3 & 1 \\ 1/3 & -1/3 & 1 \\ 1/3 & 2/3 & 1 \end{bmatrix}$
Sector 2	$X_2 = \begin{bmatrix} 1/3 & -1/3 & 1 \\ 1/3 & 2/3 & 1 \\ -2/3 & -1/3 & 1 \end{bmatrix}$	Sector 5	$X_5 = \begin{bmatrix} -1/3 & 1/3 & 1 \\ -1/3 & -2/3 & 1 \\ 2/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$
Sector 3	$X_3 = \begin{bmatrix} -1/3 & -2/3 & 1 \\ 2/3 & 1/3 & 1 \\ -1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$	Sector 6	$X_6 = \begin{bmatrix} 1/3 & 2/3 & 1 \\ -2/3 & -1/3 & 1 \\ 1/3 & -1/3 & 1 \end{bmatrix}$

Bảng 4. Thời gian và hệ số điều chế

3.2.3. *Trật tự điều chế vector chuẩn*

Với mục đích giảm thiểu CMV mà mỗi vector chuẩn chỉ sử dụng 1 phối hợp đóng cắt, đó là phối hợp đóng cắt mà CMV có độ lớn nhỏ nhất. Do đó việc sử dụng trật tự điều chế tối ưu như [10] là không thể sử dụng khi phương pháp này phải sử dụng tới 2 phối hợp đóng cắt trên cùng 1 vector chuẩn.

Báo cáo đề xuất trật tự điều chế cho tất các sector thể hiện ở Hình 10 và Bảng 4.



Hình 10. Trật tự điều chế trên tất cả các sector

Việc sử dụng trật tự điều chế này dẫn tới: khi chuyển mạch giữa các vector chuẩn với nhau, thì số cầu H thay đổi phối hợp đóng cắt có thể nhiều hơn 1, như vậy tăng thành phần tổn hao chuyển mạch van lên lớn hơn so với [10], tuy nhiên với mục đích CMV điều này không tránh khỏi.

4. Ứng dụng thuật toán phát hiện, xử lí lỗi với hệ truyền động FOC – IM

Phương pháp điều khiển tựa theo từ thông Rotor (FOC) như [21] là một trong những thuật toán được áp dụng để kiểm soát momen và tốc độ của động cơ IM. Cấu trúc điều khiển động cơ IM theo cấu trúc FOC khi sử dụng thêm thuật toán phát hiện và khắc phục sự cố biến tần thể hiện ở Hình 11.

Căn cứ vào điều kiện năng lực quá tải không đổi và bỏ qua điện trở rotor, ta có mối liên hệ sau:

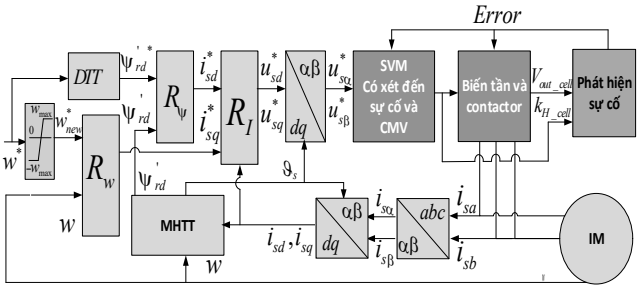
$$\frac{U'_S}{U_S} = \frac{f'_S}{f_S} \cdot \sqrt{\frac{M'}{M}} = \frac{w'}{w}\sqrt{\frac{M'}{M}} \quad (15)$$

Trong đó U_S, M, w là điện áp, momen và tốc động cơ khi tần số nguồn cấp là f_S ; U'_S, M', w' là điện áp và momen và tốc độ động cơ khi tần số nguồn cấp là f'_S

Tuy nhiên do hạn chế về điện áp tạo ra do sự cố nên tốc độ tối đa mà động cơ có thể đạt được đối với tải quạt gió $(M \sim w^2)$ ở (16)

$$w_{\max} = w_N \sqrt{\frac{U_{S\max}}{U_{SN}}} \quad (16)$$

Với U_{SN}, w_N là biên độ điện áp trên pha stator và tốc độ động cơ khi làm việc ở chế độ định mức, $U_{S\max}$ là biên độ điện áp trên pha tối đa mà biến tần có khả năng điều chế tính theo (6).



Hình 11. Minh họa một vector chuẩn trên sector I

5. Kết quả mô phỏng

Phương án được kiểm chứng bằng mô phỏng trên phần mềm Matlab- Simulink cho CHB-MLI 11 mức với $V_{dc} = 620V$ với tải IM có thông số động cơ IM thể hiện ở Bảng 6. Kịch bản tốc độ đặt lên động cơ và sự cố biến tần ở Bảng 7.

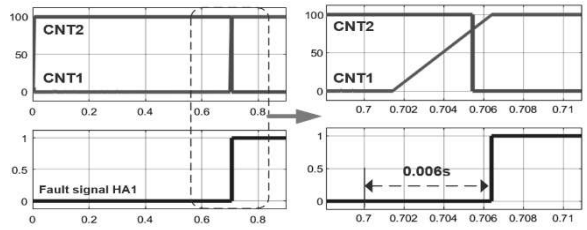
Bảng 6. Thông số động cơ IM và nguồn DC ở biến tần

Công suất danh định	$P_N = 1119kW$
Điện áp danh định	$U_N = 3300V$
Tốc độ quay	$n_N = 1470$ v/ph
Momen quán tính	$J = 1kg.m^2$

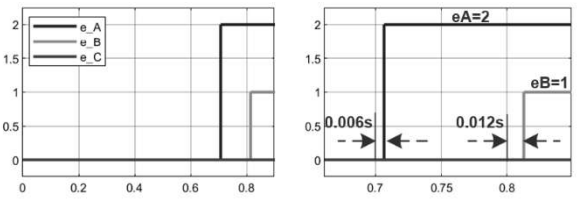
Bảng 7. Tốc độ đặt và thời gian xảy ra lỗi

Thời gian	0-0.5s	0.5-0.7s	0.7-0.8s	0.8-0.9s
Tốc độ	Tăng tốc	Tốc độ đặt ở tốc độ định mức 1470 v/ph		
Lỗi cầu H			H_{A1}, H_{A2}	H_{A1}, H_{A2} H_{B1}

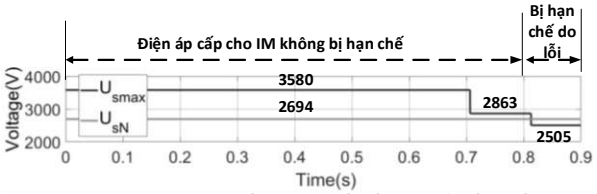
5.1. Kết quả phát hiện lỗi



Hình 12. Tín hiệu ở 2 bộ đếm CNT1, CNT2 và tín hiệu lỗi Fault signal ở cầu HA1



Hình 13. Tín hiệu lỗi ở 3 pha từ bộ phát hiện gửi đến thuật toán khắc phục



Hình 14. *Biên độ điện áp pha tối đa mà biến tần có thể điều chế và điện áp pha của động cơ làm việc chế độ định mức*

Từ Hình 12, Hình 13, thời gian để phát hiện ra lỗi trên cầu H_{A1}, H_{A2} là 0.006s và cần 0.012s để phát hiện ra lỗi H_{B1}. Như vậy, thuật toán phát hiện lỗi đã phát hiện lỗi chính xác, đúng thời gian theo yêu cầu, cách thực hiện tương đối đơn sẽ giúp cho việc triển khai thực nghiệm trở nên khả thi hơn rất nhiều.

5.2. Kết quả khắc phục lỗi

Hình 14 cho thấy biên độ điện áp mà biến tần có thể tạo ra có sự sụt giảm nhỏ nhất khi có lỗi. Cụ thể, giảm từ 3580V ở chế độ bình thường xuống 2863V khi lỗi 2 cầu H pha A và còn 2505V khi lỗi thêm 1 cầu H pha *B*. Như vậy khoảng thời gian 0.8-0.9s là khoảng thời gian biến tần không cung cấp đủ điện áp để động cơ hoạt động đúng định mức

Tốc độ động cơ được thể hiện ở Hình 15. Kết quả cho thấy, trường hợp sử dụng SVM thông thường khi không có lỗi (0-0.7s), động cơ hoạt động bình thường, bám giá trị đặt, hoạt động ổn định ở 1470v/ph. Tuy nhiên khi có sự cố, tốc độ có sự dao động mạnh, cụ thể dao động trong khoảng 1459-1488v/ph ở thời gian 0.7-0.8s và khi có thêm cầu H lỗi ở 0.8-0.9s, dao động trong khoảng1460-1584v/ph. Tuy nhiên, với thuật toán SVM cải tiến, tốc độ ổn định, bám giá trị đặt ngay cả khi không có lỗi (0-0.7s) và có lỗi(0.7-0.8s). Thời gian tính từ lúc có lỗi đến khi khắc phục được là 0.015s. Nhưng trong khoảng 0.8-0.9s, do hạn chế về điện áp mà biến tần có thể tạo ra (Hình 14) động cơ bắt buộc phải giảm tốc độ, cụ thể giảm từ 1470v/ph xuống 1346v/ph.

Momen động cơ tạo ra ở 2 phương án thể hiện ở Hình 16, cũng giống như tốc độ ở trường hợp không có lỗi, cả hai phương án đều có momen tạo ra ổn định ở 7380Nm. Tuy nhiên khi có lỗi, momen với SVM thông thường cho thấy sự mất ổn định, vấn đề này được khắc phục với phương án SVM cải tiến.

Hình 17, Hình 18 cho thấy thuật toán SVM cải tiến đã khắc phục được tình trạng mất cân bằng điên áp và dòng điện khi có lỗi ở phương pháp SVM thông thường.

Điện áp CMV cũng được giảm đáng kể cho thấy ở Bảng 8. Cụ thể, khi không có lỗi, với phương pháp cải tiến, CMV dao động từ -210V đến 210V (bằng 1/3 Vdc) trong khi phương pháp SVM thông thường có CMV rất lớn, dao động từ -1860 (gấp 3 lần Vdc) đến 210V. Thuật toán cũng cải thiện CMV đáng kể khi có lỗi, lần lượt ở hai trường hợp lỗi như sau: (-1240,1240V) so với (-2680,830V) và (-1030V,1030V) so với (-2480V,620V)

Bảng 9 cho thấy chất lượng điện áp được cải thiện, cụ thể khi động cơ làm việc ở tốc độ định mức trong trường hợp không có lỗi, chỉ số THD mà trong phương án đề xuất 0.62% còn với SVM thông thường là 2.42%. Trường hợp lỗi, 0.68% trong khi phương án còn lại là 12.07%. Điều này xảy ra do sự can thiệp của các bộ điều khiển.

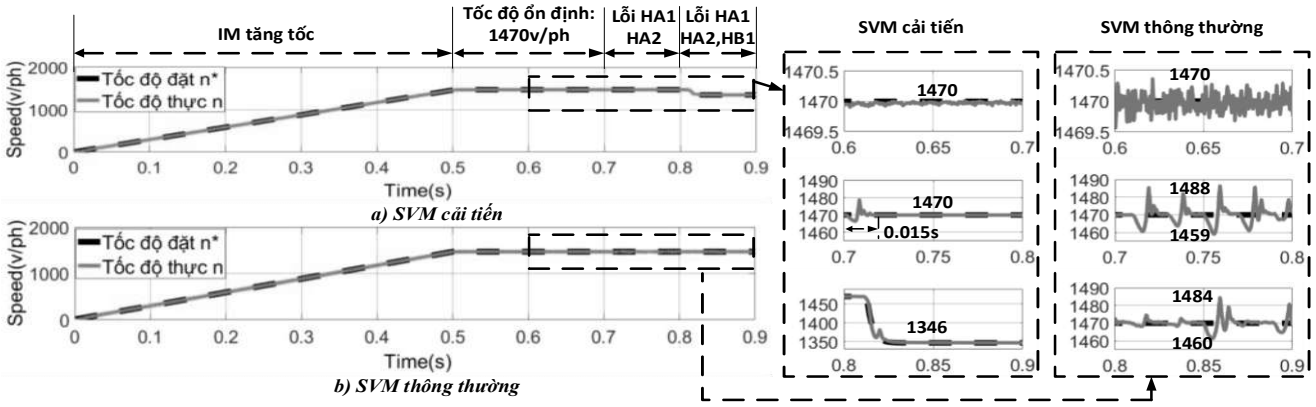
Bảng 8. Điện áp common - mode ở 2 phương án với tải IM

Thời gian	SVM cải tiến	SVM thông thường

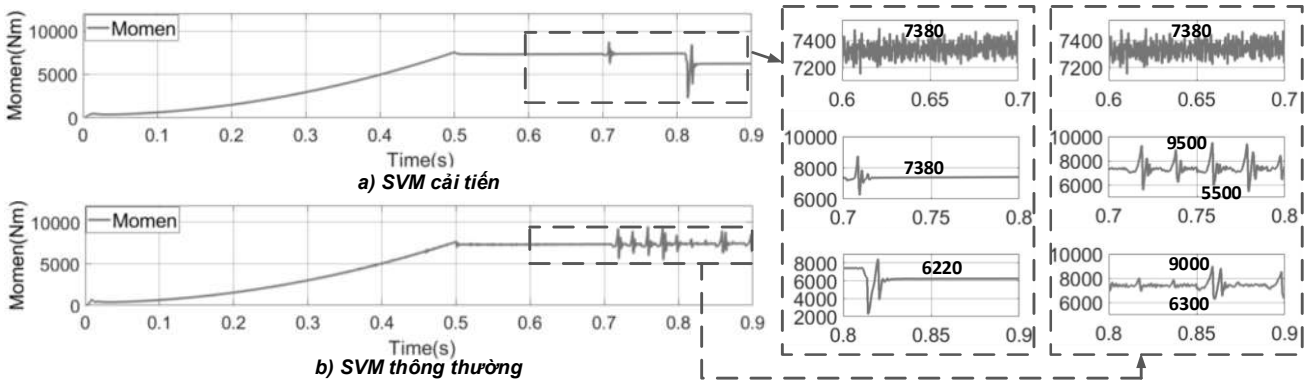
0.6-0.7s	(-210V;210V)	(-1860V,210V)
0.7-0.8s	(-1240;1240V)	(-2680V;830V)
0.8-0.9s	(-830V,830V)	(-2480V;620V)

Thời gian	SVM cải tiến	SVM thông thường
0.6-0.7	0.62%	2.42%
0.7-0.8s	0.68%	12.07%

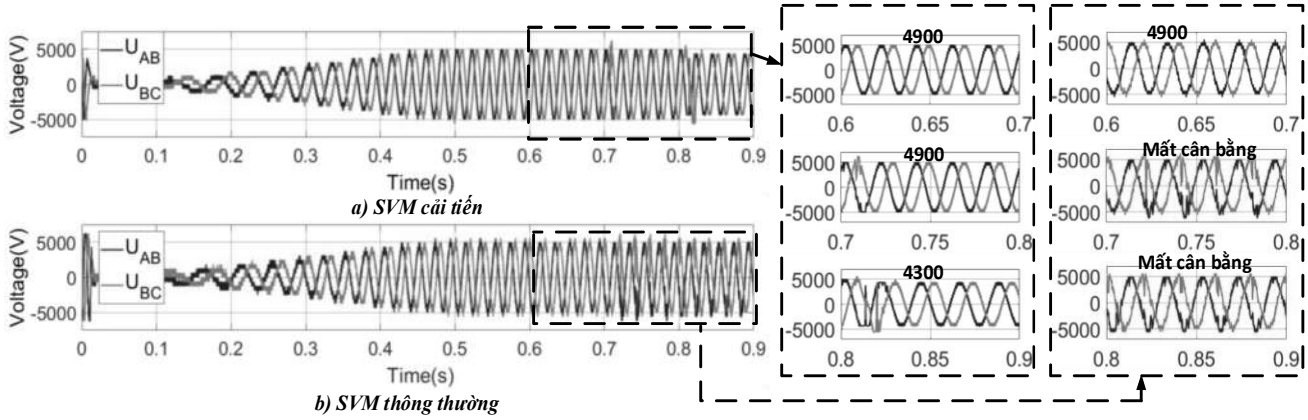
Bảng 9. So sánh chất lượng điện áp dây tải IM



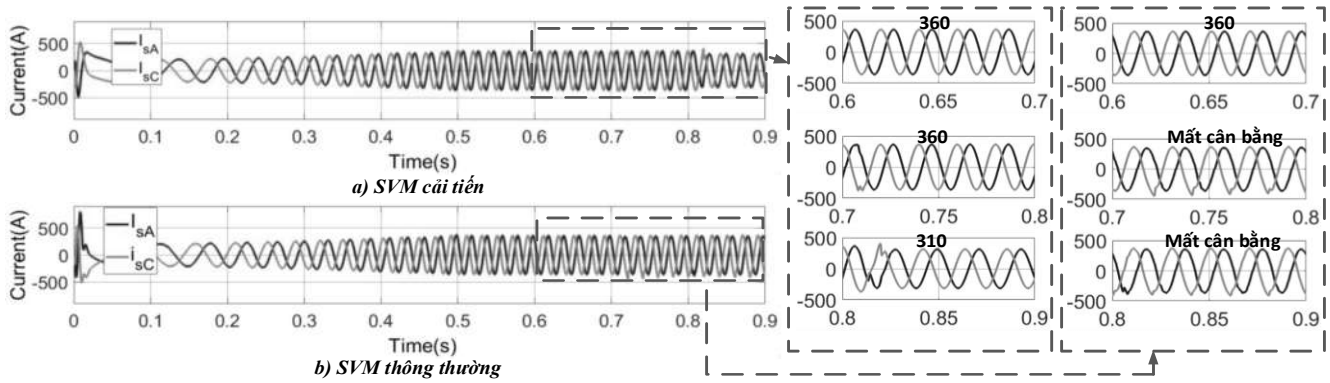
Hình 15. Tốc độ đặt và tốc độ thực ở hai phương án sử dụng SVM theo các khoảng thời gian với tải IM



Hình 16. Momen động cơ với tải quạt gió ở hai phương án sử dụng SVM theo các khoảng thời gian với tải IM



Hình 17. Điện áp dây U_{AB},U_{BC} đặt lên động cơ ở hai phương án sử dụng SVM theo thời gian với tải IM



Hình 18. Dòng điện phía stator ở hai phương án sử dụng SVM theo thời gian với tải IM

6. Kết luận

Bài báo đã đề xuất phương pháp khắc phục lỗi của hệ truyền động FOC – IM cấp nguồn bởi CHB- MLI trong điều kiện lỗi. Phương pháp đề xuất đã thu được kết kết quả như sau: Thứ nhất, loại bỏ cầu H lỗi để hệ thống tiếp tục làm việc. Thứ hai, sự cố được phát hiện nhanh, chính xác. Thứ ba, đảm bảo biến tần tạo ra điện áp lớn nhất có thể khi sự cố. Thứ tư, đảm bảo về mức độ cân bằng của điện áp, dòng điện. Thứ năm, giảm điện áp CMV. Thứ 6, phương pháp đề xuất có thể dễ dàng áp dụng cho CHB-MLI với số mức bất kì. Các kết quả nghiên cứu thu được sẽ góp phần nâng cao độ tin cậy cho hệ truyền động động cơ không đồng bộ, từ đó nâng cao khả năng ứng dụng của biến tần đa mức trong thực tế.

References

[1] B. Wu, "1. Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters 7.1," *High-Power Converters and AC Drives*. pp. 119–142, 2006.

[2] R. José *et al.*, "Multilevel converters: An enabling technology for high-poer applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 11. pp. 1786–1817, 2009, doi: 10.1109/JPROC.2009.2030235.

[3] J. S. Lai and F. Z. Peng, "Multilevel converters - A new breed of power converters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 3. pp. 509–517, 1996, doi: 10.1109/28.502161.

[4] M. Marchesoni, M. Mazzucchelli, and S. Tenconi, "A Nonconventional Power Converter for Plasma Stabilization," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 5, no. 2. pp. 212–219, 1990, doi: 10.1109/63.53158.

[5] S. Kouro *et al.*, "Recent advances and industrial applications of multilevel converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 8. pp. 2553–2580, 2010, doi: 10.1109/TIE.2010.2049719.

[6] B. Hemanth Kumar, M. M. Lokhande, R. R. Karasani, and V. B. Borghate, "Fault tolerant operation of CHB multilevel inverters based on the SVM technique using an auxiliary unit," *Journal of Power Electronics*, vol. 18, no. 1. pp. 56–69, 2018, doi: 10.6113/JPE.2018.18.1.56.

[7] H. Akagi, S. Inoue, and T. Yoshii, "Control and performance of a transformerless cascade PWM STATCOM with star configuration," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 4, pp. 1041–1049, 2007, doi: 10.1109/TIA.2007.900487.

[8] F. Khoucha, S. M. Lagoun, K. Marouani, A. Kheloui, and M. E. H. Benbouzid, "Hybrid cascaded H-bridge multilevel-inverter induction-motor-drive direct torque control for automotive applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 3, pp. 892–899, 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2037105.

[9] E. Villanueva, P. Correa, J. Rodriguez, and M. Pacas, "Control of a single-phase cascaded H-bridge multilevel inverter for grid-connected photovoltaic systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4399–4406, 2009, doi: 10.1109/TIE.2009.2029579.

[10] C. M. Van, T. N. Xuan, P. V. Hoang, M. T. Trong, S. P. Cong, and L. N. Van, "A Generalized space vector modulation for cascaded h-bridge multi-level inverter," in *Proceedings of 2019 International Conference on System Science and Engineering, ICSSE 2019*, Sep. 2019, pp. 18–24, doi: 10.1109/ICSSE.2019.8823465.

[11] S. Wei, B. Wu, F. Li, and C. Liu, "A general space vector PWM control algorithm for multilevel inverters," *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, vol. 1, no. 1, pp. 562–568, 2003, doi: 10.1109/apec.2003.1179268.

[12] B. Lu and S. K. Sharma, "A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 5. pp. 1770–1777, 2009, doi: 10.1109/TIA.2009.2027535.

[13] U. M. Choi, F. Blaabjerg, and K. B. Lee, "Study and handling methods of power IGBT Module failures in power electronic converter systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 5. pp. 2517–2533, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2373390.

[14] S. Ouni *et al.*, "Quick diagnosis of short circuit faults in cascaded H-bridge multilevel inverters using FPGA," *J. Power Electron.*, vol. 17, no. 1, pp. 56–66, 2017, doi: 10.6113/JPE.2017.17.1.56.

[15] P. Mehta, M. Kumar, and S. Sahoo, "Fault Diagnosis in Five-level CHB Inverter using Normalization Factor and THD Analysis," *India International Conference on Power Electronics, IICPE*, vol. 2018–Decem. 2018, doi: 10.1109/IICPE.2018.8709547.

[16] N. Raj, G. Jagadanand, and S. George, "Fault detection and diagnosis in asymmetric multilevel inverter using artificial neural network," *International Journal of Electronics*, vol. 105, no. 4. pp. 559–571, 2018, doi: 10.1080/00207217.2017.1378382.

[17] P. Correa and J. Rodriguez, "Control strategy reconfiguration for a multilevel inverter operating with bypassed cells," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. pp. 3162–3167, 2007, doi: 10.1109/ISIE.2007.4375121.

[18] J. Rodríguez *et al.*, "Operation of a Medium-Voltage Drive Under Faulty Conditions," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 4. pp. 1080–1085, 2005.

[19] M. Aleenejad, H. Mahmoudi, and R. Ahmadi, "A Modified Space Vector Modulation Method for Fault-Tolerant Operation of Multilevel Converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*. pp. 1–1, 2015, doi: 10.1109/tpel.2015.2509446.

[20] S. Wei, B. Wu, F. Li, and X. Sun, "Control method for cascaded H-bridge multilevel inverter with faulty power cells," *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, vol. 1. pp. 261–267, 2003, doi: 10.1109/apec.2003.1179224.

[21] N. P. Quang and J. A. Dittrich, "Vector Control of Three-Phase AC Machines: System Development in the Practice," *Power Syst.*, vol. 20, 2008.