

RESEARCH ON EVALUATING THE PERFORMANCE OF SPEED CONTROL OF SINGLE-PHASE ASYNCHRONOUS MOTOR IN VARIOUS WIDE-PULSE MODULATION MODES

Le Duc Tiep, Nguyen Thi Thu Huong*, Ninh The Anh
Le Quy Don Technical University

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 08/6/2024	The article analyzes, evaluates, compares the performance of single-phase asynchronous motor speed control in various modulation modes with improved pulse width modulation (PWM) mode and classic SinPWM mode, as well as with the case of supplying standard sine wave. The proposed improvement rules are based on changing the distribution rules of motor states and braking states. The results are examined, analyzed, compared, and evaluated using a simulation model in Matlab-Simulink software. The performance of single-phase asynchronous motor speed control is evaluated by indicators such as mechanical characteristic stiffness, motor loading capacity, static speed oscillation based on comparison when controlling the speed of single-phase asynchronous motor according to the frequency-voltage control law with constant load case. The comparison results have shown that the output alternating voltage form of inverse H bridge with sequential improved switching law and SincosPWM provide better performance for the operation of single-phase asynchronous motor compared to the inverse H bridge voltage in classic SinPWM mode. In particular, the speed control performance in SincosPWM mode is nearly equivalent to supplying standard sine wave to the motor. This has practical significance in designing power conversion circuits for AC drive systems to save energy and reduce the impact of high-order harmonic waves.
Revised: 01/8/2024	
Published: 01/8/2024	
KEYWORDS	
H-bridge inverter	
Sequential switching law	
Symmetric switching law	
Single-phase asynchronous motor	
IGBT, Mosfet, BJT	

NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG ĐIỀU CHỈNH TỐC ĐỘ LÀM VIỆC CỦA ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ MỘT PHA Ở CÁC CHẾ ĐỘ ĐIỀU CHẾ ĐỘ RỘNG XUNG CẢI TIẾN

Lê Đức Tiếp, Nguyễn Thị Thu Hương*, Ninh Thế Anh
Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 08/6/2024	Bài báo phân tích, đánh giá, so sánh hiệu năng điều chỉnh tốc độ động cơ không đồng bộ một pha ở các chế độ điều chế độ rộng xung cải tiến với chế độ SinPWM kinh điển và với trường hợp khi cấp nguồn sin chuẩn. Các luật cải tiến được nhóm tác giả đề xuất dựa trên cơ sở thay đổi quy luật phân bố trạng thái động cơ và trạng thái hãm. Các kết quả được khảo sát, phân tích, so sánh và đánh giá bằng mô hình mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink. Trong đó hiệu năng điều chỉnh tốc độ động cơ không đồng bộ một pha được đánh giá bởi các chỉ số như độ cứng đặc tính cơ, khả năng tải của động cơ, dao động tĩnh tốc độ động cơ trên cơ sở so sánh khi điều khiển tốc độ động cơ không đồng bộ một pha theo luật điều chỉnh tần số - điện áp với trường hợp tải là hằng số. Kết quả so sánh đã chỉ ra dạng điện áp xoay chiều đầu ra nghịch lưu cầu H với luật chuyển mạch tuần tự cải tiến và SincosPWM cho đáp ứng hiệu năng làm việc của động cơ không đồng bộ một pha tốt hơn hẳn so với điện áp nghịch lưu cầu H ở chế độ SinPWM kinh điển; đặc biệt hiệu năng điều chỉnh tốc độ ở chế độ SincosPWM gần tương đương với khi cấp nguồn sin chuẩn cho động cơ. Điều này có ý nghĩa thực tiễn trong thiết kế các mạch biến đổi nguồn cho các hệ truyền động điện xoay chiều nhằm tiết kiệm năng lượng, giảm ảnh hưởng của các lượng sóng hài bậc cao.
Ngày hoàn thiện: 01/8/2024	
Ngày đăng: 01/8/2024	
TỪ KHÓA	
Nghịch lưu cầu H	
Luật chuyển mạch tuần tự	
Luật chuyển mạch đối xứng	
Động cơ không đồng bộ một pha	
Khóa bán dẫn IGBT, Mosfet, BJT	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.10574>

* Corresponding author. Email: huong82hvtqs@gmail.com

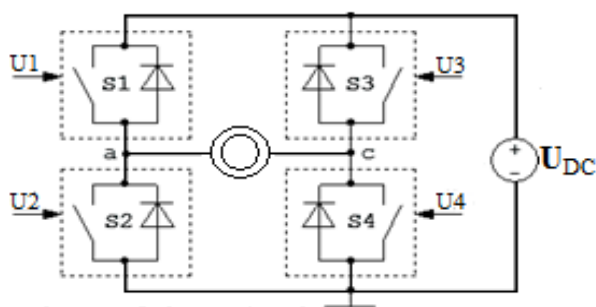
1. Giới thiệu

Ngày nay, việc điều chỉnh tốc độ các động cơ không đồng bộ một pha, hai pha và ba pha hay các động cơ xoay chiều khác với các biến tần tĩnh đã trở nên phổ biến và được ứng dụng rộng rãi trong thực tế cho công nghiệp cũng như quân sự nhờ sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ bán dẫn với việc điều khiển đóng cắt các khóa chuyển mạch của các dạng nghịch lưu khác nhau như nghịch lưu tia một pha, nghịch lưu tia nhiều pha, nghịch lưu cầu H, nghịch lưu cầu ba pha... Trong đó, việc điều khiển tốc độ động cơ điện một chiều, xoay chiều ở các chế độ điều chế độ rộng xung điều khiển chuyển mạch nghịch lưu cầu H đã được nghiên cứu và ứng dụng ngày càng phổ biến nhờ sự đơn giản và dễ dàng hiện thực hóa [1] – [14]. Vì vậy việc nghiên cứu đánh giá hiệu năng điều chỉnh tốc độ làm việc của động cơ không đồng bộ một pha hay nhiều pha với các luật chuyển mạch cải tiến hoặc với các chế độ điều chế độ rộng xung kinh điển có ý nghĩa to lớn trong việc lựa chọn, thiết kế các mạch cơ điện tử của các hệ truyền động điện xoay chiều. Thực tế, để điều khiển chuyển mạch nghịch lưu cầu H có các luật chuyển mạch số như luật chuyển mạch đối xứng, luật chuyển mạch không đối xứng, luật chuyển mạch tuần tự, luật chuyển mạch tuần tự tiết kiệm năng lượng, luật chuyển mạch đường chéo [11], [14]...; hoặc có thể sử dụng các kỹ thuật điều chế độ rộng xung như SinPWM, SIR, SvPWM... [1] – [18]. Tuy nhiên, với các công trình đã nghiên cứu thường tập trung với nghịch lưu cầu 3 pha, với nghịch lưu cầu H sử dụng tải là các động cơ điện xoay chiều thì các công trình nghiên cứu còn hạn chế. Trong đó, với các phương pháp điều chế độ rộng xung trên, mức hài bậc cao có chỉ số khá cao, mức hài cơ bản còn thấp, đặc biệt để làm tốt các chỉ số này thực tiễn thường dùng phương pháp thay đổi tần số băm xung mà chưa có nhiều các nghiên cứu sâu hơn về thay đổi quy luật phân bố trạng thái điện áp 0 và khác 0 [1], [11], [16]. Để nâng cao chất lượng điện áp đầu ra của nghịch lưu cầu H nhóm tác giả đã đề xuất hai phương án cải tiến là luật chuyển mạch tuần tự cải tiến [15] và sẽ được ký hiệu trong nội dung bài báo này là SinPWM_{CT} và luật chuyển mạch SinCosPWM [16]. Với 2 công trình đã công bố [15], [16] đã chỉ ra rằng dạng điện áp đầu ra cho các chỉ số hài cơ bản và tổng lượng hài tốt hơn hẳn so với các phương pháp kinh điển khác như SIR, SinPWM hay luật chuyển mạch tuần tự thông thường [15], [16]. Ở nội dung bài báo này nhóm tác giả nghiên cứu đánh giá hiệu năng làm việc của động cơ không đồng bộ một pha ở các chế độ điều chế độ rộng xung SinCosPWM và luật chuyển mạch tuần tự cải tiến so sánh với chế độ điều chế độ rộng xung kinh điển SinPWM và nguồn sin chuẩn để hỗ trợ quá trình nghiên cứu, thiết kế điều khiển các hệ truyền động điện xoay chiều với động cơ không đồng bộ.

2. Phương pháp nghiên cứu

Ở chế độ mạch hở, có nhiều phương pháp điều khiển tốc độ động cơ không đồng bộ như: điều chỉnh tốc độ bằng cách thay đổi điện trở phụ mạch roto, điều chỉnh tốc độ bằng cách thay đổi điện áp đặt vào mạch stato, điều chỉnh tốc độ bằng cách thay đổi số đôi cực, điều chỉnh tốc độ bằng các luật điều chỉnh tần số - điện áp [10], [11], [14], [17]. Trong đó, điều chỉnh tốc độ bằng các luật điều chỉnh tần số - điện áp là phương pháp tối ưu hơn cả, tùy theo tỷ lệ thay đổi giữa điện áp và tần số nguồn cấp cho mạch stato mà có thể lựa chọn tương ứng các dạng tải khác nhau [11]. Trong nội dung bài báo, nhóm tác giả lựa chọn điều chỉnh tốc độ động cơ không đồng bộ một pha với tải là hằng số theo luật điều chỉnh tần số - điện áp là $U/f = \text{const}$. Sơ đồ đầu nối nghịch lưu cầu H với tải là động cơ không đồng bộ một pha có dạng như hình 1.

Với dạng sơ đồ hình 1, việc điều chỉnh tần số - điện áp dựa trên cơ sở điều khiển chuyển mạch các khóa bán dẫn nghịch lưu cầu H. Có rất nhiều các phương pháp khác nhau để điều khiển chuyển mạch nghịch lưu cầu H, trong đó phương pháp thường được sử dụng rộng rãi là chế độ điều chế độ rộng xung SinPWM [11] với tải xoay chiều. Khi đó dạng điện áp đầu ra nghịch lưu cầu H ở bán kỳ dương trước khi cấp nguồn cho động cơ sẽ có dạng như hình 2 với trường hợp có 5 xung điện áp, có dạng tương tự với trường hợp có số xung áp nhiều hơn; ở bán kỳ âm dạng điện áp tương ứng nhưng với dấu đảo chiều [8], [15], [16].



Hình 1. Sơ đồ đấu nối nghịch lưu cầu H với động cơ không đồng bộ một pha

Nhận thấy rằng, điện áp ra là điện áp xoay chiều dạng xung, giá trị điện áp điều chỉnh bằng cách thay đổi giá trị điện áp trung bình thông qua việc điều chỉnh độ rộng và tổng thời gian lưu giữ các xung điện áp khác 0 và xung điện áp 0. Giả sử ta cần điều chế điện áp xoay chiều dạng xung có chu kỳ T giây với hệ số điều chỉnh điện áp k_p . Như vậy tổng thời gian lưu giữ các trạng thái điện áp khác 0 trên một chu kỳ T sẽ là $k_p.T$ giây, tổng thời gian lưu giữ các trạng thái điện áp 0 sẽ là $T - k_p.T = (1 - k_p)T$ giây [8], [11], [15], [16]. Từ đó, để thực hiện luật điều chỉnh tần số $U/f = \text{const}$ ta thực hiện điều chỉnh giá trị điều chỉnh điện áp k_p và chu kỳ T của điện áp xoay chiều dạng xung được điều chế. Khi đó $k_p = U_1/U_{dm} = f_1/f_{dm}$ [11], trong đó U_1 , U_{dm} lần lượt là điện áp làm việc và điện áp định mức tương ứng với tần số làm việc f_1 và tần số định mức f_{dm} của động cơ.

Ở chế độ luật chuyển mạch tuần tự cải tiến SinPWM_CT [15] mà nhóm tác giả đề xuất, để nâng cao chất lượng điện áp đầu ra nghịch lưu cầu H, quy luật phân bố n trạng thái điện áp khác 0 trên mỗi bán kỳ được xác định độ rộng xung theo công thức sau:

$$\delta_i = \frac{k_p T \sin(i\pi / (n+1))}{2 \sum_{i=1}^n \sin(i\pi / (n+1))} \quad (1)$$

Trong đó δ_i là độ rộng xung khác 0 thứ i trên mỗi bán kỳ, $i = 1, 2 \dots n$.

Để đảm bảo tính đối xứng trong mỗi bán kỳ của điện áp xoay chiều đầu ra nghịch lưu cầu H sẽ điều chế $n+1$ xung điện áp 0 trên mỗi bán kỳ, trong đó xung số 1 và $n+1$ có độ rộng bằng nhau và bằng $(1 - k_p)T/4n$, độ rộng xung số 2 đến xung thứ n bằng nhau và bằng $(1 - k_p)T/2n$.

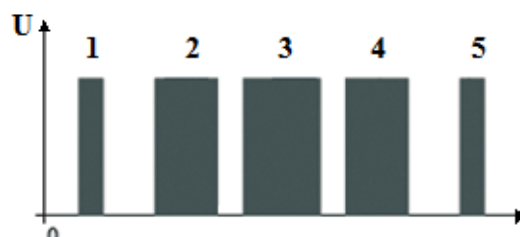
Với luật SincosPWM [16] mà nhóm tác giả đề xuất, quy luật phân bố trạng thái điện áp khác 0 cũng thực hiện như công thức (1) ở luật chuyển mạch tuần tự cải tiến ở trên, chỉ khác ở quy luật điều chế phân bố các trạng thái điện áp 0. Để đảm bảo tính đối xứng trong quy luật phân bố các trạng thái điện áp 0 và khác không, ta điều chế số xung điện áp 0 là $p+1$, khi điện áp trung bình là dương và nhỏ hơn điện áp định mức, tức là $1 > k_p > 0$ thì thứ tự điều chế sao cho trong một nửa chu kỳ điện áp xoay chiều luôn bắt đầu và kết thúc là giá trị điện áp 0, khi đó độ rộng xung của xung điện áp 0 thứ i sẽ được xác định như sau [16]:

$$\delta_{0i} = \frac{(1 - k_p)T |\cos(i\pi / (p+2))|}{2 \sum_{i=1}^{p+1} |\cos(i\pi / (p+2))|} \quad (2)$$

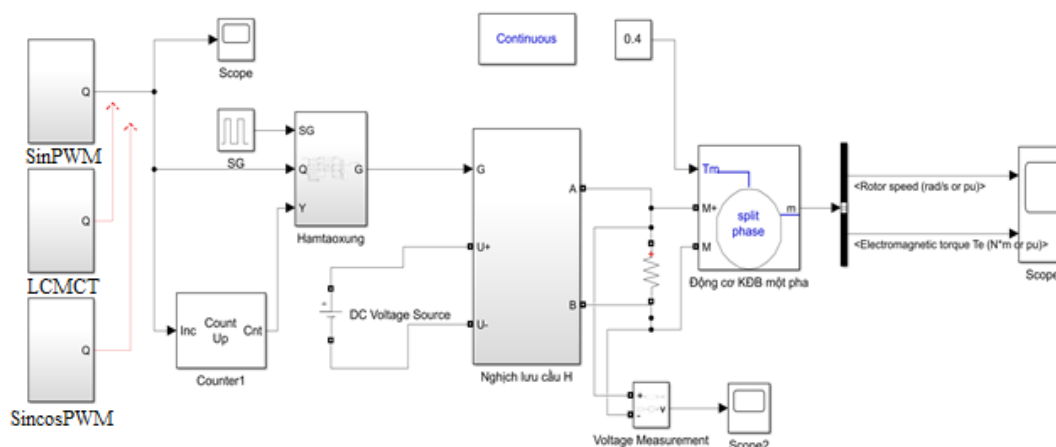
Các dạng điện áp ra của nghịch lưu cầu H với trường hợp có 9 xung ở các chế độ SinPWM, SincosPWM và SinPWM_CT có dạng như các hình 4, 5, 6.

3. Kết quả và bàn luận

Để kiểm tra, đánh giá hiệu năng làm việc của động cơ không đồng bộ một pha ở chế độ điều chế độ rộng xung ta sử dụng mô hình mô phỏng Matlab với tải như hình 3.



Hình 2. Dạng điện áp ra nghịch lưu cầu H nửa bán kỳ dương ở chế độ SinPWM



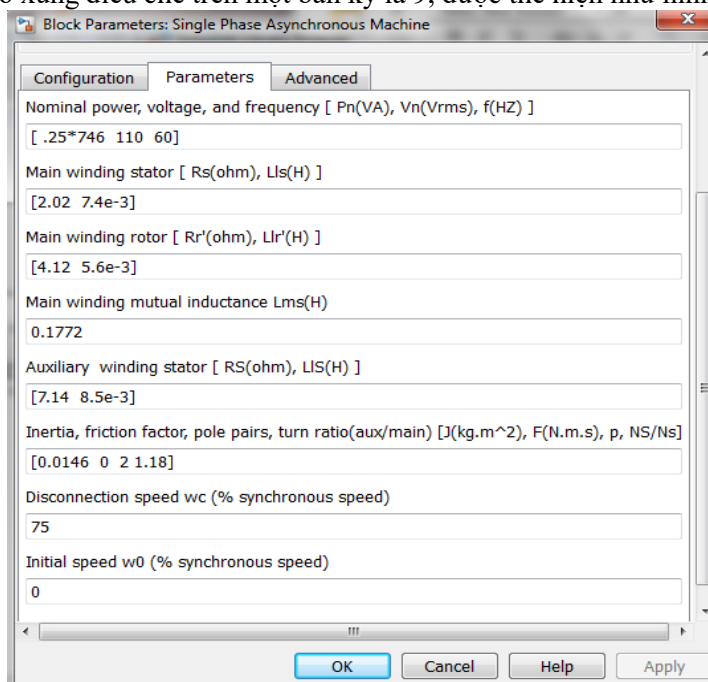
Hình 3. Mô hình mô phỏng điều khiển nghịch lưu cầu H với luật chuyển mạch tuần tự

Mô hình mô phỏng bao gồm các khối chính sau:

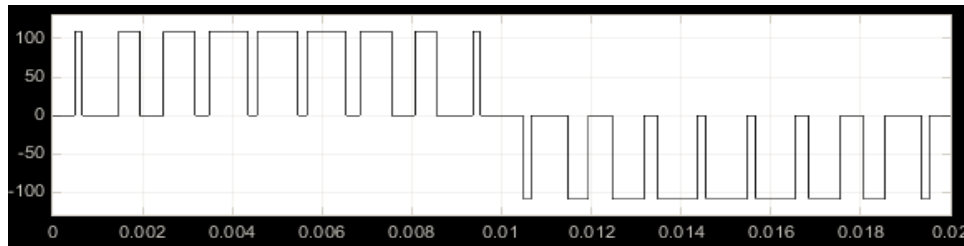
- Mô hình nghịch lưu cầu H với khối Nghịch lưu cầu H;
- DC Voltage Source là nguồn điện một chiều cấp cho nghịch lưu cầu H;
- Hamtaoxung là khối thuật toán logic tạo ra các xung điều khiển của các hàm logic U1, U2, U3, U4 tương ứng;
- Scope là khối hiển sóng đo tín hiệu tốc độ và mô men của động cơ không đồng bộ một pha.
- Động cơ không đồng bộ một pha có các thông số được cho sẵn bởi Matlab như trên hình 4.

Để đánh giá, so sánh, phân tích hiệu năng làm việc của động cơ ta lấy các thông số của động cơ, số xung, tần số đầu, hệ số điều chỉnh điện áp k_p là hoàn toàn giống nhau ở các chế độ điều chế độ rộng xung khác nhau như SinPWM và các luật cải tiến đề xuất cùng với trường hợp nguồn dạng sin chuẩn. Các dạng điện áp ra của nghịch lưu với tần số 50 Hz và số xung là 9 ở các chế độ SinPWM, SincosPWM và SinPWM_CT trước khi cấp cho động cơ sẽ có dạng như các hình 5, 6, 7.

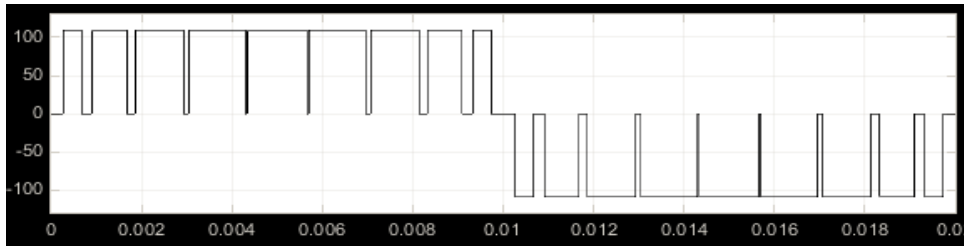
Kết quả mô phỏng đặc tính quá độ tốc độ với trường hợp riêng khi tần số điện áp cấp cho động cơ là 50 Hz, số xung điều chế trên một bán kỳ là 9, được thể hiện như hình 8.



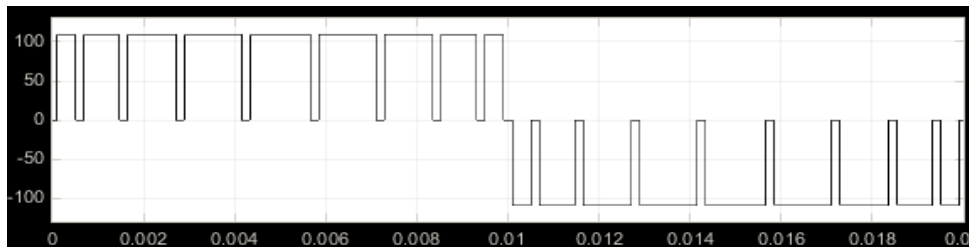
Hình 4. Các thông số của động cơ không đồng bộ một pha



Hình 5. Dạng điện áp ra nghịch lưu cầu H ở chế độ SinPWM

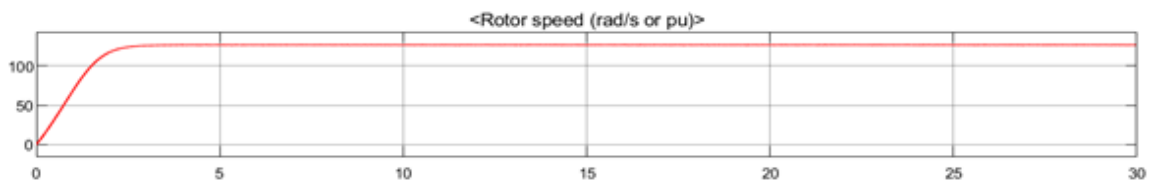


Hình 6. Dạng điện áp ra nghịch lưu cầu H ở chế độ SincosPWM



Hình 7. Dạng điện áp ra nghịch lưu cầu H ở chế độ SinPWM_CT

Phân tích các hình 5, 6, 7 thấy rằng sự phân bố các trạng thái điện áp khác 0 và điện áp 0 ở các chế độ SinPWM, SincosPWM và SinPWM_CT đã có sự khác biệt rõ ràng khi ở cùng một hệ số điều chỉnh K_p với tần số 50Hz và số xung là 9 trên mỗi bán kỳ.



Hình 8. Đặc tính quá độ tốc độ của động cơ ở chế độ SincosPWM với tải 0,1 Nm

Từ hình 8 thấy rằng dạng đặc tính tốc độ của động cơ khi ở tần số 50Hz, nghịch lưu ở chế độ chuyển mạch SincosPWM đảm bảo đạt tới trạng thái xác lập ổn định với dao động nhỏ. Thời gian quá độ 2 giây ở chế độ mạch hờ khi chưa sử dụng các giải pháp tối ưu vòng kín là đảm bảo.

Đặc tính quá độ tốc độ của động cơ không đồng bộ pha ở các chế độ SinPWM và SinPWM_CT cũng như với nguồn sin chuẩn cũng có dạng tương tự như ở chế độ SincosPWM, tuy nhiên khác về giá trị tốc độ xác lập, dao động tốc độ, và thời gian quá độ... Những sự khác biệt này được đánh giá thông qua các mô tả bảng thông số 1, 2, 3, 4. Trong các bảng thông số trên, ký hiệu $M_{tai\ max}$ là giá trị mô men tải cực đại mà động cơ có thể khởi động và làm việc tăng tốc để đạt tới trạng thái xác lập. Giá trị này được mô phỏng dò tìm khi thay đổi mô men tải tăng dần từ 0,1 Nm theo bước giá trị 0,01 Nm trên mô hình mô phỏng Matlab Simulink hình 3, với giá trị mô men tải lớn hơn giá trị cực đại thì động cơ sẽ bị đảo chiều quay, do tải là dạng có tính thể năng. Ký hiệu f_{dc} là mức tần số điều chỉnh mà động cơ có thể làm việc tương ứng với từng giá trị

mô men tải cụ thể, giá trị này được khảo sát bằng cách thay đổi điều chỉnh giá trị tần số nguồn cấp cho mạch stato từ giá trị tần số định mức $f_{dm} = 60$ Hz giảm dần theo bước giá trị bằng 1 Hz và thay đổi điện áp theo luật $U/f = \text{const}$ tương ứng ở một giá trị mô men tải là hằng số cụ thể. Với giá trị f_{dc} nhỏ hơn giá trị cực tiểu thì động cơ sẽ không thể tăng tốc đạt tới trạng thái xác lập, mà bị kéo quay ngược chiều do tải có tính thể năng.

Bảng 1. Giá trị tốc độ xác lập của động cơ ở các chế độ PWM khác nhau và nguồn sin chuẩn

Mô men tải (Nm)	Tốc độ xác lập của động cơ ở các chế độ PWM khác nhau và với nguồn sin chuẩn khi tăng mô men tải tới gần mô men cực đại (rad/s)			
	SinPWM	SinPWM_CT	SincosPWM	Nguồn Sin chuẩn
0,1	123,8	126,9	127,1	127,2
0,15	120,9	125,4	125,8	125,9
0,2	117,6	123,9	124,4	124,6
0,25	114,1	122,2	123	123,3
0,3	110,1	120,5	121,5	122,1
0,35	105,5	118,8	120	120,6
0,4	100,2	116,9	118,4	119,2
0,48	$M_{\text{tải max}}$	113,6	115,6	116,9
0,88	-	$M_{\text{tải max}}$	97,1	101,4
0,99	-	-	$M_{\text{tải max}}$	95,4
1,07	-	-	-	$M_{\text{tải max}}$

Phân tích bảng 1 thấy rằng khi thay đổi mô men tải tăng dần từ 0,1 thì tốc độ xác lập của động cơ ở hai chế độ điều chế độ rộng xung cải tiến mà nhóm tác giả đề xuất là SinPWM_CT và SincosPWM đều cho giá trị lớn hơn so với chế độ SinPWM kinh điển, giá trị này càng khác biệt và đáng kể khi mô men tải càng lớn. Sự thay đổi này cho thấy công suất cơ của động cơ không đồng bộ một pha ở các chế độ điều chế độ rộng xung cải tiến là lớn hơn so với chế độ SinPWM kinh điển, đồng thời cũng khẳng định độ cứng đặc tính cơ của động cơ ở các chế độ cải tiến là cứng hơn. Đặc biệt với chế độ SincosPWM thì các giá trị tốc độ xác lập có sự sai biệt không đáng kể so với tốc độ xác lập của động cơ với nguồn sin chuẩn. Giá trị mô men tải cực đại mà động cơ có thể làm việc ở chế độ SincosPWM là 0,99 Nm lớn hơn nhiều so với mức 0,48 Nm ở chế độ SinPWM, và gần đạt tới mức 1,07 Nm với nguồn sin chuẩn. Để đánh giá đáp ứng độ cứng đặc tính cơ của động cơ với từng chế độ PWM một cách cụ thể hơn, ta xem xét bảng 2 mô tả sự thay đổi tốc độ xác lập của động cơ khi thay đổi mô men tải trong các khoảng sai lệch là 0,05 Nm.

Bảng 2. Sự thay đổi tốc độ xác lập của động cơ khi thay đổi mô men tải ở chế độ SinPWM và Sin-SinPWM

Các khoảng thay đổi mô men tải (Nm)		0,1÷0,15	0,15÷0,2	0,2÷0,25	0,25÷0,3	0,3÷0,35	0,35÷0,4
Mức thay đổi tốc độ xác lập ở các chế độ PWM	SinPWM ($\Delta\omega 1$ rad/s)	2,9	3,3	3,5	4	4,6	5,3
	SinPWM_CT ($\Delta\omega 2$ rad/s)	1,5	1,5	1,7	1,7	1,7	1,9
	SincosPWM ($\Delta\omega 3$ rad/s)	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6
$\Delta\omega 1/ \Delta\omega 2$		1,933	2,2	2,06	2,35	2,71	2,79
$\Delta\omega 1/ \Delta\omega 3$		2,23	2,36	2,5	2,67	3,07	3,31

Phân tích bảng 2 thấy rằng sự thay đổi tốc độ xác lập trên từng khoảng thay đổi khi tăng mô men tải 0,05 Nm thì tốc độ xác lập của động cơ ở chế độ xác lập giảm theo từng mức từ 2,9 rad/s đến 5,3 rad/s. Trong khi đó giá trị này ở các chế độ SinPWM_CT và SincosPWM nhỏ hơn khá nhiều theo các khoảng từ 1,5 rad/s đến 1,9 rad/s và 1,3 rad/s đến 1,6 rad/s. Điều này nhấn mạnh như kết luận phân tích ở trên về mức công suất cơ của động cơ khi ở chế độ SincosPWM và SinPWM_CT là cao hơn so với SinPWM, và càng lớn hơn khi tải lớn hơn. Ngoài ra, trên bảng 2 các chỉ số $\Delta\omega 1/ \Delta\omega 2$ và $\Delta\omega 1/ \Delta\omega 3$ cho thấy sự khác biệt về độ cứng đặc tính cơ trung bình trên

từng khoảng thay đổi mô men tải là 0,05 Nm khi mô men tải tăng dần từ 0,1 Nm đến 0,4 Nm. Như đã biết, độ cứng đặc tính cơ được xác định bằng tỷ lệ sự thay đổi của mô men và sự thay đổi của tốc độ, như bảng 2 sự thay đổi của mô men là như nhau, do đó sự khác biệt độ cứng đặc tính cơ của động cơ ở từng chế độ PWM theo các khoảng thay đổi mô men động cơ cũng tương ứng là các giá trị $\Delta\omega_1/\Delta\omega_2$ và $\Delta\omega_1/\Delta\omega_3$. Thấy rằng, độ cứng của đặc tính cơ của động cơ trong vùng làm việc ổn định xác lập ở các chế độ SinPWM_CT và SincosPWM lần lượt lớn hơn theo các khoảng từ 1,933 lần tới 2,79 lần và 2,23 lần tới 3,31 lần so với ở chế độ SinPWM. Độ cứng đặc tính cơ của động cơ ở chế độ SincosPWM thay đổi là nhỏ nhất khi tải tăng dần từ 0,1 Nm đến 0,4 Nm với mức thay đổi tốc độ xác lập tương ứng chỉ là 1,3 rad/s tới 1,6 rad/s. Như vậy, với phân tích về thay đổi độ cứng đặc tính cơ theo từng vùng tải như trên cho thấy động cơ sẽ làm việc ổn định và ít rung lắc nhất khi có sự tác động vào mô men tải bên ngoài khi động cơ làm việc ở chế độ SincosPWM so với các chế độ còn lại, ở chế độ SinPWM_CT cũng đảm bảo gần với chế độ SincosPWM. Độ cứng đặc tính cơ lớn hơn giúp động cơ làm việc ổn định hơn trước sự thay đổi biến động về mô men tải, ngoài ra cũng giúp tăng dải điều chỉnh tốc độ của động cơ. Dải điều chỉnh tốc độ của động cơ được thể hiện bằng vùng làm việc ổn định của động cơ khi thay đổi tần số cấp nguồn cho mạch stato ở bảng 3.

Bảng 3. Dải điều chỉnh tần số nguồn cấp cho mạch stato của động cơ ở các chế độ PWM khác nhau với mức tải lần lượt là 0,1 Nm và 0,4 Nm

Mô men tải (Nm)	Dải tần số làm việc của động cơ ở các chế độ điều chế độ rộng xung khác nhau		
	SinPWM	SinPWM_CT	SincosPWM
$T_m = 0,1 \text{ Nm}$	$17 \leq f_{dc} \leq 60 \text{ Hz}$	$7 \leq f_{dc} \leq 60 \text{ Hz}$	$4 \leq f_{dc} \leq 60 \text{ Hz}$
$T_m = 0,4 \text{ Nm}$	$45 \leq f_{dc} \leq 60 \text{ Hz}$	$27 \leq f_{dc} \leq 60 \text{ Hz}$	$21 \leq f_{dc} \leq 60 \text{ Hz}$

Phân tích kết quả bảng 3 cho thấy rằng ở các mức mô men tải 0,1 Nm và 0,4 Nm thì dải tần số làm việc của động cơ ở chế độ SincosPWM và SinPWM_CT là lớn hơn nhiều so với ở chế độ SinPWM kinh điển, đặc biệt khi tải 0,4 Nm thì dải điều chỉnh tần số ở chế độ SinPWM chỉ là 45 Hz đến 60 Hz, trong khi ở chế độ SincosPWM là 21Hz đến 60 Hz, còn ở chế độ SinPWM_CT dải này là 27 Hz đến 60 Hz.

Bảng 4. Thời gian quá độ (t_{qd}) và dao động tốc độ ($\Delta\omega$) ở các chế độ điều chế độ rộng xung khác nhau

Mô men tải (Nm)	Thời gian quá độ và dao động tốc độ ở các chế độ điều chế độ rộng xung khác nhau					
	SinPWM		SinPWM_CT		SincosPWM	
	$t_{qd} (s)$	$\Delta\omega (rad)$	t_{qd}	$\Delta\omega (rad)$	t_{qd}	$\Delta\omega (rad)$
$T_m = 0,1 \text{ Nm}$	3,6	0,5	3,5	0,4	2,3	0,7
$T_m = 0,2 \text{ Nm}$	6,9	0,6	3,9	0,4	2,6	0,7

Phân tích bảng 4 cho thấy rằng thời gian quá độ tốc độ của động cơ ở chế độ SinPWM kinh điển ở hai mức mô men tải 0,1 Nm và 0,2 Nm tương ứng là 3,6s và 6,9s lớn hơn hẳn so với hai chế độ SinPWM_CT và SincosPWM, đặc biệt ở chế độ SincosPWM thời gian quá độ với hai mức tải tương ứng trên là nhỏ hơn đáng kể với thời gian tương ứng là 2,3s và 2,6s. Thời gian quá độ giúp động cơ nhanh chóng làm việc tới trạng thái xác lập, đáp ứng nhanh yêu cầu làm việc của hệ thống. Tuy nhiên, mức dao động tĩnh ở chế độ SincosPWM lại lớn hơn một chút so với chế độ SinPWM và SinPWM_CT, nhưng thông số này là nhỏ, khả năng gây rung ồn không đáng kể. Ở chế độ SinPWM_CT thì mức dao động tốc độ tĩnh nhỏ nhất có giá trị là 0,4 rad còn ở chế độ SincosPWM là 0,7 rad. Giá trị tốc độ xác lập với mức mô men tải 0,1 Nm và 0,2 Nm ở các chế độ điều chế xung này đều lớn hơn 123, nên sai số dao động tốc độ nhỏ hơn 0,06% là đảm bảo tốt yêu cầu làm việc với các hệ thống truyền động điện thông thường.

4. Kết luận

Bài báo đưa ra các phân tích đánh giá so sánh hiệu năng điều chỉnh tốc độ của động cơ không đồng bộ một pha ở các chế độ điều chế độ rộng xung cải tiến SinPWM_CT và SincosPWM mà

nhóm tác giả đã đề xuất so với ở chế độ SinPWM kinh điển. Qua phân tích đánh giá các thông số như giá trị tốc độ xác lập của động cơ khi thay đổi tải, giá trị mô men cực đại mà động cơ có thể làm việc, độ cứng đặc tính cơ khi thay đổi tải trên vùng làm việc ổn định của động cơ, thời gian quá độ đã cho thấy đáp ứng hiệu năng làm việc của động cơ ở các chế độ cải tiến đề xuất là tốt hơn hẳn so với ở chế độ SinPWM kinh điển. Đặc biệt ở chế độ SincosPWM cho đáp ứng làm việc là tốt nhất. Như vậy, với các phương pháp điều chế độ rộng xung cải tiến mà nhóm tác giả đề xuất nếu được sử dụng trong các hệ truyền động điện động cơ không đồng bộ một pha sẽ nâng cao công suất cơ của động cơ, tăng khả năng làm việc ổn định trước sự thay đổi mô men tải, và tăng khả năng đáp ứng nhanh của hệ thống với yêu cầu tải đặt ra.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. Hava, J. Kerkman, and A. Lipo, "A High Performance Generalized Discontinuous PWM Algorithm," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 34, no. 5, pp. 1059–1071, 1998.
- [2] I. A. Bakhovtsev, "Development of energy-optimal methods for controlling autonomous voltage inverters and their microprocessor implementation," Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Novosibirsk, NSTU, 1998.
- [3] R. L. Gorbunov, "Pulse AC voltage converter with improved energy performance," Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Tomsk, TPU, 2016.
- [4] J. Holtz, "Pulsewidth modulation for electronic power conversion," *Proc. IEEE*, vol. 82, pp. 1194–1214, Aug. 1994.
- [5] S. V. Hukhtikov, "Research and development of voltage inverters with PWM with a passive phase," Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Moscow, MPEI, 2013.
- [6] A. Wintrich, U. Nicolai, and T. Reimann, *Application Manual Power Semiconductors, Application Handbook*, SEMIKRON International, 2015.
- [7] J. Rodríguez, J. Lai, and F. Z. Peng, "Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 724–738, 2002.
- [8] V. V. Kryuchkov, "Development of an inverter in pulse-width modulation mode according to a sinusoidal law," *Journal "Practical Power Electronics"*, vol. 27, no. 2, pp. 23–27, 2007.
- [9] T. Le, T. Do, D. Duong, and T. Dang, "Improved SIR pulse width adjustment algorithm to control three-phase asynchronous motors," *EPU Journal of Science and Technology for Energy*, no. 25, pp. 50–60, 2021.
- [10] T. Le, "Improve asymmetric 180° digital switching rule to eliminate conduction currents," *Journal of Communications science and education*, no.32, pp. 87–92, 2022.
- [11] T. Le, "Inverters in vector PWM mode for controlling asynchronous motors," Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Moscow, MAI, 2018.
- [12] M. Venkatesha and K. Krishnanurthy, "An optimal PWM inverter," *the National Workshop on Microprocessor Controlled Drives*, MCE, Bassan, Aug. 27-28, 1993, pp. 95-131.
- [13] M. Venkatesha and K. Krishnanurthy, "Linear suboptimal PWM switching for microprocessor controlled inverters," *IEEE, TENCON*, Aug. 28-30, 1991, pp. 29-32.
- [14] B. N. Popov, "Methods for designing microprocessor control devices for mechatronic modules of drive systems," Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, Moscow, MAI 2000.
- [15] T. Le, H. Nguyen, and A. Ninh, "Research on improvement of h-bridge inverted sequential converting law with ac motor load," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 228, no. 14, pp. 177 – 183, 2023.
- [16] T. Le, H. Luon, and M. Nguyen, "Power quality enhancement of h-bridge indirect output voltage by changing time distribution of voltage status 0 and different 0," *Journal of Science and Technique*, vol. 19, no. 01, pp. 94 – 104, 2024.
- [17] S. Averin and D. Le, "Analysis of resultant vectors sequence order while vector PWM realization," *Journal "Practical Power Electronics"*, vol. 69, no. 1, pp. 19–23, 2018.
- [18] V. E. Shchetinin, "Single-phase inverters with multicell structure," Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Moscow, MAI, 2017.