

NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ BỘ HÃM TÁI SINH CHO XE ĐIỆN SỬ DỤNG ĐỘNG CƠ BLDC

RESEARCH AND DESIGN OF REGENERATIVE BRAKING FOR ELECTRIC VEHICLES USING BLDC MOTOR

VŨ NGỌC MINH*, PHẠM THỊ HỒNG ANH

Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: minhvn.ddt@vamaru.edu.vn

Tóm tắt

Động cơ điện một chiều không chổi than (BLDC) được sử dụng rộng rãi cho ô tô điện, xe máy điện vì nó hiệu quả, mật độ năng lượng cao và dễ điều khiển, dễ bảo dưỡng. Bài báo đề xuất một phương pháp đơn giản, chi phí thấp để tái sử dụng năng lượng chuyển động của xe điện sử dụng động cơ BLDC trong quá trình phanh. Cấu trúc bộ biến đổi cầu ba pha được phân tách thành ba bộ băm xung nâng áp một chiều hoạt động kết hợp với nhau. Bài báo cũng trình bày cấu trúc điều khiển, mạch mô phỏng và các thiết bị thực nghiệm quá trình hãm tái sinh trả năng lượng về phía nguồn. Các kết quả mô phỏng trên phần mềm PSIM và kết quả thực nghiệm cho thấy khả năng tái sinh năng lượng, tính chính xác và hiệu quả của thiết bị được xây dựng.

Từ khóa: Nghịch lưu ba pha, điều khiển động cơ BLDC.

Abstract

Brushless DC (BLDC) motors are widely used in electric cars and electric motorcycles because of their efficiency, high energy density, and ease of control and maintenance. The paper proposes a simple, low-cost method to reuse the motion energy of electric vehicles using BLDC motors during braking. The three-phase bridge converter structure is decomposed into three DC boost converter operating in combination. The paper also presents the control structure, simulation circuit and experimental devices for the regenerative braking process to return energy to the source. Simulation results on PSIM software and experimental results show the ability to regenerate energy, accuracy and efficiency of the built device.

Keywords: Three phase inverter, BLDC motor control.

1. Đặt vấn đề

Hiện nay trên thế giới cũng như ở Việt Nam, động cơ điện một chiều không chổi than (BLDC, Brushless direct current) được dùng phổ biến trong xe máy điện, ô tô điện có công suất từ 250W đến 50kw. Động cơ một chiều không chổi than là một loại máy điện xoay chiều đồng bộ có tốc độ roto bằng tốc độ từ trường. Khác với động cơ điện một chiều thông thường, BLDC được chuyển mạch bằng điện tử. Động cơ BLDC thường bao gồm 3 cảm biến Hall để phát hiện vị trí roto, làm cơ sở để mạch điều khiển phân bổ năng lượng đến các cuộn dây stator. Stator gồm có lõi sắt là những lá thép kỹ thuật điện ghép cách điện với nhau và dây quấn. Cách quấn dây của BLDC khác so với cách quấn dây của động cơ xoay chiều 3 pha thông thường, sự đặc biệt này tạo nên sức phản điện động dạng hình thang. Động cơ cung cấp khả năng công suất và mô-men xoắn cao hơn 15% so với PMSM [1]. Rotor làm từ nam châm vĩnh cửu nên ngoài chế độ động cơ, có thể đưa BLDC về chế độ máy phát, biến cơ năng chuyển động quay roto thành điện năng trên các cuộn dây stator.

Xe điện chuyển động trên đường có 2 trạng thái chạy và phanh. Khi ở trạng thái chạy, động cơ BLDC được cấp điện từ nguồn ắc quy, biến đổi điện năng thành cơ năng kéo xe di chuyển. Khi xe ở trạng thái phanh, động cơ bị ngừng cấp điện hoặc đưa vào chế độ hãm động năng. Trường hợp dừng cấp điện, xe được giảm tốc độ nhờ phanh cơ khí, cơ năng chuyển động của thân xe bị biến đổi thành nhiệt năng trên má phanh [2]. Trường hợp điều khiển hãm động năng, cơ năng chuyển động của thân xe bị biến đổi một phần thành nhiệt năng phân bổ trên hệ thống van bán dẫn và động cơ, một phần thành nhiệt năng trên má phanh. Như vậy, trường hợp thứ hai sẽ giúp xe phanh hãm nhanh và an toàn hơn. Trong cả hai trường hợp trên, cơ năng chuyển động của xe đều bị biến đổi thành nhiệt năng và bỏ đi một cách lãng phí.

Một số công trình nghiên cứu phân tích chế độ máy phát của BLDC [3][4], trình bày về công suất thu được so với vận tốc quay roto và các tổn thất trên máy phát. Kết quả cho thấy khi sử dụng bộ chỉnh lưu diode,

công suất điện thu được ở vùng tốc độ thấp là rất nhỏ. Công trình nghiên cứu [5] tìm cách nâng cao hiệu suất của máy phát BLDC bằng bộ chỉnh lưu tích cực, giải pháp này phù hợp khi BLDC ở tốc độ cao và quay ổn định, vùng tốc độ thấp và biến đổi chưa được xét đến.

Trong bài báo này, tác giả trình bày giải pháp sử dụng mạch cầu ba pha IGBT [6] kết hợp với thuật toán điều khiển ổn định dòng ở chế độ chỉnh lưu nâng áp cho quá trình hãm tái sinh của xe ô tô, xe máy điện sử dụng động cơ BLDC.

2. Mô hình hóa BLDC ở chế độ máy phát

Để đơn giản hóa việc điều khiển hãm tái sinh và tối đa hóa công suất đầu ra, một mô hình động học tương đương của BLDC ở chế độ máy phát được trình bày trên Hình 1. Trong mô hình, điện trở của các pha và độ tự cảm của ba cuộn dây bằng nhau, sức điện động cảm ứng có hình dạng giống hệt nhau; tổn thất chuyển mạch của van và tổn thất lõi không đáng kể [5]. Với những giả định này, phương trình điện áp pha của máy phát BLDC có thể được biểu diễn như sau.

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s - M & 0 & 0 \\ 0 & L_s - M & 0 \\ 0 & 0 & L_s - M \end{bmatrix} * \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó e_x, v_x, i_x, R_s, L_s và M lần lượt đại diện cho sức điện động, điện áp đầu cực, dòng điện pha, điện trở pha, điện cảm pha và hỗ cảm giữa các pha.

BLDC ở chế độ máy phát tạo ra các sức điện động ba pha có dạng hình thang, như trong Hình 2, có độ lớn tỷ lệ thuận với tốc độ. Hình dạng dòng điện pha của máy phát BLDC phụ thuộc vào hoạt động của bộ chuyển đổi năng lượng kết nối với máy phát điện và sử dụng chiến lược chỉnh lưu.

Ở chế độ máy phát, công suất trung bình được tính như sau:

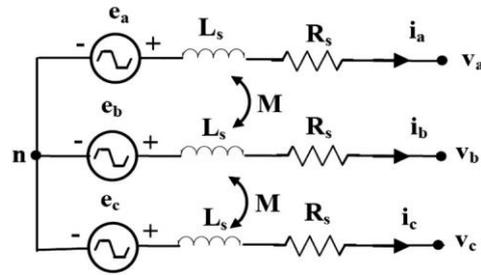
$$P_{avg} = \sum_{k=a,b,c} \frac{1}{T} \int_0^T e_k(t) i_k(t) dt \quad (2)$$

$$= \frac{3}{T} \int_0^T (e_a(t) i_a(t) dt)$$

$$P_{out} = \sum_{k=a,b,c} \frac{1}{T} \int_0^T v_k(t) i_k(t) dt$$

$$= \frac{3}{T} \int_0^T e_a(t) i_a(t) dt - 3R_s i_a^2 - \frac{3L_s}{T} \int_0^T i_a(t) di_a(t) \quad (3)$$

I II III

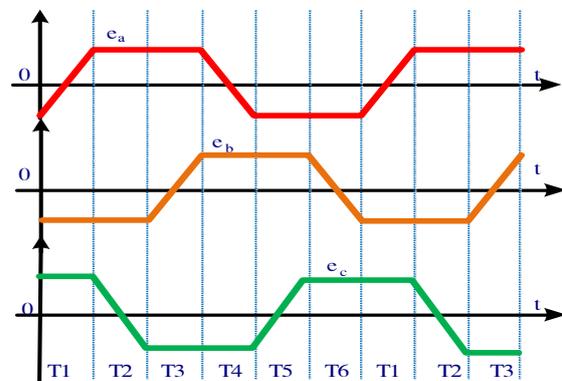


Hình 1. Mạch quy đổi của BLDC chế độ máy phát

Phương trình 3 tính công suất điện cung cấp ở đầu ra máy phát. Phần I chỉ ra giá trị trung bình năng lượng được tạo ra trong khe hở không khí, phần II là tổn thất đồng stato, nó rất nhỏ. Phần III là công suất trung bình của cuộn cảm stato, có giá trị bằng không trong một chu kỳ. Như vậy, công suất đầu ra được tạo ra từ BLDC hoàn toàn là phụ thuộc vào công suất của khe hở không khí.

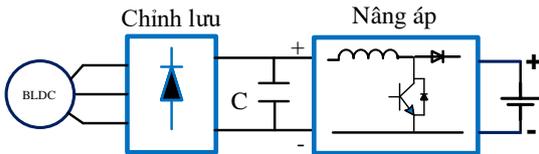
3. Nguyên lý hãm tái sinh khi xe chuyển động

Khi roto của BLDC quay, trên các cuộn dây stato có sức điện động 3 pha e_a, e_b, e_c . Nếu mắc tải thuận trở vào 3 pha sẽ hình thành dòng điện qua tải, BLDC sẽ hoạt động ở chế độ máy phát, cơ năng chuyển động được biến đổi thành điện năng cấp cho tải. Tuy nhiên, với xe điện, quá trình tái sinh năng lượng sẽ phức tạp hơn. Thứ nhất nếu tái sinh cơ năng chuyển động quay thành điện năng thì nơi hấp thụ hiệu quả điện năng này chỉ có thể là các bộ ắc quy, nói cách khác điện năng sinh ra sẽ nạp lại cho các bộ ắc quy của xe. Thứ 2, từ phương trình (1) và đồ thị Hình 2 ta thấy, ở những thời điểm muốn hãm tái sinh, Các sức điện động do BLDC sinh ra có dạng hình thang, xoay chiều và biên độ nhỏ hơn điện áp nguồn đầu vào. Như vậy, để có thể hãm tái sinh đưa năng lượng về nguồn cần có bộ biến đổi đảm nhiệm nhiệm vụ chỉnh lưu và nâng áp cho nguồn điện do BLDC tạo ra thành nguồn điện có thể nạp cho ắc quy.



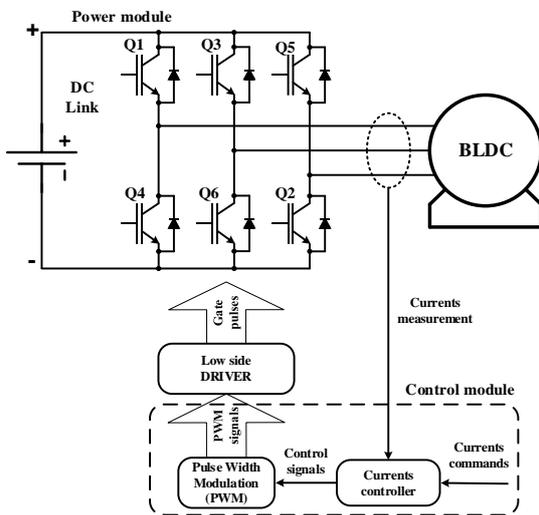
Hình 2. Biểu đồ sức điện động của BLDC

Hình 3 trình bày giải pháp kỹ thuật thường dùng để tiến hành hãm tái sinh. Mạch cầu chỉnh lưu 6 diode sẽ biến đổi nguồn điện do BLDC tạo ra thành điện một chiều. Mạch băm xung tăng áp sẽ nâng điện áp lên giá trị phù hợp để nạp cho ắc quy. Bộ điều khiển băm xung thường dùng là bộ so sánh có trễ hoặc bộ PI dùng để điều chỉnh ổn định dòng nạp. Giải pháp này đơn giản, dễ thực hiện nhưng có nhược điểm là phải thiết kế thêm các mạch công suất và mạch điều khiển.



Hình 3. Hãm tái sinh BLDC

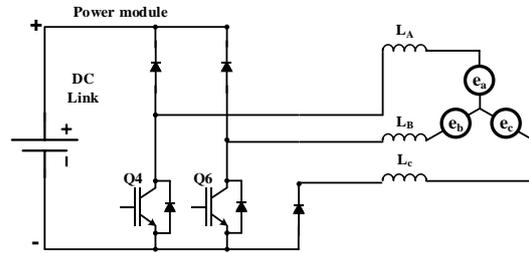
Hình 4 trình bày giải pháp sử dụng mạch công suất cầu ba pha IGBT và mạch điều khiển của nó cho giải pháp chỉnh lưu và nâng áp để trả năng lượng về nguồn ắc quy. Mạch công suất này cũng chính là bộ biến đổi công suất cho BLDC ở chế độ động cơ. Ba van thấp Q4, Q6, Q2 kết hợp với ba diode D1, D3, D5 tạo thành 3 mạch nâng áp. Theo biểu đồ hình 2, trong một chu kỳ điều khiển, các diode D4, D6, D2 sẽ làm nhiệm vụ chỉnh lưu trong những khoảng thời gian tương ứng T5+T6, T1+T2, T3+T4. Các van cao Q1, Q3, Q5 không được sử dụng.



Hình 4. Hãm tái sinh BLDC bằng mạch cầu 3 pha

Xét khoảng thời gian T4 trong Hình 2, có $e_a > e_c$, $e_b > e_c$. Nếu bỏ qua các tổn thất trên BLDC, ta có sơ đồ thay thế mạch cầu 3 pha IGBT như trên Hình 5. Phân tích tương tự cho các khoảng thời gian còn lại, trong mỗi khoảng thời gian từ T1 đến T6, mạch cầu 3 pha sẽ luôn được phân thành hai mạch nâng áp một chiều

mắc song song. Để điều khiển dòng điện nạp cho ắc quy tại một giá trị mong muốn và để ngăn chặn nó khỏi sự dao động khi tốc độ roto thay đổi, bộ điều khiển PI được tác giả sử dụng cho mạch vòng điều khiển dòng.



Hình 5. Sơ đồ thay thế mạch công suất trong khoảng thời gian T4

Gọi V_{out} là điện áp trên ắc quy, V_{in} là điện áp dây của BLDC, D là tỉ số điều biến của mạch nâng áp. Ở chế độ dòng liên tục tỉ số điều biến được tính theo công thức sau:

$$D = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}} \quad (4)$$

Khi dòng gián đoạn tỉ số điều biến được tính bằng công thức (5) với L là điện cảm tương đương trong mạch, T là chu kỳ điều khiển.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4D^2}{K}}}{2} \quad (5)$$

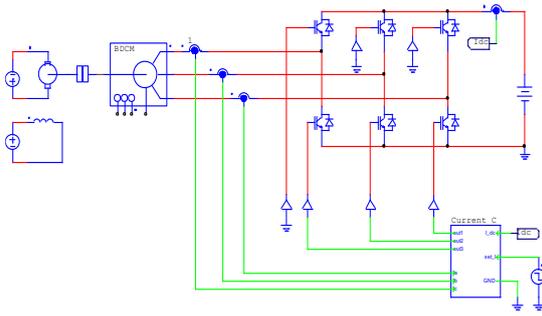
$$K = \frac{2L}{RT}$$

Ta có thể thấy, khi $D=1$ mạch sẽ hoạt động ở chế độ hãm động năng. Trong phần thực nghiệm tiếp theo, giá trị D sẽ được đặt ở giới hạn $D_{max}=0,95$.

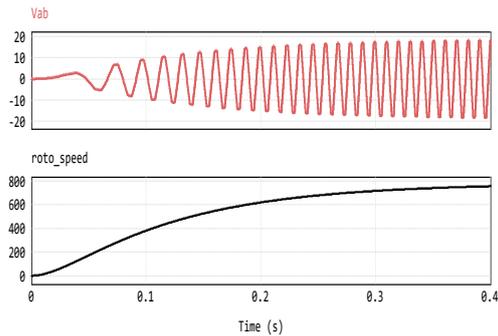
4. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm

Hình 6 là sơ đồ mạch mô phỏng hãm tái sinh cho BLDC. Động cơ điện một chiều nối đồng trục với BLDC để điều chỉnh tốc độ quay. Các thông số cơ bản của cho mạch mô phỏng được trình bày trong Bảng 1.

Hình 7 mô phỏng sức điện động dây của BLDC ở chế độ máy phát không tải. Sức điện động có dạng hình thang với biên độ 5,1V ở tốc độ $n=200\text{rpm}$ (vòng/phút) và 17,5V ở tốc độ 750rpm. Hình 8 là kết quả mô phỏng dòng điện và điện áp dây của BLDC, giá trị dòng đặt là 10A, dòng điện pha có dạng gần với hình sin, điện áp dây là chuỗi xung với điện áp đỉnh được nâng lên 24,7V để nạp cho ắc quy. Dòng nạp ắc quy được thể hiện trên Hình 9, nó có đặc điểm là một chuỗi xung dòng nên để đảm bảo ắc quy hấp thụ tốt



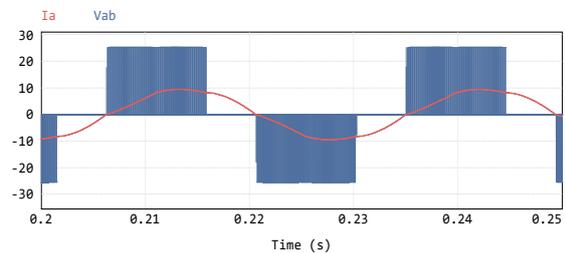
Hình 6. Mạch mô phỏng hãm tái sinh



Hình 7. Điện áp pha trên BLDC

Bảng 1. Thông số động cơ BLDC

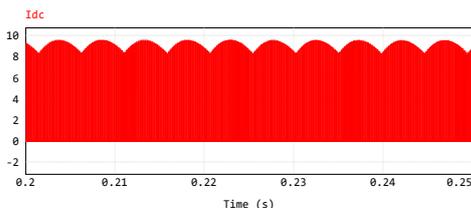
TT	Tham số kỹ thuật	Giá trị
1	Điện áp nguồn	24V
2	Tốc độ định mức	750 rpm
3	Điện trở Stator	0,21Ω
4	Điện cảm stator	1,35mH
5	Điện áp làm việc	24V
6	Dòng điện định mức	16A
7	Momen định mức	10Nm
8	Công suất động cơ	250W
9	Điện cảm móc vòng	0,69mH
10	Tần số điều biến	10kHz



Hình 8. Dòng điện và điện áp dây trên BLDC

dòng tái sinh, sẽ cần tính toán và mắc thêm tụ điện song song với ắc quy.

Để kiểm nghiệm lại lý thuyết và các kết quả mô phỏng đã được phân tích, một mô hình thực nghiệm đã được tác giả thiết kế và thực hiện. Hình 10 cho thấy tổng thể hệ thống thiết lập thực nghiệm. Một động cơ BLDC xe đạp điện 250W được sử dụng ở chế độ máy phát ở phía bên phải của hình của Hình 10. Một động cơ xoay chiều ba pha công suất 750W kéo BLDC quay thông qua dây curoa. Tốc độ quay của động cơ được điều khiển bằng biến tần. Phía bên trên biến tần lần lượt là mạch công suất cầu ba pha IGBT kết nối với hai ắc quy 12V đấu nối tiếp và mạch điều khiển. Tất cả các điều khiển và phép đo được thực hiện thông qua vi điều khiển 16 bit DSPIC 30F4011. Mạch công suất được thiết kế dựa trên tài liệu [7, 8]. Các thông số kỹ thuật của van IGBT và nguồn ắc quy được trình bày trong Bảng 2.



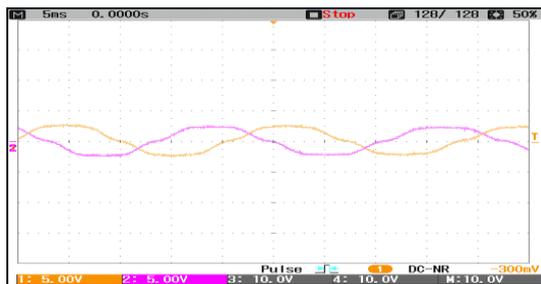
Hình 9. Dòng điện nạp ắc quy



Hình 10. Hệ thống thực nghiệm hãm tái sinh

Bảng 2. Mạch cầu IGBT

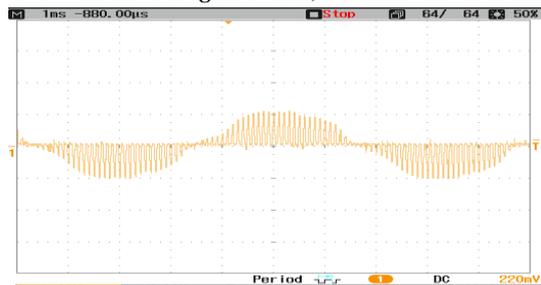
TT	Tham số kỹ thuật	Giá trị
1	Dòng trung bình (I_c)	25A
2	Điện áp ($V_{ce sat}$)	2V
3	Điện áp diode dẫn (V_{FM})	1,8V
4	Điện áp ắc quy	24,4V



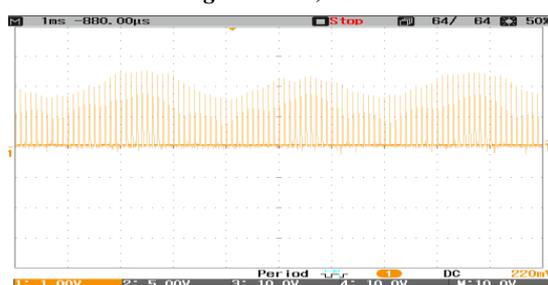
Hình 11. Sức điện động pha với $n=350$ rpm, thang đo 5V/div, 5ms/div



Hình 12. Sức điện động pha với $n=600$ rpm, thang đo 5V/div, 5ms/div



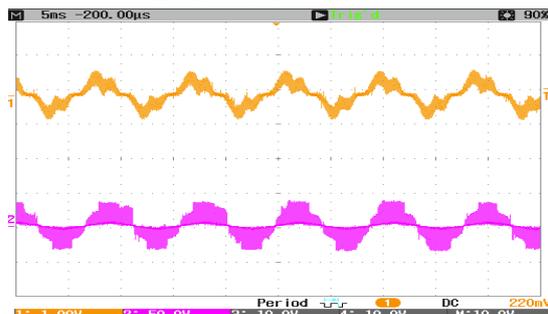
Hình 13. Dòng pha với $n=350$ rpm, 3A/div, 1ms/div



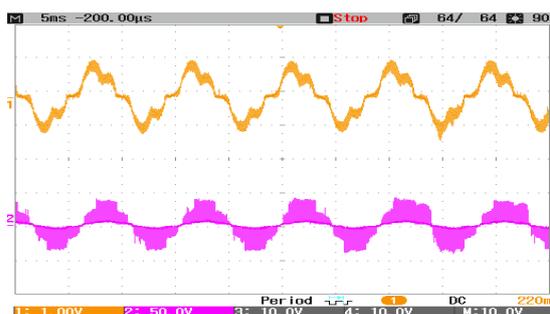
Hình 14. Dòng nạp ắc quy, thang đo 3A/div, 1ms/div



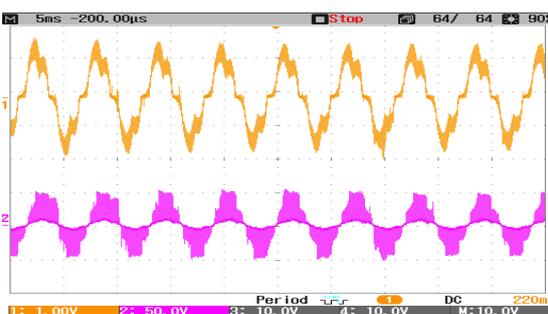
Hình 15. Dòng nạp ắc quy, thang đo 3A/div, 1µs/div



Hình 16. Dòng nạp ắc quy 6A, thang đo 10A/div, 1µs/div



Hình 17. Dòng nạp ắc quy 10A, thang đo 10A/div, 1µs/div



Hình 18. Dòng nạp ắc quy 15A, thang đo 10A/div, 1µs/div

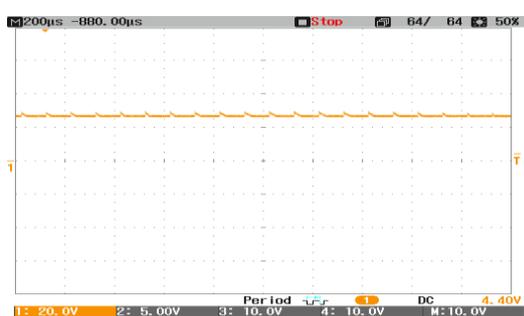
Hình 11 và 12 cho thấy dạng sóng sức điện động pha của BLDC ở hai tốc độ khác nhau là 350rpm và 600rpm khi bộ điều khiển hãm tái sinh chưa hoạt động. Giá trị lớn nhất của sức điện động pha lần lượt là 4V và 9V, quy đổi sang sức điện động dây tương ứng 6,8V và 15,3V. Như vậy, giá trị mô phỏng sức điện động trên Hình 7 phù hợp với kết quả thực nghiệm và đều nhỏ hơn điện áp 24V trên ắc quy.

Hình 13, 14, 15 lần lượt là giá trị thực nghiệm của dòng điện pha của BLDC và dòng tái sinh nạp điện cho ắc quy. Giá trị dòng đặt là 3A, với giá trị đặt này dòng nạp ắc quy và dòng tải ở chế độ gián đoạn. Chế độ dòng gián đoạn xảy ra khi tốc độ roto thấp cùng với giá trị dòng đặt hãm tái sinh nhỏ.

Kết quả thực nghiệm khi đặt giá trị dòng tái sinh 6A, 10A, 15A ở tốc độ quay 600rpm lần lượt được thể

hiện ở đồ thị phía trên các Hình 16, 17, 18. Dòng điện pha của BLDC trong các trường hợp này là dòng liên tục. Giá trị mô phỏng dòng điện pha trên hình 8 và giá trị thực nghiệm trên Hình 17 có biên độ dòng tương đương nhau nhưng dòng thực nghiệm biến dạng nhiều hơn. Đồ thị phía dưới các Hình 16, 17, 18 là điện áp dây của BLDC có giá trị lớn nhất lần lượt là 25,4V; 25,8V; 26,1V. Điện áp này lớn hơn điện áp trên ắc quy sẽ tạo ra dòng điện nạp cho ắc quy.

Điện áp trên ắc quy trong quá trình hãm tái sinh với giá trị dòng đặt 3A được thể hiện trên Hình 19. Các gai điện áp là những thời điểm năng lượng được nạp vào ắc quy.



Hình 19. Điện áp trên ắc quy Thang đo 20V/div, 200us/div

5. Kết luận

Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy, ở những thời điểm muốn hãm chuyển động của xe điện sử dụng động cơ BLDC, dùng mạch cầu công suất 3 pha IGBT kết hợp với thuật toán điều khiển được đề xuất sẽ đưa mạch vào chế độ băm xung nâng áp. Khi đó sẽ xảy ra quá trình hãm tái sinh, động cơ BLDC được đưa về chế độ máy phát và cơ năng chuyển động đã được biến đổi thành điện năng nạp trở lại cho ắc quy. Giải pháp do nhóm tác giả đề xuất có ưu điểm là đơn giản, có thể tận dụng mạch công suất điều khiển động cơ có sẵn, dễ dàng triển khai cho ô tô, xe máy điện.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT22-23.56.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Y. Chen, P. Pillay, and A. Khan (2005), *PM Wind Generator Topologies*, *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol.41, No.6, Nov/ Dec 2005.
- [2] Vũ Ngọc Minh, Tạ Cao Minh (2015), *A sliding mode algorithm for antilock braking/traction control of EVs*, *Science & technology development*, Vol18. No.k6.
- [3] Jahangir Khan, M. Tariq Iqbal (2006), *Simplified Modeling of Rectifier-Coupled Brushless DC Generators*, 4th International Conference on Electrical and Computer Engineering ICECE 2006, 19-21 December 2006, Dhaka, Bangladesh.
- [4] Bachtera Indarto (2020), *Testing Low rpm BLDC Generator as Power Plant for Remote Areas*, *Advances in Social Science, Education and Humanities Research*, Vol.528, Proceedings of the 7th International Conference on Research, Implementation, and Education of Mathematics and Sciences (ICRIEMS 2020).
- [5] H-W Lee, T-H Kim and Ehsani (2005), *Maximum power throughput in the multiphase brushless DC Generators*, *IEEE Electric power applications.*, Vol.152, No.3.
- [6] Phạm Tâm Thành, Vũ Ngọc Minh (2020), *Mô phỏng hệ thống điều khiển bộ biến đổi điện tử công suất trong phòng thí nghiệm*, *Tạp chí Giao thông vận tải*, Số tháng 05/2020.
- [7] Texas instruments (2017), *Three-phase inverter reference design using gate driver with built-in dead time insertion*, Texas instruments incorporated.
- [8] David Tam, *New 1200V Integrated circuit changes the way 3-phase motor drive inverters are designed*, International rectifier.

Ngày nhận bài:	02/04/2023
Ngày nhận bản sửa:	14/04/2023
Ngày duyệt đăng:	26/04/2023