

Dự Đoán Tốc Độ Động Cơ Không Đồng Bộ Ba Pha Dùng Giải Thuật Ước Lượng Cho Điện Áp Đầu Cực Của Động Cơ

Dương Thùy Liên

Khoa Điện-Điện tử viễn thông
Trường Đại học Giao thông vận tải
Thành phố Hồ Chí Minh
Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam
lien.duong@ut.edu.vn

Trần Thanh Vũ

Khoa Điện-Điện tử viễn thông
Trường Đại học Giao thông vận tải
Thành phố Hồ Chí Minh
Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam
vu.tran@ut.edu.vn

Tóm tắt - Bài báo trình bày phương pháp điều khiển tốc độ động cơ không đồng bộ ba pha và không dùng cảm biến tốc độ, tối giản cảm biến áp bằng cách ước lượng giá trị từ thông rotor và ước lượng tốc độ của động cơ thông qua phương pháp dự báo điện áp tại đầu cực của động cơ. Với giải pháp điều khiển này, tốc độ đặt của động cơ đáp ứng tốt chỉ với hai cảm biến dòng lắp bên trong bộ nghịch lưu, giúp hệ thống làm việc hiệu quả hơn, giảm thiểu tối đa các sai số khách quan do đo lường gây ra. Để đánh giá khả năng làm việc trong thời gian thực của mô hình đề xuất, các kết quả mô phỏng được thực hiện rồi rạc hóa trên nền tảng phần mềm PSIM có hỗ trợ lập trình thời gian thực bằng ngôn ngữ C với thời gian lấy mẫu có thể thực hiện được ở bất kỳ một vi điều khiển tầm trung trên thị trường.

Từ khóa - Estimation, predict control, motor control.

I. GIỚI THIỆU

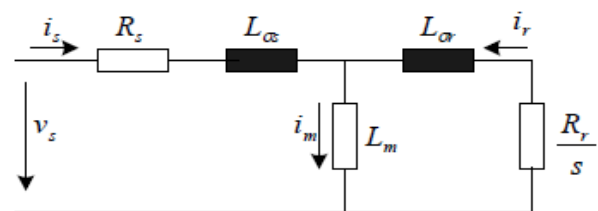
Sự phát triển của hệ thống điều khiển tốc độ động cơ không dùng cảm biến tốc độ đã nhận được những nỗ lực đáng kể trong những thập kỷ gần đây. Nó đang được sử dụng mạnh mẽ trong những ứng dụng có yêu cầu hiệu suất cao, năng động, ví dụ như băng chuyền, cần cẩu, xe điện, máy bơm, quạt... Sự vắng mặt của bộ cảm biến (tốc độ, vị trí, hoặc moment) thuộc động cơ không đồng bộ làm giảm chi phí, kích thước và tăng độ tin cậy của hệ thống tổng thể. Hơn nữa, các cảm biến thường rất khó cài đặt vào những ứng dụng nhất định và dễ bị nhiễu điện từ. Động cơ không dùng cảm biến có thể thay thế một giá trị đo lường bằng một giá trị ước tính mà không làm suy giảm tính năng động, hiệu suất, đặc biệt là trường hợp moment tải không cố định [1]. Để ước lượng tốc độ động cơ, ta có phương pháp ước lượng vòng hở tốc độ và ước lượng vòng kín tốc độ [2]. Phương pháp ước lượng vòng hở dựa vào các phương trình trạng thái của động cơ, thực hiện tính toán tốc độ của động cơ. Phương pháp ước lượng vòng kín sử dụng mô hình thích nghi-MRAS (Model Reference Adaptive System) để tính toán tốc độ.

Phương pháp ước lượng vòng hở sẽ đơn giản, dễ dàng thực hiện, số lượng tính toán ít hơn, tuy nhiên lại phụ thuộc nhiều vào thông số của động cơ và tín hiệu hồi tiếp [2]-[4].

Bài báo trình bày sử dụng phương pháp điều khiển vô hướng $v/f = const$ và ước lượng tốc độ vòng kín. Ưu điểm của phương pháp ước lượng vòng kín là ít phụ thuộc vào thông số động cơ và tín hiệu hồi tiếp, sai lệch tốc độ được điều chỉnh tự động và dùng bộ lọc Kalman để giảm bớt sai số của tốc độ ước lượng. Tín hiệu hồi tiếp về chỉ sử dụng cảm biến dòng, không sử dụng cảm biến áp và giá trị điện áp sẽ được ước tính nên sẽ giảm được sai số trong quá trình ước lượng [5][6]. Ước lượng tốc độ của động cơ, sau đó so sánh với tốc độ đặt và dùng khâu PI để hiệu chỉnh sai số $\alpha\beta$.

II. MÔ HÌNH TƯƠNG ĐƯƠNG MỘT PHA VÀ PHƯƠNG TRÌNH TOÁN CỦA ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ

A. Mô hình tương đương một pha



Hình 1. Sơ đồ tương đương một pha của động cơ không đồng bộ ba pha.

- R_s : Điện trở cuộn của stator dây pha (Ω);
- $L_{\sigma s}$: Điện cảm tản của cuộn dây stator (H);
- R_r : Điện trở rotor đã qui đổi về stator (Ω);
- $L_{\sigma r}$: Điện cảm tản của cuộn dây rotor đã qui đổi về stator (H);
- L_m : Hồ cảm giữa stator và rotor (H).

B. Mô hình tương đương một pha

Các phương trình toán học của động cơ thể hiện rõ các đặc tính thời gian của đối tượng. Việc xây dựng mô hình tương đương không nhằm mục đích mô phỏng chính xác về mặt toán học đối tượng động cơ, đó là để phục vụ cho xây dựng các thuật toán điều chỉnh được mô tả trong hình 1. Các phương trình toán cơ bản của động cơ không đồng bộ (KĐB) ba pha:

$$\vec{u}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\psi}_s}{dt} \quad (1)$$

$$0 = R_r \vec{i}_r + \frac{d\vec{\psi}_r}{dt} - j\omega \vec{\Psi}_r \quad (2)$$

$$\vec{\Psi}_s = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r \quad (3)$$

$$\vec{\Psi}_r = L_m \vec{i}_s + L_r \vec{i}_r \quad (4)$$

$$M_e = \frac{3}{2} P (\vec{\Psi}_s \times \vec{i}_s) = -\frac{3}{2} P (\vec{\Psi}_r \times \vec{i}_r) \quad (5)$$

$$M_e = M_r + \frac{J}{P} \times \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

Phương trình toán của động cơ KĐB ba pha trong hệ $\alpha\beta$:

$$\frac{di_{s\alpha}}{dt} = -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) i_{s\alpha} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r L_m} \Psi_{r\alpha} + \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} \Psi_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\alpha} \quad (7)$$

$$\frac{di_{s\beta}}{dt} = -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) i_{s\beta} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r L_m} \Psi_{r\beta} + \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} \Psi_{r\alpha} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\beta} \quad (8)$$

$$\frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\alpha} - \frac{1}{T_r} \Psi_{r\alpha} - \omega \Psi_{r\beta} \quad (9)$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\beta} - \frac{1}{T_r} \Psi_{r\beta} - \omega \Psi_{r\alpha} \quad (10)$$

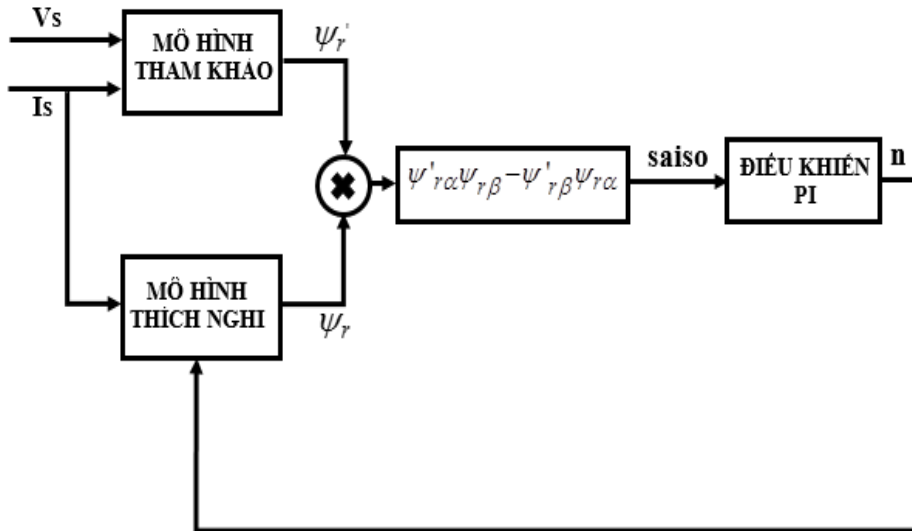
$$M_e = \frac{3}{2} P \frac{L_m}{L_r} (\Psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha}) \quad (11)$$

Trong đó:

- T_s : Hằng số thời gian stator;
- T_r : Hằng số thời gian rotor;
- σ : Hệ số từ tản tổng;
- P : Số đôi cực của động cơ;
- M_e : Moment điện từ.

III. PHƯƠNG PHÁP ƯỚC LƯỢNG VÒNG KÍN TỐC ĐỘ VÀ GIẢI THUẬT ĐIỀU KHIỂN

A. Phương pháp ước lượng tốc độ vòng kín

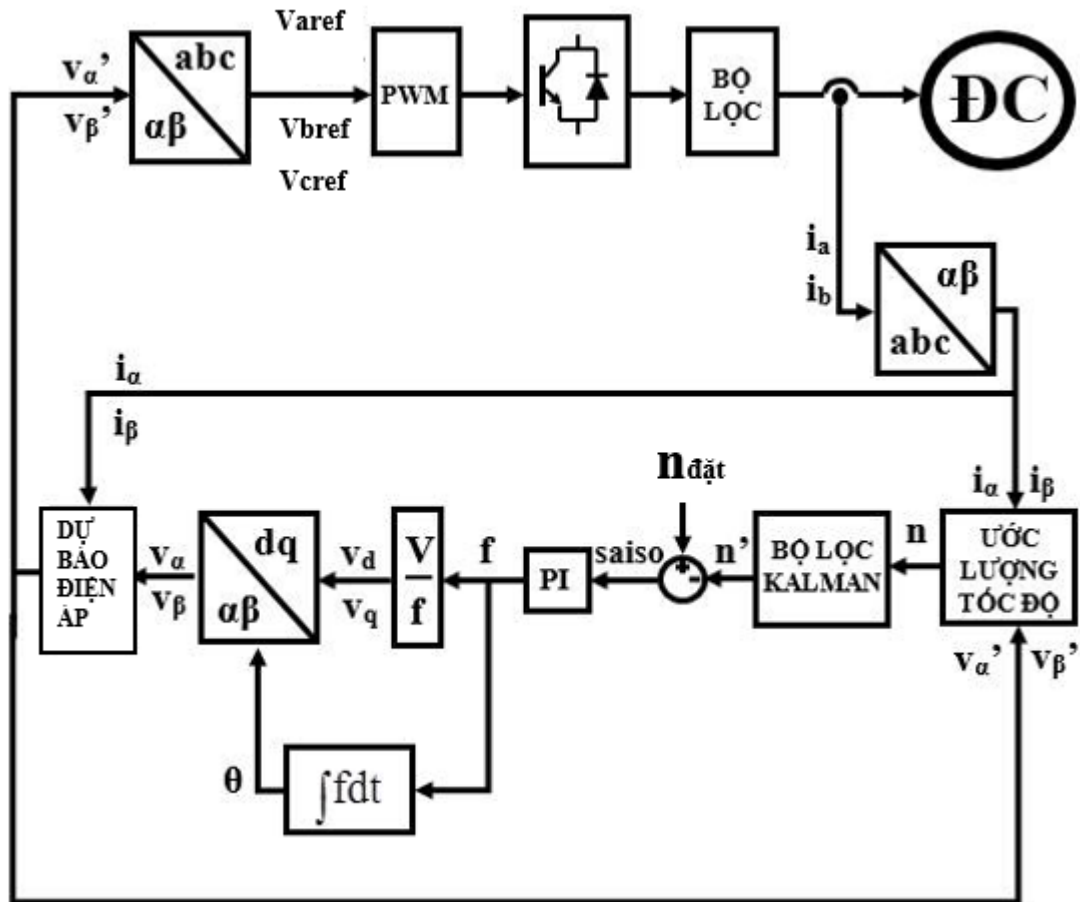


Hình 2. Sơ đồ nguyên lý ước lượng vòng kín tốc độ MRAS.

Trong phương pháp ước lượng vòng kín tốc độ, từ thông rotor được tính toán theo mô hình tham khảo và mô hình thích nghi, cả hai giá trị từ thông này tính độc lập với nhau. Từ thông trong mô hình tham khảo được tính theo phương trình (1), (2) và (4). Từ thông trong mô hình thích nghi tính theo phương trình (9), (10) và phụ thuộc vào tốc độ n của động cơ. Nếu tốc độ ước lượng của động cơ khác với tốc độ thực của động cơ

thì vector từ thông tính ở mô hình thích nghi sai lệch với vector từ thông ở mô hình tham khảo. Sai lệch này được định nghĩa bằng phần thực của tích hai vector từ thông tính được từ hai mô hình. Sai lệch càng nhỏ, tốc độ ước lượng của động cơ gần bằng với tốc độ thực của động cơ và sai lệch được hiệu chỉnh bằng khâu PI để giảm thiểu sai lệch giữa hai vector từ thông trên.

A. Lưu đồ giải thuật

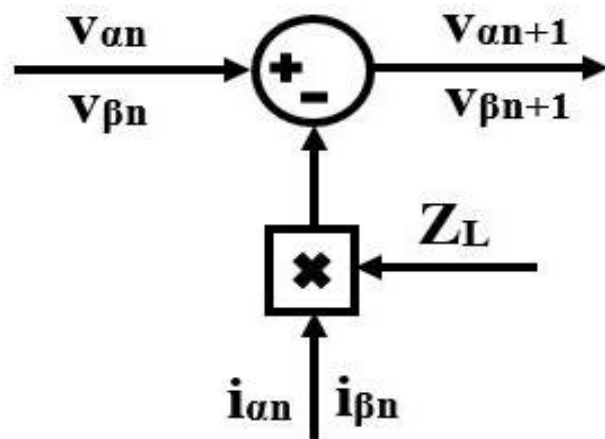


Hình 3. Lưu đồ giải thuật.

Sơ đồ giải thuật được trình bày trong hình 3. Hệ thống điều khiển được đề xuất hoạt động dựa trên các giá trị hồi tiếp dòng điện. Trong đó, dòng điện i_a và i_b được đo lường là dòng điện trên pha A và pha B một cách tương ứng. Các giá trị điện áp ở đầu cực của động cơ được dự báo thông qua mô hình điều khiển động cơ cũng được đề cập tại hình 3. Sau khi ước lượng được tốc độ, hiệu chỉnh sai số bằng khâu PI, đạt được giá trị của tần số điều khiển và phương pháp điều khiển $V/f = const$ tạo được ba sóng điều khiển cho mạch điều khiển. Bộ lọc Kalman được sử dụng để lọc tốc độ ước lượng cho giảm dao động và gần bằng với tốc độ đặt để việc ước lượng chính xác hơn. Điện áp ngõ ra bộ nghịch lưu không bằng điện áp trên động cơ vì bộ lọc đã làm suy hao biên độ và trễ pha, vì vậy điện áp ngõ ra được tính toán và dự báo cho giống với điện áp trên đầu cực của động cơ.

Hình 4 mô tả phương pháp dự báo điện áp trên đầu cực động cơ. Từ ngõ ra của bộ sáu khóa điện áp cấp cho động cơ đi qua bộ lọc LC, vì dòng điện đi qua tụ rất bé nên sự khác nhau về điện áp giữa điện áp cơ bản ngõ ra bộ nghịch lưu và trên đầu cực động cơ quyết định bởi cuộn cảm. Do đó điện áp trên đầu cực của

động cơ bằng điện áp cơ bản ngõ ra bộ nghịch lưu trừ cho dòng điện hồi tiếp về nhân Z_L .

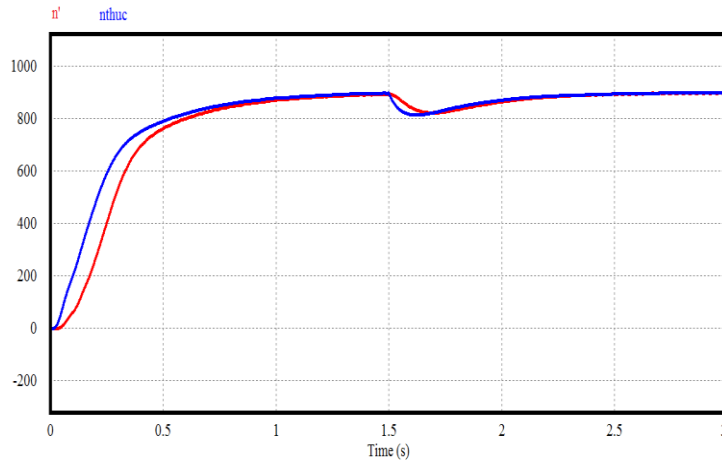


Hình 4. Mô hình dự báo điện áp.

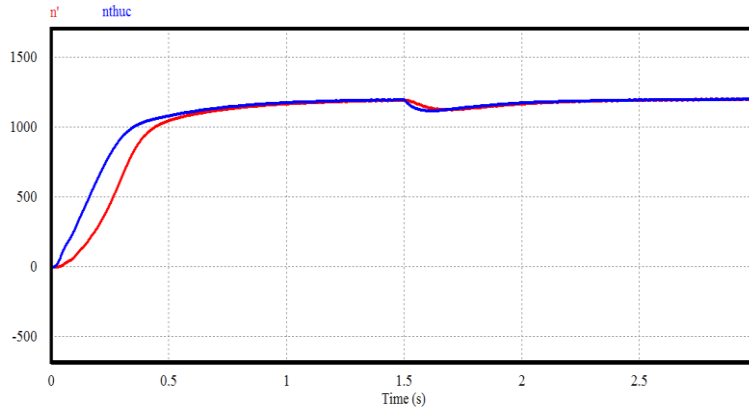
IV. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG, KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ MÔ HÌNH THỰC TẾ

B. Kết quả mô phỏng và kết quả thực

Động cơ dùng để mô phỏng có thông số như sau: $P = 370 \text{ W}$, $U = 220 \text{ V}$, $I = 2.5 \text{ A}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $p = 2$, $R_s = 5 \Omega$, $R_r = 6.5 \Omega$, $L_s = 0.1857 \text{ H}$, $L_m = 0.16991 \text{ H}$, $L_r = 0.1857 \text{ H}$.



Hình 5. Tốc độ đo từ cảm biến, tốc độ ước lượng chưa lọc và tốc độ ước lượng đã lọc với $ndat = 900$ rpm.

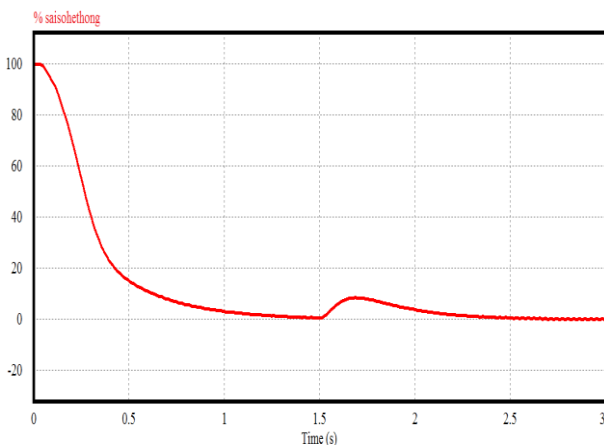


Hình 6. Tốc độ đo từ cảm biến, tốc độ ước lượng chưa lọc và tốc độ ước lượng đã lọc với $ndat = 1200$ rpm.

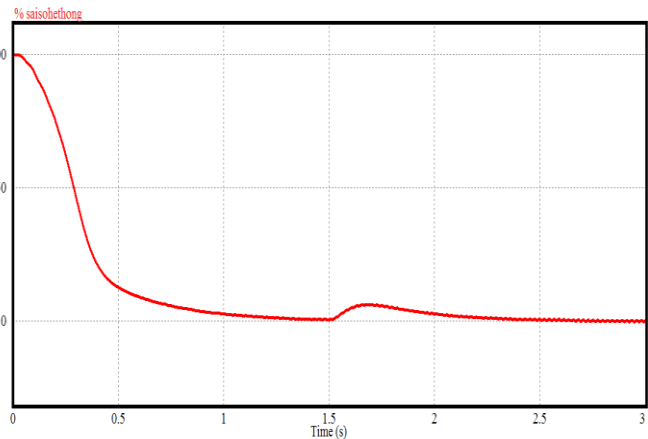
Hình 5 và hình 6 thể hiện tốc độ ước lượng n , tốc độ ước lượng n' sau khi qua bộ lọc Kalman từ phương pháp đề xuất khi tốc độ đặt $ndat$ lần lượt là 900 rpm và 1200 rpm. Tốc độ đối chiếu $nthuc$ là giá trị đo lường từ cảm biến tốc độ. Tại thời điểm $t = 1.5$ s, đóng tải định mức cho động cơ. Từ hình cho thấy tốc độ ước lượng n dao động quanh giá trị của tốc độ tham chiếu

từ cảm biến và việc sử dụng bộ lọc Kalman đã làm cho tốc độ ước lượng gần bằng với tốc độ tham chiếu.

Hình 7 và hình 8 thể hiện sai số hệ thống giữa tốc độ đặt $ndat$ và tốc độ ước lượng n' sau khi lọc, khi tốc độ đặt lần lượt là 900 rpm và 1200 rpm. Từ hình cho thấy sai số ban đầu là 100% và sau đó tiến dần về 0%.



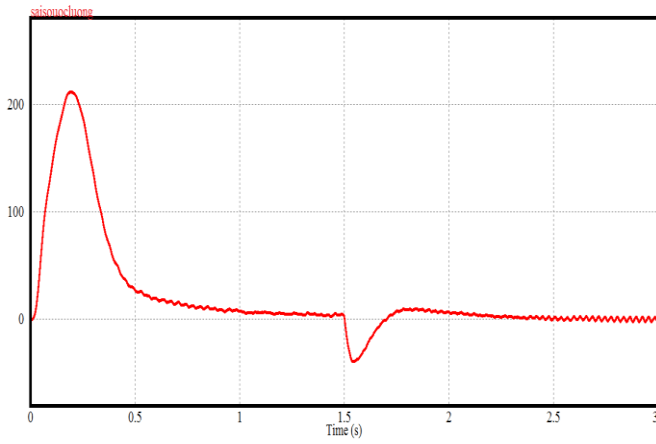
Hình 7. Sai số hệ thống với $ndat = 900$ rpm.



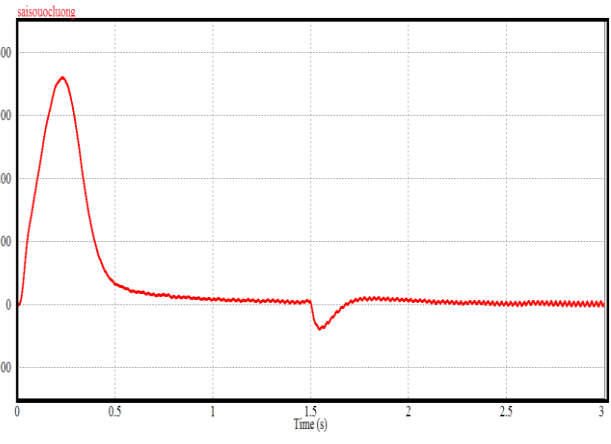
Hình 8. Sai số hệ thống với $ndat = 1200$ rpm.

Hình 9 và hình 10 thể hiện sai số ước lượng giữa tốc độ đo từ cảm biến và tốc độ ước lượng n' sau khi lọc, khi tốc độ đặt lần lượt là 900 rpm và 1200 rpm.

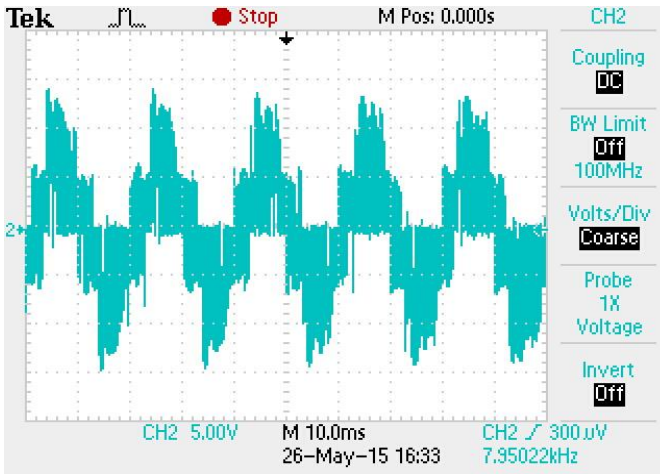
Từ đó cho thấy ban đầu sai số ước lượng lớn và sau đó giảm dần về mức 0.



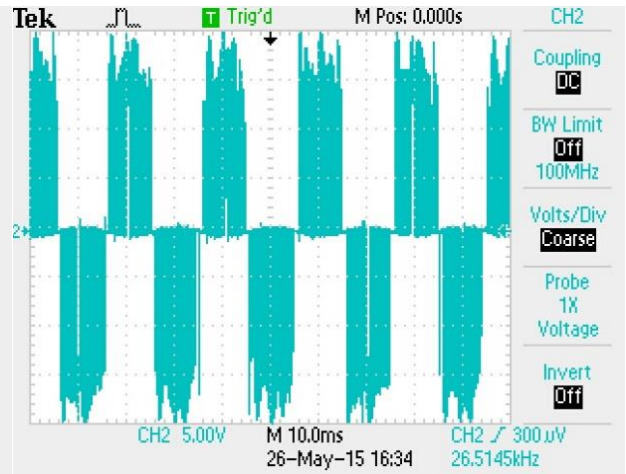
Hình 9. Sai số ước lượng với $ndat = 900$ rpm.



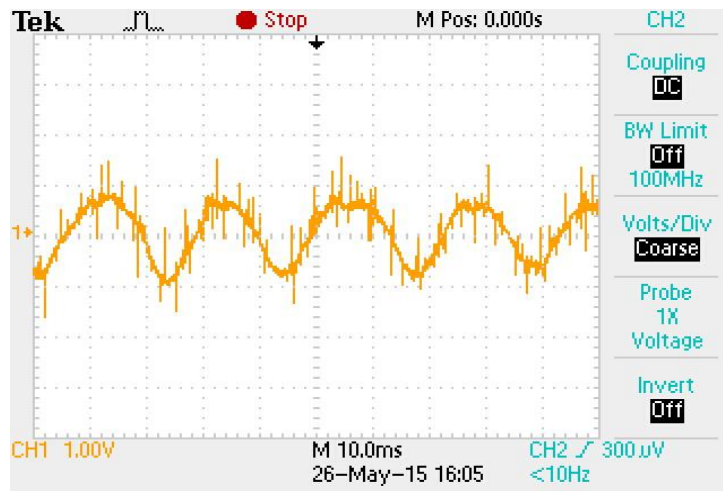
Hình 10. Sai số ước lượng với $ndat = 1200$ rpm.



Hình 11. Điện áp pha ngõ ra bộ nghịch lưu.



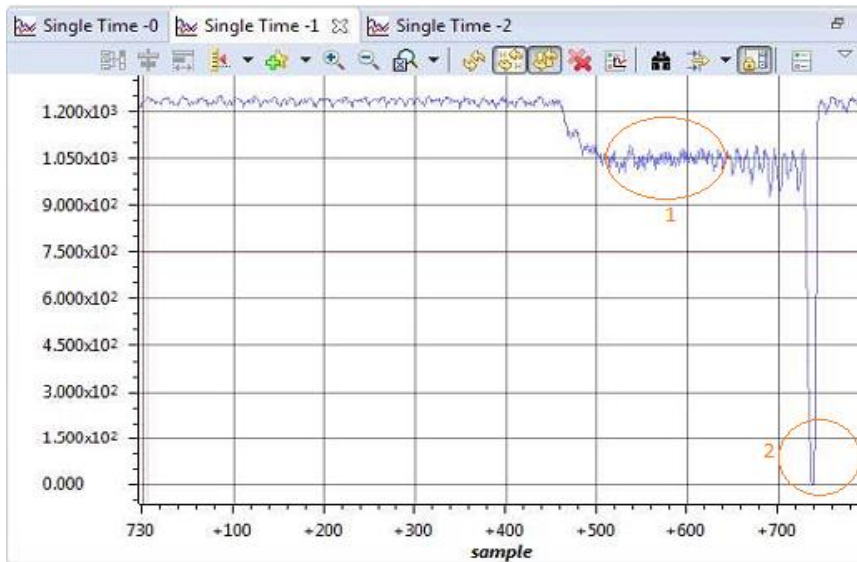
Hình 12. Điện áp dây ngõ ra bộ nghịch lưu.



Hình 13. Dòng điện ngõ ra bộ nghịch lưu.

Hình 11, hình 12 và hình 13 thể hiện dạng sóng điện áp pha, điện áp dây và dòng điện ngõ ra của bộ nghịch lưu. Ta nhận thấy dạng sóng điện áp và dòng

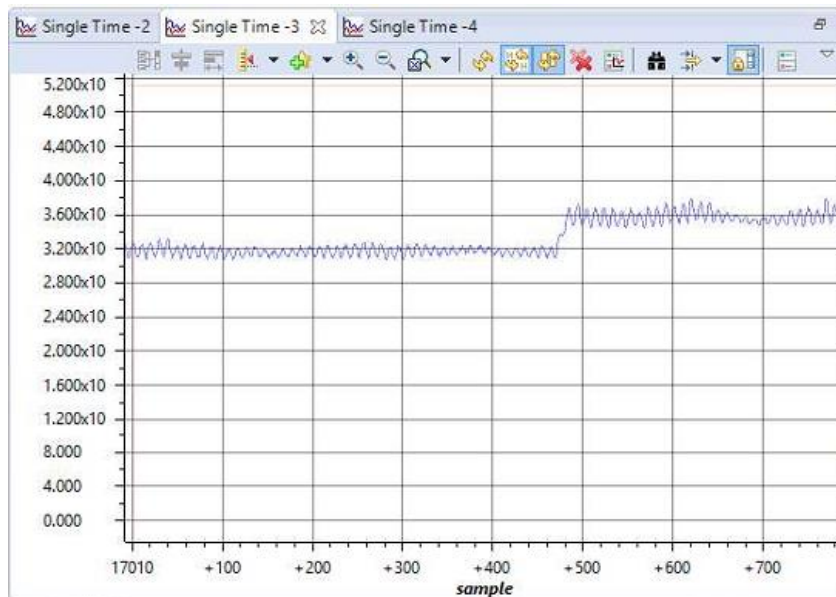
điện ngõ ra của bộ nghịch lưu đúng với lý thuyết, động cơ chạy tốt, hoạt động ổn định.



Hình 14. Tốc độ ước lượng thực tế.



Hình 15. Tốc độ đo thực tế từ Tachometer.



Hình 16. Dạng sóng tần số tại tốc độ đặt tại 900rpm.

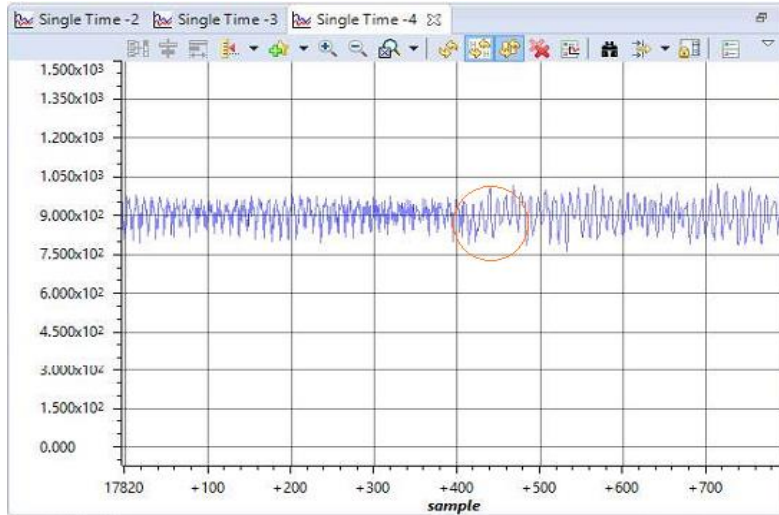
Hình 14 thể hiện khi cho tần số đặt là 40.5 Hz và chạy vòng hồ tốc độ thì tốc độ ước lượng khoảng 1220 rpm, gần giống với tốc độ đo trên tachometer ở hình

15 (1216). Khi bắt đầu đóng tải nhẹ, tốc độ động cơ giảm cong 1050 (điểm 1 trong hình 14) tương ứng tốc độ đo trên Tachometer là 1003. Khi đóng tải mạnh

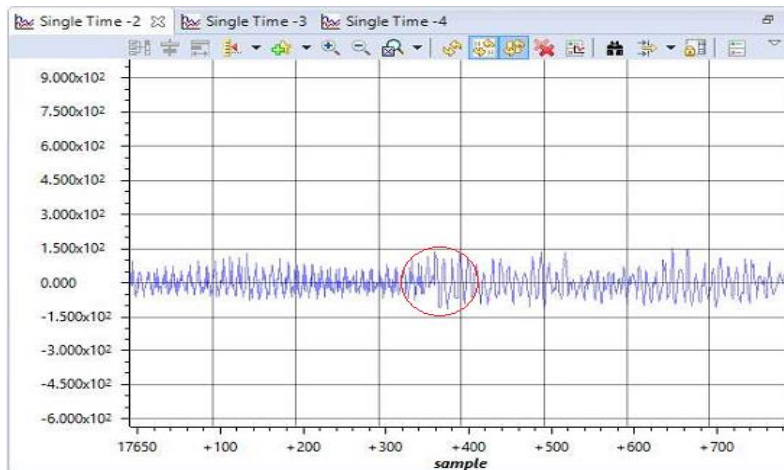
động cơ dừng trong giây lát, tốc độ ước lượng giảm về 0 (điểm 2 trong hình 14), sau đó nhả tải, tốc độ lại trở về như ban đầu. Kết quả cho thấy thuật toán ước lượng tốc độ đúng và hoạt động tốt.

Hình 16 thể hiện đáp ứng tần số khi tần số đặt là 31 Hz (tương ứng tốc độ đặt là 930rms) và chạy vòng

kín tốc độ, lúc đầu chưa đóng tải thì tốc độ dao động quanh 900 rms (hình 17) và tần số khoảng 32 Hz (hình 16). Sau khi đóng tải, tốc độ như trước và tần số tăng lên khoảng 36 Hz, moment tăng nhằm giữ cho tốc độ không đổi. Hình 18 thể hiện sai số của tốc độ đặt và tốc độ ước lượng.



Hình 17. Đáp ứng tốc độ ước lượng tại tốc độ đặt 900rpm.

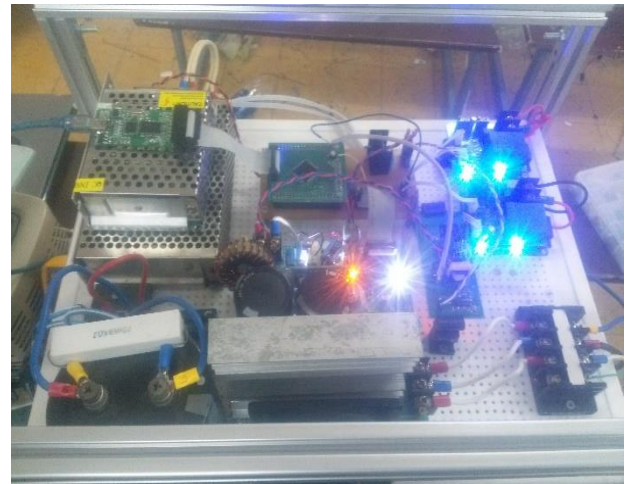


Hình 18. Sai số giữa tốc độ đặt và tốc độ ước lượng.

Hình 19 và hình 20 thể hiện mô hình tổng thể, mạch động lực và mạch điều khiển thi công thực tế.



Hình 19. Mô hình tổng thể.



Hình 20. Mạch động lực và mạch điều khiển.

IV. KẾT LUẬN

Mô hình điều khiển động cơ không đồng bộ ba pha trong điều kiện không cảm biến tốc độ, tối giản cảm biến điện áp và giải thuật đề xuất được nghiên cứu xây dựng hoàn chỉnh. Các phương trình và giải thuật được mô tả chi tiết, các mô phỏng được thực hiện rõ ràng trên phần mềm hỗ trợ lập trình PSIM. Nghiên cứu đã chứng minh chỉ 2 cảm biến dòng điện từ bộ nghịch lưu hệ thống điều khiển tốc độ động cơ đã đạt được kết quả khả quan. Điều này có ý nghĩa rất lớn trong các lĩnh vực điều khiển khắc nghiệt cần độ ổn định cao, chi phí thấp. Các thông số cần thiết cho quá trình điều khiển đều có thể ước lượng một cách chính xác hoặc có thể dự báo thông qua thông số kết nối của hệ thống phần cứng. Các phương trình và giải thuật đã được thực hiện với chu kỳ lấy mẫu thực tế nên có thể lập trình ứng dụng một cách dễ dàng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] C. C. Gastaldini, R. P. Vieira, R. Z. Azzolin, H. A. Gründling, “Speed Sensorless Sliding Mode Observer for Three-Phase Induction Motor”, in 2012 XXth International Conference on Electrical Machines, 02-05 September 2012, Marseille, France, IEEE, 2012.
- [2] G. Adamidis, M. Leibadaras, “Evaluation of methods of speed estimation of asynchronous motor based on direct torque control (DTC)”, in SPEEDAM 2010, 14-16 June 2010, Pisa, Italy, IEEE, 2010.
- [3] C. Nagamani, N.Prasannakumar, R. V. Raju, “Analysis of the performance of an MRAS based sensorless speed estimation scheme for induction motors under fluctuating inputs”, in 2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE), 06-08 March 2014, Coimbatore, India, IEEE, 2014.
- [4] R. Pena, R. Cardenas, J. Proboste, G. Asher, J. Clare, “Sensorless Control of Doubly-Fed Induction Generators Using a Rotor-Current-Based MRAS Observer”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, issue 1, pp. 330-339, 2008. DOI: 10.1109/TIE.2007.896299.
- [5] S. Ishida, T. Endo, H. Fujii, H. Tomita, N. Fujimoto, “Sensorless Vector Control with Quick Response for General Purpose Inverters”, in Conference Record of the Power Conversion Conference - Yokohama 1993, 19-21 April 1993, Yokohama, Japan, IEEE, 1993.
- [6] C. Patel, R. Ramchand, K. Sivakumar, A. Das, K. Gopakumar, “A Rotor Flux Estimation During Zero and Active Vector Periods Using Current Error Space Vector From a Hysteresis Controller for a Sensorless Vector Control of IM Drive”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.58, issue 6, 2011.