

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CHO HỆ TRUYỀN ĐỘNG RAĐA HÀNG HẢI SỬ DỤNG ĐỘNG CƠ PMSM

DESIGN SLIDING MODE CONTROLLER FOR MARINE RADAR SYSTEM
USING A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Nguyễn Ngọc Tuấn¹, Trần Xuân Tinh^{2,*},
Sái Văn Thuận², Lê Ngọc Sơn²

TÓM TẮT

Bộ điều khiển tốc độ của radar hàng hải có vai trò rất quan trọng trong ổn định chất lượng tín hiệu thu - phát. Bài báo này trình bày kết quả xây dựng bộ điều khiển trượt cho hệ truyền động radar hàng hải sử dụng động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu. Các kết quả kiểm nghiệm bằng mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink cho thấy bộ điều khiển này đảm bảo được độ chính xác trong điều khiển; ổn định được tốc độ ngay cả khi có nhiễu mạnh.

Từ khóa: Điều khiển trượt, radar hàng hải, tốc độ, động cơ đồng bộ.

ABSTRACT

The speed controller of the marine radar plays a very important role in stabilizing the quality of the transceiver signal. This paper presents the results of building a sliding mode controller for a marine radar transmission system using a permanent magnet synchronous motor. The test results by simulation on Matlab-Simulink software show that this controller ensures accuracy in control; Stable speed even in the presence of strong interference.

Keywords: Sliding mode controller, marine radar, speed, synchronous motor.

¹Học viện Kỹ thuật quân sự

²Học viện Phòng không - Không quân

*Email: tinhpk79@gmail.com

Ngày nhận bài: 02/5/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/6/2022

Ngày chấp nhận đăng: 27/6/2022

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

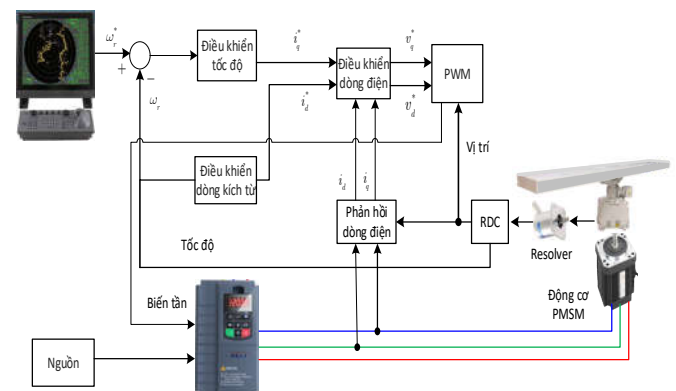
Radar hàng hải trang bị trên tàu hải quân, với nhiệm vụ phát hiện các tàu, chướng ngại vật trên biển như đá ngầm, các tảng băng trôi, giúp tàu di chuyển trên biển, tránh các va chạm có thể xảy ra [1]. Ngoài ra, radar trên tàu hải quân còn phải quản lý các mục tiêu trên không như máy bay, tên lửa trong môi trường mặt biển biến động liên tục. Để đảm bảo khả năng đo hệ truyền động của radar phải hoạt động chính xác và ổn định.

Hiện nay, một số hệ truyền động của đài radar trên tàu hải quân đã qua nhiều năm sử dụng, thiết bị xuống cấp, bộ điều khiển lạc hậu, rất cần nghiên cứu nâng cấp, hiện đại hóa để đáp ứng tốt hơn những yêu cầu của chiến tranh công nghệ cao. Hướng nghiên cứu chính của bài báo là tập

trung vào xây dựng bộ điều khiển mới cho hệ truyền động radar sử dụng động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM). Đây là động cơ có cấu trúc đơn giản, trọng lượng nhẹ, công suất cao và khả năng truyền động mạnh mẽ. Tuy nhiên, chất lượng điều khiển vị trí và tốc độ của hệ thống PMSM bị ảnh hưởng lớn bởi tính phi tuyến tính của hệ thống nhiễu tải bên ngoài [2, 3]. Với phương pháp điều khiển tuyến tính hiện có, hệ truyền động chưa thể đáp ứng tốt chất lượng điều khiển.

Để khắc phục vấn đề này, nhóm tác giả đề xuất sử dụng bộ điều khiển trượt. Đây là bộ điều khiển có tính bền vững cao, cấu trúc đơn giản, đảm bảo độ chính xác khi hệ thống có tham số bất định và nhiễu bên ngoài [4, 5]. Qua khảo sát cho thấy bộ điều khiển trượt tổng hợp được cho kết quả tốt ngay cả khi có các yếu tố phi tuyến tác động.

2. MÔ HÌNH HỆ TRUYỀN ĐỘNG RAĐA HÀNG HẢI



Hình 1. Mô hình hệ truyền động radar hàng hải

Mô hình toán học của hệ khi xét đến các thành phần bất định của hệ thống [3].

$$u_q = \left(R_s + \frac{dL_q}{dt} \right) i_q + (\omega_r L_d) i_d + \omega_r \varphi_m \quad (1)$$

$$u_d = (-\omega_r L_q) i_q + \left(R_s + \frac{dL_d}{dt} \right) i_d + \frac{d\varphi_m}{dt} \quad (2)$$

Phương trình mô men điện từ của động cơ được tính:

$$T_e = \frac{3}{2} P_n [\varphi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

Một cách gần đúng có thể coi $L_d = L_q$ nên có:

$$T_e = \frac{3}{2} P_n \varphi_m i_q \quad (4)$$

Phương trình cân bằng mômen:

$$T_e - T_L = \frac{B}{P_n} \omega_r + \frac{J}{P_n} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (5)$$

Trong đó, i_d , i_q , u_d , u_q là dòng điện, điện áp trục d, q tương ứng; R_s , L , φ_m , P_n lần lượt thể hiện điện trở của stato, độ tự cảm, từ thông của nam châm vĩnh cửu và số cặp cực; J , T_L , T_e , B lần lượt là mômen quán tính, mômen tải, mômen điện từ và hệ số ma sát nhớt.

Từ đó rút ra mô hình toán học hệ truyền động:

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{1}{\omega_r L_d} \left(-R_s i_q - \frac{dL_q}{dt} i_q - \omega_r \varphi_m + u_q \right) \\ i_q &= \frac{1}{\omega_r L_q} \left(R_s i_d + \frac{dL_d}{dt} i_d + \frac{d\varphi_m}{dt} - u_d \right) \\ \dot{\omega}_r &= \frac{P_n}{J} \left(T_e - T_L - \frac{B}{P_n} \omega_r \right) \end{aligned} \quad (6)$$

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CHO HỆ THỐNG PMSM

Thay (4) vào (6) có:

$$\dot{\omega}_r = \frac{3P_n^2 \varphi_m i_q}{2J} - \frac{P_n T_L}{J} - \frac{B}{J} \omega_r \quad (7)$$

Sai số tốc độ giữa trục động cơ và tốc độ đặt: $e = \omega_d - \omega_r$. Đạo hàm sai số và thay (7) vào phương trình có:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{\omega}_d - \dot{\omega}_r \\ \dot{e} &= \dot{\omega}_d - \left[\frac{3P_n^2 \varphi_m i_q}{2J} - \frac{P_n T_L}{J} - \frac{B}{J} \omega_r \right] \end{aligned} \quad (8)$$

Chọn mặt trượt như (9)

$$s = e \quad (9)$$

Tín hiệu điều khiển được chọn sao cho $\dot{s} = 0$

$$\dot{s} = \dot{\omega}_d - \frac{3P_n^2 \varphi_m i_q}{2J} + \frac{P_n T_L}{J} + \frac{B}{J} \omega_r = 0 \quad (10)$$

Đặt $k = \frac{3P_n^2 \varphi_m}{2J}$, qua biến đổi có:

$$k i_q = \dot{\omega}_d + \frac{P_n T_L}{J} + \frac{B}{J} \omega_r \quad (11)$$

Từ (11) rút ra

$$i_q = \frac{1}{k} \left[\dot{\omega}_d + \frac{P_n T_L}{J} + \frac{B}{J} \omega_r \right]$$

Đặt $u_{eq} = i_q$, đây là thành phần giữ cho các biến trạng thái nằm trên mặt trượt.

Thành phần tín hiệu đưa biến trạng thái tiến về mặt trượt $u_N = K_a \operatorname{sgn}(s)$ với $K_a = \frac{3P_n^2 \varphi_m k_c}{2J} > 0$, trong đó k_c là hằng số được chọn để điều chỉnh sự ổn định và tốc độ tiến về mặt trượt của biến trạng thái.

Cuối cùng tìm ra luật điều khiển có dạng:

$$u = u_{eq} + u_N = \frac{1}{k} \left[\dot{\omega}_d + \frac{P_n T_L}{J} + \frac{B}{J} \omega_r \right] + K_a \operatorname{sgn}(s) \quad (12)$$

Chứng minh:

$$\text{Chọn hàm Lyapunov: } V = \frac{1}{2} s^2$$

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(-K_a \operatorname{sgn}(s)) = -K_a |s| \quad (13)$$

Với $K_a > 0$ thì $\dot{V} < 0$ với mọi s , vì vậy điều kiện ổn định của hệ luôn tồn tại.

Thời gian để các biến trạng thái tiến về miền ổn định là:

$$\dot{s} = \frac{ds}{dt} = -K_a \operatorname{sgn}(s) \Leftrightarrow \frac{ds}{\operatorname{sgn}(s)} = -K_a dt \quad (14)$$

Lấy tích phân hai vế có:

$$\int \frac{ds}{\operatorname{sgn}(s)} = - \int K_a dt \quad (15)$$

Kết quả có:

$$s \operatorname{sgn}(s) + c_0 = -K_a t_r + c_1 \Leftrightarrow |s| = -K_a t_r + c_2;$$

$$\text{Với } c_2 = |s(0)| \text{ từ đó xác định được } t_r = \frac{|s(0)|}{K_a}$$

Do thời gian tới t_r tỷ lệ nghịch với độ lớn K_a nên K_a càng

lớn thì thời gian đáp ứng càng nhanh. Do $K_a = \frac{3P_n^2 \varphi_m k_c}{2J}$ vì thế có thể điều chỉnh K_a thông qua hằng số k_c .

4. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

4.1. Tham số mô phỏng

Mô phỏng đánh giá chất lượng của bộ điều khiển bằng phần mềm Matlab-Simulink với các tham số cơ hệ được cho trong bảng 1.

Bảng 1. Các tham số của cơ hệ sử dụng mô phỏng

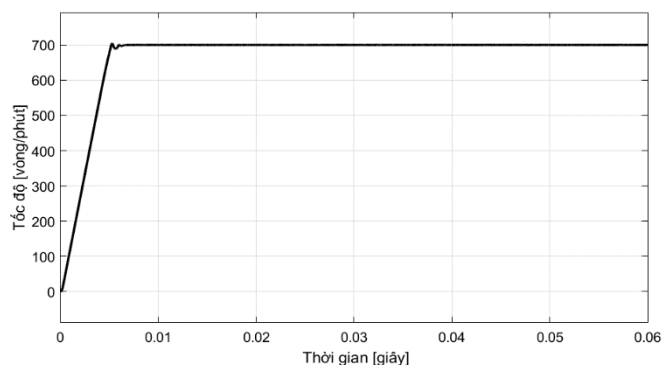
Ký hiệu	Tham số PMSM	Giá trị
P_n	Công suất định mức	0,75kW
ω_n	Tốc độ định mức	3000vòng/phút
P_n	Số cặp cực	2

I_N	Dòng điện định mức	5,3A
Φ_m	Từ thông của nam châm vĩnh cửu	0,109Wb
L	Độ tự cảm	0,17mH
R_s	Điện trở Stator	1,8 Ω
J	Momen quán tính	5.10 ⁻³ kg.m ²
B	Hệ số ma sát nhớt	5.10 ⁻³ Nm.s

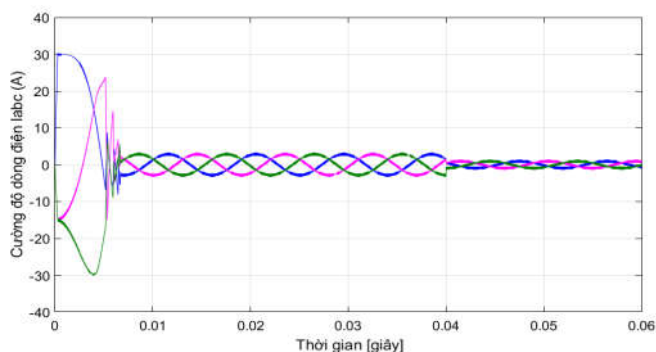
4.2. Kết quả mô phỏng

Kiểm tra chất lượng của bộ điều khiển thông qua đáp ứng tốc độ của hệ truyền động trong các trường hợp khác nhau.

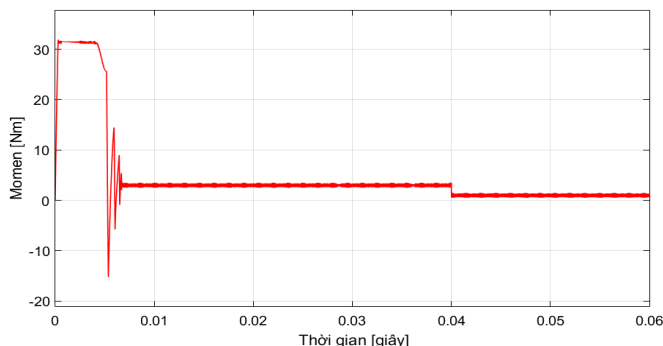
+ Trường hợp 1: Tốc độ đặt là 700 vòng/phút, với momen tải ban đầu là 3Nm giảm xuống 1Nm tại thời điểm 0,04 giây.



Hình 2. Đáp ứng tốc độ của động cơ chấp hành trường hợp tải giảm

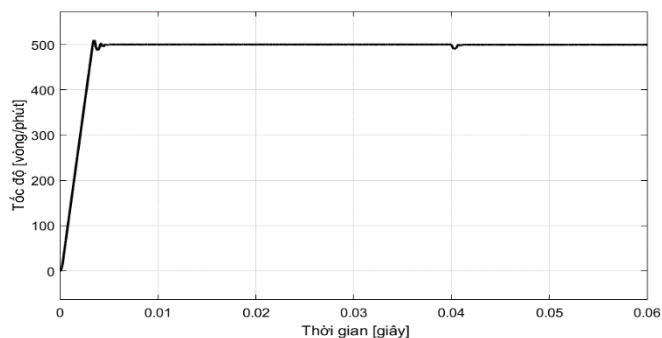


Hình 3. Cường độ dòng điện trong các cuộn dây pha trường hợp tải giảm

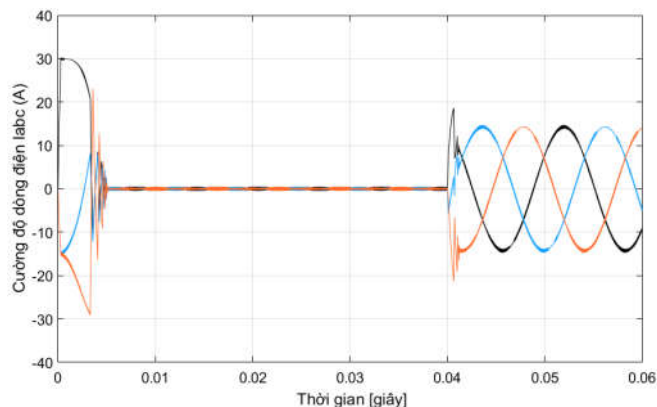


Hình 4. Đáp ứng momen động cơ trường hợp tải giảm

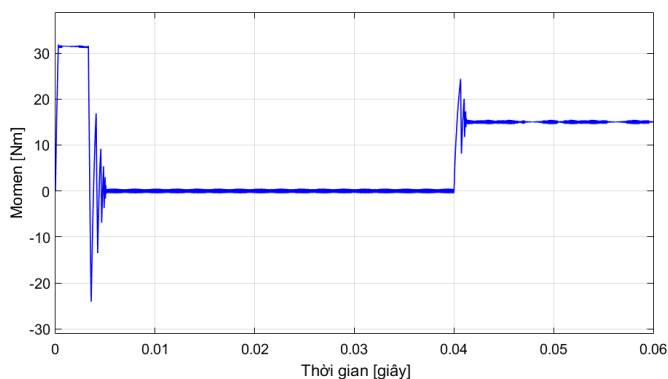
+ Trường hợp 2: Tốc độ đặt là 500 vòng/phút, với momen tải ban đầu là 2Nm tăng lên 15 Nm tại thời điểm 0,04 giây.



Hình 5. Đáp ứng tốc độ của động cơ chấp hành trường hợp tải tăng



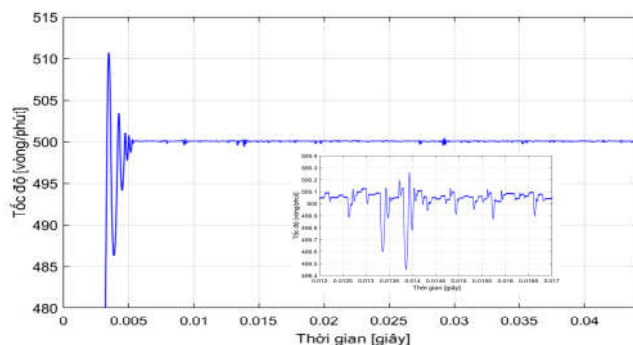
Hình 6. Cường độ dòng điện trong các cuộn dây pha trường hợp tải tăng



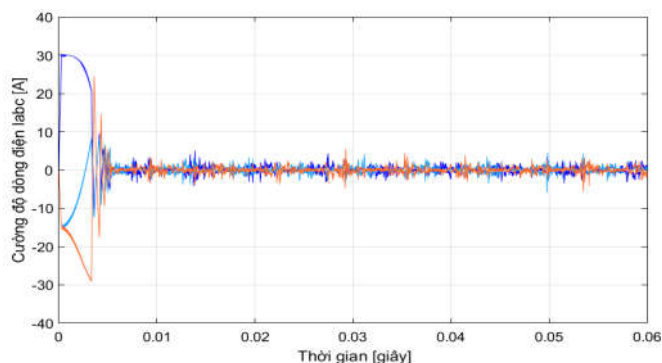
Hình 7. Đáp ứng momen động cơ trường hợp tải tăng

Với hai trường hợp trên, khi momen tải thay đổi, không có nhiễu, tốc độ đáp ứng của hệ nhanh, dao động nhỏ, độ quá chỉnh 0,7%, hệ ổn định.

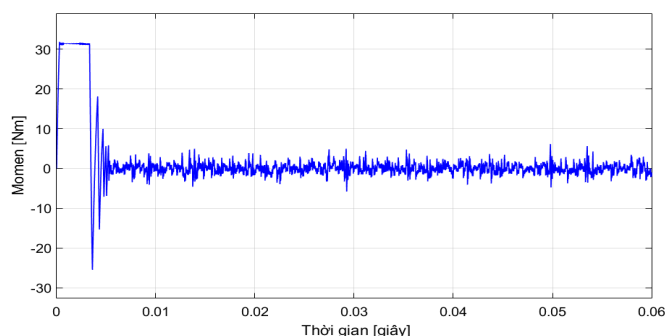
+ Trường hợp 3: Tốc độ đặt là 500 vòng/phút, với momen tải là nhiễu ngẫu nhiên trong khoảng 2Nm.



Hình 8. Đáp ứng tốc độ của động cơ chấp hành trường hợp có nhiễu



Hình 9. Cường độ dòng điện trong các cuộn dây pha trường hợp có nhiễu



Hình 10. Đáp ứng momen động cơ trường hợp có nhiễu

Trường hợp có nhiễu hệ dao động mạnh, nhưng ổn định sau 0,005 giây, độ quá chỉnh 20%; sai số xác lập 0,5 vòng/phút.

4.3. Nhận xét kết quả

Qua kết quả mô phỏng ta thấy, bộ điều khiển trượt đã đáp ứng tốt yêu cầu của hệ thống, đó là tính tác động nhanh, ổn định được tốc độ trong các trường hợp khác nhau. Quá trình điều khiển êm ái, không có độ quá chỉnh, chống rung tốt.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả xây dựng bộ điều khiển trượt cho hệ truyền động radar hàng hải trong tàu biển dân sự và quân sự. Phần trình bày được bắt đầu từ việc xây dựng mô hình cơ hệ, tổng hợp bộ điều khiển, mô phỏng bằng phần mềm Matlab-Simulink. Các kết quả kiểm nghiệm cho thấy:

- Thứ nhất, việc sử dụng bộ điều khiển trượt làm tăng tính ổn định của hệ thống, đảm bảo độ chính xác khi điều khiển.
- Thứ hai, phương pháp này đã giúp giảm tối đa sai số và hiện tượng dao động trong điều kiện hệ thống chịu ảnh hưởng của các yếu tố phi tuyến, nhiễu loạn về tải trong quá trình làm việc ở môi trường biển.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. G. Rechard Cury, 2009. *Radar system performance Modelling*. Artech House.
- [2]. Zhang B., Pi Y., Luo Y., 2012. *Fractional order sliding-mode control based on parameters auto-tuning for velocity control of permanent magnet synchronous motor*. ISA Trans., 51, 649–656
- [3]. Huang J., Li H., Teng F., Liu D., 2012. *Fractional order sliding mode controller for the speed control of a permanent magnet synchronous motor*. In Proceedings of the 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Taiyuan, China, pp. 1203–1208.
- [4]. Ke Z., Xiao-guang Z., Li S., Chang C., 2011. *Sliding mode control of high-speed PMSM based on precision linearization control*. In Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Beijing, China, pp. 1–4
- [5]. Liu Y., Zhou B., Fang S., 2010. *Sliding Mode Control of PMSM Based on a Novel Disturbance Observer*. Proc. Chin. Soc. Electr. Eng., 30, 80–85.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Ngoc Tuan¹, Tran Xuan Tinh², Sai Van Thuan², Le Ngoc Son²

¹Military Technical Academy

²Air Defence - Air Force Academy