



Điều khiển tốc độ động cơ một chiều kích từ độc lập sử dụng bộ điều khiển trễ

Đỗ Chí Thành^{1*}, Trần Xuân Phương²

¹ Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Công nghệ Đông Á

² Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Công nghệ Đông Á

*Email: thanhdc@eaut.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo này trình bày phương pháp điều khiển tốc độ động cơ một chiều (DC) kích từ độc lập sử dụng bộ điều khiển trễ Dead-Beat Controller trong miền số. Mục tiêu là đảm bảo tốc độ động cơ đạt giá trị tham chiếu trong thời gian tối thiểu mà không có dao động hoặc sai số quá độ. Mô hình động cơ được xây dựng và rời rạc hóa, sau đó bộ điều khiển Dead-Beat được thiết kế dựa trên hàm truyền số. Quá trình mô phỏng được thực hiện bằng Matlab và Simulink, với kết quả cho thấy hiệu quả của phương pháp trong việc điều khiển chính xác và nhanh chóng. Các bước triển khai cụ thể trong Simulink cũng được trình bày chi tiết.

Từ khóa: Động cơ một chiều, Dead-Beat Controller động cơ DC, Điều khiển số động cơ DC.

Abstract

This paper presents a method for controlling the speed of a separately excited direct current (DC) motor using a Dead-Beat Controller in the digital domain. The objective is to ensure that the motor speed reaches the reference value in minimal time without overshoot or steady-state error. The motor model is developed and discretized, and then the Dead-Beat Controller is designed based on the digital transfer function. The simulation process is conducted using Matlab and Simulink, with results demonstrating the effectiveness of the method in achieving precise and rapid control. The specific implementation steps in Simulink are also detailed.

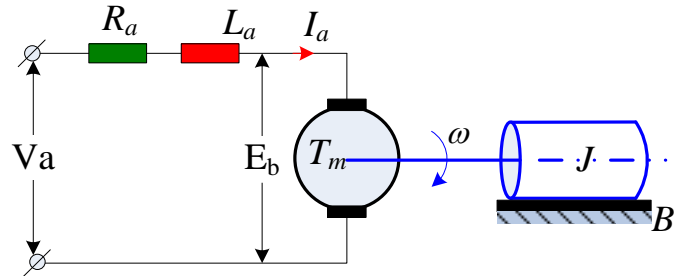
Keywords: Direct Current Motor, Dead-Beat Controller for DC Motor, Digital Control of DC Motor

1. Mở đầu

Động cơ một chiều kích từ độc lập được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp nhờ khả năng điều khiển tốc độ linh hoạt và hiệu suất cao. Tuy nhiên, các yếu tố như trễ thời gian trong hệ thống số và nhiễu có thể ảnh hưởng đến hiệu suất điều khiển. Bộ điều khiển Dead-Beat là một giải pháp điều khiển số tối ưu, cho phép hệ thống đạt trạng thái mong muốn trong số bước thời gian tối thiểu mà không có dao động dư. Bộ điều khiển trễ Dead-Beat là một phương pháp điều khiển số, giúp đưa tốc độ động cơ về giá trị mong muốn trong vài bước thời gian, không có dao động quá độ. Điều này phù hợp cho động cơ DC kích từ độc lập, loại động cơ có từ thông cố định và tốc độ điều chỉnh qua điện áp phản ứng [3, tr. 25 – 26; 4, tr.89].

Bài báo này tập trung vào việc áp dụng bộ điều khiển Dead-Beat cho động cơ DC kích từ độc lập, với sự hỗ trợ của Matlab để tính toán và Simulink để mô phỏng. Phương pháp này tận dụng ưu điểm của điều khiển số để cải thiện đáp ứng động của hệ thống.

2. Mô hình hóa động cơ DC



Hình 1. Sơ đồ thay thế động cơ điện một chiều kích từ độc lập

Phương trình cân bằng điện áp phần ứng được xác định như sau:

$$V_a(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_b(t) \quad (1)$$

Phương trình sức điện động mạch phần ứng được xác định như sau:

$$E_b(t) = K\omega(t) \quad (2)$$

Phương trình cân bằng mô-men được xác định theo biểu thức sau:

$$T_m(t) = K I_a(t) \quad (3)$$

$$T_m(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (4)$$

Trong đó:

K : Hằng số động cơ (V/rad/s)

J : Mô-men quán tính của roto [Kg.m²].

L_a : Điện cảm phần ứng [H].

R_a : Điện trở phần ứng [Ω].

B : Hệ số ma sát nhớt [N·m·s/rad].

Ta kết hợp phương trình (1), (3), (4) ta được:

$$V_a(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_b(t) \quad (5)$$

$$K I_a(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (6)$$

Thực hiện biến đổi Laplace của (5) và (6), ta được:

$$V_a(s) = R_a I_a(s) + L_a I_a(s) \cdot s + E_b(s) \quad (7)$$

$$K I_a(s) = J \omega(s) \cdot s + B \omega(s) \quad (8)$$

Từ phương trình (8) thế vào phương trình (7) ta được:

$$V_a(s) = \omega(s) \frac{1}{K} [L_a \cdot J \cdot s^2 + R_a \cdot J + L_a B(s) + K^2] \quad (9)$$

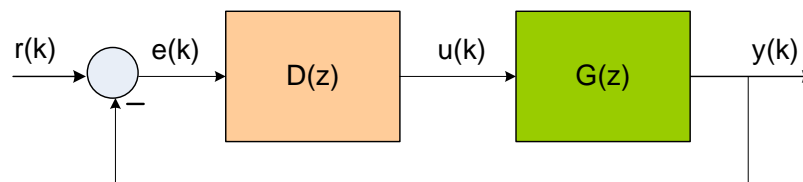
Mô hình liên tục của động cơ DC kích từ độc lập được biểu diễn bằng hàm truyền từ điện áp phản ứng $V_a(s)$ đến tốc độ $\omega(s)$.

$$G_1(s) = \frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K}{[JL_a s^2 + (JR_a + BL_a)s + (K^2 + BR_a)]} \quad (10)$$

3. Thiết kế bộ điều khiển dead-beat

Trong hệ thống điều khiển số, Dead-Beat Controller hoạt động trong miền (z) (biến đổi z) thay vì miền (s) (biến đổi Laplace), vì nó thường áp dụng cho các hệ rời rạc.

Mục tiêu: Đảm bảo đầu ra (y(k)) đạt giá trị tham chiếu (r(k)) sau một số bước thời gian hữu hạn (thường là (n) bước, với (n) là bậc của hệ thống), mà không có sai số hoặc dao động dư. Hàm truyền của Dead-Beat Controller được thiết kế dựa trên hàm truyền của đối tượng điều khiển (plant) và yêu cầu đáp ứng mong muốn [1, tr. 50 – 55; 5, tr.10].



Hình 2. Cấu trúc cơ bản của bộ điều khiển trễ Dead-Beat Controller

Cấu trúc của bộ điều khiển Dead-Beat bao gồm các thành phần chính:

- Mô hình đối tượng (Plant): Động cơ DC kích từ độc lập, được biểu diễn dưới dạng hàm truyền rời rạc (G(z)), thường bao gồm trễ thời gian.
- Bộ điều khiển (D(z)): Được thiết kế để đảm bảo hàm truyền vòng kín (T(z)) có dạng z^{-k} (trễ (k) bước), với (k) là tổng bậc hệ thống và độ trễ.
- Hồi tiếp: Tín hiệu đầu ra y(k) (tốc độ) được đo và đưa ngược về để tính toán sai số.
- Tín hiệu tham chiếu r(k): Giá trị tốc độ mong muốn mà hệ thống cần đạt.

Bộ điều khiển trễ được thiết kế sao cho tốc độ đầu ra của động cơ có dạng tốc độ tham chiếu nhưng chậm sau một vài chu kỳ lấy mẫu. Khi đó, hàm truyền của hệ thống có bộ điều khiển trễ được thể hiện như sau [2, tr. 60 – 63; 5, tr.10]:

$$G_2(z) = \frac{\omega(z)}{\omega^*(z)} = z^{-k} \quad (11)$$

Trong đó, $\omega^*(z)$ tốc độ tham chiếu ở dạng biến đổi z và z^{-k} là hàm truyền của bộ trễ sau k ($k \geq 1$) chu kỳ lấy mẫu.

Từ phương trình (10) có thể được viết gọn lại như sau:

$$G_1(s) = \frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K}{a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (12)$$

Trong đó, $a_2 = L_a J, a_1 = L_a B + R_a J, a_0 = R_a B + K^2$

Thông số của động cơ một chiều kích từ độc lập trong mô hình khảo sát:

Điện trở mạch phần ứng	$R_a = 7,55 (\Omega)$
Điện cảm mạch phần ứng	$L_a = 0,1114 (H)$
Điện trở mạch kích từ	$R_e = 240 (\Omega)$
Điện cảm mạch kích từ	$L_e = 120 (H)$
Hỗ cảm giữa phần ứng và kích từ	$M_e = 1,8 (H)$
Điện áp kích từ	$V_e = 220 (V)$
Hằng số động cơ	$K = 1,6504 (V/rad/s)$
Mômen quán tính của rôto	$J = 0,01287 (kg.m^2)$
Hệ số ma sát	$B = 0,0001 (N.m.s)$
Mômen tải	$T_L = 5 (Nm)$
Thông số bộ băm xung	
Điện áp đầu vào	$E = 220 (V)$
Tần số băm xung	$f = 1000 (Hz)$

Từ thông số động cơ theo (10) ta xác định được hàm truyền cụ thể của động cơ điện một chiều kích từ độc lập có dạng như sau:

$$G_1(s) = \frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{1,65}{0,001434s^2 + 0,09717s + 2,724} \quad (13)$$

Để áp dụng bộ điều khiển trễ, mô hình liên tục được rời rạc hóa bằng phương pháp ZOH với chu kỳ lấy mẫu T_s . Với $T_s=0.01$ giây, khi đó, hàm truyền của động cơ giữ bậc không đầu vào có dạng như sau:

$$G_1(z) = \frac{\omega(z)}{V_a(z)} = \frac{0,04579z + 0,03651}{z^2 + 1,372z + 0,5078} \quad (14)$$

Giả thiết $k=1$, khi đó hàm truyền của cả hệ với bộ điều khiển là:

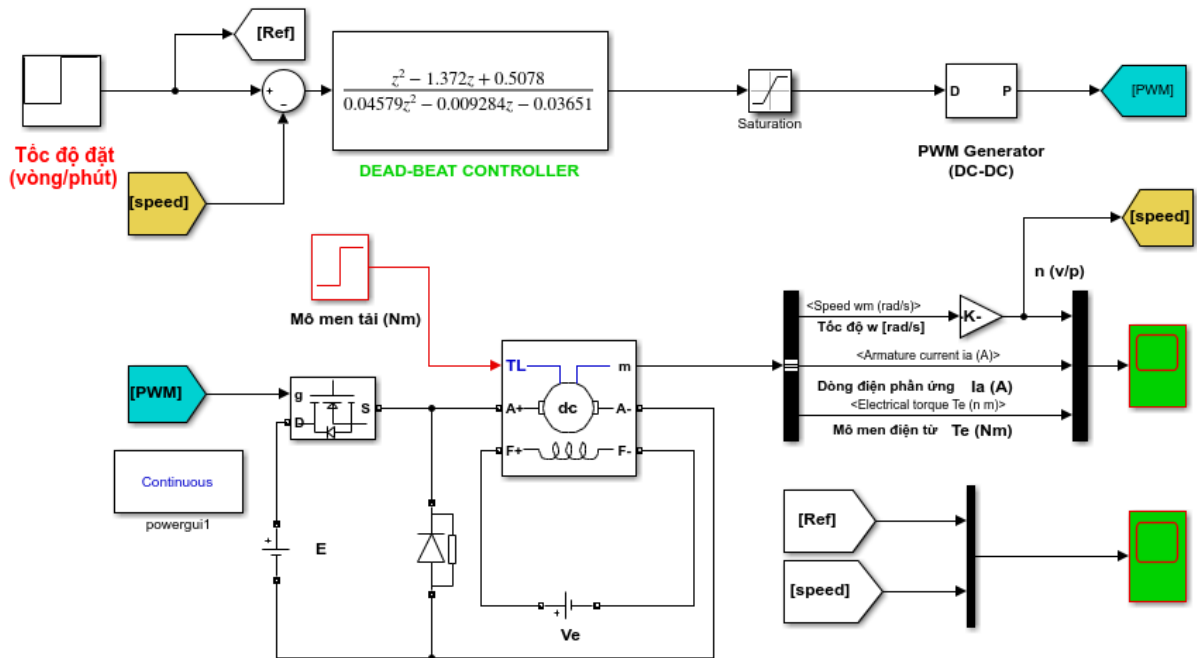
$$G_2(z) = z^{-1} \quad (15)$$

Cuối cùng, hàm truyền của bộ điều khiển trễ sẽ có dạng như sau:

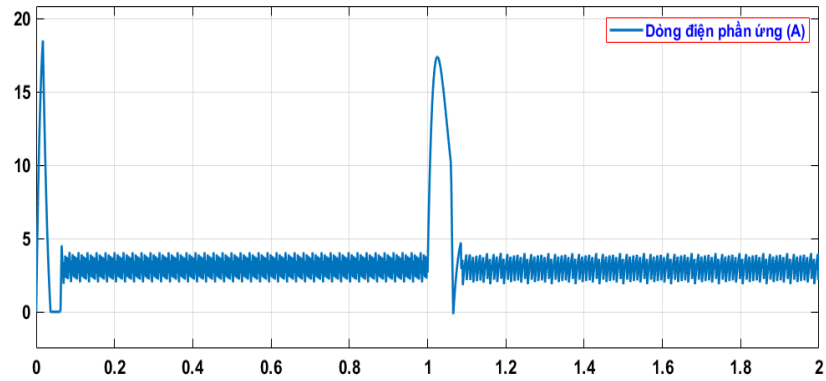
$$D(z) = \frac{1}{G_1(z)} \left[\frac{G_2(z)}{1 - G_2(z)} \right] = \frac{z^2 - 1,372z + 0,5078}{0,04579z^2 - 0,009284z + 0,031651} \quad (16)$$

4. Mô hình hóa trong matlab & simulink

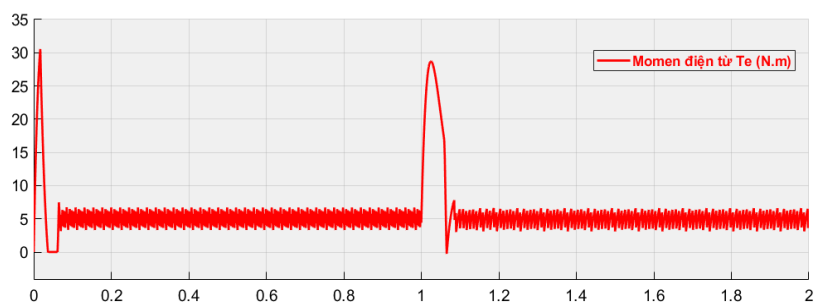
Sử dụng Matlab & Simulink để khảo sát hệ điều khiển tốc độ động cơ một chiều kích từ độc lập được cấp bởi bộ băm xung điện áp sử dụng bộ điều khiển trễ.



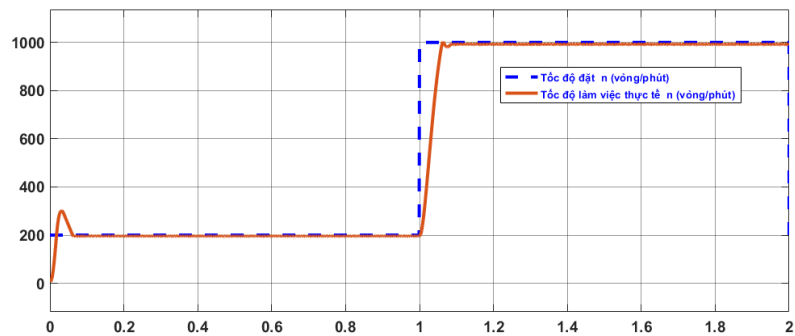
Hình 3. Mô hình mô phỏng điều khiển động cơ một chiều kích từ độc lập sử dụng bộ điều khiển trễ Dead-Beat Controller



Hình 4. Dòng điện phản ứng của động cơ



Hình 5. Mômen điện từ của động cơ



Hình 6. Tốc độ tham chiếu và tốc độ thực của động cơ

5. Trao đổi và kết luận

Phương pháp sử dụng bộ điều khiển Dead-Beat để điều khiển tốc độ động cơ DC kích từ độc lập đã được chứng minh hiệu quả thông qua mô phỏng trong Matlab và Simulink. Kết quả cho thấy khả năng đạt tốc độ mong muốn trong thời gian tối thiểu, mở ra tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống công nghiệp.

Bài báo có thể kết luận rằng Dead-Beat Controller là một phương pháp hiệu quả cho điều khiển tốc độ động cơ DC kích từ độc lập trong các hệ thống yêu cầu phản hồi nhanh, độ dao



động nhỏ. Tuy nhiên, cần cân nhắc nhiều và sai lệch mô hình trong ứng dụng thực tế. Các ứng dụng tiềm năng bao gồm robot công nghiệp, máy công cụ, và hệ thống tự động hóa.

Các nghiên cứu tiếp theo có thể tập trung vào cải thiện độ bền với nhiễu và thử nghiệm thực tế. Hướng phát triển có thể bao gồm kết hợp với bộ lọc Kalman hoặc điều khiển thích nghi để tăng tính thực tiễn.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Nise, N. S. (2019). "Control Systems Engineering", 8th Edition, Wiley.
- [2]. Franklin, G. F., Powell, J. D., & Workman, M. L. (1997). "Digital Control of Dynamic Systems", 3rd Edition, Addison-Wesley.
- [3]. Ogata, K. (1995). Discrete-Time Control Systems (2nd ed.). Prentice Hall.
- [4]. Mahmoud, M. S., & Elshenawy, A. K. (2016). "Speed control of a DC motor using Controllers." Automation, Control and Intelligent Systems, 4(6), 89-95.
- [5]. Gwad, M. N. (n.d.). "Discrete Controller Design (Deadbeat & Dahlin Controllers)." CSE421 Digital Control Lecture Notes. Retrieved March 26, 2025, from <https://mnourgwad.github.io/CSE421/lectures/CSE421DigitalControlL10.pdf>.