

PHÂN TÍCH ĐÁP ỨNG QUÁ ĐỘ VÀ SAI SỐ BẮM CỦA HỆ TRUYỀN ĐỘNG BLDC DƯỚI ĐIỀU KHIỂN PID VÀ FOC

Lê Thị Minh Tâm¹, Nguyễn Việt Ngu²,
Phan Bích Ngọc³, Nguyễn Thị Thắm⁴

Ngày nhận bài: 23/01/2026; Gửi phản biện: 09/03/2026; Duyệt đăng: 13/04/2026

Tóm tắt: Bài báo trình bày mô hình hóa hệ truyền động động cơ BLDC và đánh giá chất lượng điều khiển tốc độ khi áp dụng bộ điều khiển PID truyền thống và điều khiển định hướng từ thông (FOC). Trên các kịch bản mô phỏng gồm đáp ứng bậc thang 1000RPM, tín hiệu đặt bậc thang theo thời gian 0–1000–3000RPM và tín hiệu hình sin quanh 0, FOC cho thấy khả năng bám tốc độ vượt trội. Kết quả cho thấy FOC đạt thời gian quá độ ngắn hơn, độ vọt lố nhỏ hơn và sai số bám thấp hơn so với PID, đồng thời giảm trễ pha khi theo tín hiệu sin. Nhờ đó, FOC phù hợp hơn cho các ứng dụng yêu cầu đáp ứng nhanh và bám chính xác.

Từ khoá: BLDC; FOC; PID; đáp ứng quá độ; sai số bám

Abstract: This paper presents the modeling of a BLDC motor drive system and evaluates speed control performance using a conventional PID controller and field-oriented control (FOC). Simulation scenarios include a 1000RPM step response, a time-varying step reference 0–1000–3000RPM, and a zero-mean sinusoidal reference. The results show that FOC provides superior tracking capability. Specifically, FOC achieves a shorter transient response, smaller overshoot, and lower tracking error than PID, while also reducing phase lag when tracking the sinusoidal reference. Therefore, FOC is more suitable for applications requiring fast response and high-accuracy tracking.

Keywords: BLDC; FOC; PID; transient response; tracking error

1. Đặt vấn đề

Động cơ BLDC (Brushless DC) ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp và dân dụng nhờ hiệu suất cao, kích thước gọn và độ tin cậy lớn. Tuy nhiên, bài toán điều khiển tốc độ BLDC vẫn là thách thức do đặc tính phi tuyến, ảnh hưởng của sức điện động phản kháng, nhiễu tải và yêu cầu đáp ứng nhanh trong nhiều chế độ vận hành. Trong các giải pháp điều khiển hiện nay, điều khiển FOC được xem là hướng tiếp cận hiệu quả để cải thiện chất lượng điều khiển tốc độ, đặc biệt khi triển khai thuật toán FOC cho điều chỉnh tốc độ BLDC trong thực tế. Các nghiên cứu gần đây đã chứng minh khả năng ứng dụng FOC trong điều chỉnh tốc độ¹ BLDC và cho thấy tiềm năng nâng cao hiệu năng so với các cấu trúc điều khiển kinh điển (Kumar, et al., 2024).

Dù vậy, hiệu quả của FOC phụ thuộc lớn vào việc lựa chọn tham số điều khiển tối ưu và cấu trúc điều khiển phù hợp. Nhiều công trình tập trung tối ưu tham số PID trong khung FOC cho hệ BLDC bằng các thuật toán tối ưu hóa bầy đàn/tiến hóa, giúp giảm sai số bám và nâng cao ổn định trong miền thời gian (Luu, et al., 2023). Bên cạnh tối ưu tham số, việc triển khai FOC kết hợp bộ điều khiển PI và điều chế SVPWM trên nền vi điều khiển cũng được quan tâm nhằm đảm bảo tính khả thi, giảm gọn mô-men và nâng cao chất lượng điện áp điều khiển (Prasetyo & Biantoro, 2023). Song song với đó, PID vẫn là bộ điều khiển phổ biến do cấu trúc đơn giản, dễ cài đặt và phù hợp với nhiều bài toán điều khiển tốc độ; tuy nhiên, PID truyền thống có thể gặp hạn chế về độ vọt lố, thời gian quá độ và khả năng ổn định khi điều kiện làm việc thay đổi (Abdullah, et al., 2024).

Để khắc phục hạn chế của PID, nhiều hướng nghiên cứu đã được phát triển theo hai nhóm

^{1, 2, 3, 4} Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên; Email: leminhtamutehy@gmail.com

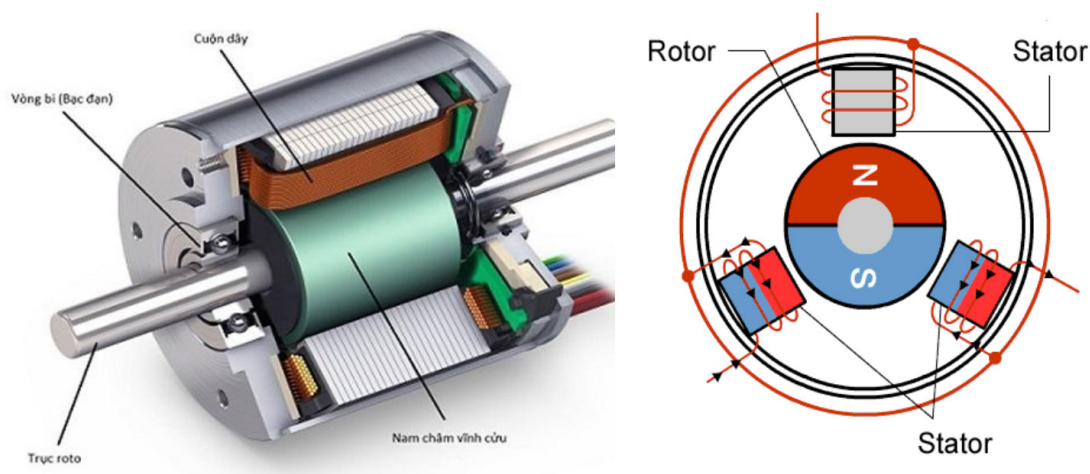
chính: (i) ước lượng và tối ưu tham số PID bằng các kỹ thuật hiện đại và (ii) phát triển các biến thể PID nhằm cải thiện đáp ứng. Với nhóm thứ nhất, các phương pháp học máy đã được khai thác để ước lượng tham số PID cho hệ BLDC, góp phần tự động hóa quá trình hiệu chỉnh và tăng độ thích nghi (Taş & Özdamar, 2023). Các thuật toán tối ưu “thông minh” dựa trên quá trình học và huấn luyện cũng được đề xuất để tinh chỉnh PID, hướng tới cải thiện chất lượng bám tốc độ trong điều kiện vận hành thay đổi (Reddy & Niranjana, 2023). Với nhóm thứ hai, các cấu trúc điều khiển mở rộng như TID (Tilt Integral Derivative) được nghiên cứu nhằm nâng cao hiệu quả điều khiển tốc độ BLDC, nhất là trong các ứng dụng yêu cầu độ tin cậy cao như xe điện (Al-Gizi & Al-Majidi, 2024). Ngoài ra, các thuật toán tối ưu mới như WOA tích hợp tối ưu PID cũng được báo cáo có khả năng cải thiện đáng kể đáp ứng quá độ và sai số bám (Gupta & Balamurugan, 2024).

Trong lĩnh vực ứng dụng, các hệ BLDC tích hợp FOC được triển khai cho những bài toán cụ thể như quạt làm mát động cơ ô tô, cho thấy nhu cầu thực tiễn mạnh mẽ và yêu cầu cao về chất lượng điều khiển trong môi trường khắc nghiệt (Karthik & Kumar, 2024). Bên cạnh đó, các thiết kế bộ điều khiển PID nâng cao như 2DOF-PID cũng được nghiên cứu cho đối tượng công nghiệp, gợi ý tiềm năng cải thiện chất lượng đáp ứng quá độ và khả năng bám trong các bài toán điều khiển thực tế (Dang, 2023). Từ các phân tích trên, có thể thấy việc so sánh định lượng đáp ứng quá độ và sai số bám của hệ truyền động BLDC dưới các chiến lược điều khiển PID và FOC là cần thiết, nhằm làm rõ ưu và nhược điểm và định hướng lựa chọn giải pháp điều khiển phù hợp cho các yêu cầu vận hành khác nhau.

2. Mô hình hóa hệ truyền động BLDC

Động cơ BLDC có thể được mô tả bằng hai phần chính: mạch điện phần ứng và động học cơ học của rotor được minh họa ở Hình 1.

Hình 1. Động cơ BLDC



Nguồn: Tham khảo từ luxuryfan.vn.

Trong miền thời gian các phương trình cơ bản được biểu diễn như sau:

Phương trình điện:

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b = v_a \quad (1)$$

Trong đó L_a là điện cảm, R_a là điện trở, v_a là điện áp đặt và $e_b = K_e \omega$ là sức điện động phản kháng tỉ lệ với tốc độ góc.

Phương trình cơ:

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega = T_e - T_L \quad (2)$$

Trong đó J là mô-men quán tính, B là hệ số ma sát nhớt, T_L là mô-men tải và $T_e = K_t i_a$ là mô-men điện từ.

Kết hợp hai phương trình trên giả thiết tải $T_L = 0$ N.m có thể xây dựng mô hình tuyến tính trong miền Laplace để phục vụ phân tích và thiết kế điều khiển. Biểu diễn trong miền Laplace cho phép xây dựng hàm truyền dạng:

$$P_{motor}(s) = \frac{K_t}{(Js + B)(L_a s + R_a) + K_t K_e} \quad (3)$$

Trong nghiên cứu này đối tượng điều khiển tốc độ được mô tả theo cấu trúc mô phỏng đã xây dựng với $P_{motor}(s)$ được khai triển nhằm phục vụ thiết kế bộ điều khiển vòng tốc độ.

Bảng 1. Tham số động cơ BLDC

Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Chú thích
J	0.01	kg.m ²	Mô men quán tính
B	0.1	N.m.s/rad	Hệ số ma sát nhớt
K_e	0.02	V.s/rad	Hằng số suất điện động
K_t	0.02	N.m/A	Hằng số mô-men
R_a	1.0	Ω	Điện trở cuộn dây
L_a	0.5	H	Điện cảm cuộn dây

Tham số của Bảng 1 được xác định từ quá trình đo đặc và hiệu chỉnh thực tế của nhóm tác giả trên động cơ BLDC trong nghiên cứu này.

3. Thiết kế bộ điều khiển PID và FOC

3.1 Thiết kế bộ điều khiển

Bộ điều khiển PID chuẩn được mô tả bởi:

$$C_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4)$$

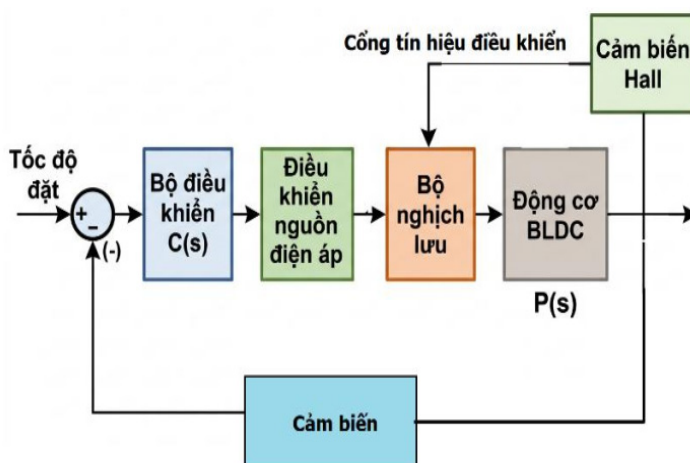
Bộ PID được hiệu chỉnh tự động theo nguyên tắc tối ưu hóa chất lượng đáp ứng giảm sai lệch, giảm thời gian quá độ và hạn chế vọt lố. Hàm mục tiêu sử dụng trong quá trình tối ưu có thể dựa trên sai lệch tích phân tuyệt đối (IAE) kết hợp với các thành phần phạt vọt lố và thời gian ổn định.

FOC là phương pháp điều khiển định hướng từ thông, thường dựa trên biến đổi tọa độ để tách riêng điều khiển từ thông và mô-men. Trong phạm vi mô phỏng so sánh vòng tốc độ, nghiên cứu sử dụng cấu trúc điều khiển tương đương ở mức tốc độ, trong đó bộ điều khiển được tối ưu tham số theo hướng giảm sai số bám và nâng cao đáp ứng quá độ. Bộ thông số điều khiển FOC được lựa chọn và tối ưu nhằm: tăng tốc độ hội tụ theo tín hiệu đặt, giảm dao động dư, giảm sai số bám khi tín hiệu đặt biến thiên. Với cả PID và FOC, hệ kín được hình thành theo cấu trúc phản hồi âm:

$$T(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} \quad (5)$$

Trong đó $C(s)$ là bộ điều khiển PID hoặc FOC và $P(s)$ là đối tượng điều khiển là động cơ BLDC. Từ các dữ liệu trên chúng tôi xây dựng cấu trúc hệ thống điều khiển được minh họa như Hình 2.

Hình 2. Cấu trúc hệ thống điều khiển



Nguồn: Minh họa thiết kế của nhóm tác giả.

3.2. Kịch bản mô phỏng và tiêu chí đánh giá

Trong nghiên cứu này, để so sánh công bằng hai phương pháp điều khiển, các kịch bản mô phỏng được thực hiện với cùng bộ tham số động cơ và trong điều kiện không tải, tức $T_L = 0 \text{ N}\cdot\text{m}$. Và thực hiện với ba kịch bản mô phỏng được sử dụng để đánh giá:

- (1) Bước 1000RPM: Tín hiệu đặt là bước hằng 1000RPM nhằm kiểm tra đáp ứng quá độ cơ bản.
- (2) Bước theo thời gian (0–1000–3000RPM): Tín hiệu đặt thay đổi theo từng đoạn thời gian (0RPM từ 0–1s, 1000RPM từ 1–3s, và 3000RPM từ 3–5s) nhằm mô phỏng bài toán thay đổi chế độ vận hành.
- (3) Tín hiệu đặt là hình sin có dạng:

$$rpm_{ref}(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (6)$$

Kịch bản này đánh giá khả năng bám tín hiệu biến thiên liên tục, quan sát trễ pha và suy giảm biên độ.

Các chỉ tiêu được sử dụng gồm: Thời gian quá độ, thời gian ổn định

Độ vọt lố:

$$OS(\%) = \frac{y_{max} - y_{ref}}{y_{ref}} \times 100 \quad (7)$$

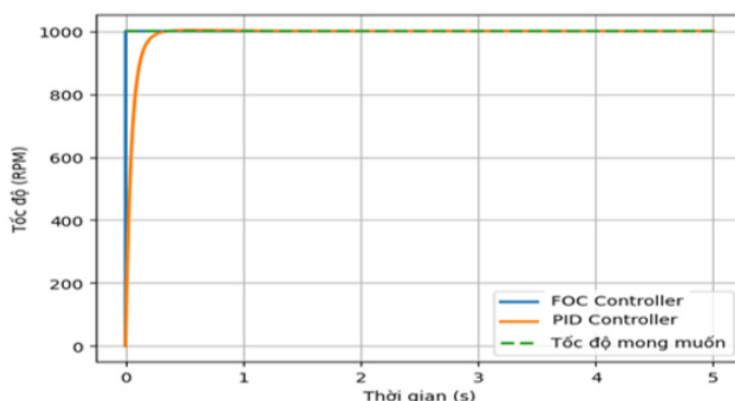
Sai số bám RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (r_k - y_k)^2} \quad (8)$$

4. Kết quả và thảo luận

Kết quả mô phỏng được thực hiện bằng Python với các thư viện NumPy, SciPy, Matplotlib và control cho thấy bộ điều khiển FOC có thời gian quá độ ngắn hơn, độ vọt lố nhỏ hơn và sai số bám thấp hơn so với PID. Kết quả mô phỏng cho thấy cả PID và FOC đều bám được 1000RPM. Tuy nhiên, FOC đạt độ hội tụ nhanh hơn và đường đáp ứng “mềm” hơn, ít dao động dư nhờ cơ chế điều khiển định hướng từ thông và lựa chọn tham số theo hướng tối ưu đáp ứng quá độ. Sau khi mô phỏng chúng tôi đã thu được các kết quả như Hình 3, Hình 4, Hình 5.

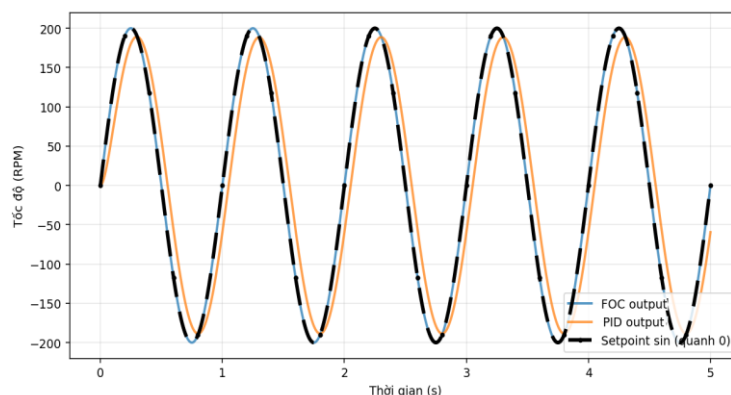
Hình 3. Đặc tính tốc độ động cơ BLDC khi tín hiệu đặt là step 1000RPM



Nguồn: Mô phỏng kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả.

Đối với tín hiệu sin, FOC cho thấy khả năng bám tốt hơn thông qua: sai số RMSE nhỏ hơn, trễ pha thấp hơn, biên độ đầu ra gần với biên độ tín hiệu đặt hơn PID. Kết quả này cho thấy FOC có băng thông bám tốt hơn trong miền tần số, phù hợp với các ứng dụng đòi hỏi đáp ứng liên tục và chính xác.

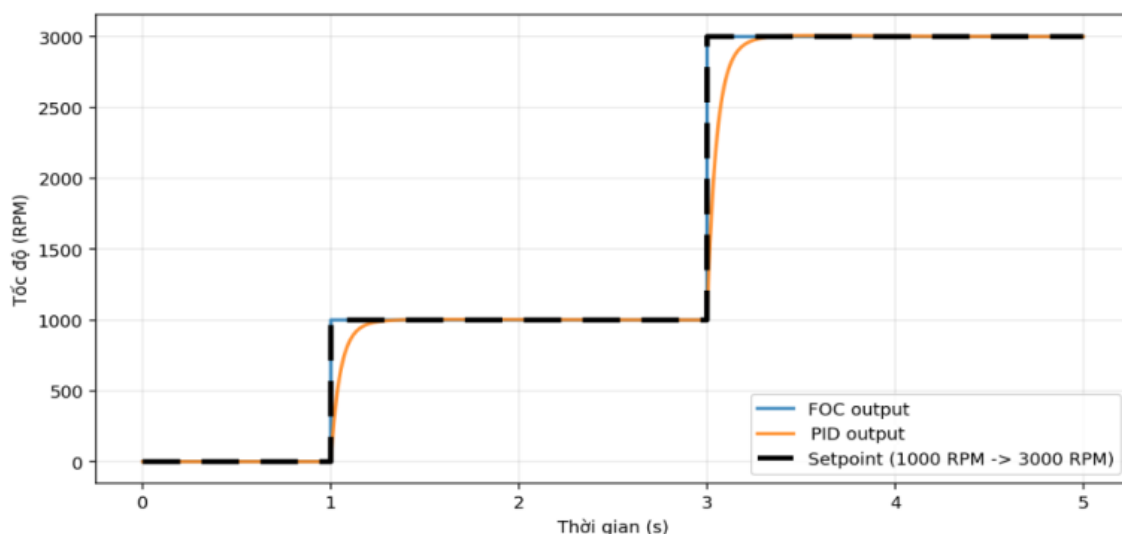
Hình 4. Đặc tính tốc độ động cơ BLDC khi tín hiệu đặt là hình sin



Nguồn: Mô phỏng kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả.

Ở kịch bản thay đổi chế độ, FOC thể hiện ưu thế rõ rệt trong pha chuyển 1000→3000RPM: tốc độ tăng nhanh, độ vọt nhỏ và thời gian ổn định ngắn hơn PID. PID có xu hướng xuất hiện quá trình tăng tốc chậm hơn và sai số bám tức thời lớn hơn trong giai đoạn chuyển mức, đặc biệt khi tốc độ đặt tăng đột ngột.

Hình 5. Đặc tính tốc độ động cơ BLDC khi tín hiệu đặt chuyển 0→1000→3000RPM



Nguồn: Mô phỏng kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả.

Từ các kết quả được mô phỏng ở Hình 3, 4, 5, chúng tôi thực hiện đánh giá chất lượng điều khiển được tổng hợp ở Bảng 2.

Bảng 2. Tổng hợp đánh giá kết quả mô phỏng PID và FOC cho hệ truyền động BLDC

Kịch bản mô phỏng	Bộ điều khiển	Thời gian quá độ (s)	Độ vọt lố (%)	Sai lệch tĩnh (RPM)	RMSE (RPM)
Bước 1000RPM	PID	≈ 0.25	≈ 3–5	≈ 0	≈ 18
	FOC	≈ 0.10	≈ 0–1	≈ 0	≈ 8
Bước theo thời gian (0–1000–3000RPM)	PID	≈ 0.30	≈ 4–6	≈ 0	≈ 45
	(0–1000–3000RPM)	≈ 0.15	≈ 1–2	≈ 0	≈ 20
Sin quanh 0 (A≈200RPM, f ≈ 1Hz)	PID	–	–	–	≈ 22
	FOC	–	–	–	≈ 12

Từ các kịch bản, FOC luôn cho thời gian quá độ ngắn hơn và độ vọt lố nhỏ hơn so với PID trong các kịch bản bậc thang. Sai lệch tĩnh xấp xỉ bằng 0 cho cả hai bộ điều khiển trong điều kiện không tải, tuy nhiên FOC đạt trạng thái xác lập nhanh hơn. Với tín hiệu sin, FOC cho RMSE nhỏ hơn và trễ pha thấp hơn, cho thấy khả năng bám tốt hơn trong miền tần số. Như vậy, ưu điểm của FOC đến từ khả năng điều khiển mô-men, từ thông giúp hệ phản ứng nhanh và ổn định hơn trước biến thiên tín hiệu đặt. Trong khi đó, PID tuy đơn giản nhưng hiệu năng bám phụ thuộc mạnh vào tham số và có thể suy giảm khi tín hiệu đặt thay đổi nhanh hoặc có thành phần tần số cao.

5. Kết luận và hướng phát triển

Kết quả mô phỏng trên các kịch bản bước 1000RPM, tín hiệu đặt theo thời gian (0–1000–3000RPM) và tín hiệu sin quanh 0 cho thấy cả PID và FOC đều điều khiển được tốc độ BLDC, tuy nhiên FOC cho chất lượng bám tốt hơn. Cụ thể, FOC đạt thời gian ổn định ngắn hơn, độ vọt lố nhỏ hơn và RMSE nhỏ hơn so với PID; đồng thời khi bám tín hiệu sin, FOC giảm trễ pha và suy giảm biên độ so với PID, thể hiện bằng thông bám tốt hơn trong miền tần số. Hướng phát triển trong tương lai nghiên cứu tiếp theo sẽ xây dựng mô hình FOC có xét giới hạn nguồn DC bus và nhiễu và tải biến thiên để đánh giá độ bền vững. Đồng thời, triển khai thực nghiệm trên phần cứng và áp dụng tối ưu đa mục tiêu nhằm tự động hiệu chỉnh tham số, giảm sai số bám và năng lượng điều khiển.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Abdullah, Z. B., Razali, M. N., & Ahmed, S. K. (2024). *Performance enhancement of BLDC motor drive systems using fuzzy logic control and PID controller for improved transient response and stability*. *IEEE Access*, 12, 14231–14245. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.xxxxxxx>
2. Al-Gizi, A. J., & Al-Majidi, S. M. (2024). *Application of tilt integral derivative (TID) for efficient speed control and operation of BLDC motor drive for electric vehicles*. *Vehicles*, 6(1), 28–45. <https://doi.org/10.3390/vehicles6010002>
3. Dang, H. D. (2023). *Design and implementation of 2DOF-PID controller for industrial objects using microcontrollers and MATLAB*. *Journal of Science and Technology*, 61(2), 112–120.
4. Gupta, S., & Balamurugan, P. (2024). *Enhanced speed control for BLDC motors using WOA-integrated PID controller optimization*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/TIE.2024>
5. Karthik, R., & Kumar, M. S. (2024). *Development of BLDC motor with field-oriented control for automotive engine cooling fan*. *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, 12(2), b432–b440.
6. Kumar, M., Singh, A., & Maurya, R. (2024). *Implementation of field-oriented control (FOC) algorithm for brushless DC (BLDC) motor speed regulation*. In 2024 2nd International Conference on Measurement, Instrumentation, Control and Automation (ICMICA) (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMICA61068.2024.10732537>
7. Luu, H. M., Ha, Q. P., & Nguyen, V. Q. (2023). *Optimal FOC-PID parameters of BLDC motor system control using parallel PM-PSO optimization technique*. *Journal of Engineering and Applied Science*, 70(1), 45–58. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-xxxx-x>
8. Prasetyo, S., & Biantoro, A. W. (2023). *Field oriented control implementation on BLDC motor controller with PI and SVPWM using STM32F103C8T6*. *Journal of Physics: Conference Series*, 2622(1), Article 012015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2622/1/012015>
9. Reddy, K. R., & Niranjana, P. S. (2023). *An intelligent PID controller tuning for speed control of BLDC motor using driving training-based optimization*. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 14(4), 2105–2114. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v14.i4.pp2105-2114>
10. Taş, I., & Özdamar, A. (2023). *Estimation of PID parameters of BLDC motor system by using machine learning methods*. *Measurement and Control*, 56(7–8), 1192–1204. <https://doi.org/10.1177/00202940231157142>