

ẢNH HƯỞNG CỦA CƯỜNG ĐỘ DÒNG ĐIỆN KÍCH THÍCH VÀ TỐC ĐỘ QUAY TỚI MÔ MEN VÀ CÔNG SUẤT CỦA PHANH DÒNG ĐIỆN XOÁY 50 KW

EFFECTS OF EXCITATION CURRENT AND ROTATIONAL SPEED ON TORQUE
AND POWER OF A 50 KW EDDY CURRENT BRAKE

Nguyễn Công Thuật*, Hoàng Mạnh Cường

Trường Đại học Công nghiệp Việt – Hung

*Email: Cthuatst@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo phân tích ảnh hưởng của dòng điện kích từ và tốc độ quay đến mô men và công suất của phanh dòng điện xoáy (ECB) 50 kW sử dụng trong bộ thử động cơ. Mô hình điện từ lý thuyết dựa trên mô hình Wouterse mở rộng được xây dựng nhằm mô tả mối quan hệ giữa dòng kích từ, mật độ từ thông và dòng điện xoáy trong rotor, có xét đến hiệu ứng bề mặt ở tốc độ cao. Các quan hệ đặc trưng được khảo sát bằng MATLAB. Kết quả cho thấy trong vùng chưa bão hòa từ, mô men phanh tỷ lệ với bình phương dòng kích từ và tuyến tính theo tốc độ quay, trong khi công suất tăng theo bình phương tốc độ. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở cho thiết kế sơ bộ và định hướng lựa chọn chế độ vận hành tối ưu của ECB.

Từ khóa: Phanh dòng điện xoáy; Mô hình điện từ; Mô men phanh; Bão hòa từ.

ABSTRACT

This paper analyzes the effects of excitation current and rotational speed on the torque and power of a 50 kW eddy current brake (ECB) used in an engine test bench. A theoretical electromagnetic model based on the extended Wouterse model is developed to describe the relationship among excitation current, magnetic flux density, and induced eddy currents in the rotor, taking into account the skin effect at high speeds. The characteristic relationships are investigated using MATLAB. The results show that, in the unsaturated magnetic region, the braking torque is proportional to the square of the excitation current and varies linearly with rotational speed, while the braking power increases with the square of the speed. The findings provide a basis for preliminary design and for determining optimal operating conditions of the ECB.

Keywords: Eddy current brake; Electromagnetic modeling; Braking torque; Magnetic saturation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong nghiên cứu và phát triển động cơ đốt trong cũng như hệ truyền động hiện đại, bộ thử công suất (engine dynamometer) đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá đặc tính làm việc, hiệu suất và độ tin cậy của hệ thống. Trong số các thiết bị hấp thụ công suất, phanh dòng điện xoáy (Eddy Current Brake – ECB) được sử dụng rộng rãi nhờ các ưu điểm như không tiếp xúc cơ khí, giảm mài mòn, khả năng đáp ứng nhanh và vận hành ổn định trong dải công suất trung bình [3]. Mô hình thiết bị tạo tải đa năng sử dụng phanh dòng điện xoáy (ECB) được nghiên cứu với mục đích tạo tải giả lập ô tô di chuyển trên đường cho mục tiêu đào tạo, nghiên cứu [1].

Nguyên lý hoạt động của ECB dựa trên hiện tượng cảm ứng điện từ được mô tả bởi định luật Faraday và lực Lorentz. Khi rotor dẫn điện quay trong từ trường do stator tạo ra, từ thông biến thiên sinh ra dòng điện xoáy trong vật liệu rotor. Sự tương tác giữa dòng điện xoáy và từ trường tạo ra lực điện từ ngược chiều chuyển động, từ đó sinh ra mô men phanh [2]. Đặc tính này cho phép ECB chuyển đổi trực tiếp năng lượng cơ học thành nhiệt năng mà không cần tiếp xúc cơ khí, phù hợp với các hệ thống thử nghiệm yêu cầu độ bền và độ chính xác cao.

Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng mô men phanh của ECB phụ thuộc mạnh vào các tham số vận hành và đặc tính vật liệu, bao gồm mật độ từ thông, độ dẫn điện của rotor và tốc độ quay [4]. Trong điều kiện làm việc tuyến tính, mô men phanh có thể được biểu diễn gần đúng là hàm bậc hai của dòng điện kích từ và tuyến tính theo tốc độ quay, trong khi công suất phanh tăng theo bình phương tốc độ [5]. Các quan hệ này đóng vai trò quan trọng trong việc định hướng thiết kế và lựa chọn chế độ làm việc của hệ thống.

Các phương pháp nghiên cứu ECB hiện nay chủ yếu bao gồm ba hướng tiếp cận. Thứ nhất là mô hình giải tích, sử dụng các biểu thức toán học để mô tả mối quan hệ giữa các đại lượng vật lý, phù hợp cho giai đoạn thiết kế sơ bộ [6]. Thứ hai là phương pháp mô phỏng số, đặc biệt là phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), cho phép phân tích chi tiết phân bố từ trường, dòng điện xoáy và tổn hao năng lượng trong hệ thống [4]. Thứ ba là các nghiên cứu thực nghiệm nhằm kiểm chứng mô hình và đánh giá hiệu suất thực tế của thiết bị [7].

Tuy nhiên, các phương pháp mô phỏng số và thực nghiệm thường yêu cầu thời gian tính toán lớn và chi phí cao, đặc biệt trong giai đoạn thiết kế ban đầu. Do đó, bài báo này tập trung xây dựng mô hình toán học có xét đến hiệu ứng bề mặt nhằm làm rõ ảnh hưởng của các tham số vận hành. Đóng góp chính của bài báo gồm:

Xây dựng mô hình Wouterse mở rộng có xét đến hiệu ứng bề mặt;

Phân tích định lượng ảnh hưởng của dòng kích từ và tốc độ quay;

Xác định vùng làm việc tối ưu của ECB;

Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn thông số vận hành và tối ưu hóa thiết kế ECB trong các ứng dụng bộ thử động cơ.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình toán học

Để mô tả chính xác mô-men phanh của phanh dòng điện xoáy trong điều kiện làm việc thực tế, mô hình Wouterse được mở rộng được sử dụng nhằm xét đến ảnh hưởng của các yếu tố đến mô-men phanh ECB.



$$T_{brake} = \rho \cdot \sigma \cdot t_d \cdot \omega \cdot B_q^2 \cdot \sum_{i=1}^{2p} A_{pole} \cdot R_{eff,i}^2$$

Trong đó:

- ρ : Hệ số hiệu chỉnh phân bố từ trường;
- σ : Độ dẫn điện của rotor;
- t_d : Chiều dày hiệu dụng của rotor;
- ω : Tốc độ góc;
- B_q : Mật độ từ thông hiệu dụng tại khe hở không khí;
- $2p$: Số cực từ;
- A_{pole} : Diện tích tác dụng của mỗi cực từ;
- $R_{eff,i}$: Bán kính hiệu dụng tại cực từ thứ i .

Để phản ánh chính xác các thông số ở tốc độ cao (có skin effect), mô hình được hiệu chỉnh:

$$T_{brake} = \frac{\rho \cdot \sigma \cdot t_d \cdot \omega \cdot B_q^2}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2} \cdot \sum_{i=1}^{2p} A_{pole} \cdot R_{eff,i}^2$$

Bảng 1. Thông số chính ECB 50 kW

Thông số		Trị số	Thông số		Trị số
Công suất cực đại		50kW	Tốc độ		500-6000 rpm
Mô men			Dòng kích thích		2-10 (A)
Rotor	Bán kính	200mm	Cực từ	Diện tích	0.0009m ²
	Độ dày	15mm		Số lượng	8
	Vật liệu	Nhôm		Vật liệu	Thép kỹ thuật

Phương trình toán học của ECB được triển khai bằng MATLAB nhằm thực hiện khảo sát các thông số đầu vào để đánh giá nhanh ảnh hưởng của chúng đến mô men và công suất.

Trong đó: ω_c là tốc độ đặc trưng phụ thuộc vật liệu và chiều dày rotor.

Công suất phanh được xác định: $P = T \cdot \omega$.

2.2. Phương pháp tính toán

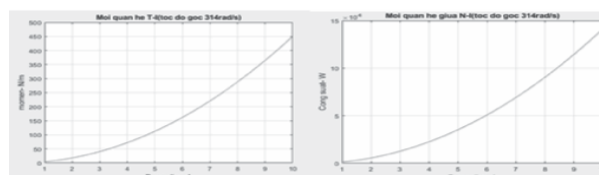
Mô hình được triển khai trên MATLAB để khảo sát tham số. Ngoài ra, kết quả được so sánh xu hướng với các công bố trước nhằm kiểm chứng tính hợp lý.

3. ĐỐI TƯỢNG NGHIÊN CỨU

Đối tượng nghiên cứu là ECB có công suất là 50kW được tính toán thiết kế (hình 1) cho phanh thử động cơ. Các thông số chính được thể hiện ở bảng 1.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Ảnh hưởng của dòng kích từ tới mô men, công suất

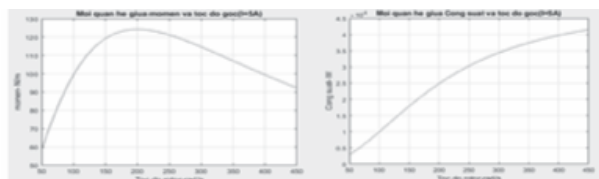


Hình 1. Ảnh hưởng của dòng kích từ tới mô men, công suất

Kết quả mô phỏng (hình 1) cho thấy mô men tăng gần bậc hai theo dòng kích từ. Trong khoảng điều khiển dòng điện kích thích chưa xuất hiện phi tuyến do bão hòa từ.

Công suất tăng nhanh hơn so với mô men do phụ thuộc đồng thời vào cả mô men và tốc độ quay. Xu hướng tăng mạnh ở vùng dòng lớn cho thấy tải nhiệt trên rotor sẽ rất cao khi vận hành ở công suất lớn. Kết quả này khẳng định rằng trong thiết kế ECB, cần đặc biệt chú ý đến giới hạn dòng kích từ nhằm tránh quá nhiệt, đồng thời đảm bảo hiệu quả làm mát phù hợp với chế độ làm việc.

4.2. Ảnh hưởng của tốc độ rotor (với dòng kích từ không đổi 5 A)

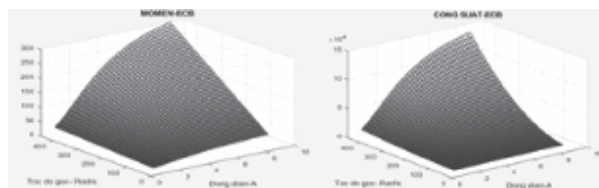


Hình 2. Mối quan hệ của tốc độ quay tới mô men, công suất

Mối quan hệ giữa tốc độ quay với mô men và công suất của phanh dòng điện xoáy thể hiện đặc trưng phi tuyến rõ rệt (hình 2). Mô men tăng nhanh trong vùng tốc độ thấp và đạt giá trị cực đại khoảng 180-200 rad/s, sau đó giảm dần khi tốc độ tiếp tục tăng do ảnh hưởng của hiệu ứng bề mặt (skin effect) làm giảm độ thâm nhập của dòng điện xoáy ở tốc độ cao, từ đó làm suy giảm lực điện từ.

Công suất tăng liên tục theo tốc độ quay, mặc dù tốc độ tăng có xu hướng chậm dần ở vùng cao. Kết quả cho thấy tồn tại vùng tốc độ tối ưu để đạt mô men cực đại, và tăng hệ số trao đổi nhiệt trong quá trình làm mát.

4.3. Phân tích kết hợp và vùng tối ưu



Hình 3. Quan hệ kết hợp giữa dòng điện kích thích và tốc độ với công suất ECB

Kết quả mô phỏng cho thấy mối quan hệ kết hợp giữa dòng điện kích thích và tốc độ quay đến mô men và công suất của phanh dòng điện xoáy mang tính phi tuyến và phụ thuộc đồng thời vào cả hai tham số (hình 3). Khi tốc độ tiếp tục tăng, mô men đạt giá trị cực đại rồi giảm dần do ảnh hưởng của hiệu ứng bề mặt và sự suy giảm độ thâm nhập của dòng điện xoáy.

Đối với công suất, do được xác định bởi $P = T\omega$, nên công suất tăng mạnh khi cả dòng kích từ và tốc độ cùng tăng. Trong vùng tốc độ cao, mặc dù mô men có xu hướng giảm, nhưng công suất vẫn tiếp tục tăng do tốc độ đóng vai trò chi phối. Kết quả cho thấy sự tồn tại của vùng làm việc tối ưu, trong đó mô men đạt cực đại tại vùng tốc độ trong bình 1500 đến 2500 vòng/ phút, công suất cực đại ở tốc độ cao. Kết quả phù hợp với xu hướng trong các nghiên cứu trước.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả nghiên cứu ảnh hưởng kết hợp của dòng điện kích thích và tốc độ quay đến đặc tính mô men và công suất của phanh dòng điện xoáy công suất 50 kW. Trên cơ sở mô hình toán học theo hướng tiếp cận Wouterse mở rộng và triển khai tính toán bằng MATLAB, các mối quan hệ đặc trưng giữa các tham số đã được làm rõ thông qua phân tích và mô phỏng.



Kết quả cho thấy mô men phanh tăng theo bình phương dòng kích từ và tăng theo tốc độ trong vùng thấp, và đạt cực đại và giảm dần khi tốc độ tăng cao do ảnh hưởng của hiệu ứng bề mặt và giới hạn thâm nhập dòng điện xoáy. Ngược lại, công suất phanh tăng mạnh theo tốc độ quay và dòng kích từ, do phụ thuộc đồng thời vào mô men và tốc độ, trong đó tốc độ đóng vai trò chi phối ở vùng cao. Điều này dẫn đến sự tồn tại của vùng làm việc tối ưu, trong đó mô men đạt giá trị lớn nhất tại một tốc độ xác định, trong khi công suất tiếp tục tăng ở dải tốc độ cao.

Các kết quả nghiên cứu cho phép lựa chọn đồng thời dòng kích từ và tốc độ quay trong thiết kế và vận hành ECB nhằm đạt hiệu quả tối ưu. Đồng thời, sự gia tăng công suất ở tốc độ cao cũng đặt ra yêu cầu nghiêm ngặt đối với hệ thống làm mát. Nghiên cứu là cơ sở cho các bước phát triển tiếp theo như mô phỏng phần tử hữu hạn và thực nghiệm kiểm chứng nhằm hoàn thiện thiết kế ECB trong ứng dụng thực tế. ❖

Ngày nhận bài: **12/3/2026**

Ngày phản biện: **26/3/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Công Thuật, “Xây dựng mô hình thiết bị tạo tải đa năng sử dụng phanh dòng điện xoáy (ECB)”. Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số đặc biệt tháng 10, pp: 99-104, 2025.
- [2]. J. R. Brauer, “*Magnetic Actuators and Sensors*”. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2006.
- [3]. S. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, “*Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*”, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018.
- [4]. J. Wang and K. Atallah, “*Analysis of eddy-current brakes with conductive rotors*”. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 2, pp. 611-619, 2008.
- [5]. Y. S. Lee, “*Design and analysis of eddy current braking systems*”. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 10, pp. 3967-3969, 2005.
- [6]. A. Hughes and B. Drury, “*Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*”, 4th ed. Oxford, U.K.: Elsevier, 2013.
- [7]. J. F. Gieras, “*Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*”, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010.