

PHÁT TRIỂN MÔ HÌNH MÁY ĐIỆN MỘT CHIỀU PHI TUYẾN TRONG MÔI TRƯỜNG SPICE CỦA MULTISIM BẰNG CÁCH TÍCH HỢP CÁC ĐẶC TÍNH TỪ

BÙI QUANG BÌNH

Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Quy Nhơn

Faculty of Natural Sciences, Quy Nhon University

Email: buiquangbinh@qnu.edu.vn

Ngày nhận bài: 1/6/2026

Ngày sửa chữa: 12/6/2026

Ngày duyệt đăng bài: 23/6/2026

Tóm tắt:

Mô hình máy điện một chiều mặc định trong thư viện của phần mềm NI Multisim là mô hình tuyến tính lý tưởng, vốn đã bỏ qua các hiện tượng như: bão hòa từ, từ thông dư và tổn hao sắt từ. Điều này dẫn đến sai số lớn khi mô phỏng hệ thống truyền động trong các chế độ như quá tải, tự kích từ hoặc khi cần tính toán chính xác hiệu suất năng lượng. Bài viết đề xuất một giải pháp phát triển mô hình hành vi phi tuyến mở rộng cho máy điện một chiều thông qua cấu trúc mạch phụ (Subcircuit), sử dụng trực tiếp ngôn ngữ SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Kết quả mô phỏng trên phần mềm Multisim cho thấy, mô hình mới hoạt động ổn định và phản ánh đúng hành vi của hệ thống, mở ra hướng ứng dụng hiệu quả trong thiết kế mạch điều khiển máy điện và giảng dạy chuyên ngành.

Từ khóa: máy điện một chiều, SPICE Netlist, bão hòa từ, từ dư, tổn hao sắt từ.

Development of a nonlinear DC machine model in the Multisim SPICE environment by integrating magnetic characteristics

Abstract:

The default direct-current machine model in the NI Multisim software library is an ideal linear model that neglects phenomena such as magnetic saturation, residual flux, and iron losses. This limitation leads to considerable errors when simulating drive systems under operating conditions such as overload and self-excitation or when accurate energy-efficiency calculations are required. This study proposes a solution for developing an extended nonlinear behavioral model of a direct-current machine through a subcircuit structure using the SPICE language directly. Simulation results obtained in Multisim indicate that the proposed model operates stably and accurately reflects system behavior, thereby offering promising applications in electrical machine control-circuit design and specialized teaching.

Keywords: DC machine, SPICE netlist, magnetic saturation, residual magnetism, iron losses.

1. Đặt vấn đề

Trong xu hướng phát triển của các hệ thống tự động hóa và phương tiện giao thông điện, việc mô phỏng chính xác các thành phần truyền động cơ - điện đóng vai trò quyết định đến chất lượng thiết kế của mạch điều khiển như mạch PWM (Pulse Width Modulation), mạch cầu H... (Bose, 2006), Phần mềm NI Multisim, dựa trên nền tảng mô phỏng SPICE mạnh mẽ (NI Corporation, 2009), là một trong những công cụ phổ biến nhất được các kỹ sư và nhà nghiên cứu lựa chọn nhờ giao diện thân thiện, trực quan, khả năng tương tác và khả năng phân tích mạch hỗn hợp nhanh chóng (Rashid, 2025). Tuy nhiên, mô hình máy điện một chiều có sẵn trong thư viện tiêu chuẩn của Multisim hiện tại gặp phải những giới hạn nhất định. Đó là: (i) Từ thông được coi là hằng số và tuyến tính hoàn toàn với dòng kích từ, khiến mô hình không thể phản ánh hiện tượng bão hòa từ khi máy điện vận hành ở vùng điện áp cao hoặc quá tải. (ii) Khi dòng kích từ bằng không, từ thông trong mô hình mặc định triệt tiêu hoàn toàn. Điều này làm cho việc mô phỏng chế độ máy phát một chiều tự kích từ trở nên bất khả thi trên phần mềm. (iii) Mô hình chỉ tính đến tổn hao đồng trên các dây quấn, bỏ qua tổn hao sắt từ bao gồm tổn hao từ trễ và tổn hao dòng xoáy. Do đó, kết quả tính toán hiệu suất toàn phần của hệ thống luôn có sai số lớn so với thực tế.

Để giải quyết các hạn chế trên mà không làm tăng độ phức tạp tính toán của thuật toán SPICE, bài báo đề xuất giải pháp can thiệp trực tiếp vào mã nguồn SPICE Netlist, xây dựng một khối mạch phụ phi tuyến mở rộng. Mô hình này không chỉ nâng cao độ chính xác mô phỏng hành vi cơ - điện mà còn tích hợp các “chân đo ảo” cho phép bóc tách trực tiếp từ thông và các thành phần năng lượng tổn hao trong lõi thép theo thời gian thực.

2. Cơ sở toán học của máy điện một chiều phi tuyến

2.1. Mô hình toán học của máy điện một chiều

Mô hình toán học của động cơ điện một chiều được mô tả bởi các phương trình (Vidlak et al, 2021):

$$v_a = e_a + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (1) \quad J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m = T_e - T_L \quad (3)$$

$$e_a = K_a \Phi \omega_m \quad (2) \quad T_e = K_a \Phi i_a \quad (4)$$

trong đó, v_a - điện áp vào động cơ; i_a - dòng điện phần ứng, R_a - điện trở dây quấn phần ứng; L_a - điện cảm dây quấn phần ứng; e_a - sức phản điện; Φ - từ thông dưới một cực từ; ω_m - tốc độ góc của rotor; K_a - hằng số, phụ thuộc cấu tạo dây quấn phần ứng; J - mô-men quán tính của rotor và tải; B - hệ số ma sát nhớt; T_e - mô-men điện từ do động cơ sinh ra; T_L - mô-men tải.

- Để tổng quát hóa phương trình cân bằng điện áp và mô-men cho máy điện (chế độ động cơ và máy phát), phương trình (1) được viết thành (Fitzgerald et al., 2003):

$$v_a = e_a \pm (R_a I_a + L_a \frac{di_a}{dt}) \quad (5)$$

và tương tự, phương trình (3) viết thành:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m = \pm (T_e - T_L) \quad (6)$$

trong đó, dấu “+” tương ứng với chế độ động cơ và dấu “-” tương ứng với chế độ máy phát điện.

2.2. Mô hình toán học đặc tính bão hòa từ và từ dư

Đặc tính từ hóa thực tế của lõi thép máy điện có bản chất phi tuyến và có từ dư, điều mà mô hình tuyến tính mặc định trong SPICE/Multisim không thể đáp ứng. Để khắc phục giới hạn này, tác giả đã khai thác khả năng xây dựng nguồn hành vi tùy biến của thuật toán SPICE bằng các hàm Polyl, PWL, Table (NI Corporation, 2009) và chọn hàm số phi tuyến $\arctan(x)$ để xấp xỉ hóa đường cong bão hòa mạch từ nhờ ưu

điểm mô tả mượt mà vùng tiệm cận bão hòa. Đồng thời, một hằng số phù hợp được tích hợp vào phương trình toán học nhằm mô tả hiện tượng từ dư của lõi thép.

Hàm số $\arctan(x)$ có đặc tính toán học tương đồng rất tốt với quá trình từ hóa thực tế của vật liệu sắt từ (Mörée & Leijon, 2023). Đặc biệt, do hàm số này liên tục và có đạo hàm tại mọi điểm, giúp giải quyết triệt để lỗi hội tụ toán học (Convergence error) trong thuật toán giải của SPICE khi mô phỏng các quá trình quá độ biến đổi nhanh. Bên cạnh đó, hằng số từ dư là thành phần đại diện cho từ tính còn lưu lại bên trong các mạch từ của stator sau khi dòng điện kích từ đã ngắt về không.

Khi đó, công thức biểu diễn từ thông cực từ phi tuyến tổng quát được xác lập như sau:

$$\Phi = \Phi_{res} + L_{af} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \arctan(K_{sat} \cdot I_f) \quad (7)$$

trong đó: Φ_{res} - hằng số từ thông dư; L_{af} - điện cảm tương hỗ giữa cuộn kích từ và cuộn phần ứng; K_{sat} - hệ số điều chỉnh mức độ bão hòa; I_f - dòng điện kích từ.

2.3. Mô hình hóa đặc tính tổn hao sắt từ

Tổn hao sắt từ P_{core} trong lõi thép máy điện về cơ bản bao gồm hai thành phần chính: tổn hao từ trễ P_h và tổn hao dòng điện xoáy P_e (Fitzgerald et al., 2003). Các thành phần tổn hao này phụ thuộc trực tiếp vào biên độ mật độ từ thông cực đại B_m và tần số từ hóa f . Dựa trên mô hình lý thuyết Steinmetz cải tiến (Xu et al., 2023), tổng công suất tiêu tán do sắt từ được xác định theo biểu thức:

$$P_{core} = P_h + P_e = k_h \cdot f^\beta \cdot B_m^\alpha + k_e \cdot f^2 \cdot B_m^2 \quad (8)$$

trong đó, k_h và k_e lần lượt là các hệ số tổn hao từ trễ và dòng điện xoáy; các chỉ số α và β là các hệ số Steinmetz đặc trưng cho đặc tính của từng loại vật liệu lõi thép ($\alpha = 1,5 \div 2,5$ và $1 < \beta < 3$). Đối với vật liệu sắt từ mềm vận hành ở tần số thấp, hệ số mũ của tần số trong thành phần từ trễ được chuẩn hóa $\beta = 1$ (Petrescu et al., 2017).

Tần số từ hóa f tỉ lệ thuận với độ lớn vận tốc góc ω (Fitzgerald et al., 2003) và để tần số từ hóa không âm bất kể chiều quay của rotor, ta lấy trị tuyệt đối vận tốc góc:

$$f = k_f \cdot |\omega| \quad (9)$$

Mật độ từ thông B_m tỉ lệ tuyến tính với từ thông Φ (giả thiết tiết diện lõi thép không đổi) và để B_m luôn dương ta lấy trị tuyệt đối từ thông:

$$B_m = k_B \cdot |\Phi| \quad (10)$$

trong đó, k_f và k_B là các hằng số phụ thuộc vào số đôi cực p và tiết diện của mạch từ. Khi đó, biểu thức (8), được viết lại thành:

$$P_{core} = (k_h \cdot k_f \cdot k_B^\alpha) \cdot |\omega| \cdot |\Phi|^\alpha + (k_e \cdot k_f^2 \cdot k_B^2) \cdot |\omega|^2 \cdot |\Phi|^2 \quad (11)$$

Độ lớn mô-men cản rotor $|M_{core}|$ tương ứng với công suất tổn hao lõi được xác định bằng:

$$|M_{core}| = \frac{P_{core}}{|\omega|} = (k_h \cdot k_f \cdot k_B^\alpha) \cdot |\Phi|^\alpha + (k_e \cdot k_f^2 \cdot k_B^2) \cdot |\omega| \cdot |\Phi|^2 \quad (12)$$

Trong môi trường SPICE, phương trình biểu diễn mô-men cản do tổn hao sắt từ (13) được thiết lập như sau:

$$M_{core} = \text{sign}(\omega) \cdot (C_h \cdot |\Phi|^\alpha + C_e \cdot |\omega| \cdot \Phi^2) \quad (13)$$

trong đó, C_h và C_e là các hằng số đã được chuẩn hóa để đại diện cho tổn hao năng lượng trên trục quay. Hàm dấu $\text{sign}(\omega)$ được tích hợp nhằm đảm bảo mô-men M_{core} luôn tác động ngược chiều với chiều quay của máy điện (NI Corporation, 2009).

3. Phương pháp thiết kế mô hình hành vi SPICE cho máy điện

3.1. Thiết kế cấu trúc linh kiện tùy chỉnh

Cấu trúc mô hình máy điện có hai phần: Điện và Cơ. Để tương thích với thuật toán giải của SPICE trong Multisim, quá trình thiết kế mô hình dựa trên nguyên lý tương đương Cơ - Điện (Ogata, 2004), với các thông số và đại lượng cơ học của trục quay được quy đổi sang các thông số và đại lượng điện tương ứng:

Vận tốc góc $\omega(\text{rad/s}) \Rightarrow$ Điện áp $V(\text{V})$

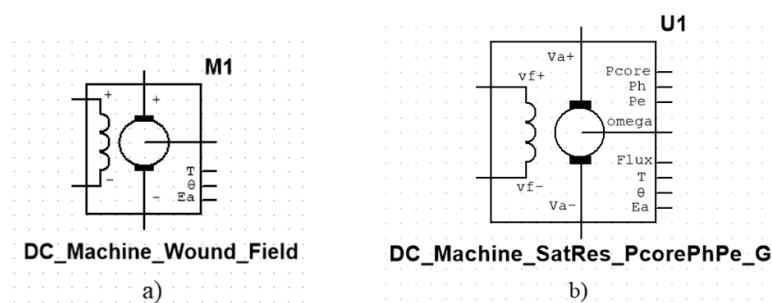
Mô-men quay $T(\text{N.m}) \Rightarrow$ Dòng điện $I(\text{A})$

Mô-men quán tính $J(\text{kg.m}^2) \Rightarrow$ Tụ điện $C(\text{F})$

Hệ số ma sát nhớt $B(\text{N.m.s/rad}) \Rightarrow$ Điện dẫn $G(\Omega^{-1})$

Mô hình máy điện DC có sẵn trong thư viện Multisim được đóng gói dưới dạng một khối mạch phụ (.SUBCKT) với giao diện có 8 chân, chỉ cho phép phân tích các truyền động cơ bản (Hình 1a). Để đáp ứng yêu cầu nghiên cứu chi tiết về đặc tính phi tuyến và tổn hao từ tính, linh kiện đã được thiết kế lại thành khối mạch phụ mở rộng với 12 chân (Hình 1b). Việc nâng cấp cấu trúc 12 chân này không làm thay đổi các quy luật động học cốt lõi của mô hình máy điện gốc, mà còn cho phép tích hợp các đặc tính mô phỏng hành vi bão hòa từ, từ dư và tổn hao lõi thép.

Hình 1. Đóng gói linh kiện máy điện DC



a) Mô hình tiêu chuẩn;

b) Mô hình mở rộng

Nguồn: Phần mềm NI Multisim 14.3

3.2. Triển khai các nguồn hành vi tùy biến

Trong môi trường SPICE, các hiện tượng như bão hòa từ, từ dư, và tổn hao lõi thép được thực hiện thông qua các nguồn hành vi tùy biến (Arbitrary Behavioral Sources), là các nguồn dòng phụ thuộc và nguồn áp phụ thuộc. Các mô hình nguồn hành vi toán học phi tuyến trong nghiên cứu này được xây dựng và cấu trúc nghiêm ngặt dựa trên việc tuân thủ các cú pháp, hàm số và thứ tự ưu tiên toán tử theo quy chuẩn của trình giải mạch chuyên dụng phần mềm Multisim (Rashid, 2025).

3.2.1. Tích hợp đặc tính bão hòa từ, hiện tượng từ dư và trích xuất chân đo ngoài

Để thể hiện mối quan hệ giữa dòng điện kích từ $I(L_f)$ và từ thông Φ , đặc tính bão hòa được nhúng vào nguồn áp hành vi Eflux_out thông qua hàm phi tuyến $\arctan()$. Đồng thời, hằng số từ dư Phi_res được cộng trực tiếp vào theo biểu thức (7). Đại lượng từ thông tính toán nội bộ này được gán trực tiếp làm điện áp đầu ra của chân Flux_out.

...

* Khai báo tham số mạch từ phi tuyến

+ Ksat=3

+ Phi_res=0.05

* Hàm từ thông phi tuyến tại nút flux_out và đưa ra chân đo Flux

Eflux_out flux_out 0 value = {Phi_res + Laf*(2/pi)*arctan(Ksat*I(Lf))}

...

3.2.2. Lập trình hành vi tổn hao sắt từ phi tuyến

Hành vi tổn hao sắt từ của lõi thép được biểu diễn bởi mô-men cản M_{core} theo công thức (13), được tích hợp trực tiếp vào phương trình động lực học của trục quay bằng cách sử dụng một nguồn dòng hành vi G_{core_loss} nút tốc độ omega xuống điểm 0V. Việc sử dụng toán tử điều kiện ba ngôi (cond ? thiết lập 1 : thiết lập 2) của SPICE cho phép xử lý tốt hàm dấu $sign(\omega)$ (NI Corporation, 2009)

...

* Khai báo tham số định luật Steinmetz cải tiến

+ Ch=0.2159 ; Hệ số tổn hao từ trễ

+ Ce=0.001039 ; Hệ số tổn hao dòng xoáy

+ alpha=1.6 ; Hệ số mũ Steinmetz

* Nguồn dòng mô phỏng mô-men cản (có tác dụng hãm trục quay omega)

$G_{core_loss} \text{ omega } 0 \text{ value} = \{ (v(\omega) > 0 ? 1 : -1) * (Ch * (abs(v(flux_out)))^\alpha + Ce * abs(v(\omega)) * (v(flux_out)^2)) \}$

...

3.2.3. Phân tách và trích xuất các công suất tổn hao ra chân đo ngoài

Để có thể trực tiếp giám sát các thành phần tổn hao theo thời gian thực mà không làm ảnh hưởng đến mạch động lực, các thành phần tổn hao trong lõi thép được trực tiếp đưa ra các chân đo vật lý: P_{core_out} , Ph_{out} , Pe_{out} . Công suất tiêu tán (W) được tính toán thông qua mối quan hệ với mô-men và tốc độ quay, các giá trị này được đưa ra các chân đo độc lập dưới dạng điện áp chuẩn hóa ($1V = 1W$).

...

* Chân P_{core_out} : Tổng công suất tổn hao sắt từ (W)

$E_{core_power} \text{ } P_{core_out} \text{ } 0 \text{ value} = \{ abs(v(\omega)) * (Ch * (abs(v(flux_out)))^\alpha + Ce * abs(v(\omega)) * (v(flux_out)^2)) \}$

* Chân Ph_{out} : công suất tổn hao từ trễ (W)

$E_{ph} \text{ } Ph_{out} \text{ } 0 \text{ value} = \{ abs(v(\omega)) * Ch * (abs(v(flux_out)))^\alpha \}$

* Chân Pe_{out} : công suất tổn hao dòng xoáy (W)

$E_{pe} \text{ } Pe_{out} \text{ } 0 \text{ value} = \{ (v(\omega)^2) * Ce * (v(flux_out)^2) \}$

...

4. Kết quả và thảo luận

Để đánh giá tính chính xác của mô hình máy điện đề xuất trong môi trường NI Multisim, chúng tôi kiểm chứng một động cơ một chiều có các thông số: Công suất trục cơ $P_{dm} = 1KW$, $U_{dm} = 220V$, $I_{dm} = 5,4$ (A); Điện áp kích từ $U_f = 110V$, dòng điện kích từ $I_{fdm} = 0,56A$, $n_{dm} = 1800$ vòng/phút; mô-men cơ $T_{dm} = 5,3$ N.m; hiệu suất $\eta = 80\%$.

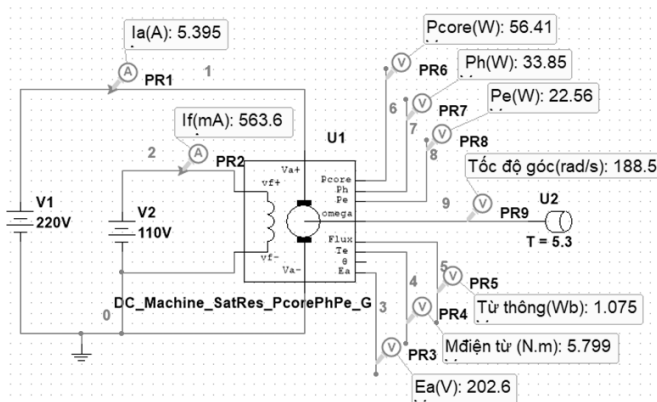
Sau khi tính toán và nhập các thông số nội bộ của động cơ vào mô hình, bổ sung các thiết kế nguồn hành vi ở mục 3 vào mô hình SPICE Netlist có sẵn và thực hiện mô phỏng động cơ DC ở chế độ tải định mức (hình 2). Kết quả mô phỏng khớp hoàn toàn với các tính toán từ các phương trình điện, cơ.

4.1. Kiểm chứng đặc tính bão hòa mạch từ và hiện tượng từ dư

- Thực hiện mô phỏng ở chế độ quét dòng kích từ để đo từ thông trên chân Flux của mô hình phi tuyến, ta được kết quả hình 3. Kết quả này hoàn toàn tương đồng với đặc tính bão hòa từ và từ dư của một máy điện thực tế như hình 4 (Fitzgerald et al, 2003). Hình ảnh cũng thể hiện tốc độ bão hòa nhanh hay chậm theo hệ số K_{sat} ứng với mức bão hòa xác định bởi L_{af} .

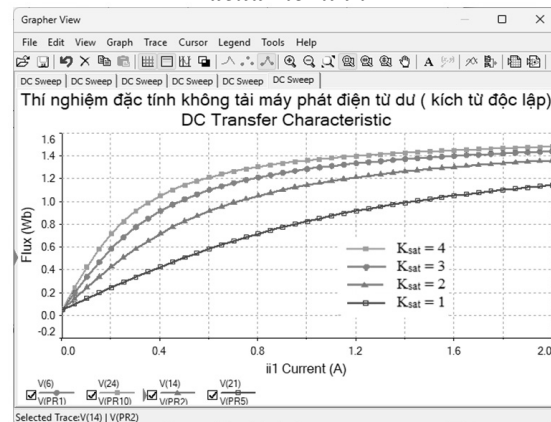
- So sánh đối chiếu ở Hình 5 cho thấy, mô hình tuyến tính không mô tả được từ dư và khiến từ thông tăng vô hạn phi thực tế ở dải dòng điện cao (đạt hơn 3Wb tại 2A). Ngược lại, mô hình đề xuất đã tái hiện rõ rệt đặc tính bão hòa từ mềm (xấp xỉ 1,5Wb tại 2A) và tích hợp chính xác lượng từ dư của lõi thép thực tế.

Hình 2. Mô phỏng tương tác động cơ DC ở chế độ tải định mức



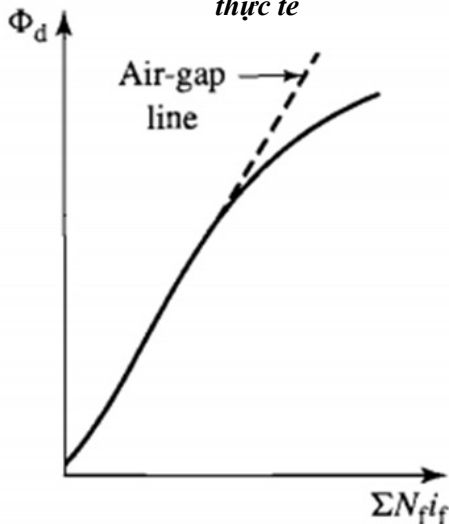
Nguồn: Phần mềm NI Multisim 14.3

Hình 3. Đặc tuyến bão hòa và từ dư của mô hình



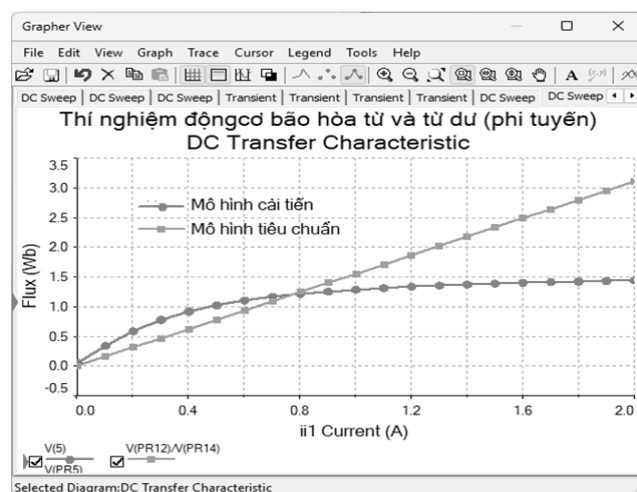
Nguồn: Phần mềm NI Multisim 14.3

Hình 4. Đặc tuyến bão hòa và từ dư thực tế



Nguồn: Fitzgerald et al. (2003)

Hình 5. So sánh đặc tính từ thông ở 2 mô hình



Nguồn: Phần mềm NI Multisim 14.3

4.2. Khảo sát quá trình tự kích từ của mô hình máy phát điện

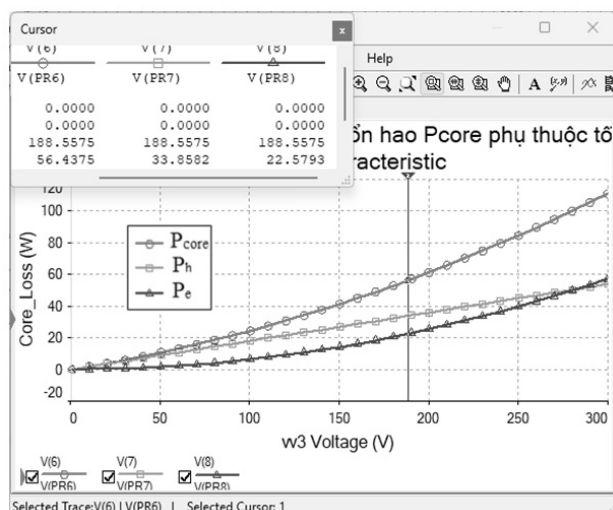
Thực hiện mô phỏng quá độ (transient) của 2 mô hình ta được kết quả như hình 6.

Mô hình cải tiến thể hiện tính vận năng cao khi giữ nguyên tập thông số nhận dạng từ chế độ động cơ vẫn mô phỏng chính xác hiện tượng tự kích từ ở chế độ máy phát. Sự tồn tại của mức từ dư 0,05Wb giúp hệ thống tự thiết lập điện áp môi 9,425V tại $t = 0$, tạo tiền đề cho quá trình tự kích lên điện áp xác lập 250,7V dưới đặc tính giới hạn bão hòa của hàm $\arctan()$. Trong khi đó, mô hình tiêu chuẩn không thể thiết lập sức điện động và điện áp ra ($E_a = 0V$, $U_a = 0V$).

4.3. Khảo sát đặc tuyến không tải trên mô hình máy phát điện kích từ độc lập

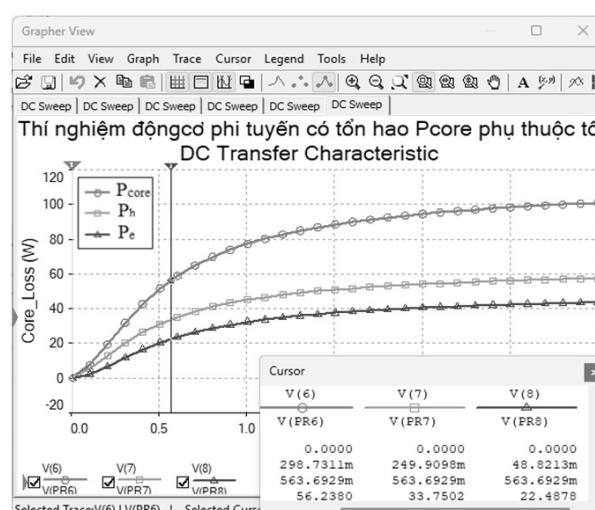
Thực hiện mô phỏng quét điện áp ra không tải theo dòng điện kích từ trên mô hình cải tiến cho kết quả như Hình 7. Đồ thị điện áp ra không tải theo dòng kích từ của mô hình cải tiến có dạng tương đồng với đặc tuyến không tải máy phát kích từ độc lập ở Hình 8 (Chapman, 2005), phản ánh chính xác bản chất vật lý của máy phát.

Hình 9. Tổn hao sắt từ theo tốc độ động cơ



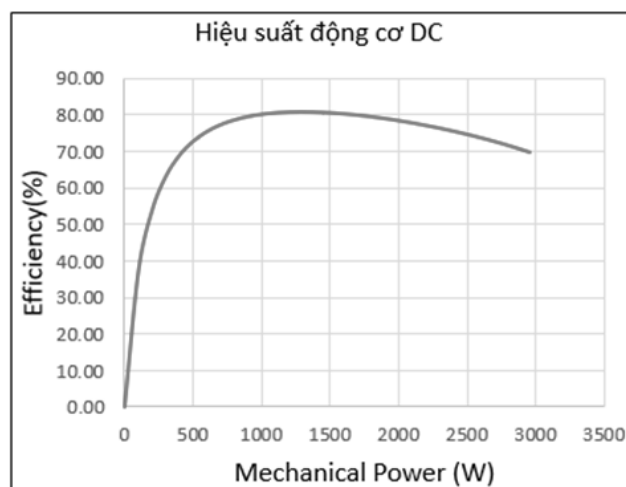
Nguồn: Phần mềm NI Multisim 14.3

Hình 10. Tổn hao sắt từ theo từ thông



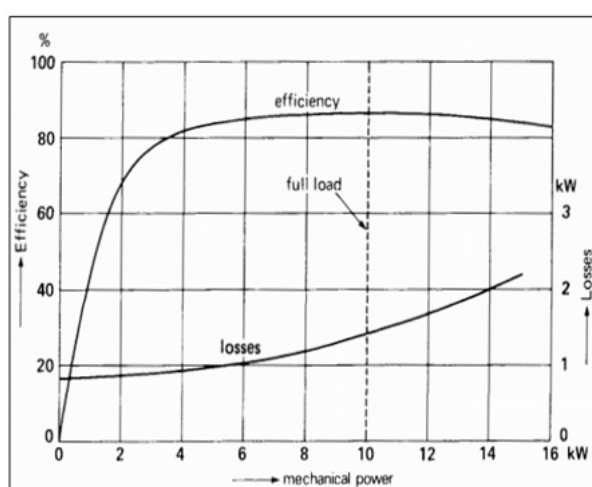
Nguồn: Phần mềm NI Multisim 14.3

Hình 11. Đặc tuyến hiệu suất của mô hình động cơ



Nguồn: Phần mềm NI Multisim 14.3

Hình 12. Đặc tuyến hiệu suất động cơ thực tế



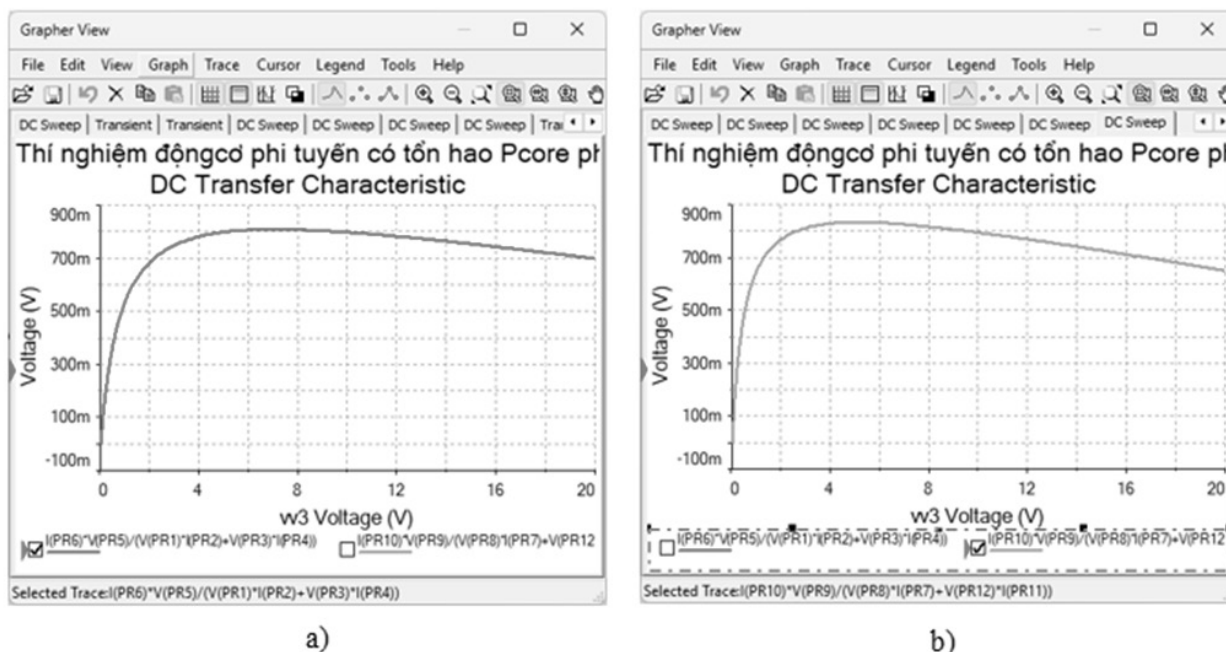
Nguồn: Wildi, (2002)

4.5. Khảo sát đặc tuyến hiệu suất của mô hình động cơ

Mô phỏng khảo sát đặc tuyến hiệu suất mô hình động cơ theo công suất tải cho kết quả như Hình 11. Đường cong hiệu suất này có dạng điển hình và tương đồng với các nghiên cứu trong các giáo trình (Wildi, 2002). Kết quả này cho thấy, mô hình phản ánh chính xác tính chất vật lý của máy điện thực tế.

- So sánh đối chiếu đặc tuyến hiệu suất theo mô-men cơ trên 2 mô hình, ta cũng thấy: Về mặt hình dáng, cả hai mô hình đều thể hiện đặc tính tương đồng do quy luật chi phối của tổn hao đồng bậc hai ở các vùng tải. Tuy nhiên, về mặt định lượng, mô hình tiêu chuẩn cho kết quả hiệu suất tại tải định mức lên tới 83,0%, cao hơn so với mức 80,0% của mô hình cải tiến. Sai lệch 3% hiệu suất này là một khiếm khuyết của mô hình tiêu chuẩn, xuất phát từ việc bỏ qua hoàn toàn các thành phần tổn hao sắt từ. Việc đánh giá thấp tổng tổn hao (17% so với 20%) sẽ dẫn đến những sai lầm nghiêm trọng trong bài toán thiết kế hệ thống tản nhiệt và dự báo tuổi thọ cách điện của máy điện.

Hình 13. So sánh đặc tuyến hiệu suất theo mô-men tải



a) Mô hình cải tiến;

b) Mô hình mặc định

Nguồn: Phần mềm NI Multisim 14.3

5. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng, triển khai và kiểm chứng thành công mô hình cải tiến của máy điện DC tích hợp các hiện tượng bão hòa mạch từ, từ dư và phân tách tổn hao sắt từ. Thông qua các khảo sát toàn diện từ chế độ máy phát đến động cơ, các kết luận quan trọng được rút ra như sau:

- Mô hình đề xuất đã tái hiện một cách chính xác các hành vi phi tuyến của lõi thép là hiện tượng bão hòa từ và từ dư. Đây là yếu tố quyết định giúp mô hình mô phỏng thành công quá trình tự kích từ trên máy điện kích từ song song và nối tiếp - một hiện tượng mà mô hình tuyến tính lý tưởng không mô phỏng được.
- Mô hình đề xuất đã bóc tách và định lượng tường minh các thành phần tổn hao lõi phụ thuộc vào tốc độ quay và từ thông. Hệ quả là đặc tuyến hiệu suất theo mô-men tải (hay công suất cơ) của động cơ được xác định chính xác với hiệu suất định mức đạt 80,0% tại mô-men định mức 5,3 N.m.
- Mô hình được đề xuất không chỉ đạt độ chính xác cao về mặt định lượng mà còn phản ánh sâu sắc bản chất tương tác Cơ - Điện của hệ thống. Bên cạnh tiềm năng ứng dụng trong tối ưu hóa tản nhiệt và thiết kế truyền động hiệu suất cao, mô hình còn đóng vai trò như một công cụ giảng dạy trực quan và tin cậy trong các trường đại học kỹ thuật.

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

Bose B. K. (2006). Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. Academic Press, San Diego, California 92101-4495, USA. <https://uodiyala.edu.iq/uploads/PDF%20ELIBRARY%20UODIYALA/EL99/Power%20Electronics%20And%20Motor%20Drives.pdf>

Chapman S. J. (2005). Electric Machinery Fundamentals (4th Edition). McGraw-Hill, New York, USA. [https://elcom-team.com/Subjects/%D8%A2%D9%84%D8%A7%D8%AA%20%D9%83%D9%87%D8%B1%D8%A8%D8%A7%D8%A6%D9%8A%D8%A9%201/%D8%A7%D9%84%D9%83%D8%AA%D8%A8%20%D9%88%20%D8%A7%D9%84%D8%AD%D9%84%D9%88%D9%84/machine-book-\(5th-ed\)-compressed.pdf](https://elcom-team.com/Subjects/%D8%A2%D9%84%D8%A7%D8%AA%20%D9%83%D9%87%D8%B1%D8%A8%D8%A7%D8%A6%D9%8A%D8%A9%201/%D8%A7%D9%84%D9%83%D8%AA%D8%A8%20%D9%88%20%D8%A7%D9%84%D8%AD%D9%84%D9%88%D9%84/machine-book-(5th-ed)-compressed.pdf)

- Fitzgerald, A. E., Kingsley Jr., C., & Umans, S. D. (2003). *Electric Machinery* (6th Edition). McGraw-Hill, New York. <https://uodiyala.edu.iq/uploads/PDF%20ELIBRARY%20UODIYALA/EL99/Electric%20Machinery.pdf>
- Mörée, G., & Leijon, M. (2023). Review of Hysteresis Models for Magnetic Materials. *Energies*, 16(9), 3908. <https://doi.org/10.3390/en16093908>
- NI Corporation. (2009). *NI Multisim User Manual*. National Instruments Corporation. Austin, Texas 78759-3504, USA. <https://download.ni.com/support/manuals/374483a.pdf>
- Ogata K. (2004). *System Dynamics* (4th Edition). Harlow, England: Pearson Education Limited. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781292038490_A24582535/preview-9781292038490_A24582535.pdf
- Petrescu, L., Ioniță, V., Cazacu, E., & Petrescu, C. (2017). Steinmetz' parameters fitting procedure for the power losses estimation in soft magnetic materials. 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), 208-213. <https://doi.org/10.1109/OPTIM.2017.7974972>
- Rashid M. H. (2025). *SPICE and LTspice for Power Electronics and Electric Power* (4th Edition). Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Vidlak, M. D., Gorel, L., Vavruš, V., & Makys, P. (2021). Sensorless speed control of brushed DC machine. 2021 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE), 169-176.
- Wildi T. (2002). *Electrical Machine, Drives, and Power Systems* (5th Edition). Prentice Hall.
- Xu, K., Guo, Y., Lei, G., & Zhu, J. (2023). Estimation of Iron Loss in Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Particle Swarm Optimization and a Recurrent Neural Network. *Magnetism*, 3(4), 327-342. <https://doi.org/10.3390/magnetism3040025>