

SO SÁNH HIỆU QUẢ NĂNG LƯỢNG VÀ TỔN HAO CỦA ĐỘNG CƠ ĐIỆN ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU LỖI TRONG TRÊN CHU TRÌNH LÁI XE Ô TÔ US06 KHI SỬ DỤNG CÁC CHIẾN LƯỢC ĐIỀU KHIỂN KHÁC NHAU TRONG PHẦN MỀM ANSYS MOTOR-CAD

COMPARISON OF ENERGY EFFICIENCY AND LOSSES OF AN INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR ON THE US06 AUTOMOTIVE DRIVING CYCLE USING DIFFERENT CONTROL STRATEGIES IN ANSYS MOTOR-CAD SOFTWARE

Nguyễn Thành Bắc^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huinh5804.2025.390>

TÓM TẮT

Sự phát triển của xe điện (EV) đòi hỏi hiệu suất năng lượng cao trên toàn bộ dải hoạt động, đặc biệt là trong các chu trình lái thực tế. Chiến lược điều khiển động cơ điện đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa hiệu suất này. Nghiên cứu này tập trung vào việc so sánh hiệu quả năng lượng và tổn hao tổng cộng của một động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu lõi trong (IPMSM) cụ thể khi vận hành theo chu trình lái US06, sử dụng hai chiến lược điều khiển phổ biến: Mô-men xoắn cực đại trên Ampe (MTPA) và hiệu suất cực đại (Maximum Efficiency - ME). Mô hình động cơ chi tiết (dựa trên các thông số hình học, vật liệu từ và thông số xe Tesla Model 3) và các phân tích được thực hiện bằng phần mềm Ansys Motor-CAD. Mô hình Lab được xây dựng bao gồm mô hình bão hòa Saturation Model (Full Cycle) và mô hình tổn hao FEA Map (với hệ số chế tạo tổn hao sắt là 1,5) để đảm bảo độ chính xác, đồng thời giả định nhiệt độ hoạt động của cuộn dây và nam châm được duy trì ở mức 80°C. Kết quả mô phỏng chu trình lái US06 cho thấy chiến lược ME mang lại hiệu quả năng lượng tổng thể tốt hơn một chút so với MTPA, thể hiện qua mức tiêu thụ năng lượng đầu vào thấp hơn (2814,42Wh so với 2817,20Wh) và tổng tổn hao thấp hơn (151,26Wh so với 154,80Wh), dẫn đến hiệu suất trung bình cao hơn (96,30% so với 96,22%). Phân tích chi tiết các thành phần tổn hao chỉ ra rằng ME đạt được lợi thế này chủ yếu nhờ việc giảm đáng kể tổn hao sắt và tổn hao nam châm, mặc dù phải chấp nhận một sự gia tăng nhỏ trong tổn hao đồng. Nghiên cứu này cung cấp cơ sở cho việc lựa chọn chiến lược ME để tối ưu hóa hiệu quả năng lượng cho các phương tiện điện hoạt động trong các điều kiện tương tự chu trình US06.

Từ khóa: Ansys Motor-CAD, động cơ điện, ô tô điện, động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (BPM/IPM), phân tích điện từ, phân tích nhiệt, phần tử hữu hạn (FEA), bản đồ hiệu suất, chu trình lái, quản lý nhiệt.

ABSTRACT

The development of electric vehicles (EVs) necessitates high energy efficiency across the entire operating range, particularly during realistic driving cycles. The electric motor control strategy plays a crucial role in optimizing this performance. This study focuses on comparing the energy efficiency and total losses of a specific Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) when operating on the US06 driving cycle, utilizing two common control strategies: Maximum Torque Per Ampere (MTPA) and Maximum Efficiency (ME). A detailed motor model (based on geometric parameters, materials from, and Tesla Model 3 vehicle parameters) and subsequent analyses were performed using Ansys Motor-CAD software. The Lab model was constructed incorporating a Saturation Model (Full Cycle) and an FEA Map loss model (with an iron loss manufacturing factor of 1.5) to ensure accuracy, while assuming the operating temperature of the windings and magnets was maintained at 80°C. Simulation results for the US06 driving cycle indicate that the ME strategy offers slightly better overall energy efficiency compared to MTPA, demonstrated by lower input energy consumption (2814.42Wh vs. 2817.20Wh) and lower total losses (151.26Wh vs. 154.80Wh), leading to a marginally higher average efficiency (96.30% vs. 96.22%). A detailed analysis of loss components reveals that ME achieves this advantage primarily by

significantly reducing iron and magnet losses, despite accepting a slight increase in copper losses. This research provides a basis for selecting the ME strategy to optimize energy efficiency for electric vehicles operating under conditions similar to the US06 driving cycle.

Keywords: Ansys Motor-CAD, Electric Motor, Electric Vehicle (EV), Brushless Permanent Magnet Motor (BPM) / Interior Permanent Magnet Motor (IPM), Electromagnetic Analysis, Thermal Analysis, Finite Element Analysis (FEA), Efficiency Map, Driving Cycle, Thermal Management.

¹Trường Cơ khí - Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: bacnt@hauai.edu.vn

Ngày nhận bài: 16/6/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 07/8/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/11/2025

1. GIỚI THIỆU

Xe điện (EV) đang ngày càng trở nên phổ biến như một giải pháp giao thông bền vững. Trái tim của EV là hệ thống truyền động điện, trong đó động cơ điện đóng vai trò trung tâm. Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu lõi trong (IPMSM) được ưa chuộng trong các ứng dụng EV nhờ mật độ công suất cao, hiệu suất tốt và dải tốc độ hoạt động rộng [3]. Tuy nhiên, hiệu suất tổng thể của hệ thống không chỉ phụ thuộc vào thiết kế động cơ mà còn chịu ảnh hưởng lớn từ chiến lược điều khiển được áp dụng.

Trong quá trình vận hành, đặc biệt là khi đi theo các chu trình lái tiêu chuẩn hoặc thực tế, động cơ hoạt động ở nhiều điểm mô-men xoắn và tốc độ khác nhau. Hai chiến lược điều khiển cơ bản thường được sử dụng là mô-men xoắn cực đại trên Ampe (MTPA) và Hiệu suất cực đại (Maximum Efficiency - ME) [7]. MTPA nhằm mục đích tối thiểu hóa dòng điện stator cho một mô-men xoắn yêu cầu, thường dẫn đến giảm tổn hao đồng. Trong khi đó, chiến lược ME cố gắng tối thiểu hóa tổng tổn hao (bao gồm tổn hao đồng, tổn hao sắt, tổn hao nam châm,...) tại mỗi điểm hoạt động để đạt hiệu suất tức thời cao nhất.

Việc lựa chọn chiến lược điều khiển nào hiệu quả hơn phụ thuộc nhiều vào đặc điểm của chu trình lái và mục tiêu tối ưu hóa. Chu trình lái US06 là một chu trình kiểm tra khắc nghiệt, đặc trưng bởi tốc độ cao và các giai đoạn tăng/giảm tốc đột ngột, mô phỏng điều kiện lái xe trên đường cao tốc và đô thị [1]. Đánh giá hiệu suất của động cơ dưới các chiến lược điều khiển khác nhau trên chu trình này là rất quan trọng.

Nghiên cứu này đặt mục tiêu so sánh hiệu quả năng lượng và tổn hao tổng cộng của một động cơ IPMSM cụ thể khi vận hành theo chu trình lái US06, sử dụng hai chiến lược điều khiển MTPA và ME. Công cụ mô phỏng Ansys Motor-CAD, đặc biệt là module Lab, được sử dụng để xây dựng mô hình động cơ, mô phỏng chu trình lái và phân tích kết quả.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Động cơ IPM có nam châm vĩnh cửu được gắn chìm vào bên trong các rãnh của rotor sắt từ. Cấu trúc này tạo ra sự không đối xứng về từ trở giữa trục dọc (d-axis, trục có từ thông nam châm) và trục ngang (q-axis, trục vuông góc với trục d). Sự khác biệt về từ trở này ($L_q > L_d$) cho phép động cơ IPM tạo ra thêm một thành phần **mô-men từ trở (reluctance torque)** bên cạnh **mô-men tương tác từ (mutual torque)** do tương tác giữa từ thông nam châm và dòng điện stator.

Tổng mô-men điện từ (T_e) của động cơ IPM có thể được biểu diễn như sau [2, 4, 6]:

$$T_e = \frac{3}{2} p [\lambda_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (1)$$

Trong đó: p là số cặp cực từ; λ_{pm} là từ thông liên kết cực đại do nam châm vĩnh cửu tạo ra trên cuộn dây stator; i_d, i_q là thành phần dòng điện stator trên trục d và trục q (trong hệ tọa độ quay đồng bộ với rotor); L_d, L_q là điện cảm dọc trục và ngang trục của stator.

Hiệu quả năng lượng của động cơ được quyết định bởi các dạng tổn hao xảy ra trong quá trình hoạt động. Các tổn hao chính trong động cơ IPM bao gồm:

Tổn hao đồng (P_{cu}): Là tổn hao do điện trở của cuộn dây stator khi có dòng điện chạy qua [2, 4, 6].

$$P_{cu} = \frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2) \quad (2)$$

Trong đó: R_s là điện trở một pha của cuộn dây stator; Hệ số 3/2 xuất hiện do việc chuyển đổi từ hệ ba pha sang hệ tọa độ d-q.

Tổn hao sắt (P_{fe}): Bao gồm tổn hao do dòng điện xoáy (eddy current loss) và tổn hao từ trễ (hysteresis loss) trong lõi sắt từ của stator và rotor do sự biến thiên của từ trường. Tổn hao sắt phụ thuộc vào tần số điện ($f_e = p \cdot \omega_m / (2\pi)$) và biên độ của mật độ từ thông [2, 4, 6].

$$P_{fe} = P_{hyst} + P_{eddy} = k_h f_e B_m^x + k_e f_e^2 B_m^2 t_l^2 \quad (3)$$

Trong đó: k_n, k_e là các hằng số từ trễ và dòng xoáy; B_m là biên độ mật độ từ thông đỉnh; x là số mũ Steinmetz (thường từ 1,6 đến 2,5); t_l là độ dày của lá thép.

Tổn hao cơ khí (P_{mech}): Bao gồm tổn thất do ma sát ở ổ bi và tổn thất do sức cản của không khí (windage loss) khi rotor quay [2, 4, 6].

$$P_{mech} = k_f \omega_m + k_w \omega_m^y \quad (4)$$

Trong đó: k_f là hệ số ma sát; k_w là hệ số cản không khí; y là số mũ, thường từ 2 đến 3.

Tổng tổn hao động cơ (P_{loss}) [2, 4, 6]:

$$P_{loss} = P_{cu} + P_{fe} + P_{mech} (+P_{stray}) \quad (5)$$

Hiệu suất động cơ (η_m) [2, 4, 6]:

$$\eta_m = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = \frac{T_e \omega_m}{T_e \omega_m + P_{loss}} \quad (6)$$

Chu trình lái US06 (còn gọi là SFTP US06 hoặc "Supplemental Federal Test Procedure") được thiết kế để mô phỏng điều kiện lái xe ở tốc độ cao, gia tốc lớn và các hành vi lái xe "aggressive" hơn so với chu trình FTP75.

Yêu cầu lực kéo và công suất trên chu trình US06

Để phân tích, chúng ta cần xác định yêu cầu lực kéo và công suất tại bánh xe tại mỗi thời điểm của chu trình US06, dựa trên đồ thị tốc độ $V(t)$ của chu trình và các thông số của xe (khối lượng M , hệ số cản lăn f_{rr} , diện tích cản chính diện A_f , hệ số cản khí động học C_d).

Lực kéo tại bánh xe [4, 6]:

$$F_{wh}(t) = f_{rr} Mg + \frac{1}{2} \rho A_f C_d V(t)^2 + \delta M \frac{dV(t)}{dt} \quad (7)$$

Công suất tại bánh xe [4, 6]:

$$P_{wh}(t) = F_{wh}(t) \cdot V(t) \quad (8)$$

Khi $\frac{dV(t)}{dt} < 0$ (giảm tốc), $F_{wh}(t)$ có thể âm, đại diện cho lực phanh. Phần năng lượng này có thể được thu hồi thông qua phanh tái sinh.

Xác định điểm làm việc của động cơ

Từ yêu cầu tại bánh xe, chúng ta cần quy đổi về yêu cầu tại trục động cơ:

Mô-men xoắn yêu cầu tại trục động cơ [4, 6]:

$$T_e(t) = \frac{F_{wh}(t) \cdot r_w}{i_{total} \cdot \eta_{trans}} \quad (\text{khi kéo}) \quad (9)$$

$$T_e(t) = \frac{F_{wh}(t) \cdot r_w \cdot \eta_{trans}}{i_{total}} \quad (\text{khi phanh tái sinh}) \quad (10)$$

Tốc độ góc của động cơ [4, 6]:

$$\omega_m(t) = \frac{V(t) \cdot i_{total}}{r_w} \quad (11)$$

Trong đó: r_w là bán kính bánh xe; i_{total} là tổng tỉ số truyền từ động cơ đến bánh xe; η_{trans} là hiệu suất của hệ thống truyền lực.

Tại mỗi thời điểm t của chu trình US06, chúng ta có một cặp $(T_e(t), \omega_m(t))$ là điểm làm việc của động cơ.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Mô hình động cơ

Đối tượng nghiên cứu là một động cơ IPMSM được mô hình hóa trong Ansys Motor-CAD, dựa trên các thông số hình học, vật liệu và cấu hình cuộn dây. Các thông số chính được thể hiện trên bảng 1, 2 và 3 và hình 1 ÷ 3.

Bảng 1. Các thông số lắp ráp stato và rôto của động cơ

Thông số	Giá trị
Công suất danh định	200 (kW)
Kiểu động cơ	Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu lõi trong
Phương pháp làm mát	Làm mát bằng dầu
Tốc độ tối đa	15000 (vòng/phút)
Số rãnh stato	48
Đường kính ngoài lá thép stator	198 (mm)
Đường kính trong lá thép stator	142,54 (mm)
Số cực	8
Khe hở không khí	1 (mm)
Đường kính rotor	140,54 (mm)
Đường kính trục rotor	46,91 (mm)
Đường kính đầu trục phía trước	20 (mm)
Đường kính đầu trục phía sau	20 (mm)
Chiều dài động cơ điện	260 (mm)
Chiều dài lá thép Stator	150 (mm)
Chiều dài nam châm	152 (mm)
Chiều dài lá thép Rotor	152 (mm)

Bảng 2. Thông số cuộn dây

Thông số	Giá trị
Kiểu quấn dây	Wave
Kiểu bố trí dây	Kiểu kẹp tóc (hairpin)
Số pha	3
Bước (Throw)	6
Số lớp quấn dây	6
Số mạch nhánh song song	2
Kiểu chia lớp	Overlapping (Chồng lấn)
Mô hình nêm	Có nêm

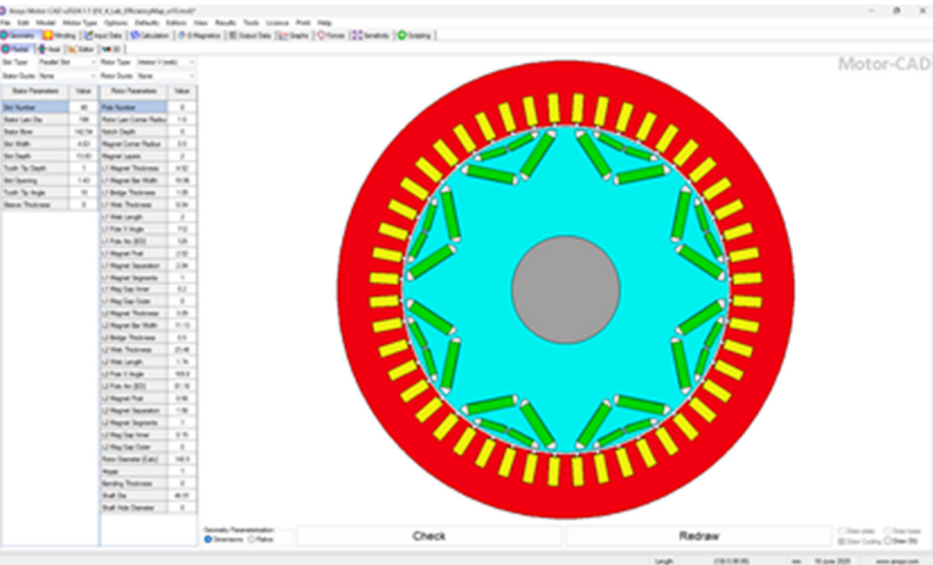
Bảng 3. Thông số vật liệu

Thành phần	Vật liệu
Lá thép stator	N018-1160
Cuộn dây phần ứng	Đồng (Nguyên chất)

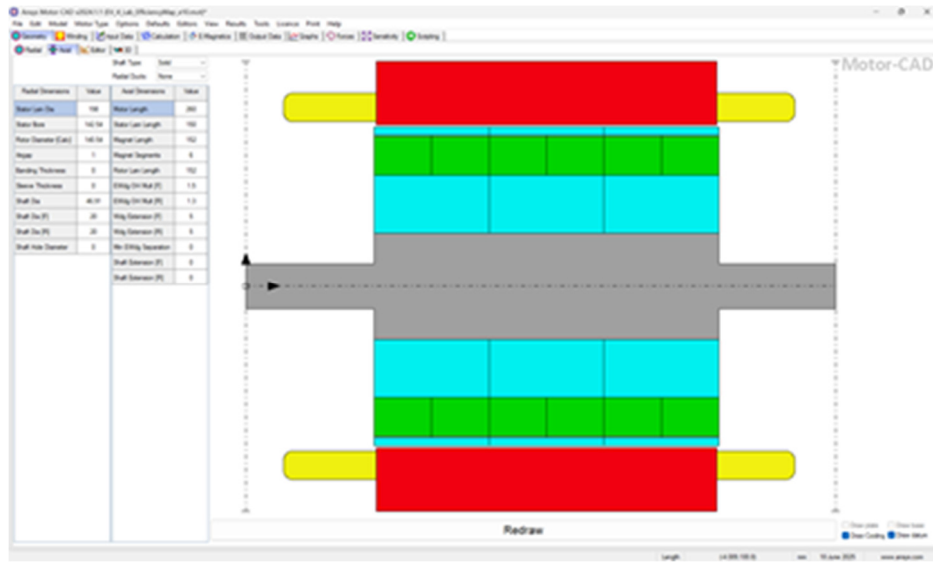
Lá thép rotor	N018-1160
Nam châm (Magnet)	N42EH
Trục rotor	Stahl 37

3.2. Xây dựng mô hình

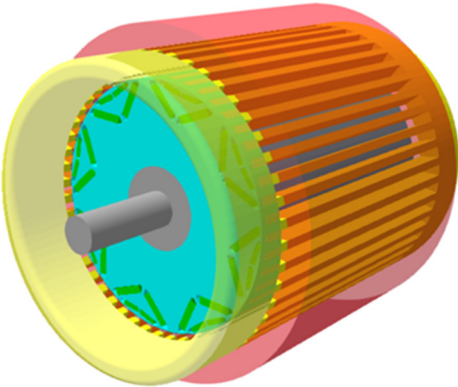
Để mô phỏng hiệu suất trên toàn bộ dải hoạt động và chu trình lái một cách hiệu quả, module Lab của Motor-CAD được sử dụng. Mô hình Lab được xây dựng với các cấu hình sau để đảm bảo độ chính xác, đặc biệt là về tổn hao:



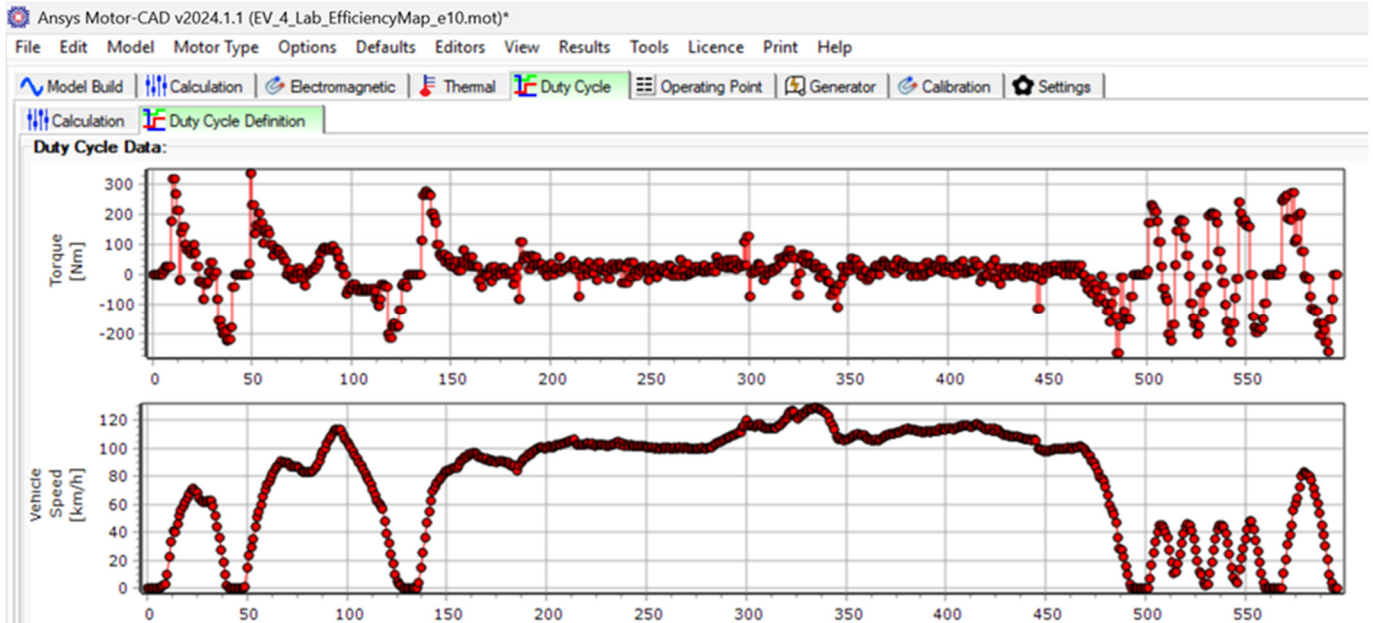
Hình 1. Mô hình hình học theo hướng hướng kính của động cơ



Hình 2. Mô hình hình học theo hướng hướng trục của động cơ



Hình 3. Mô hình 3D của động cơ



Hình 4. Chu trình lái xe ô tô US06

3.4. Chiến lược điều khiển

Trong tab "Calculation" của module Lab, hai chiến lược điều khiển được cấu hình và mô phỏng riêng biệt cho chu trình US06:

- **Maximum Torque/Amp (MTPA):** Tối ưu hóa dòng điện và góc pha để đạt mô-men xoắn yêu cầu với dòng điện biên độ thấp nhất.

- **Maximum Efficiency (ME):** Tối ưu hóa dòng điện và góc pha để đạt mô-men xoắn yêu cầu với tổng tổn hao thấp nhất tại điểm làm việc đó.

3.5. Thiết lập mô phỏng và phân tích

Mô phỏng chu trình lái được thực hiện trong module Lab (Duty Cycle -> Calculation). Tùy chọn "Thermal Transient Coupling" được đặt là "No Coupling" để tập trung so sánh hiệu quả điện từ của hai chiến lược ở nhiệt độ hoạt động giả định không đổi (được định nghĩa trong tab Calculation: nhiệt độ cuộn dây và nam châm là 80°C).

Hai mô phỏng riêng biệt được chạy:

- Mô phỏng US06 với chiến lược điều khiển MTPA.
- Mô phỏng US06 với chiến lược điều khiển ME.

Kết quả từ mỗi mô phỏng được phân tích thông qua cửa sổ "Lab Results Viewer", tập trung vào các chỉ số sau:

- **Năng lượng đầu vào tổng (Electrical Input Energy):** Tổng năng lượng điện tiêu thụ trong suốt chu trình (Wh).

- **Tổng tổn hao (Total Loss):** Tổng năng lượng bị tổn hao trong chu trình (Wh). Motor-CAD cũng cung cấp chi tiết tổn hao đồng (Copper Loss), tổn hao sắt (Iron Loss),

tổn hao nam châm (Magnet Loss), và tổn hao cơ khí (Mechanical Loss).

- **Hiệu suất trung bình (Average Efficiency):** Tỷ lệ giữa năng lượng cơ đầu ra và năng lượng điện đầu vào trong suốt chu trình (%).

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Sau khi thực hiện mô phỏng chu trình lái US06 cho cả hai chiến lược điều khiển MTPA và ME bằng phần mềm Ansys Motor-CAD, các kết quả chính về năng lượng và tổn hao được thu thập và trình bày chi tiết trong bảng 5. Các mô phỏng này được thực hiện dựa trên mô hình động cơ IPMSM đã được xây dựng, bao gồm các mô hình bão hòa Full Cycle và bản đồ tổn hao FEA Map, đồng thời giả định nhiệt độ hoạt động của cuộn dây và nam châm được duy trì ở mức 80°C.

Bảng 5. So sánh hiệu suất năng lượng và tổn hao trên chu trình US06

Chỉ số	Chiến lược MTPA	Chiến lược ME	Đơn vị
Năng lượng đầu vào tổng	2817,20	2814,42	Wh
Tổng tổn hao	154,80	151,26	Wh
- Tổn hao đồng	67,00	69,19	Wh
- Tổn hao sắt	77,21	71,61	Wh
- Tổn hao nam châm	0,42	0,29	Wh
- Tổn hao cơ khí	10,17	10,17	Wh
Hiệu suất trung bình	96,22	96,30	%
Tỷ lệ hoạt động chế độ động cơ	67,02	67,02	%
Tỷ lệ hoạt động chế độ máy phát	32,98	32,98	%

Dữ liệu mô phỏng trong bảng 5 cung cấp cái nhìn chi tiết về hiệu quả của hai chiến lược điều khiển trên chu trình US06:

- **Hiệu quả năng lượng tổng thể:** Chiến lược ME cho thấy một chút ưu thế về hiệu quả năng lượng so với MTPA. Năng lượng đầu vào tổng cộng của ME (2814,42Wh) thấp hơn một chút so với MTPA (2817,20Wh). Điều này dẫn đến hiệu suất trung bình của ME (96,30%) nhỉnh hơn không đáng kể so với MTPA (96,22%). Mặc dù sự chênh lệch về hiệu suất tổng thể không lớn, nhưng nó cho thấy tiềm năng tối ưu hóa của chiến lược ME.

- **Tổng tổn hao:** Tổng năng lượng tổn hao trong suốt chu trình của chiến lược ME (151,26Wh) thấp hơn so với chiến lược MTPA (154,80Wh), cụ thể là giảm được khoảng 3,54Wh. Đây là yếu tố chính đóng góp vào sự cải thiện nhỏ về hiệu suất của ME.

- **Phân tích thành phần tổn hao:**

+ **Tổn hao Đồng:** Một kết quả thú vị là tổn hao đồng của chiến lược ME (69,19Wh) lại cao hơn so với MTPA (67,00Wh). Điều này cho thấy rằng để đạt được tổng tổn hao thấp nhất, chiến lược ME có thể chấp nhận một mức dòng điện (và do đó là tổn hao đồng) cao hơn một chút ở một số điểm vận hành so với MTPA. Sự đánh đổi này được thực hiện để giảm thiểu các thành phần tổn hao khác, đặc biệt là tổn hao sắt.

+ **Tổn hao Sắt:** Đây là thành phần mà chiến lược ME thể hiện sự vượt trội rõ ràng. Tổn hao sắt của ME (71,61Wh) thấp hơn đáng kể so với MTPA (77,21Wh), giảm được 5,6Wh. Chu trình US06 với các đặc điểm tốc độ cao và thay đổi tải liên tục làm cho tổn hao sắt trở thành một yếu tố quan trọng. Chiến lược ME, bằng cách tối ưu hóa dòng điện và góc pha để giảm tổng tổn hao, đã thành công trong việc giảm thiểu tổn hao sắt hiệu quả hơn so với MTPA, vốn chỉ tập trung vào việc giảm biên độ dòng điện.

+ **Tổn hao nam châm:** Tổn hao nam châm của ME (0,29Wh) cũng thấp hơn so với MTPA (0,42 Wh), cho thấy ME cũng có ảnh hưởng tích cực đến việc giảm tổn thất do dòng xoáy trong nam châm.

+ **Tổn hao cơ khí:** Tổn hao cơ khí là như nhau (10,17Wh) cho cả hai chiến lược, điều này là hợp lý vì tổn hao cơ khí chủ yếu phụ thuộc vào tốc độ động cơ và các yếu tố cơ học của ổ bi, mà chu trình tốc độ là giống nhau cho cả hai trường hợp.

- **Tỷ lệ hoạt động chế độ động cơ/máy phát:** Cả hai chiến lược đều có cùng tỷ lệ hoạt động ở chế độ động cơ (67,02%) và chế độ máy phát (32,98%) trên chu trình

US06. Điều này cho thấy chiến lược điều khiển không làm thay đổi cách động cơ đáp ứng với yêu cầu năng lượng của chu trình lái (khi nào cần cung cấp năng lượng, khi nào tái tạo năng lượng), mà chỉ thay đổi cách tối ưu hóa dòng điện và góc pha để đạt được các mục tiêu cụ thể (MTPA vs. ME) tại mỗi điểm làm việc đó.

Tóm lại, mặc dù sự cải thiện về hiệu suất tổng thể của chiến lược ME so với MTPA trên chu trình US06 trong trường hợp này là khiêm tốn (khoảng 0,08%), phân tích chi tiết các thành phần tổn hao cho thấy ME đạt được điều này chủ yếu bằng cách giảm đáng kể tổn hao sắt và tổn hao nam châm, ngay cả khi phải chấp nhận một sự gia tăng nhỏ trong tổn hao đồng. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc xem xét tất cả các thành phần tổn hao khi lựa chọn chiến lược điều khiển, đặc biệt đối với các chu trình lái phức tạp.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã sử dụng phần mềm Ansys Motor-CAD để thực hiện so sánh định lượng hiệu quả năng lượng và các thành phần tổn hao của một động cơ IPMSM cụ thể khi vận hành trên chu trình lái US06 dưới hai chiến lược điều khiển khác nhau: Mô-men xoắn Cực đại trên Ampe (MTPA) và Hiệu suất Cực đại (ME). Mô hình động cơ chi tiết, bao gồm mô hình bão hòa Full Cycle và bản đồ tổn hao FEA Map (với hệ số chế tạo tổn hao sắt là 1,5), đã được xây dựng và mô phỏng trong module Lab, với giả định nhiệt độ hoạt động của cuộn dây và nam châm được duy trì ở mức 80°C.

Kết quả mô phỏng cho thấy chiến lược Hiệu suất Cực đại (ME) mang lại hiệu quả năng lượng tổng thể tốt hơn một chút so với chiến lược MTPA khi vận hành trên chu trình lái US06. Cụ thể, chiến lược ME giúp giảm tổng năng lượng tiêu thụ (2814,42Wh so với 2817,20Wh) và tổng tổn hao (151,26Wh so với 154,80Wh), dẫn đến hiệu suất trung bình cao hơn một cách khiêm tốn (96,30% so với 96,22%).

Phân tích chi tiết các thành phần tổn hao đã làm rõ cơ chế đằng sau sự cải thiện này. Mặc dù chiến lược ME dẫn đến tổn hao đồng cao hơn một chút so với MTPA, lợi thế chính của nó đến từ việc giảm đáng kể tổn hao sắt và tổn hao nam châm. Điều này đặc biệt quan trọng trong chu trình US06, vốn có nhiều giai đoạn hoạt động ở tốc độ cao và tải trọng thay đổi liên tục, nơi tổn hao sắt trở thành một yếu tố đáng kể. Khả năng của chiến lược ME trong việc tối ưu hóa dòng điện và góc pha để cân bằng và giảm thiểu tổng thể các loại tổn hao đã chứng tỏ sự ưu việt hơn so với chiến lược MTPA, vốn chủ yếu tập trung vào việc giảm thiểu dòng điện stator.

Nghiên cứu này cung cấp bằng chứng dựa trên mô phỏng cho thấy việc lựa chọn chiến lược điều khiển ME có thể là một hướng đi phù hợp để tối đa hóa hiệu quả năng lượng cho các phương tiện điện hoạt động trong các điều kiện vận hành phức tạp và đòi hỏi cao tương tự như chu trình US06. Mặc dù sự cải thiện về hiệu suất tổng thể có thể không quá lớn trong trường hợp cụ thể này, việc hiểu rõ cách các chiến lược khác nhau ảnh hưởng đến từng thành phần tổn hao là rất quan trọng cho việc thiết kế và tối ưu hóa hệ thống truyền động điện. Các nghiên cứu sâu hơn, bao gồm phân tích ảnh hưởng tương hỗ của nhiệt độ và xác thực thực nghiệm, sẽ cần thiết để khẳng định hoàn toàn các kết quả này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. United States Environmental Protection Agency (EPA), *Dynamometer Drive Schedules*, [epa.gov](https://www.epa.gov), truy cập ngày 18-06-2025, tại trang web <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>.
- [2]. Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Stefano Longo, Kambiz Ebrahimi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles (Third Edition)*. Taylor & Francis Group, 2018.
- [3]. Gianmario Pellegrino, Alfredo Vagati, Barbara Boazzo, Paolo Guglielmi, "Comparison of Induction and PM Synchronous Motor Drives for EV Application Including Design Examples," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2012.
- [4]. Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova, *Design of rotating electrical machines - Second Edition*. Wiley, 2014.
- [5]. Chris Johnson, *EV range on Australian highways: Why Model 3 beats all other electric cars on efficiency*, thedriven.io, truy cập ngày 17/06-2025, tại trang web <https://thedriven.io/2023/09/07/ev-range-on-australian-highways-why-model-3-beats-all-other-electric-cars-on-efficiency/>.

[6]. Paul Krause, Oleg Wasynczuk, Scott Sudhoff, Steven Pekarek, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. Wiley, 2013.

[7]. Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada, Yoji Takeda, "Wide-Speed Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with High-Performance Current Regulator", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1994.

[8]. Tesla, *Tesla Model 3 2024 Owners_Manual-China-Software version 2025.2.12*, Tesla, 2025.

AUTHOR INFORMATION

Nguyen Thanh Bac

School of Mechanical and Automotive Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam