

NGHIÊN CỨU TỐI ƯU HÓA CHIẾN LƯỢC ĐIỀU KHIỂN
HỆ THỐNG TRUYỀN LỰC SONG SONG Ô TÔ HYBRID
RESEARCH FOR OPTIMIZING CONTROL STRATEGY OF A PARALLEL
HYBRID DRIVETRAIN IN VEHICLE

NGUYỄN SĨ ĐÌNH, TRẦN THÀNH LAM*, LÃ QUỐC TIỆP

Khoa Động lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự

*Email liên hệ: lam.tranthanh@lqdtu.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo trình bày khái quát phân loại hệ thống truyền lực Hybrid trên ô tô hiện nay. Đồng thời nghiên cứu cơ sở lý thuyết hệ động lực Hybrid, mô hình bình điện, sơ lược về lý thuyết tối ưu. Áp dụng phần mềm Matlab - Simulink tiến hành mô phỏng, so sánh và đánh giá các kết quả nghiên cứu, tương ứng với các chu trình thử tiêu chuẩn, NEDC, FTP - 75, FTP_HIGHWAY và 15_MODE. Các kết quả chính của nghiên cứu là lượng tiêu hao nhiên liệu trên một chu trình, trạng thái năng lượng của bình điện, cũng như các giá trị về mô men và công suất của động cơ điện và động cơ đốt trong.

Từ khóa: Tối ưu, mô hình bình điện, chu trình thử, trạng thái năng lượng của bình điện (SoC).

Abstract

This article presents an overview of the classification of Hybrid powertrain systems. At the same time, studying the theoretical basis of the Hybrid dynamical system, the battery model, and a overview of the optimization theory. Applying Matlab - Simulink software conducts simulation, compares and evaluates research results, corresponding to standard test cycles, NEDC, FTP - 75, FTP_HIGHWAY and 15_MODE. The main results of the study are the fuel consumption per driving cycle, the state of charge of battery, as well as the torque and power of the electric motor and the internal combustion engine.

Keywords: Optimization, battery model, driving cycle, State of Charge (SoC).

1. Đặt vấn đề

Vấn đề nóng lên toàn cầu do biến đổi khí hậu cũng như sự khan hiếm nhiên liệu hóa thạch trong thập kỷ tới thúc đẩy các nhà nghiên cứu phát triển các phương tiện xanh với hệ thống động truyền lực mới, trong đó nổi bật là các phương tiện điện hóa và phương tiện lai Hybrid. Tiên phong trong các nghiên cứu về ô tô lai

điện là các hãng xe nổi tiếng đến từ Nhật Bản như Toyota, Honda,... Hiện nay chỉ có Toyota đưa xe lai Hybrid vào thị trường Việt Nam một cách chính thống, thông qua mẫu xe Toyota Corolla Cross HV. Trong lĩnh vực Cơ khí - Động lực, trên thế giới đã có rất nhiều công trình khoa học, cũng như giáo trình, tài liệu nghiên cứu chuyên sâu về phương tiện lai Hybrid [4, 5, 6]. Trong khi đó, ở nước ta, hầu hết ấn phẩm tiếng Việt được xuất bản trước năm 2015 về ô tô hybrid mới chỉ đề cập đến những khái niệm cơ bản hoặc giới thiệu những thành tựu mới của các hãng chế tạo ô tô hybrid cũng như một số công trình thiết kế chế tạo cụm thiết bị, mô hình ô tô hybrid trong phạm vi các đồ án tốt nghiệp đại học hoặc luận văn thạc sĩ,... Thực tế cho thấy, kỹ thuật và công nghệ tối ưu hóa hệ động lực hybrid được áp dụng cho các mẫu ô tô hybrid hiện đại vẫn còn là bí quyết của một số hãng chế tạo ô tô hybrid hàng đầu trên thế giới. Trong thời gian gần đây, đã có một số công trình nghiên cứu chuyên sâu về chiến lược điều khiển ô tô lai Hybrid [1, 3], như tài liệu [1] nghiên cứu tối ưu hóa hệ động lực Hybrid bằng giải thuật đàn ong, tuy nhiên giải pháp này khó áp dụng trong thực tế.

Với mục đích nghiên cứu lý thuyết kết hợp với mô phỏng, xác định giải pháp tối ưu hóa chiến lược điều khiển Hybrid phù hợp với điều kiện Việt Nam, từ đó làm cơ sở cho việc thiết kế và chế tạo các hệ thống điện, điện tử, điều khiển xe lai hybrid trong tương lai, vấn đề nghiên cứu đặt ra là cần thiết.

2. Tổng quan ô tô lai Hybrid

Ô tô lai điện (HEV) là một phân nhóm chính của ô tô lai (Hybrid Vehicle, HV) [5]. Trong cấu trúc hệ thống động truyền lực của HEV, có trang bị động cơ điện (Motor - Generator, MG) kết hợp với loại động cơ khác, thường là động cơ đốt trong (ICE). Trong đó, động cơ điện và ICE có thể được mắc song song (parallel hybrid), hoặc mắc nối tiếp (series hybrid), mắc đồng thời cả nối tiếp và song song (series-parallel hybrid) và mắc hỗn hợp (complex hybrid).

Căn cứ vào việc sử dụng thêm động cơ điện cung cấp sức kéo cho xe, tùy mục đích của nhà chế tạo, có

thể phân chia HEV thành các loại chủ yếu sau:

+ **Micro Hybrid Electric Vehicle (Micro HEV):** Về bản chất là một ô tô sử dụng ICE thông thường, nhưng mô-tơ dùng để khởi động ICE và máy phát điện của xe được loại bỏ và cả hai được thay thế chỉ bằng một động cơ điện kiểu tích hợp đóng vai trò như một động cơ khởi động kiêm máy phát (*integrated-starter-generator, ISG*) nhằm giảm tiêu hao nhiên liệu. ISG thường liên kết chuyển động bằng dây đai với ICE. ISG có hai chức năng là chức năng khởi động nhanh ICE (*idle stop, tức là tự động tắt máy và khởi động nhanh ICE trở lại khi xe cần dừng trong một khoảng thời gian ngắn*) và chức năng phanh tái sinh (*regenerative braking, thực hiện phanh tái sinh khi xe cần giảm tốc hoặc phanh*) để nạp điện cho bình điện.

+ **Mild Hybrid Electric Vehicle (Mild HEV):** Đây là các loại ô tô lai điện mà xe không thể chạy được chỉ bằng động cơ điện, ICE được sử dụng là nguồn cung cấp sức kéo chính và toàn thời gian trong quá trình chuyển động của xe. Trên ô tô lai kiểu Mild HEV, ISG được lắp thêm để ngoài việc thực hiện hai chức năng là khởi động nhanh ICE và thực hiện phanh tái sinh còn nhằm giảm được kích cỡ cũng như công suất của ICE và hỗ trợ sức kéo cho ICE chỉ khi xe cần tăng tốc nhanh trong một khoảng thời gian ngắn. Động cơ điện kiểu ISG sử dụng trên Mild HEV thường có công suất nhỏ và mắc nối tiếp giữa ICE và hộp số của xe.

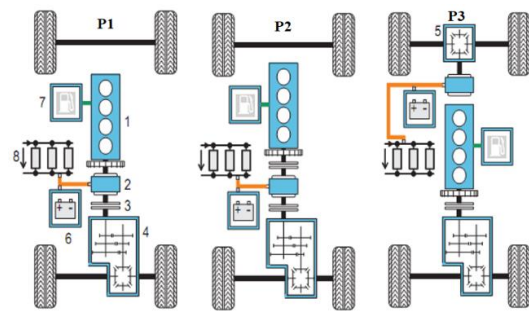
+ **Full Hybrid Electric Vehicle (Full HEV):** xe có thể chạy ở các chế độ gồm: chỉ bằng động cơ điện, chỉ bằng ICE hoặc bằng đồng thời cả hai loại động cơ này. Tuy Full HEV có trang bị bộ pin dung lượng lớn hơn nhiều so với hai loại HEV nói trên, nhưng ở chế độ chỉ sử dụng động cơ điện thì Full HEV chỉ chạy được một quãng đường khá ngắn, thường áp dụng khi xe chạy ở tốc độ khá thấp. ICE vẫn là nguồn cung cấp sức kéo chính và được sử dụng trong phần lớn quá trình chuyển động của xe. Kết cấu hệ thống động truyền lực của Full HEV khá phức tạp, động cơ điện và ICE thường áp dụng cấu trúc mắc nối tiếp (*series hybrid*), mắc song song (*parallel hybrid*), mắc kết hợp nối tiếp và song song (*series-parallel hybrid*) hoặc mắc kiểu phức hợp (*complex hybrid*). Xe có giá thành cao, tuy nhiên việc cải tiến năng lượng qua lại dưới dạng điện - cơ rất linh hoạt và việc sử dụng xe rất thuận tiện.

+ **Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV):** Đây chính là một loại Full HEV nhưng được trang bị bộ pin lớn sạc lại được nhiều lần từ nguồn điện bên ngoài bằng cáp sạc. PHEV có thể chạy được chỉ bằng nguồn điện từ bộ pin với khoảng cách khá dài và giảm được số lần nạp nhiên liệu trong quá trình khai thác xe. Phần

lớn quá trình xe hoạt động, ICE và động cơ điện thường hoạt động ở chế độ phối hợp sao cho ICE được duy trì ở chế độ có hiệu suất cao. PHEV thừa hưởng các ưu điểm của cả hai loại HEV và BEV.

+ **Extended-range electric vehicle (EREV):** Đây chính là một kiểu BEV có lắp thêm động cơ đốt trong loại nhỏ và máy phát điện nhằm kéo dài hành trình dự trữ của xe. EREV chỉ chạy bằng động cơ điện được cấp điện bởi bộ pin, ICE chỉ được dùng để dẫn động máy phát phát điện nạp cho bộ pin của xe. EREV có dự trữ hành trình lớn vì ICE có thể làm việc để nối dài hành trình chạy xe khi mà xe đã tiêu hao hết điện năng của bộ pin.

Trong thực tế, các loại ô tô điện hiện có rất đa dạng về chủng loại và kết cấu. Trong mấy năm gần đây, khi mà hãng Tesla liên tục cho ra đời các mẫu ô tô điện kiểu BEV như Tesla Roaster, Tesla Model S, Tesla Model X,... với dự trữ hành trình lớn và có chế độ tự hành ở các cấp độ khác nhau đã làm bùng nổ nhu cầu đối với thị trường ô tô điện toàn cầu và ô tô điện ngày càng khẳng định được xu thế phát triển mạnh mẽ áp đảo trong tương lai không xa.



Hình 1. Phương án bố trí hệ thống truyền lực hybrid song song

P1 - Mắc song song, không có ly hợp;

P2 - Mắc song song sử dụng 2 ly hợp;

P3 - Động cơ xăng và động cơ điện bố trí riêng rẽ cho từng cầu. 1 - Động cơ đốt trong (ICE); 2 - Động cơ điện; 3 - Ly hợp; 4 - Hộp số - cầu xe; 5 - Cầu xe; 6 - Bình điện; 7 - Bình nhiên liệu; 8 - Bộ chuyển đổi.

3. Cơ sở lý thuyết

3.1. Cơ sở lý thuyết hệ động lực Hybrid

Hệ thống động lực trên ô tô hybrid bao gồm động cơ đốt trong, động cơ điện, các bình điện, hệ thống truyền lực. Trong phần này sẽ đưa ra phương trình động lực học của các thành phần trên. Lựa chọn mô hình hóa hệ thống truyền lực hybrid song song P2 với hai ly hợp kết nối động cơ đốt trong, động cơ điện và

hộp số phân phối. Để lập phương trình động lực học cho hệ nhiều vật có thể sử dụng các phương pháp sau: Phương trình Newton-Euler, Nguyên lý D'Alembert/Jourdain, Phương trình Lagrange. Phương trình Newton-Euler phù hợp với phương pháp số và lập trình theo mô đun, ta có:

- Phương trình Newton-Euler cho động cơ đốt trong được biểu diễn như sau [4]:

$$I_{ice} \dot{\omega}_{ice}(t) = T_{ice}(t) - T_{clth1}(t) \quad (1)$$

Với I_{ice} : Là mô men quán tính khối lượng của động cơ.

- Trường hợp ly hợp 1 và 2 đóng hoàn toàn, ta có phương trình cho vận tốc góc và mô men của ly hợp:

$$\begin{aligned} T_{clth1}(t) &= T_{clth2}(t) \\ \omega_{ice}(t) &= \omega_{clth}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó: ω_{clth} là vận tốc góc của ly hợp khi ly hợp đóng; $T_{clth1}(t)$ là mô men đầu vào của ly hợp; $T_{clth2}(t)$ mô men đầu ra của ly hợp.

- Phương trình Newton-Euler cho động cơ điện:

$$\begin{aligned} I_{ice} \dot{\omega}_{ice}(t) &= T_{clth2}(t) + T_{mg}(t) - T_{gbx1}(t) \\ \omega_{clth}(t) &= \omega_{mg}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Trong đó: $T_{gbx1}(t)$ là mô men đầu vào của hộp số. Từ phương trình (1), (2) và biến đổi phương trình (3) ta có:

$$(I_{ice} + I_{mg}) \dot{\omega}_{ice}(t) = T_{ice}(t) + T_{mg}(t) - T_{gbx1}(t) \quad (4)$$

- Phương trình động lực học hộp số:

$$\begin{aligned} I_{gbx} \dot{\omega}_{gbx2}(t) &= i_{gbx} T_{igbx1}(t) - T_{gbx2}(t) \\ \omega_{ice}(t) &= \omega_{gbx1}(t) = i_{gbx}(t) \omega_{gbx2}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

Trong đó: $T_{gbx2}(t)$ là mô men đầu ra của hộp số, i_{gbx} là tỷ số truyền của hộp số tương ứng.

Cả hai động cơ chính ICE và MG đều có thể được sử dụng riêng lẻ hoặc đồng thời để điều khiển chuyển động của ô tô. Trong trường hợp bổ sung mô-men xoắn, hệ thống điều khiển cho phép mô-men xoắn của động cơ đốt trong (ICE) được chọn trong các giới hạn nhất định độc lập với yêu cầu của người lái. Giới hạn mô-men xoắn của hệ thống truyền lực P2 tuân theo điều kiện mô-men xoắn đầu vào hộp số $T_{gbx1}(\cdot)$ được cho bởi:

$$T_{gbx1}(t) = T_{ice}(t) + T_{mg}(t) - (I_{ice} + I_{mg}) \dot{\omega}_{ice}(t) \quad (6)$$

Từ phương trình (5), biến đổi (6) ta có:

$$\begin{aligned} [I_{gbx} + i_{gbx}^2(t) \cdot (I_{ice} + I_{mg})] \dot{\omega}_{ice}(t) &= i_{gbx}^2(t) \cdot (T_{ice}(t) + \\ &+ T_{mg}(t)) - i_{gbx}(t) T_{gbx2}(t) \end{aligned} \quad (7)$$

Phương trình động lực học cầu xe được thể hiện như sau:

$$\begin{aligned} I_{fd} \dot{\omega}_{fd2}(t) &= i_{fd} T_{gbx2}(t) - T_{wh}(t) \\ \omega_{fd2}(t) &= \omega_{wh}(t) \\ \omega_{fd1}(t) &= i_{fd} \omega_{wh}(t) \\ \omega_{ice}(t) &= i_{gbx}(t) i_{fd} \omega_{wh}(t) \end{aligned} \quad (8)$$

Trong đó: $\omega_{fd1}(t)$; $\omega_{fd2}(t)$ là vận tốc góc đầu vào và đầu ra của cầu xe.

Trong phương trình (8) mô men và số vòng quay của bánh xe chủ động $T_{wh}(\cdot)$, $\omega_{wh}(\cdot)$ được tính toán từ chu trình thử tiêu chuẩn với:

$$\begin{aligned} T_{road}(t) &= r_{wh} F_W(t) a \\ T_{wh}(t) &= I_{veh} \dot{\omega}_{rrh}(t) + T_{road}(t) \\ I_{veh} &= m r_{wh}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

3.2. Mô hình bình điện [2]

Trong quá trình mô phỏng động lực học của ô tô hybrid cần phải xây dựng được mô hình bình điện để đánh giá điện áp đầu ra theo trạng thái nạp (SoC) của bình điện.

Mô hình bình điện nhận các giá trị đầu vào biến đổi: dòng điện i_{batt} được yêu cầu từ mô hình dẫn động (bộ biến đổi điện áp và motor điện) và nhiệt độ t_{batt} của bình điện được tính toán theo mô hình nhiệt của bình điện. Mô hình đưa ra các biến đầu ra: điện áp bình điện V_{batt} , SoC và công suất tổn hao $P_{LossBatt}$. Để mô phỏng sự hoạt động của bình điện thay vì một mô hình điện phức tạp có thể sử dụng một mạch mẫu tương đương mà vẫn đảm bảo được độ chính xác và tải thay thế. SoC(t) của bình điện được tính theo công thức:

$$SoC(t) = SoC(t_0) - \int_0^t \frac{i_{batt}(t)}{3600 \cdot Q_{batt}} dt \quad (10)$$

Trong đó: $SoC(t_0)$ là trạng thái nạp ban đầu; Q_{batt} là dung lượng của bình điện.

- Mô hình tĩnh học của bình điện

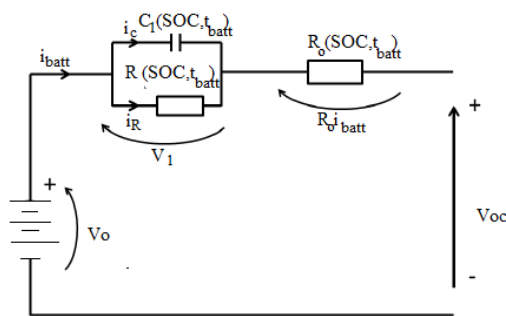
Sử dụng biểu đồ nạp và xả của nhà sản xuất và giá

trị tại các nhiệt độ khác nhau thì phương trình tính học của bình điện được mô tả:

$$V_{oc}(SoC, t_{batt}) = V_0(SoC, t_{batt}) - R_{batt}(SoC, t_{batt})i_{batt} \quad (11)$$

- Mô hình động lực học của bình điện

Bình điện khi hoạt động có sự biến thiên của dòng điện i_{batt} . Mô hình tính học không đủ để nghiên cứu cho tất cả các trường hợp làm việc. Sơ đồ nghiên cứu mô hình động lực học của bình điện thể hiện trên Hình 2.



Hình 2. Mô hình động lực học của bình điện

Phương trình vi phân mô tả trạng thái năng lượng của bình điện như sau [2]:

$$SoC = - \frac{V_o - \sqrt{V_o^2 - 4(I_r^2 R_1 + T_m \omega_m \eta_m^k - T_g \omega_g \eta_g^k) R_{batt}}}{14400 \cdot Q_{batt} \cdot R_{batt}} \quad (12)$$

3.3. Chu trình thử nghiệm tiêu chuẩn

Để đánh giá suất tiêu hao nhiên liệu của hệ động lực Hybrid sử dụng các chu trình thử nghiệm tiêu chuẩn, trong nội dung của bài báo sử dụng các chu trình thử NEDC, FTP - 75, FTP_HIGHWAY và 15_MODE với dữ liệu như sau:

$$CT(t) = \begin{bmatrix} v(t) \\ s(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Trong đó: $v(t)$ là vận tốc chuyển động của ô tô theo thời gian; $s(t)$ là mấp mô mặt đường; các chu trình thử này được xây dựng dựa trên thói quen lái xe, mật độ phương tiện và điều kiện giao thông của từng thành phố, từng khu vực trong một quốc gia. Trong hầu hết các chu trình tiêu chuẩn $s(t)=0$. Mấp mô mặt đường ngẫu nhiên thường được sử dụng cho bài toán khảo sát dao động và quay vòng.

3.4. Lý thuyết tối ưu chiến lược điều khiển hệ thống truyền lực ô tô lai hybrid [4]

Hiện nay có rất nhiều công trình nghiên cứu ứng

dụng lý thuyết tối ưu cho bài toán giảm suất tiêu hao nhiên liệu cũng như phát thải của xe lai Hybrid. Các phương pháp thường được sử dụng là:

- Phương pháp logic dựa trên các quy tắc và kinh nghiệm (*Rule-based and Heuristic-based Logic*);

- Phương pháp cực tiểu hóa lượng tiêu thụ nhiên liệu tương đương (*Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS)*) [4];

- Ứng dụng thuật toán di truyền cho tối ưu hóa đa mục tiêu [3];

- Phương pháp tối ưu hóa hệ động lực ô tô Hybrid bằng giải thuật đàn ong [1];

- Chiến lược quản lý năng lượng dựa trên mô hình điều khiển dự báo (*Model Predictive Energy Management Strategies*).

Với phương pháp logic dựa trên các quy tắc và kinh nghiệm, vấn đề quản lý năng lượng cho ô tô lai Hybrid được giải quyết bằng cách áp dụng phương pháp logic dựa trên các quy tắc, bộ hệ số kinh nghiệm được lựa chọn thông qua tri thức chuyên gia [7]. Các phương pháp quản lý năng lượng dựa trên quy tắc thường có quan hệ tương hỗ, dễ diễn giải và do đó rất phổ biến trong thực tế.

Bảng 1. Các chế độ làm việc của hệ động lực hybrid dựa trên quy tắc

TT	Chế độ	Giá trị
1	Start/stop	$T_{req}(t) < T_{limit}$
2	Boost	$T_{req}(t) > T_{ice}^{max}(\omega_{ice}(t))$
3	Chế độ thuần điện	$T_{dem, tract} < k_1$
4	Chế độ tiết kiệm nhiên liệu	$\min_{m_{fuel}}$ theo đặc tính của động cơ
5	Chế độ nạp năng lượng (phanh tái sinh)	$T_{MG}(t) < 0$

Trong đó: $T_{req}(t)$: Mô men yêu cầu; T_{limit} : Mô men ngưỡng; $T_{ice}^{max}(\omega_{ice}(t))$: Mômen sinh ra của động cơ đốt trong. $T_{sem, tract}(t)$ mô men kéo cần thiết, k_1 hệ số kinh nghiệm. $T_{MG}(t)$ mô men động cơ điện.

Một phương pháp tiên tiến hơn là chiến lược giảm thiểu mức tiêu thụ tương đương. Biểu thức của ECMS được mô tả bằng phương trình:

$$\min_u \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_{fuel}(u(t)) + p(t) \cdot H_l \cdot SoC(t) dt \quad (14)$$

Với H_l là nhiệt trị thấp của nhiên liệu.

Câu hỏi đặt ra là làm thế nào để lựa chọn $p(t)$ cho phù hợp, $p(t)$ trong trường hợp này được lựa chọn theo phương pháp nhiều hoặc ít kết hợp thử và sai (*more-or-less try-and-error*) cho đến khi nhận được giá trị tối ưu.

Để ứng dụng ECMS thông qua mô phỏng, cần dựa trên phương pháp số để giải, nhằm đạt được mục đích, giảm suất tiêu hao nhiên liệu tối đa của hệ động lực Hybrid.

Giải pháp điều khiển tối ưu được đưa ra trong trường hợp này đó là cực tiểu hóa phiếm hàm mục tiêu $j(u)$:

$$\begin{aligned} \min_{u(\cdot)} j(u) &= \phi(x(t_f)) + \int_{t_0}^{t_f} L(x(t), u(t)) dt \\ \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) \\ x(t_0) &= x_0 \\ x(t_f) &= x_f \\ c_u(u(t)) &\leq 0 \quad \forall t \in [t_0, t_f] \\ c_x(x(t)) &\leq 0 \quad \forall t \in [t_0, t_f] \end{aligned} \quad (15)$$

Trong đó:

$x(\cdot)$: Là các trạng thái liên tục của hệ thống;

$u(\cdot)$: Là các biến điều khiển của hệ thống;

$c_u(\cdot)$: Là các ràng buộc điều khiển;

t_0, t_f : Ứng với thời điểm đầu và cuối của hệ thống;

$c_x(\cdot)$ là các ràng buộc trạng thái.

Để tối thiểu hóa một phiếm hàm mục tiêu, sử dụng thước đo hiệu suất $L(\cdot)$ và $\phi(\cdot)$. Trong đó $L(\cdot)$ được gọi là biến số Lagrangian và $\phi(\cdot)$ là biến số trạng thái. Phiếm hàm mục tiêu được phân loại như sau:

$$J(u) = \begin{cases} \phi(x(t_f)) + \int_{t_0}^{t_f} L(x(t), u(t)) dt & \text{Bolza-type} \\ \int_{t_0}^{t_f} L(x(t), u(t)) dt & \text{Lagrange-type} \\ \phi(x(t_f)) & \text{Mayer-type} \end{cases} \quad (16)$$

Bởi vì các biến điều khiển $u(\cdot)$ không được biểu diễn dưới dạng tường minh. Vì vậy quá trình cực tiểu phiếm hàm mục tiêu là quá trình phi tuyến. Cần áp dụng phương pháp số để giải. Đối với hệ động lực Hybrid kiểu song song P2, cần xác định biến điều

khiển của hệ thống $u(t)$ để cực tiểu hóa phiếm hàm mục tiêu tương ứng với suất tiêu hao nhiên liệu nhỏ nhất kiểu Bolza như sau.

$$\begin{aligned} \phi_{fuel}(u) &= K_f \cdot (SoC(t_f) - SoC_f) + \\ &+ \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_{fuel}(u(t)) dt = K_f \cdot (SoC(t_f) - SoC_f) + \\ &+ \int_{t_0}^{t_f} \gamma_f \cdot bsfc(T_{ice}, \omega_{ice}) \cdot T_{ice} \cdot \omega_{ice} dt \end{aligned} \quad (17)$$

Trong đó: $\dot{m}_{fuel}(\cdot)$ là suất tiêu hao nhiên liệu theo thời gian. ICE hoạt động như một bộ chuyển đổi năng lượng nhiệt từ việc đốt cháy nhiên liệu để tạo ra công suất cơ học đầu ra, với hiệu suất nhiệt động lực học của nó được xác định bằng:

$$\eta_e = \frac{\omega_{ice} \cdot T_{ice}}{\dot{Q}_{fuel}} \quad (18)$$

Trong đó: ω_{ice} là vận tốc độ góc của động cơ,

T_{ice} là mô men xoắn đầu ra của động cơ (mô-men xoắn

có ích) và $\dot{Q}_{fuel}$ là hàm trạng thái nhiệt động

Enthalpy của nhiên liệu. Ta có suất tiêu hao nhiên liệu của ICE được tính theo công thức sau:

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{\dot{Q}_{fuel}}{H_l} \quad (19)$$

Mặt khác phương trình vi phân biểu diễn mối liên hệ giữa trạng thái của bình điện và biến điều khiển:

$$SoC(t) = f(SoC(t), u(t)), \quad \forall t \in [t_0, t_f] \quad (20)$$

Kèm theo các ràng buộc:

$$c_x(SoC(t)) := \begin{bmatrix} SoC(t) - SoC_{max} \\ SoC_{min} - SoC(t) \end{bmatrix} \quad (21)$$

Trong đó $SoC(\cdot)$ là trạng thái tích điện của bình điện. Các điều kiện đầu của hệ thống:

$$\begin{aligned} \beta(t_0) &= 0 \\ SoC(t_0) &= SoC_0 \end{aligned} \quad (22)$$

Với biến điều khiển $u(t)$, phải đáp ứng được các điều kiện phân chia mômen xoắn giữa ICE và MG đến bánh xe chủ động ứng với từng trường hợp sau.

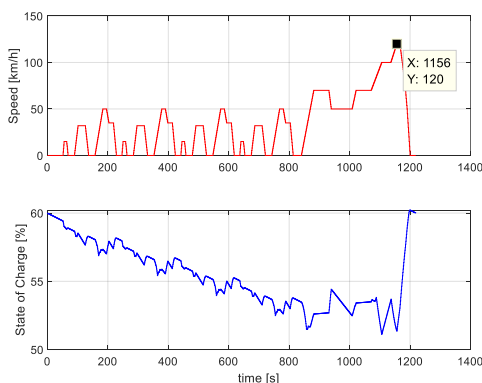
$$u(t) = \begin{cases} [-1, 0] & \text{Start-Stop ICE, MG với sự thay đổi điểm tải} \\ 0 & \text{Chỉ ICE làm việc} \\ (1, 0) & \text{Chế độ Boost; phanh tái sinh (recuperation)} \\ 1 & \text{Chỉ MG làm việc hoặc phanh tái sinh} \end{cases}$$

Trong chương trình khảo sát, biến điều khiển $u(t)$ được chia thành 101 giá trị trong khoảng $[-1, 1]$; trạng thái năng lượng của bình điện SoC chia thành 501 giá trị trong khoảng $[0,3;0,7]$. Thời điểm biên ban đầu và cuối của SoC tương ứng:

$$\begin{aligned} \text{SoC}(t_0) &= 0,6 \\ \text{SoC}(t_f) &= 0,6 \end{aligned} \quad (23)$$

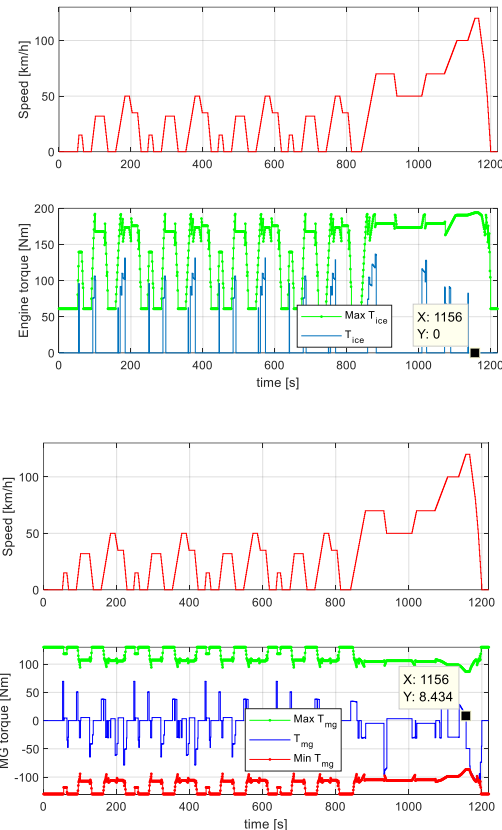
4. Kết quả và thảo luận

Các thông số đầu vào mô phỏng như sau: Chu trình thử New European Driving Cycle (NEDC), Federal Test Procedure (FTP-75; FTP_HIGHWAY), 10-15 mode cycle (15-MODE); Thông số đầu vào động cơ điện như đặc tính ngoài, hiệu suất và suất tiêu hao nhiên liệu từ phần mềm ADVISOR PM25 [6], đặc tính ngoài của động cơ xe tham khảo cùng các thông số kỹ thuật thể hiện trong phần Phụ lục.



Hình 3. Trạng thái năng lượng của bình điện ứng với chu trình thử NEDC

Nhận xét: Từ đồ thị Hình 3 tương ứng với trạng thái năng lượng của bình điện trong suốt chu trình thử NEDC, thay đổi theo hướng giảm dần, điều này thể hiện hệ động lực Hybrid làm việc ở chế độ chỉ động cơ điện nhiều hơn so với sử dụng động cơ đốt trong, nhằm tiết kiệm nhiên liệu, đến thời điểm, $t = 1156s$; Ô tô giảm dần tốc độ và sử dụng phanh, thuật toán điều khiển sẽ cho phép động cơ điện làm việc ở chế độ phanh tái sinh (recuperation), chuyển hóa một phần năng lượng mất mát thành năng lượng điện để nạp vào bình điện, nhằm duy trì SoC ở cuối chu trình thử, đạt giá trị 0,6 như điều kiện biên.



Hình 4. Mômen của ICE và MG ứng với chu trình thử NEDC

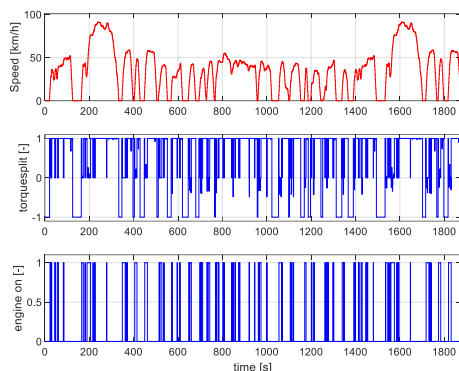
Từ đồ thị Hình 4, có thể thấy động cơ ICE từ thời điểm $t = 1156s$ không làm việc, mômen của ICE $T_{ice}=0$, mômen của động cơ MG âm, tương ứng với chế độ máy phát, nạp năng lượng trở lại cho ắc quy.

Bảng 2. So sánh lượng tiêu hao nhiên liệu và số lần sử dụng ICE/chu trình thử tiêu chuẩn

TT	Chu trình thử	Lượng tiêu hao nhiên liệu/chu trình	Số lần sử dụng ICE/chu trình
1	NEDC (Europe)	0,15177 [lít]	20
2	FTP-75 (USA)	0,3501 [lít]	68
3	FTP_HIGHWAY (USA)	0,011727 [lít]	9
4	15_MODE (Japan)	0.035724 [lít]	4

Tiến hành thử nghiệm với các chu trình thử khác nhau, ta có Bảng 2.

Như vậy với chu trình thử trên đường cao tốc FTP_HIGHWAY (USA), số lần sử dụng động cơ đốt trong tương ứng 9, khối lượng nhiên liệu tiêu hao 0,011727 [lít] trên một chu trình, lượng tiêu hao nhiên liệu này là thấp nhất trong 4 chu trình, nhờ tận dụng tốt khả năng tăng tốc của động cơ điện, thời gian làm việc của động cơ đốt trong tương đối nhỏ.



Hình 5. Quá trình sử dụng ICE ứng với chu trình thử FTP - 75

5. Kết luận

- Bài báo đã xây dựng cơ sở lý thuyết động lực học hệ động lực Hybrid, mô hình bình điện và cơ sở lý thuyết cực tiểu hóa suất tiêu hao nhiên liệu của phương tiện lai (ECMS). Khảo sát nhiều chu trình thử khác nhau để đánh giá hiệu quả của phương pháp. Trên cơ sở đó, các kết quả của bài báo có thể làm tài liệu tham khảo để thiết kế các ô tô hybrid mới, cải tiến các ô tô truyền thống thành ô tô hybrid.

- Tuy nhiên, bài báo chưa đánh giá được ảnh hưởng của các thông số điều khiển đến tính năng động lực học của ô tô, chưa đánh giá được ảnh hưởng của các thông số khối lượng, sự phân chia công suất đến chất lượng phát thải của ô tô.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Vũ Thăng Long, *Nghiên cứu tối ưu hóa thiết kế độ lớn và tham số điều khiển nguồn năng lượng hệ động lực xe Hybrid*, Luận án Tiến sĩ, Khánh Hòa, 2016.
- [2] Nguyễn Văn Trà, Lê Quốc Tiệp, *Nghiên cứu hệ thống động lực trên ô tô hybrid*, Bài báo khoa học Hội nghị KH&CN Cơ khí Động lực, Đại học Bách khoa Hà Nội, 2016;
- [3] Nguyễn Văn Trà, Lê Quốc Tiệp, *Xác định tỷ lệ công suất hợp lý của các nguồn động lực trên ô tô Hybrid kiểu hỗn hợp*, Bài báo khoa học Hội nghị

KH&CN Cơ khí Động lực XI, Đại học Lâm nghiệp Việt Nam, 2018.

- [4] Thomas J. Böhm, Benjamin Frank (auth.), *Hybrid Systems, Optimal Control and Hybrid Vehicles Theory, Methods and Applications*, Springer International Publishing AG 2017.
- [5] Chris Mi, M. Abul Masrur, David Wenzhong Gao. *Hybrid Electric Vehicle*, Wiley, USA, 2011.
- [6] Markel, T., Wipke, K., and Nelson, D., *Optimization Techniques for Hybrid Electric Vehicle Analysis Using ADVISOR*, Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York. Nov. 11-16, 2001.
- [7] Andreas Balazs, Edoardo Morra, Stefan Pischinger, *Optimization of Electrified Powertrains for City Cars*, SAE International 2012.

PHỤ LỤC:

Thông số kỹ thuật xe tham khảo

TT	Thông số kỹ thuật	Giá trị
1	Khối lượng của phương tiện [kg]	1800
2	Thời gian tăng tốc từ 0 đến 100 km/h [s]	8,5
3	Vận tốc lớn nhất [km/h]	165
4	Góc dốc lớn nhất/tốc độ [%/km/h]	6/90
5	Tỷ số truyền của hộp số	[15.5; 9.3; 6.0; 4.1; 3.1; 2.5; 2.1]
6	Hiệu suất của hệ thống truyền lực	0,9
7	Bán kính tính toán của bánh xe [m]	0,3
8	Hệ số cản không khí [-]	0,35
9	Diện tích cản chính diện [m ²]	3,9
10	Hệ số cản lăn của đường	0,01
11	Mô men cực đại của động cơ [Nm]	199
12	Nhiệt trị thấp của nhiên liệu [J/kg]	42500000
13	Mô men cực đại của động cơ điện [Nm]	130
14	Hiệu suất lớn nhất của bình điện	0,94

Ngày nhận bài: 09/7/2021
Ngày nhận bản sửa: 02/8/2021
Ngày duyệt đăng: 12/8/2021