JTE
HCMUTE
ISSN: 1859-1272

TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.hcmute.edu.vn/index.php/jte/index
Email: jte@hcmute.edu.vn

Modeling and Simulation of Hybrid Vehicle Control System by Using MATLAB Simulink

Nguyen Van Long Giang[1], Le Van Mien[2*]
[1]*HCMC University of Technology and Education, Vietnam.*
[2]*HCMC Industry and Trade College, Vietnam.*

[*] Corresponding author. *Email: mienlv97@gmail.com*

ARTICLE INFO

Received:	18/02/2023
Revised:	07/03/2023
Accepted:	16/03/2023
Published:	28/04/2023

KEYWORDS

Hybrid electric vehicle (HEV);
Internal combustion engine (ICE);
Traction motor (MG2);
Motor/generator (MG1);
Control strategies;
Fuel consumption;
Emissions;
Driving cycle test.

ABSTRACT

Nowadays, automotive manufacturers are increasingly leading the development of hybrid vehicles due to growing energy consumption and increased emissions. The power-split hybrids, due to the simultaneous use of speed and torque couplings, have integrated the advantages of series and parallel hybrid systems and minimized their disadvantages [1]. However, optimization of its operation mode depends on many components, such as an internal combustion engine (ICE), traction motor (MG2), motors and generators (MG1), a battery, and a power-split device [2]. Therefore, the control strategy development for power-split hybrid electric vehicles (HEV) always needs to be improved and developed. This study is no exception, focusing on control strategies of power flow in a power-split HEV system. The control system model had been built with the MATLAB/Simulink package, and the simulation results showed optimal operation of each component in the control system. Fuel consumption of ICE decreased by 54,79% and 53,09% in two typical driving cycle tests (NEDC and FTP-75), and emissions of the three main components in the exhaust gas CO, HC, decreased by 0,39%, 0,26%, and 0,93%, respectively, according to the NEDC, and by 4,4%, 4,9%, and 3,7%, according to the FTP-75 driving cycle test.

Mô hình hóa và mô phỏng hệ thống điều khiển xe hybrid bằng MATLAB simulink

Nguyễn Văn Long Giang[1], Lê Văn Miền[2*]
[1]*Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM, Việt Nam.*
[2]*Trường Cao đẳng Công Thương TP.HCM, Việt Nam.*

* Tác giả liên hệ. *Email: mienlv97@gmail.com*

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài:	18/02/2023
Ngày hoàn thiện:	07/03/2023
Ngày chấp nhận đăng:	16/03/2023
Ngày đăng:	28/04/2023

TỪ KHÓA

Xe điện hybrid (HEV);
Động cơ đốt trong (ICE);
Mô tơ kéo (MG2);
Mô tơ/máy phát điện (MG1);
Chiến thuật điều khiển;
Tiêu hao nhiên liệu;
Khí xả;
Chu trình thử.

TÓM TẮT

Ngày nay, các nhà sản xuất ô tô ngày càng có xu hướng phát triển các loại xe hybrid do tiêu thụ nhiên liệu và lượng phát thải khí xả ngày càng tăng. Các hệ thống hybrid phân chia công suất do sử dụng đồng thời các khớp nối tốc độ và mô men đã tích hợp ưu điểm của hệ thống hybrid nối tiếp và song song và giảm thiểu nhược điểm của chúng. Tuy nhiên, việc tối ưu hóa chế độ hoạt động của nó phụ thuộc vào nhiều thành phần như động cơ đốt trong (ICE), mô tơ kéo (MG2), mô tơ/máy phát điện (MG1), ắc quy và thiết bị phân chia công suất. Do đó, việc phát triển chiến thuật điều khiển cho xe điện lai (HEV) kiểu hỗn hợp luôn cần được cải tiến và phát triển. Nghiên cứu này cũng không ngoài mục đích đó, tập trung vào các chiến thuật điều khiển dòng năng lượng trong hệ thống HEV kiểu hỗn hợp. Mô hình hệ thống điều khiển đã được xây dựng bằng phần mềm Matlab/Simulink và kết quả mô phỏng chứng minh sự tối ưu hóa hoạt động của từng bộ phận trong hệ thống điều khiển, mức tiêu hao nhiên liệu của ICE giảm lần lượt 54,79 % và 53,09% trong hai chu trình thử tiêu biểu NEDC, FTP-75 và lượng phát thải của ba thành phần chính trong khí xả là CO, HC, NO_x giảm lần lượt theo chu trình thử NEDC là 0,39%, 0,26%, 0,93% và theo chu trình thử FTP-75 là 4,4%, 4,9%, 3,7%.

JTE
HCMUTE
ISSN: 1859-1272

TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.hcmute.edu.vn/index.php/jte/index
Email: jte@hcmute.edu.vn

Doi: https://doi.org/10.54644/jte.76.2023.1350

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Đặt vấn đề

Việc vận hành một chiếc xe hybrid đòi hỏi sự quản lý phức tạp bao gồm các chiến thuật điều khiển khác nhau. Do có vô số cấu hình có thể có của xe hybrid (và khả năng liên kết hoạt động giữa các bộ phận, chi tiết lại với nhau trong hầu hết mọi sự kết hợp mong muốn) nên vấn đề thiết kế một cấu hình tối ưu nhất sẽ đảm bảo trạng thái hoạt động tối ưu nhất của các thành phần đồng thời thỏa mãn các điều kiện từ người lái xe và môi trường. Sau đó, một cấu trúc quản lý phù hợp sẽ phải được tạo ra để chi phối và điều khiển trạng thái động lực của từng bộ phận đơn lẻ và của toàn bộ hệ thống [3]. Trong số tất cả các chiến thuật quản lý năng lượng, tối ưu hóa toàn diện là chiến thuật điều khiển tốt nhất để đáp ứng tất cả các yêu cầu về điều khiển. Tuy nhiên, nó bị ảnh hưởng bởi chu trình lái thử gây tiêu tốn thời gian lớn và khó đưa vào vận hành trên thực tế. Do đó, các phương pháp về điểm hoạt động không đổi của động cơ và đường cong tối ưu của động cơ là thực tế hơn. [4].

Tsuji cùng cộng sự [5] đã nghiên cứu mô hình mô phỏng đầy đủ trên xe Toyota Prius. Thông qua việc sử dụng ngôn ngữ tín hiệu hỗn hợp và tương tự VHDL (VHDL-AMS), nhóm tác giả đã thực hiện mô phỏng theo chu trình thử LA#4, kết quả là mức tiêu hao nhiên liệu giảm 1,4%, tiêu thụ nhiên liệu giảm 10,3% trong quá trình khởi động và thời gian tăng tốc thực tế giảm 1,4% so với mô phỏng. Xin cùng các cộng sự [6] đã nghiên cứu quản lý năng lượng tối ưu của xe điện hybrid pin nhiên liệu dựa trên điều khiển dự đoán mô hình và ước tính khối lượng trực tuyến. Kết quả bộ điều khiển được thiết kế có thể giảm mức tiêu thụ nhiên liệu bổ sung xuống khoảng 0,1%. Cipek cùng các cộng sự [7] đã nghiên cứu một mô hình mô phỏng hướng điều khiển của một chiếc xe điện hybrid phân chia công suất. Một thuật toán tối ưu hóa dựa vào giải thuật lan truyền ngược liên hồi (BPTT) đã được thực hiện để điều khiển tốc độ động cơ và các biến điều khiển mô men của hệ thống truyền lực trên xe Toyota Prius theo chu trình thử chứng nhận NEDC. Kết quả mô phỏng đã chứng minh mô hình đã cải thiện tiêu hao nhiên liệu khoảng 1,8 % so với bộ điều khiển theo luật (Rule-based Controller) thông thường. Cao cùng các cộng sự [8] đã nghiên cứu mô hình hóa và mô phỏng trên chiếc xe lai sạc điện (PHEV). Kết quả mức tiêu hao nhiên liệu của mô hình trong 2 chu trình thử NEDC và HWYCOL trên 100 km lần lượt là 4,56 lít và 4,42 lít, giá trị tiêu thụ nhiên liệu của cả hai chu trình NEDC và HWYCOL là rất gần nhau, vì vậy trong bất kỳ chu trình lái thử nào, chiến lược quản lý năng lượng sẽ duy trì hiệu quả và tối ưu. Thạc sĩ Huỳnh Quốc Việt [9] đã nghiên cứu đề tài "Ứng dụng logic mờ trong điều khiển lực kéo trên xe lai kiểu hỗn hợp". Tác giả đã sử dụng chu trình thử tiêu biểu của các nước phát triển như ECE-15, NEDC và UDDS để phân tích, kiểm nghiệm tính hiệu quả trong việc sử dụng logic mờ để điều khiển mô men kéo của mô hình xe điện HEV. Kết quả nghiên cứu đạt được khi so sánh 3 chu trình thử ECE-15, NEDC và UDDS với bộ điều khiển ADVISOR đó là mức tiêu hao nhiên liệu lần lượt giảm 31,1%, 27,11% và 19,96%.

Từ việc tổng quan các công trình nghiên cứu trên đây, chúng ta thấy được rằng việc nghiên cứu xây dựng mô hình mô phỏng để tối ưu hóa hoạt động của các bộ phận trong hệ thống điều khiển trên xe hybrid phân chia công suất, đặc biệt là giảm tiêu hao nhiên liệu và giảm phát thải khí xả là rất cần thiết và mang tính thời sự. Toyota Prius sử dụng một hệ thống truyền động hybrid kiểu hỗn hợp để tận dụng tối đa các ưu điểm và khắc phục những hạn chế của kiểu truyền động nối tiếp và song song. Bộ phân chia công suất cho phép động cơ dẫn động bánh xe trực tiếp khi cần thiết, hoặc được ngắt nối công suất đến các bánh xe để sạc ắc quy [10]. Prius là mẫu ô tô hybrid (chạy xăng - điện) được sản xuất hàng loạt đầu tiên trên thế giới vào cuối năm 1997 và đây là mẫu xe hybrid thành công nhất của Toyota. Hiện tại, mẫu xe này vẫn đang tiếp tục được nghiên cứu và cải tiến về mẫu mã, an toàn tiện nghi, hiệu suất, khí xả,...đó là lý do tác giả lựa chọn thông số xe Prius để thực hiện mô phỏng và tối ưu hoạt động của các bộ phận trong hệ thống điều khiển. Ngoài ra, các thông số kỹ thuật của chiếc xe hoàn toàn có thể thay đổi được các giá trị để áp dụng vào các thông số tính toán mô phỏng, do đó mô hình hệ thống điều khiển

JTE
HCMUTE
ISSN: 1859-1272

TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.hcmute.edu.vn/index.php/jte/index
Email: jte@hcmute.edu.vn

này có thể áp dụng cho các dòng xe hybrid tương tự. Tuy nhiên, chiến thuật điều khiển cần phải tiếp tục được nghiên cứu và xây dựng lại cho phù hợp trong từng điều kiện áp dụng khác nhau.

2. Mô hình truyền động các hệ thống trên xe HEV

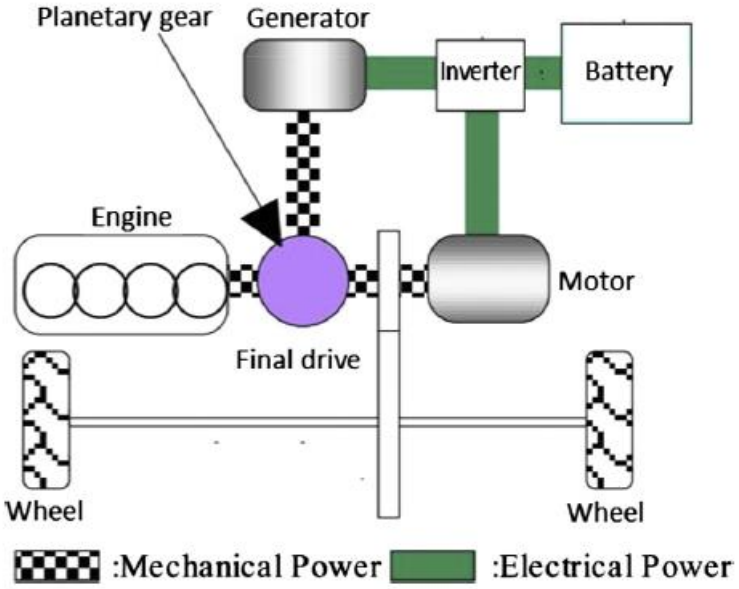
Trạng thái sạc của ắc quy (SOC) [11]:

Trạng thái sạc (SOC) được định nghĩa là tỷ số giữa lượng điện còn lại tại một thời điểm nhất định t trong ắc quy ($Q\ (t)$) và dung lượng danh định của ắc quy (Q_0 tính bằng Ah).

$$SOC(t) = \frac{Q(t_0)-Q(t)}{Q_0}.100 \quad (1)$$

Cuối cùng, SOC biểu thị bằng phần trăm được tính toán bởi Công thức (2) như là một hàm của dòng ắc quy i_{batt} (A).

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{100}{3600}.\int_{t_0}^{t} \frac{i_{batt}(t)}{Q_0} dt \quad (2)$$



Hình 1. *Mô hình xe lai phân chia công suất* [12]

Bộ phân chia công suất với hệ bánh răng hành tinh:

Tốc độ quay của bánh răng bao (ω_r), bánh răng mặt trời (ω_s), và cần dẫn (ω_c) thỏa mãn mối quan hệ sau:

$$\omega_s.R_s + \omega_r.R_r = \omega_c.(R_s + R_r) \quad (3)$$

Trong đó: R_s và R_r là bán kính của bánh răng mặt trời và bánh răng bao. Đối với xe Toyota Prius, máy phát điện được nối trực tiếp với bánh răng mặt trời, mô tơ nối với bánh răng bao và động cơ đốt trong nối trực tiếp với các bánh răng hành tinh. Các bánh xe được kết nối với bánh răng bao qua bộ vi sai. Với tỷ số truyền vi sai (r_{final}) và tỷ số (i) giữa bánh răng bao và bánh răng mặt trời, phương trình (3) được viết lại như sau:

$$\frac{i}{r_{final}}.\omega_w + \omega_{MG1} = \omega_{ICE}.(1+i) \quad (4)$$

Trong đó: ω_w, ω_{MG1} và ω_{ICE} lần lượt là tốc độ của bánh xe, mô tơ/máy phát điện và động cơ đốt trong.

Theo phương trình (4), mối quan hệ giữa tốc độ động cơ và tốc độ bánh xe được xác định không chỉ bởi yếu tố tỷ số truyền i mà còn phụ thuộc vào tốc độ của máy phát điện.

Tốc độ của mô tơ kéo và tốc độ bánh xe có mối quan hệ:

JTE
HCMUTE
ISSN: 1859-1272

TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.hcmute.edu.vn/index.php/jte/index
Email: jte@hcmute.edu.vn

$$\omega_{MG2} = \frac{1}{r_{final}}.\omega_w \quad (5)$$

Tốc độ của mô tơ/máy phát điện được xác định bởi:

$$\omega_{MG1} = \omega_{ICE}.(1+i) - \frac{i}{r_{final}}.\omega_w \quad (6)$$

Trục dẫn động được nối với bánh răng bao thông qua bộ giảm tốc cuối cùng với tỷ số truyền (r_{final}). Do đó, tổng mô men kéo tại bánh xe được xác định bởi:

$$T_d = \frac{1}{r_{final}}.(T_r + T_{MG2}) = \frac{1}{r_{final}}.\left(T_{MG2}.\frac{i}{i+1}.T_{ICE}\right) \quad (7)$$

Trong đó: T_d, T_r, T_{MG2} và T_{ICE} lần lượt là mô men kéo tại bánh xe, bánh răng bao, mô tơ kéo và động cơ đốt trong.

Tính tiêu hao nhiên liệu của động cơ đốt trong:

Lượng tiêu hao nhiên liệu của động cơ có thể được mô phỏng như là một hàm số của mô men và tốc độ góc của động cơ:

$$\dot{m}_f = f(T_{ICE}, \omega_{ICE}) \quad (8)$$

Trong nghiên cứu này, lượng tiêu hao nhiên liệu của Toyota Prius được ước tính bởi đầu vào là mô men được điều khiển bởi khối Controller và vận tốc xe.

Động lực học của xe:

Phương trình động lực học của xe theo hướng chuyển động có thể được biểu diễn bởi:

$$m.\dot{V}_x = F_x - C_a.{V_x}^2 - R_x - m.g.\sin(\theta) \quad (9)$$

Trong đó: m, g, V_x, C_a, R_x, F_x và θ lần lượt là khối lượng của xe, gia tốc trọng trường, vận tốc xe, hệ số cản khí động học, lực dọc xe do cản lăn, lực dọc bánh xe và độ dốc mặt đường.

Động lực học bánh xe:

Động lực học của bánh xe được xác định bởi:

$$I_w.\dot{\omega}_w = T_d - T_{fbrake} - r_w.F_x \quad (10)$$

Trong đó: I_w, T_{fbrake} và r_w lần lượt là mô men quán tính của bánh xe, mô men phanh yêu cầu của bánh xe trước và bán kính bánh xe.

3. Thiết kế bộ điều khiển mômen kéo và mômen phanh

Phần này trình bày chiến thuật điều khiển để tối ưu hóa tiêu thụ nhiên liệu của xe, tối ưu hóa lượng phát thải khí xả của động cơ đốt trong cùng với việc duy trì trạng thái sạc SOC của ắc quy ở mức tối ưu. Chiến thuật điều khiển phải tuyệt đối tuân theo yêu cầu của người lái theo chu trình thử.

Theo đồ thị đặc tính tiêu hao nhiên liệu, vùng hoạt động tối ưu của ICE ở dải tốc độ 1500 - 3500 vòng/phút và mô men đầu ra từ 60 đến 100 N.m. Tương tự như vậy, MG1 và MG2 nên được điều khiển để hoạt động ở mô men dưới 200 Nm. Vùng tối ưu cho quá trình phóng và sạc của ắc quy ở mức SOC trung bình khoảng từ 0,5 đến 0,7.

Khối Controller điều khiển mô men kéo và mô men phanh thông qua các lệnh điều khiển đến động cơ đốt trong ICE, mô tơ kéo MG2, mô tơ/máy phát điện MG1 để phân phối mô men đến các thành phần theo vận tốc yêu cầu từ người lái. Khối Controller dựa trên các tín hiệu đầu vào như mô men kéo (T_{com}), mô men phanh (T_{brake}), vận tốc xe (V_x), trạng thái sạc ắc quy SOC.

Dựa vào Hình 2, nguyên lý hoạt động của bộ điều khiển Controller đó là xác định tốc độ xe theo chu trình lái thử và đo tốc độ thực tế để điều khiển mô men kéo và mô men phanh dựa trên việc điều khiển ổn định trạng thái sạc của ắc quy trong các giới hạn hoạt động tối ưu. Nghĩa là luôn để ắc quy ở trạng thái cân bằng trong giới hạn $SOC_L < SOC < SOC_H$. Với SOC_L = 0,5; SOC_H = 0,7.

- Điều khiển mô men phanh: nếu $T_{brake} < T_{MG2}$ thì mô men phanh được điều khiển toàn bộ thông qua mô tơ kéo MG2. Ngược lại, T_{MG2} đạt giá trị lớn nhất và $T_{cơ\ khí} = T_{brake} - max$.

JTE
HCMUTE
ISSN: 1859-1272

TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.hcmute.edu.vn/index.php/jte/index
Email: jte@hcmute.edu.vn

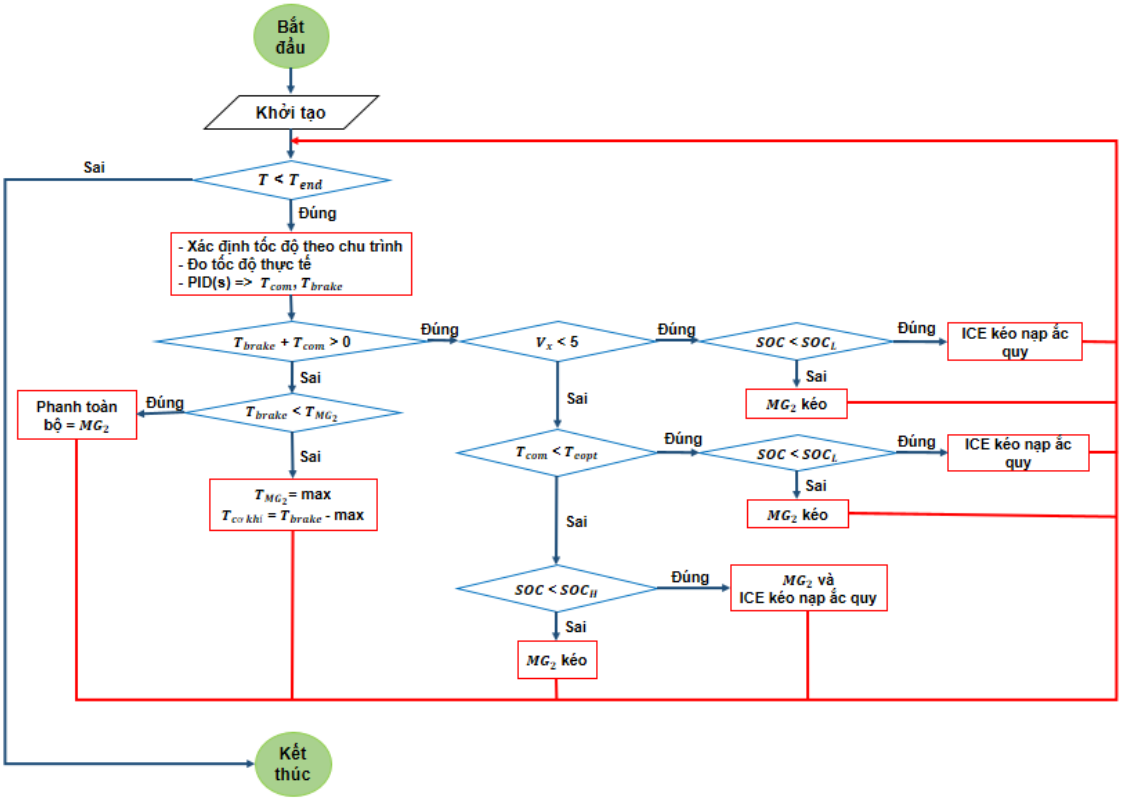
- Điều khiển mô men kéo:

+ Nếu V_x < 5 m/s và trạng thái sạc $SOC < SOC_L$ thì ICE kéo và nạp ắc quy. Ngược lại, $SOC > SOC_L$ thì MG2 kéo.

+ Nếu V_x > 5 m/s và mô men kéo nhỏ hơn mô men tối ưu (T_{e-opt}) của ICE: $T_{com} < T_{e-opt}$ và thỏa mãn $SOC < SOC_L$ thì ICE kéo và nạp ắc quy. Ngược lại, $SOC > SOC_L$ thì MG2 kéo.

+ Nếu V_x > 5 m/s và mô men kéo lớn hơn mô men tối ưu của ICE: $T_{com} > T_{e-opt}$ và thỏa mãn $SOC < SOC_H$ thì MG2 và ICE cùng thực hiện kéo và nạp ắc quy. Ngược lại, $SOC > SOC_H$ thì MG2 kéo.

Sau đó, tất cả các kết quả tính toán của bộ điều khiển được đưa về và tiếp tục thực hiện vòng lặp của giải thuật điều khiển cho đến khi giá trị $T > T_{end}$ sẽ kết thúc vòng lặp.



Hình 2. *Sơ đồ chiến thuật điều khiển mô men kéo và mô men phanh*

4. Kết quả và đánh giá

Thiết lập bộ điều khiển mô men kéo và mô men phanh và thực hiện mô phỏng hoạt động của xe Toyota Prius trong Simulink, sử dụng 2 chu trình thử tiêu biểu: Chu trình thử nghiệm Liên bang FTP-75 (Mỹ) và Chu trình lái mới của Châu Âu NEDC. Cả 2 chu trình thử FTP-75 và NEDC đều được thiết lập trên quãng đường xe di chuyển dài với các điều kiện địa hình khác nhau, thời gian di chuyển kéo dài và các yêu cầu phải đạt được về tốc độ trung bình, tốc độ tối đa,...Từ đó, tác giả có cơ sở để đánh giá được tình trạng hoạt động của mô hình hệ thống điều khiển xe hybrid cũng như chiến thuật điều khiển đưa ra có tối ưu và hiệu quả hay không.

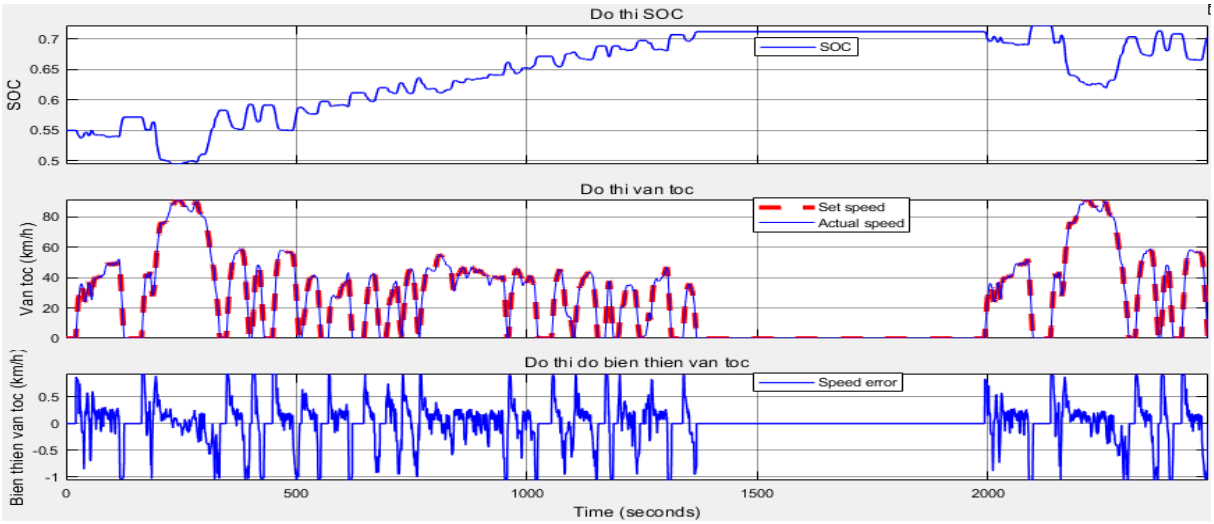
Hình 3 biểu diễn đồ thị trạng thái sạc SOC của ắc quy, đồ thị vận tốc xe mô phỏng và vận tốc xe mong muốn, đồ thị độ biến thiên vận tốc biểu diễn độ lệch giữa vận tốc thiết lập theo chu trình thử FTP-75 và vận tốc thực tế của xe đạt được (km/h). Các kết quả đạt được như sau:

- Đồ thị trạng thái sạc SOC của ắc quy: Trong khoảng thời gian từ 0 - 300 giây, xe thực hiện quá trình tăng tốc, lúc này mô tơ kéo sử dụng điện của ắc quy để đạt vận tốc tối đa theo chu trình thử nên lúc này trạng thái sạc của ắc quy giảm. Sau đó, xe di chuyển trong giai đoạn ổn định, lúc này tùy thuộc

JTE
HCMUTE
ISSN: 1859-1272

TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.hcmute.edu.vn/index.php/jte/index
Email: jte@hcmute.edu.vn

vào đặc tính của chu trình thử mà ICE được điều khiển để hoạt động, ICE và MG2 thực hiện quá trình kéo máy phát điện để sạc ắc quy, làm cho trạng thái sạc SOC của ắc quy tăng dần đến giới hạn trên (SOC_H = 0.7). Trạng thái sạc SOC của ắc quy luôn được điều khiển nằm trong vùng cho phép (0.5 < SOC < 0.7) và tuân theo vận tốc di chuyển của xe.



Hình 3. *Đồ thị trạng thái sạc và vận tốc của xe theo chu trình thử FTP-75*

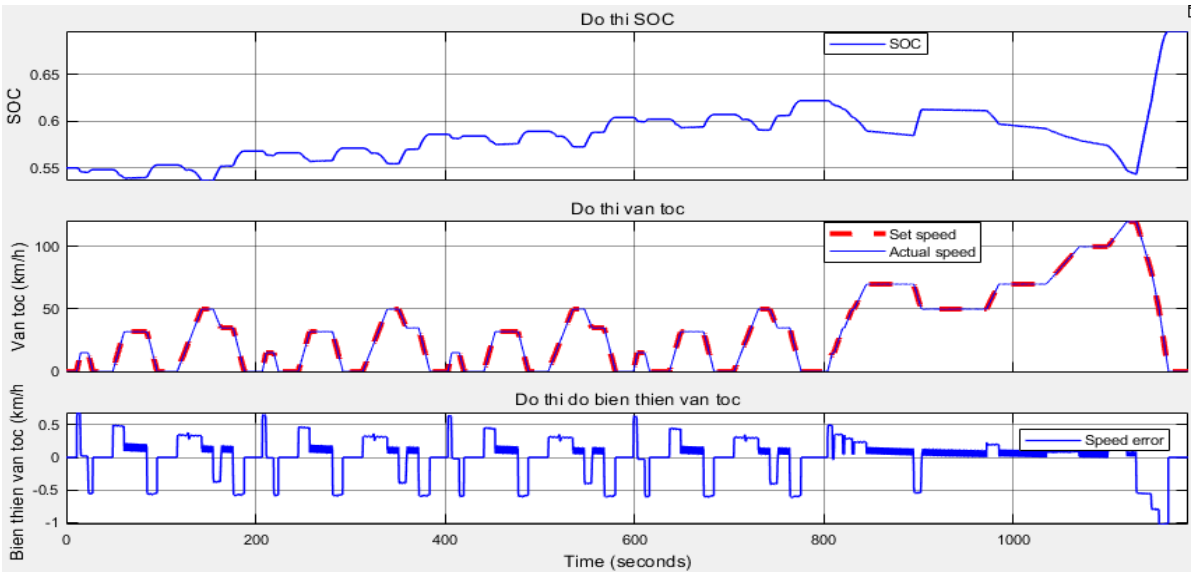
- Đồ thị vận tốc của xe theo chu trình thử:

+ Đường màu đỏ nét đứt: vận tốc thiết lập theo chu trình thử cho đường phố FTP-75 (km/h).

+ Đường màu xanh dương: vận tốc thực tế của xe đạt được (km/h).

Cả hai đường màu đỏ nét đứt và đường màu xanh dương nét liền gần như trùng khớp nhau, điều đó chứng tỏ mô hình đã đáp ứng được vận tốc xe mong muốn một cách chính xác. Do đó, ta thấy được rằng bộ điều khiển đã hoạt động hiệu quả.

- Đồ thị độ biến thiên vận tốc: biểu diễn độ lệch giữa vận tốc thiết lập theo chu trình thử FTP-75 và vận tốc của xe đạt được (km/h). Đồ thị độ biến thiên vận tốc lớn hơn 0 km/h khi giá trị vận tốc thiết lập lớn hơn vận tốc của xe và ngược lại. Độ biến thiên giữa 2 đường biểu diễn vận tốc trong cả chu trình khoảng 1 km/h, chứng tỏ bộ điều khiển Controller hoạt động hiệu quả.

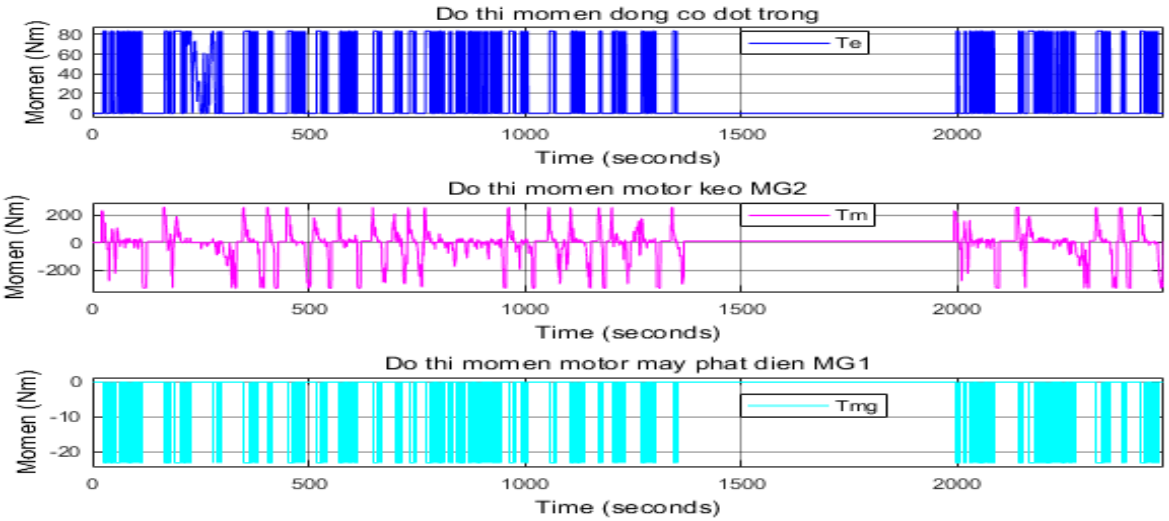


Hình 4. *Đồ thị trạng thái sạc và vận tốc của xe theo chu trình thử NEDC*

JTE
HCMUTE
ISSN: 1859-1272

TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.hcmute.edu.vn/index.php/jte/index
Email: jte@hcmute.edu.vn

Hình 4 biểu diễn đồ thị trạng thái sạc SOC của ắc quy, đồ thị vận tốc của xe và đồ thị độ biến thiên vận tốc theo chu trình thử NEDC. Các kết quả đạt được của từng đồ thị đều nằm trong vùng hoạt động tối ưu giống như chu trình thử FTP-75 trong hình 3, chứng tỏ bộ điều khiển đã hoạt động hiệu quả cho cả 2 chu trình thử.



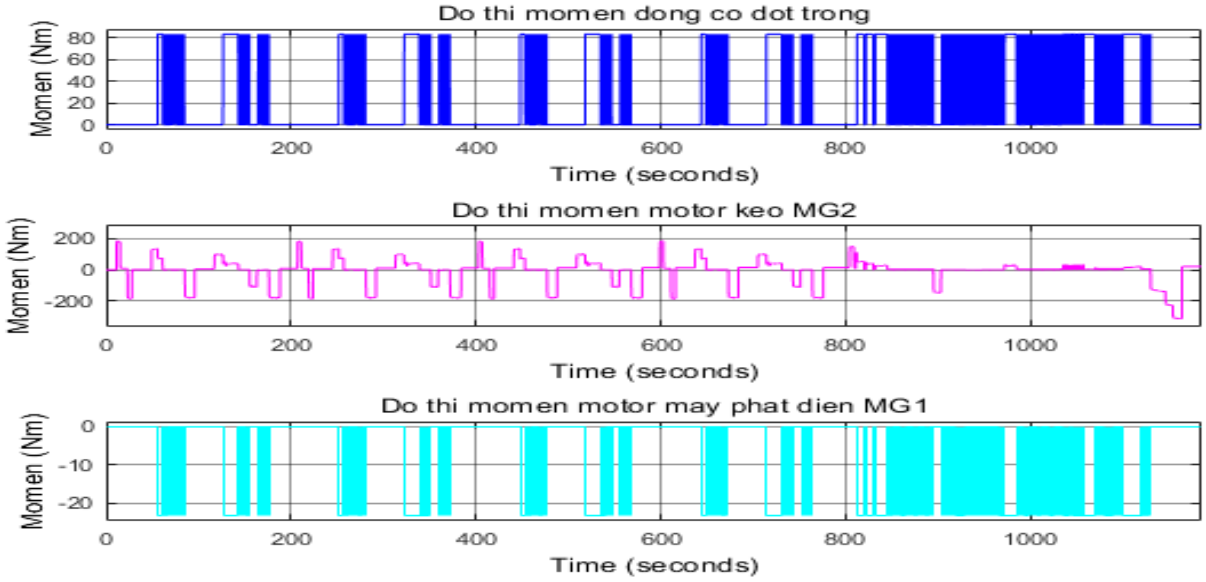
Hình 5. *Đồ thị mô men của ICE, MG2 và MG1 theo chu trình thử FTP-75*

Hình 5 biểu diễn đồ thị mô men của động cơ đốt trong ICE, mô tơ kéo MG2 và mô tơ/máy phát điện MG1 theo chu trình thử FTP-75. Các kết quả được thể hiện như sau:

- Đường màu xanh dương thể hiện mô men của động cơ đốt trong T_{ICE}. Từ đồ thị ta thấy rằng mô men của động cơ đốt trong luôn duy trì trong mức từ 60 đến 100 Nm. Chứng tỏ rằng bộ điều khiển đã hoạt động chính xác và tối ưu.

- Đường màu hồng biểu diễn mô men của mô tơ kéo T_{MG2}. Mô men của MG2 đã hoạt động hiệu quả, mang cả 2 giá trị (-) và (+). Giá trị (+) thể hiện mô tơ kéo đã thực hiện quá trình kéo để tạo động lực cho xe, giá trị (-) thể hiện mô tơ kéo thực hiện kéo máy phát để sạc lại cho ắc quy.

- Đường màu xanh lam biểu diễn mô men của mô tơ/máy phát điện T_{MG1}. Quá trình hoạt động của MG1 tương đối ít, nguyên nhân là do ở chu trình FTP-75, phanh tái sinh đã làm việc khá hiệu quả. Mô men âm thể hiện MG1 thực hiện quá trình nạp là chủ yếu.

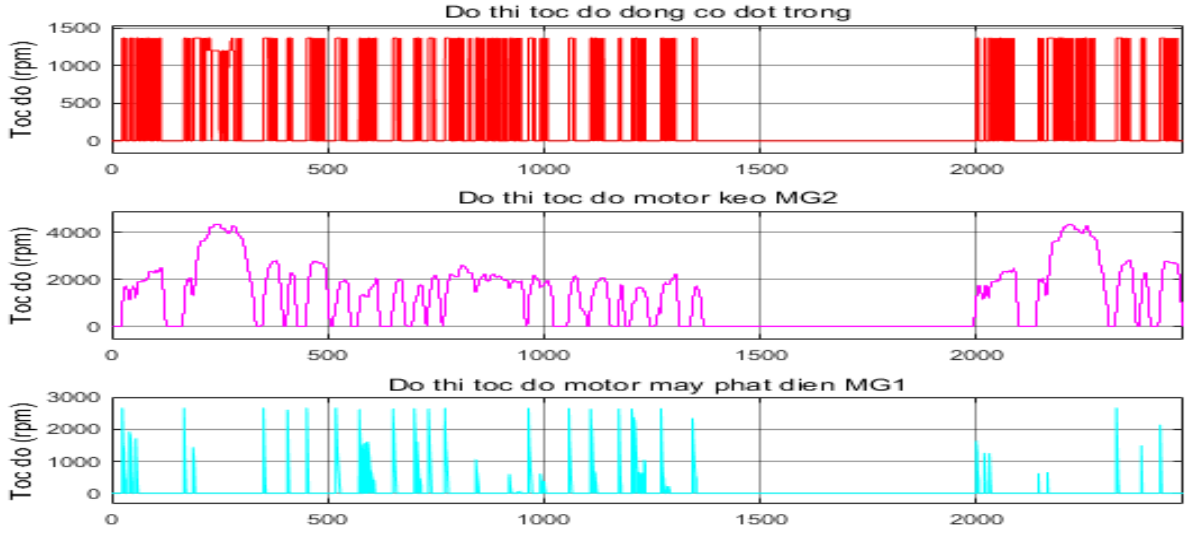


Hình 6. *Đồ thị mô men của ICE, MG2 và MG1 theo chu trình thử NEDC*

JTE
HCMUTE
ISSN: 1859-1272

TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.hcmute.edu.vn/index.php/jte/index
Email: jte@hcmute.edu.vn

Hình 6 biểu diễn đồ thị mô men của ICE, MG2 và MG1 theo chu trình thử NEDC. Các kết quả đạt được đều hoạt động hiệu quả giống như chu trình thử FTP-75 trong hình 5, mô men của các thành phần trong hệ thống đều hoạt động trong vùng tối ưu theo như yêu cầu đề ra.



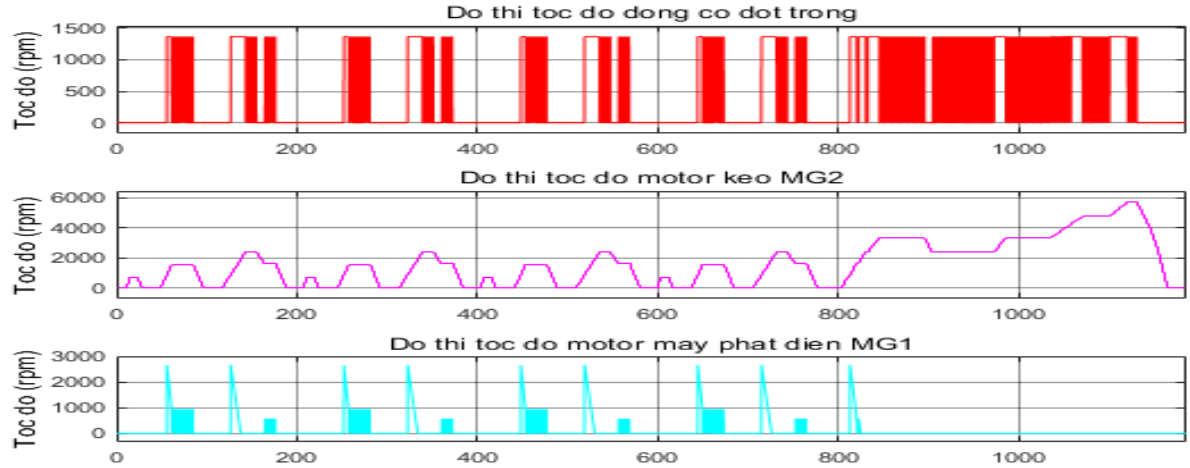
Hình 7. *Đồ thị tốc độ của ICE, MG2 và MG1 theo chu trình thử FTP-75*

Hình 7 biểu diễn đồ thị tốc độ của động cơ đốt trong ICE, mô tơ kéo MG2 và mô tơ/máy phát điện MG1 theo chu trình thử FTP-75. Các kết quả được thể hiện như sau:

- Đường màu đỏ biểu diễn số vòng quay của động cơ đốt trong N_{ICE}. Từ đồ thị ta thấy rằng số vòng quay của ICE luôn duy trì trong mức 1500 vòng/phút. Chứng tỏ rằng động cơ đốt trong luôn được điều khiển hoạt động trong vùng tối ưu.

- Đường màu hồng biểu diễn số vòng quay của mô tơ kéo N_{MG2}. Số vòng quay của mô tơ kéo tỉ lệ với vận tốc của xe, nguyên nhân là do mô tơ được nối trực tiếp đến bánh lái thông qua bộ giảm tốc.

- Đường màu xanh lam biểu diễn số vòng quay của mô tơ/máy phát điện N_{MG1}. Quá trình hoạt động của MG1 tương đối ít, tốc độ của MG1 được duy trì dưới 3000 vòng/phút để duy trì trạng thái sạc SOC của ắc quy và đảm bảo ít tổn thất năng lượng của xe.

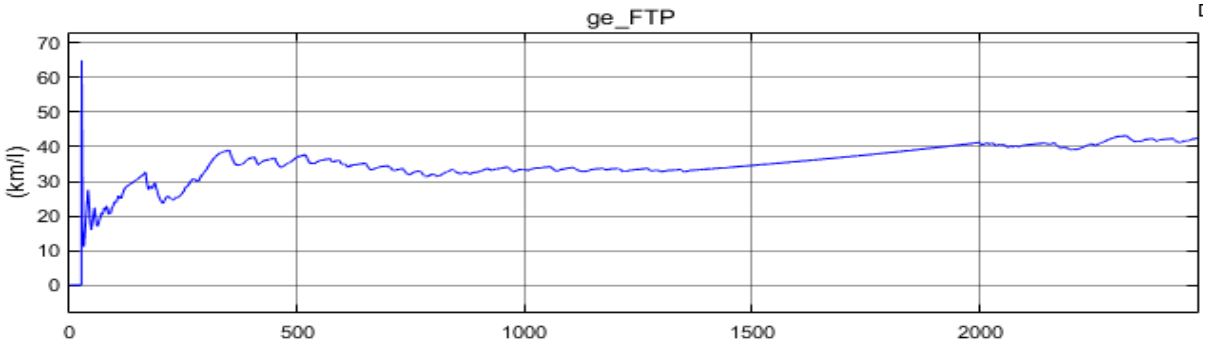


Hình 8. *Đồ thị tốc độ của ICE, MG2 và MG1 theo chu trình thử NEDC*

Hình 8 biểu diễn đồ thị tốc độ của động cơ đốt trong ICE, mô tơ kéo MG2 và mô tơ/máy phát điện MG1 theo chu trình thử NEDC. Các kết quả đạt được đều hoạt động hiệu quả giống như chu trình thử FTP-75 trong hình 7, tốc độ của các thành phần trong hệ thống đều hoạt động trong vùng tối ưu và được điều khiển chính xác.

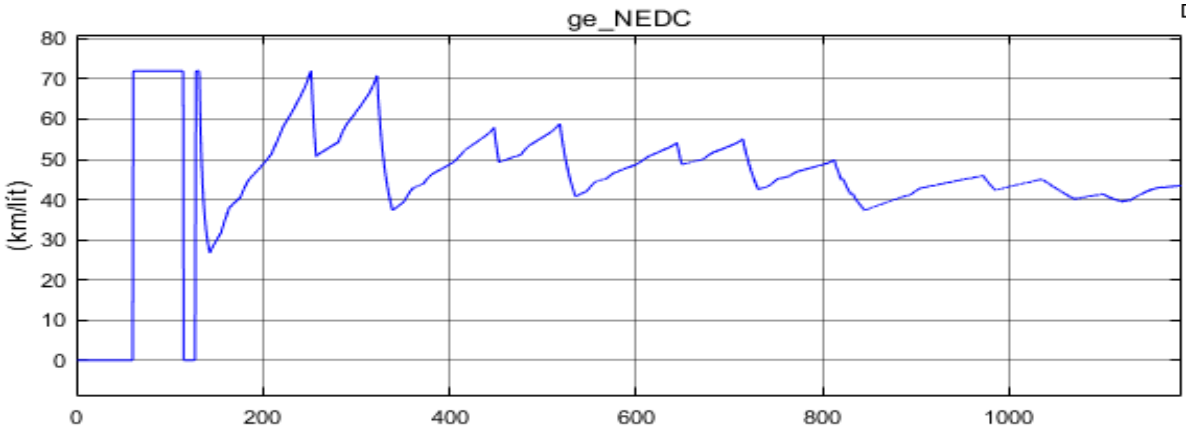
JTE
HCMUTE
ISSN: 1859-1272

TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.hcmute.edu.vn/index.php/jte/index
Email: jte@hcmute.edu.vn



Hình 9. *Suất tiêu hao nhiên liệu của ICE theo chu trình thử FTP-75*

Hình 9 và hình 10 biểu diễn đồ thị suất tiêu hao nhiên liệu của ICE theo đơn vị km/lít lần lượt theo 2 chu trình thử FTP-75 và NEDC. Qua mô phỏng theo chu trình thử FTP-75, tính toán suất tiêu hao nhiên liệu trung bình đạt 42,46 km/lít xăng, tương đương 2,355 lít/100 km và theo chu trình thử NEDC suất tiêu hao nhiên liệu trung bình đạt 43,45 km/lít xăng, tương đương 2,301 lít/100 km. Các kết quả thu được từ 2 chu trình thử chứng minh rằng bộ điều khiển đã hoạt động cực kỳ chính xác và hiệu quả, suất tiêu hao nhiên liệu của ICE trên xe Toyota Prius kiểu hỗn hợp đã được giảm thiểu đáng kể do ICE luôn được kiểm soát ở mức 1500 vòng/phút.



Hình 10. *Suất tiêu hao nhiên liệu của ICE theo chu trình thử NEDC*

Để đánh giá hoạt động của bộ điều khiển Controller vừa thiết kế, kết quả mô phỏng trên đã được so sánh với kết quả mô phỏng từ bộ điều khiển ADVISOR. Các kết quả được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. *Bảng so sánh tiêu hao nhiên liệu theo các chu trình thử*

Chu trình thử	Controller (Lít/100km)	ADVISOR (Lít/100km)	Kết quả (%)
NEDC	2,301	5,09	-54,79
FTP-75	2,355	5,02	-53,09

Từ bảng 2 trên ta thấy mô hình thực hiện với chiến thuật điều khiển mới đã đạt được hiệu quả tốt hơn theo các chu trình thử khác nhau. Mức tiêu hao nhiên liệu đã giảm lần lượt 54,79% và 53,09% theo 2 chu trình thử NEDC và FTP-75 khi so sánh giữa bộ điều khiển Controller và bộ điều khiển ADVISOR trong Matlab/Simulink.

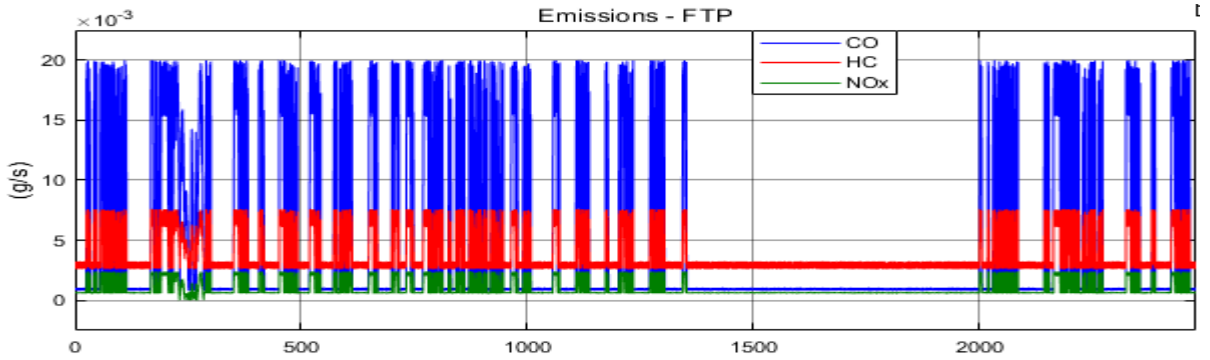
Bảng 2. *Bảng so sánh lượng phát thải khí xả theo các chu trình thử*

Thành phần khí xả (g/km)	Chu trình NEDC	ADVISOR	Kết quả (%)	Chu trình FTP-75	ADVISOR	Kết quả (%)
CO	0,769	0,772	-0,39	0,588	0,615	-4,4
HC	0,782	0,784	-0,26	0,515	0,542	-4,9
NO_x	0,107	0,108	-0,93	0,130	0,135	-3,7

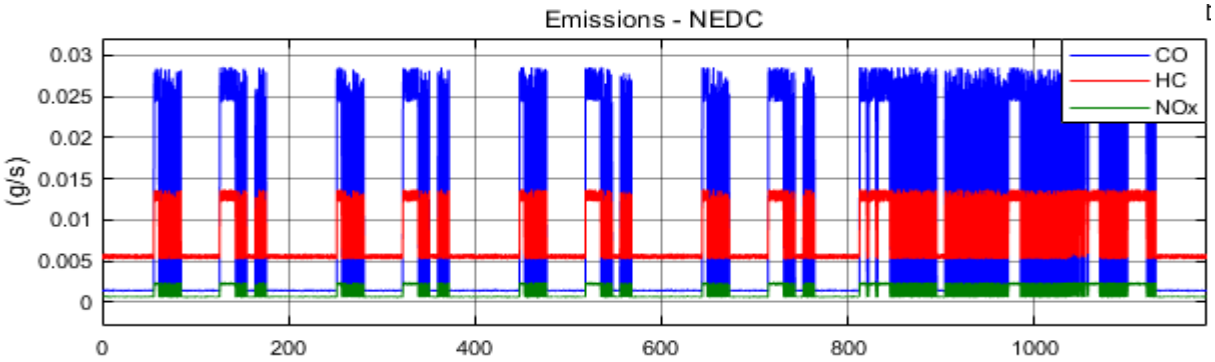
JTE
HCMUTE
ISSN: 1859-1272

TẠP CHÍ KHOA HỌC GIÁO DỤC KỸ THUẬT
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Website: https://jte.hcmute.edu.vn/index.php/jte/index
Email: jte@hcmute.edu.vn

Hình 11 và hình 12 biểu diễn đồ thị phát thải các thành phần khí xả chủ yếu của ICE theo 2 chu trình thử FTP-75 và NEDC. Các kết quả được trình bày trong bảng so sánh 4.2, lượng phát thải của ba thành phần chính trong khí xả là CO, HC, NO_x giảm lần lượt theo chu trình thử NEDC là 0,39%, 0,26%, 0,93% và theo chu trình thử FTP-75 là 4,4%, 4,9%, 3,7%.



Hình 11. *Đồ thị các thành phần khí xả theo chu trình FTP-75*



Hình 12. *Đồ thị các thành phần khí xả theo chu trình NEDC*

5. Kết luận

Bộ điều khiển mô men kéo và mô men phanh cho xe hybrid kiểu hỗn hợp đã được thực hiện và các kết quả thu được đã chứng minh bộ điều khiển đã hoạt động như mong đợi. Bộ điều khiển mới giúp tối ưu hóa hiệu suất hoạt động của từng thành phần chính cấu thành xe lai trong việc phân phối dòng công suất khi xe vận hành như: ICE, MG2, MG1 và ắc quy. Các chiến thuật điều khiển được xây dựng hợp lý và đặc biệt là suất tiêu hao nhiên liệu của ICE giảm đáng kể lần lượt 54,79% và 53,09% theo 2 chu trình thử NEDC và FTP-75 khi so sánh giữa bộ điều khiển Controller và bộ điều khiển ADVISOR trong Matlab/Simulink. Do đó, đề tài này đã đáp ứng được tính kinh tế, đây là một trong những yếu tố quan trọng, là chìa khóa thành công trong lĩnh vực nghiên cứu về dòng xe HEV. Ngoài ra, lượng phát thải của ba thành phần chính trong khí xả là CO, HC, NO_x giảm lần lượt theo chu trình thử NEDC là 0,39%, 0,26%, 0,93% và theo chu trình thử FTP-75 là 4,4%, 4,9%, 3,7%, chứng minh bộ điều khiển hoạt động hiệu quả, vừa giảm tiêu thụ nhiên liệu và giảm phát thải khí xả.

Bộ điều khiển phân phối mô men kéo và mô men phanh luôn đáp ứng nhất quán các yêu cầu của quá trình điều khiển theo tín hiệu bàn đạp ga và bàn đạp phanh, ắc quy luôn luôn cung cấp đủ năng lượng để đáp ứng theo từng chế độ vận hành của xe HEV theo chu trình lái thử tiêu chuẩn, luôn đảm bảo sự ổn định hoạt động của xe trong suốt quá trình vận hành.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] E. Mohammadpour, Khajavi MN., "Modeling and control of power-split hybrid electric vehicle using fuzzy logic method ". International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS), Vol.6, Issue 1(2014) 1-13.

[2] Chen, J.-S. and Q.-V. Huynh, "Model and control power-split hybrid electric vehicle with fuzzy logic". Journal of Engineering Technology and Education, 2012.

[3] F.Schluter, P.Waltermann, "Hierarchical control structures for Hybrid vehicles – Modelling, simulation, and optimization". *IFAC Advances in Automotive Control*, Ascona, Switzerland, 1995.

[4] Jiankun Peng, Hongwen He, Rui Xiong, "Rule based energy management strategy for a series–parallel plug-in Hybrid electric bus optimized by dynamic programming". Applied Energy, 2016.
[5] Kimitoshi Tsuji, Toshiji Kato. "VHDL-AMS Full Hybrid Vehicle Simulation Model for the Concept Planning and the Power Performance and Fuel Economy Estimation results". *7th IFAC Symposlumon Advances in Automotive Control*. *The International Federation of Automatic Control*, September 4-7, 2013. Tokyo, Japan.
[6] Weiwei Xin, Enyong Xu, Weiguang Zheng, Haibo Feng, Jirong Qin. "Optimal energy management of fuel cell Hybrid electric vehicle based on model predictive control and on-line mass estimation". Energy Reports 8, pp. 4964 – 4974, 2022.
[7] Mihael Cipek, Danijel Pavkovic´, Joško Petric. "A control-oriented simulation model of a power-split Hybrid electric vehicle". Applied Energy, 2012.
[8] Jianfei Cao, Jiankun Peng, Hongwen He. "Modeling and Simulation Research on Power-split Hybrid Electric Vehicle". *CUE2016-Applied Energy Symposium and Forum 2016: Low carbon cities & urban energy systems*. Energy Procedia 104, pp. 354 – 359, 2016.
[9] ThS. Huỳnh Quốc Việt. "Ứng dụng logic mờ trong điều khiển lực kéo trên xe lai kiểu hỗn hợp". *Tạp Chí Khoa Học Giáo Dục Kỹ Thuật*, số 53, tháng 07/2019.
[10] Rajesh Rajamani, "Vehicle Dynamics and Control", pp. 461-469, *Springer*, 2012.
[11] Martin Hedon, "Modeling and simulation of a hybrid powertrain". KTH Royal Institute of Technology, p. 24, 2018.
[12] M. Monterazi, M. Mahmoodi, "Development a new power management strategy for power split hybrid electric vehicles". Transportation Research Part D 37, pp. 79-96, 2015.