

ỨNG DỤNG LOGIC MỜ TRONG ĐIỀU KHIỂN LỰC KÉO TRÊN XE LAI KIỂU HỖN HỢP

APPLICATION OF FUZZY LOGIC TO CONTROL TRACTION FORCE FOR POWER-SPLIT HYBRID ELECTRIC VEHICLES

Huỳnh Quốc Việt

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM, Việt Nam

Ngày toà soạn nhận bài 27/3/2019, ngày phản biện đánh giá 12/4/2019, ngày chấp nhận đăng 2/5/2019.

TÓM TẮT

Ngày nay, các loại xe lai động cơ xăng-điện kiểu hỗn hợp (HEV) đang phát triển nhanh chóng nhằm cải thiện suất tiêu hao nhiên liệu và khí thải ra môi trường. Sự kết hợp giữa động cơ đốt trong và động cơ điện rất đa dạng, trong đó HEV kiểu hỗn hợp (power-split HEV) đã kết hợp được các ưu điểm của cả kiểu nối tiếp và song song. Tuy nhiên, việc tối ưu hóa chế độ hoạt động của chúng phụ thuộc vào nhiều thành phần như động cơ đốt trong, mô tơ điện/ máy phát điện, ắc quy và bộ phân phối công suất. Vì thế, việc phát triển chiến thuật điều khiển cho HEV kiểu hỗn hợp luôn được cải tiến, 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. Đặc biệt, việc dùng logic mờ hiện thực hóa chiến thuật điều khiển mô men kéo để tối ưu hóa việc điều khiển điện năng của HEV kiểu hỗn hợp và được phân tích, kiểm nghiệm tính hiệu quả trong một số chu trình thử tiêu biểu như NEDC, UDDS. Mô hình HEV được thực hiện bằng Matlab/Simulink, các kết quả mô phỏng đã cho thấy những cải thiện đáng kể về suất tiêu hao nhiên liệu.

Từ khóa: Động cơ đốt trong; mô tơ điện; xe lai kiểu hỗn hợp; thiết bị phân phối công suất; bộ điều khiển logic mờ.

ABSTRACT

Nowadays, hybrid electric vehicles (HEV) have been speedily developed and deployed by automobile manufacturers to improve fuel consumption and emissions. Among different hybrid configurations, the power-split HEV combines the advantages of series and parallel hybrids. However, optimization of its operation mode depends on many components such as an internal combustion engine, motors/generators, battery, and power-split device. Besides, the control strategy development for power-split HEV is more complex compared with the other HEV. This study focused on control strategies of power flow in power-split HEV system. Based on the analysis of efficiency in a representative driving cycle, a fuzzy torque control strategy was developed to optimize the power management of the power-split HEV. The power-split HEV model had been built with Matlab/Simulink package, and the simulation results showed significant improvements in fuel consumption and performance.

Keywords: internal combustion engine (ICE); electric motor (EM); hybrid electric vehicle (HEV); power-split device; fuzzy logic control (FLC).

1. GIỚI THIỆU

Việc quản lý năng lượng trong xe lai động cơ-điện là một vấn đề tối quan trọng vì nó có thể ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất và kích thước của xe. Trong đó, chiến thuật điều

khiển năng lượng là một trong những yếu tố quan trọng nhất trong vấn đề thiết kế xe HEV. Chiến thuật điều khiển tốt có nghĩa là giảm tiêu thụ nhiên liệu, giảm khí thải, và cải thiện tính năng hoạt động của xe. Ngoài ra, các phương pháp quản lý năng lượng thông minh

có thể quan sát và ghi nhớ các ứng xử của người lái trong nhiều điều kiện khác nhau. Những phương pháp này ngày càng được áp dụng rộng rãi cho việc điều khiển HEV.

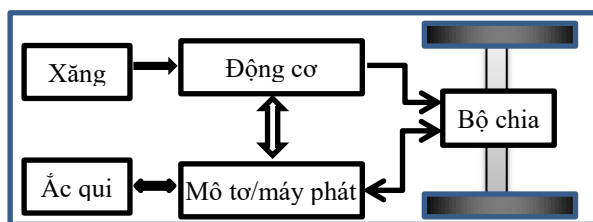
Toyota Prius là chiếc HEV được thương mại hóa đầu tiên. Chiến thuật điều khiển của nó đã được nghiên cứu rộng rãi từ khi xuất hiện trên thị trường vào năm 1997. ADVISOR, một công cụ mô phỏng máy tính được sử dụng phổ biến và mạnh mẽ cho HEVs, bao gồm một mô hình tích hợp của Toyota Prius và dữ liệu thiết yếu của các cụm chi tiết trong thư viện của ADVISOR.

Mục đích của nghiên cứu này là thực hiện chiến thuật điều khiển thông minh để cải thiện hiệu suất vận hành của xe và giảm tiêu thụ nhiên liệu. Mô hình toán của xe đã được thực hiện với công cụ mô phỏng Simulink/MatLab, bộ điều khiển được thiết kế từ thanh công cụ logic mờ của MatLab. Bộ điều khiển tính toán mô men kéo yêu cầu và phân phối mô men xoắn, tốc độ động cơ cần thiết để tối ưu hóa vùng hoạt động của động cơ, mô tơ và duy trì trạng thái sạc (SOC) hợp lý trong suốt quá trình vận hành xe.

Cuối cùng là phần đánh giá hiệu quả những bộ điều khiển dùng logic mờ thông qua các kết quả mô phỏng của mô hình HEV và ADVISOR [1].

2. MÔ HÌNH TRUYỀN ĐỘNG CÁC HỆ THỐNG TRÊN XE HEV

Toyota Prius sử dụng một hệ thống truyền động hybrid kiểu hỗn hợp, nó kết hợp cả kiểu nối tiếp và song song để tối đa hóa các ưu điểm cũng như khắc phục các hạn chế của chúng. Một bộ phân chia công suất cho phép động cơ dẫn động bánh xe trực tiếp khi cần thiết, hoặc được ngắt kết nối đến bánh xe để sạc ắc qui [2].



Hình 1. Sơ đồ phân bố hệ thống truyền động lai kiểu hỗn hợp.

Thông số kỹ thuật của xe Prius dùng mô phỏng được liệt kê trong Bảng 1 [3].

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của xe mô phỏng

Tên chi tiết	Giá trị
Khối lượng xe	1368 kg
Hệ số cản gió	0.3
Diện tích cản gió	1.746 m ²
Khoảng cách 2 cầu xe	2.55m
Chiều cao trọng tâm	0.569m
Hệ số cản lăn	0.015
Đường kính bánh xe	0.287m
Tỉ số truyền lực cuối	3.93
ICE công suất tối đa/ mô men xoắn	43kW/102Nm @4000rpm
EM công suất tối đa/ mô men xoắn	30kW/305Nm
EG công suất tối đa/mô men xoắn	15kW/55Nm
Dung lượng ắc qui / Điện áp	1.872kWh/288V

Bộ phân phối 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 [4]:

$$\omega_s R_s + \omega_r R_r = \omega_c (R_s + R_r) \quad (1)$$

Trong đó, R_r và R_s là bán kính của bánh răng bao và bánh răng mặt trời. Trong Toyota Prius, máy phát được nối trực tiếp với bánh răng mặt trời, mô tơ nối với bánh răng bao và động cơ đốt trong (ICE) nối trực tiếp với các bánh răng hành tinh. Các bánh xe được kết nối với bánh răng bao qua bộ vi sai. Với tỉ số truyền vi sai (r_{final}) và tỉ số (i) giữa bánh răng bao và bánh răng mặt trời, (1) có thể được viết lại như sau:

$$\frac{i}{r_{final}} \omega_w + \omega_{EG} = \omega_{ICE} (1 + i) \quad (2)$$

Trong đó, ω_w , ω_{EG} , và ω_{ICE} lần lượt là tốc độ của bánh xe, máy phát và động cơ.

Theo phương trình (2), mối quan hệ giữa tốc độ động cơ và tốc độ bánh xe được xác định không chỉ bởi tỷ số truyền i mà còn phụ thuộc vào tốc độ máy phát.

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

$$\omega_{EM} = \frac{1}{r_{final}} \omega_w \quad (3)$$

Tốc độ máy phát điện được xác định

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

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 là:

$$T_d = \frac{1}{r_{final}} (T_r + T_{EM}) = \frac{1}{r_{final}} \left(T_{EM} + \frac{i}{i+1} T_{ICE} \right) \quad (5)$$

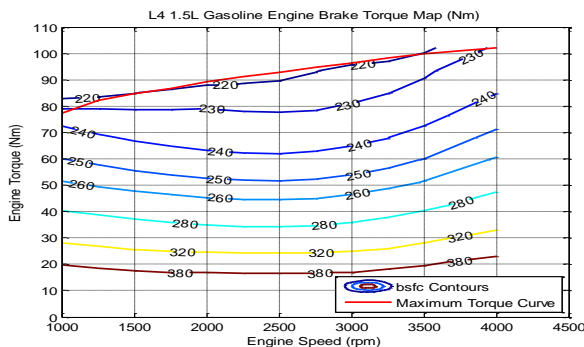
Trong đó T_d , T_r , T_{EM} , và T_{ICE} lần lượt là mô men kéo tại bánh xe, bánh răng bao, mô tơ và động cơ.

Tính tiêu hao nhiên liệu của động cơ:

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

$$\dot{m}_f = f(T_{ICE}, \omega_{ICE}) \quad (6)$$

Trong nghiên cứu này, lượng nhiên liệu tiêu hao của Toyota Prius đã được ước tính bằng đồ thị đặc tính tiêu hao nhiên liệu của động cơ từ thực nghiệm được thể hiện trong hình 2.



Hình 2. Đồ thị đặc tính tiêu hao nhiên liệu của ICE

Tương tự, việc mô phỏng mô tơ và máy phát điện cũng được thực hiện dựa vào đồ thị đặc tính hiệu suất động cơ / máy phát theo mô men và tốc độ. Chúng được mô tả theo các thông số thực nghiệm như bảng dữ liệu 2-D trong mô hình mô phỏng.

Động lực học của xe [6]:

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

$$m\dot{V}_x = F_x - C_a V_x^2 - R_x - mg \sin(\theta) \quad (7)$$

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 [7]:

Động lực học của bánh xe, được gộp vào một bánh xe ảo, được xác định bởi:

$$I_w \dot{\omega}_w = T_d - T_{brake} - r_w F_x \quad (8)$$

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

Trạng thái sạc ắc quy (SOC) [8]:

Nguồn điện cung cấp bởi ắc quy, và nguồn điện sạc ắc quy đã được xác định bởi

$$P_{batt} = \eta^k T_{EG} \omega_{EG} + \eta^k T_{EM} \omega_{EM} + P_{acc} \quad (9)$$

η là hiệu suất chuyển đổi cơ - điện, P_{acc} là công suất phụ tải điện, $k = -1$ trong quá trình xả và $k = 1$ trong quá trình sạc.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN MÔ MEN KÉO

Phần này trình bày chiến thuật điều khiển để tối ưu hóa tiêu thụ nhiên liệu của xe cùng với việc duy trì SOC ở mức tối ưu. Chiến thuật điều khiển phải tuyệt đối tuân thủ theo yêu cầu của người lái.

Các tiêu chí thiết kế cho bộ điều khiển được thiết lập dựa vào các vùng làm việc tối ưu của các bộ phận chính trên xe lai động

ơ-điện như: động cơ đốt trong (ICE), ắc qui nạp hoặc xả và động cơ điện (EM). Theo đồ thị đặc tính tiêu hao nhiên liệu, vùng hoạt động tối ưu của ICE ở tốc độ 1500-3500 vòng / phút và mô men xoắn đầu ra từ 60 đến 100 Nm. Tương tự như vậy, EM nên được điều khiển để hoạt động ở mô men xoắn dưới 150Nm. Vùng tối ưu cho quá trình phóng nạp của ắc qui ở mức SOC trung bình khoảng từ 0,5 đến 0,7 [5].

Bộ điều khiển lực kéo được thiết kế theo các chiến thuật đề xuất sau:

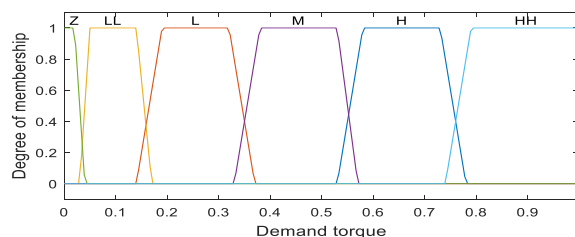
Trường hợp đầu tiên, khi SOC thấp. Nếu mô men yêu cầu thấp, ICE cần được điều khiển để hoạt động ở khu vực tối ưu. Nếu mô men yêu cầu trung bình hoặc cao, ICE được điều khiển để tạo ra mô men cao hơn nhằm đáp ứng cả mô men yêu cầu đồng thời sạc bổ sung cho ắc qui (ắc qui nạp điện).

Trường hợp thứ hai, khi SOC trung bình. Nếu mô men yêu cầu thấp, ICE được tắt. Nếu mô men yêu cầu trung bình, ICE được điều khiển để hoạt động ở khu vực tối ưu. Tương tự, nếu mô men yêu cầu cao, thì ICE được điều khiển để tạo ra mô men trong vùng tối ưu. Lượng mô men còn thiếu được cung cấp bởi mô tơ (do ắc qui cung cấp điện).

Đối với trường hợp cuối cùng, khi SOC cao. Nếu mô men yêu cầu thấp hoặc trung bình, ICE nên được tắt. Xe được hoạt động như một chiếc xe điện thuần túy. Nếu mô men yêu cầu cao, ICE được điều khiển để tạo ra mô men tối ưu. Lượng mô men còn thiếu được cung cấp bởi mô tơ (do ắc qui cung cấp điện).

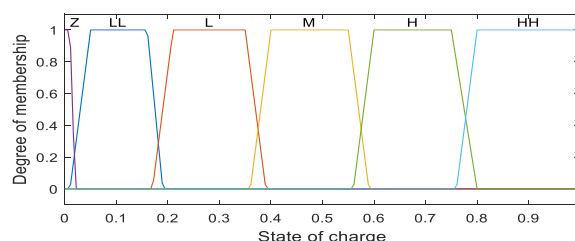
Từ những phân tích trên, ba tín hiệu đầu vào của bộ điều khiển lực kéo dùng logic mờ bao gồm mô men yêu cầu, SOC và tốc độ xe. Để tăng tính tổng quát, tất cả các tín hiệu đầu vào và đầu ra được chuẩn hóa trong mức [0, 1]. Các tín hiệu đầu vào này được xác định như sau.

Tín hiệu đầu vào mô men kéo yêu cầu: là mô men yêu cầu từ người lái và được chia thành sáu hàm thành phần khác nhau như trong hình 3.



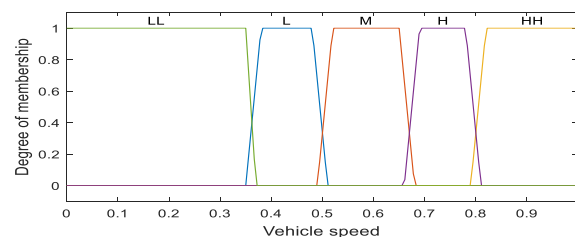
Hình 3. Mô men kéo yêu cầu

Tín hiệu đầu vào SOC: do vùng hoạt động tối ưu của ắc qui từ 0.5 đến 0.7 nên các hàm thành phần tập trung trong vùng [0,45, 0,75], và phân tán trong những vùng [0, 0.45] và [0.75, 1]. Các chức năng hàm thành phần được thể hiện trong hình. 4.



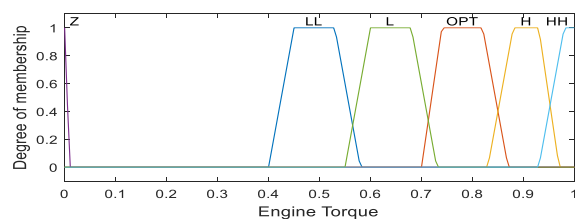
Hình 4. Tín hiệu đầu vào SOC

Tín hiệu đầu vào tốc độ xe: tương tự nó cũng được mô tả bởi sáu hàm thành phần như thể hiện trong hình. 5.

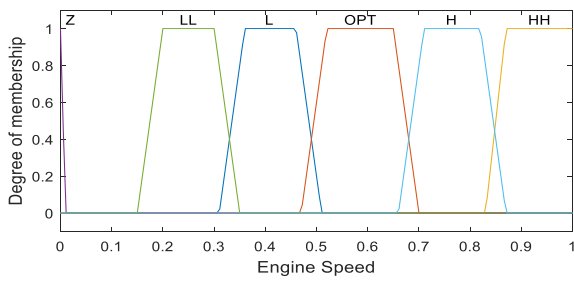


Hình 5. Tín hiệu đầu vào tốc độ xe

Hai tín hiệu đầu ra của bộ điều khiển fuzzy là mô men và tốc độ của ICE. Các hàm thành phần của đầu ra sẽ bằng không khi động cơ tắt (tốc độ thấp) và tập trung chủ yếu khu vực vận hành tối ưu của động cơ đốt trong như hình 6 và 7.

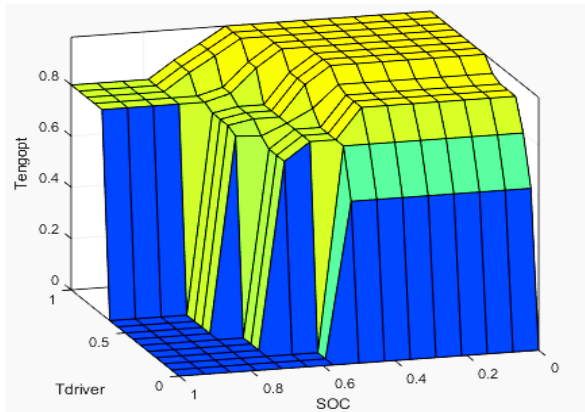


Hình 6. Tín hiệu đầu ra mô men của ICE



Hình 7. Tín hiệu đầu ra tốc độ của ICE

Dựa vào các tín hiệu đầu vào, các luật điều khiển được xây dựng theo chiến thuật mô tả phần trên, kết quả tính toán mô men và tốc độ động cơ được biểu diễn dạng đồ thị mặt 3D như hình 8.

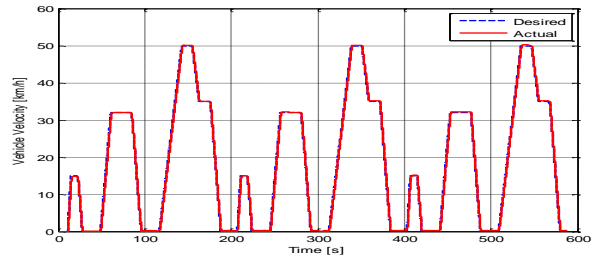


Hình 8. Kết quả của bộ điều khiển bằng logic mờ.

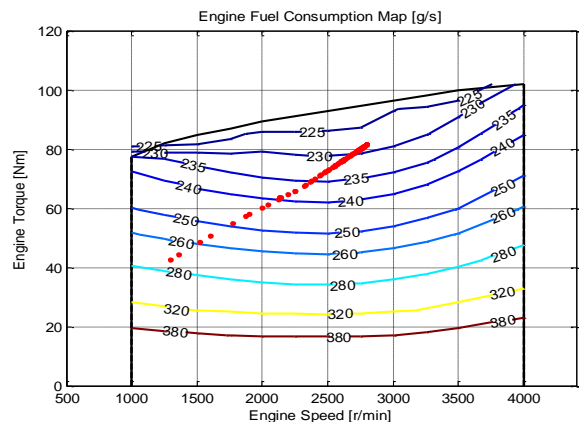
4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Thiết lập bộ điều khiển mô men kéo và thực hiện mô phỏng hoạt động của xe Prius trong Simulink, sử dụng ba chu trình lái xe tiêu biểu ECE-15, NEDC và UDSS. Hình 9 cho thấy tốc độ xe mô phỏng và tốc độ xe mong muốn theo chu trình ECE-15. Vận tốc của xe gần như trùng với tốc độ xe mong muốn. Hình 10 thể hiện các điểm hoạt động của động cơ trên đồ thị đặc tính tiêu hao nhiên liệu. Các điểm hoạt động chủ yếu tập trung vào vùng tối ưu. Tương tự, hình 11 và hình 12 mô tả các điểm hoạt động của mô tơ và máy phát trên đồ thị đặc tính hiệu suất của chúng. Phần này các điểm hoạt động của mô tơ cũng nằm chủ yếu ở khu vực có hiệu suất cao. Hình 12 thể hiện tình trạng sạc ắc qui trong khi xe vận hành theo chu trình ECE-15. SOC tại thời điểm bắt đầu và kết thúc là gần như nhau tại 0,6. Trong suốt quá trình vận

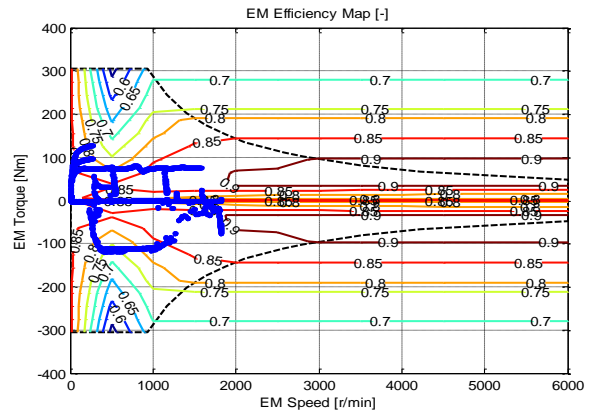
hành theo chu trình này, SOC của ắc qui thay đổi nhưng luôn hoạt động ở phạm vi tối ưu.



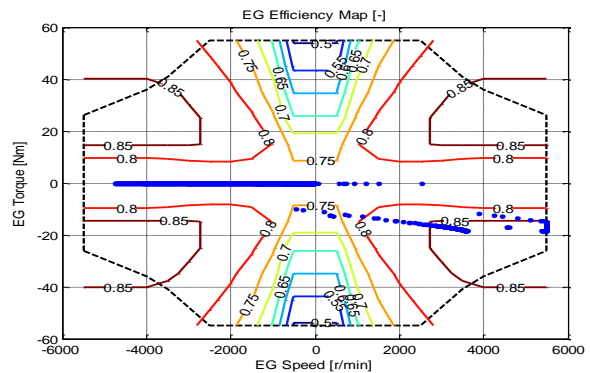
Hình 9. Vận tốc mô phỏng và vận tốc mong muốn của xe trong chu trình ECE-15



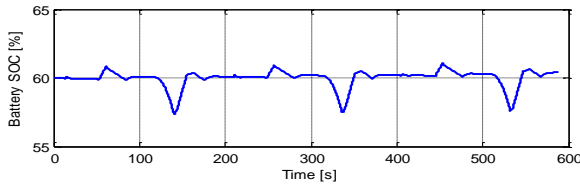
Hình 10. Các điểm hoạt động của ICE



Hình 11. Các điểm hoạt động của EM



Hình 12. Các điểm hoạt động của EG



Hình 13. Sự thay đổi SOC của ắc qui trong chu trình ECE-15

Để đánh giá hoạt động của các bộ điều khiển vừa thiết kế, kết quả mô phỏng trên đã được so sánh với kết quả mô phỏng không sử dụng logic mờ của ADVISOR. Bảng 2 cho thấy các kết quả của mô hình điều khiển logic mờ (FLC) và ADVISOR trong các chu trình thử cụ thể.

Bảng 2. Tiêu hao nhiên liệu và hiệu năng.

Mục	FLC L/100km	ADVISOR (L/100km)	Kết quả (%)
ECE-15	4.32	6.27	31.1
NEDC	3.71	5.09	27.11
UDDS	3.89	4.86	19.96
Thời gian tăng tốc từ 0-100 km/h	11.2s	16.2s	-5 s

Từ so sánh trên ta thấy mô hình thực hiện với chiến thuật điều khiển logic mờ mới đã đạt được hiệu quả tốt hơn trong các quá trình mô phỏng theo các chu trình thử khác nhau. Tất cả các bộ phận chính của xe lai như ICE, EM và ắc qui đã được vận hành ở các

vùng tối ưu. Tính kinh tế nhiên liệu đã tăng lần lượt 31,1%, 27,11% và 19,96% tùy theo chu kỳ lái xe ECE-15, NEDC và UDDS, khả năng tăng tốc cũng tăng từ 16,2 lên 11,2 giây ở tốc độ từ 0 đến 100 km/h. Do đó, việc đề xuất chiến thuật điều khiển được thiết kế từ đồ thị đặc tính hiệu suất (ICE, EM và ắc qui) đã thành công trên hệ thống HEV kiểu hỗn hợp.

Từ kết quả trên, mô hình thực hiện với bộ điều khiển phân phối lực kéo dùng logic mờ đã đạt được hiệu quả cao trong quá trình phân phối công suất và quản lý năng lượng, đặc biệt là khi xe vận hành trong đô thị (ECE-15).

5. KẾT LUẬN

Bộ điều khiển lực kéo ứng dụng logic mờ cho xe lai động cơ-điện kiểu hỗn hợp đã được thực hiện và chứng minh sự thành công. Bộ điều khiển lực kéo 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. Kết quả mang lại hiệu suất tốt hơn và tiết kiệm nhiên liệu đáng kể.

Bộ điều khiển phân phối lực kéo luôn đáp ứng các yêu cầu của quá trình điều khiển theo tín hiệu bàn đạp ga, ắc qui luôn cung cấp đủ năng lượng đáp ứng theo từng chế độ vận hành của xe HEVs và luôn đảm bảo sự ổn định của xe trong suốt quá trình vận hành và tiết kiệm nhiên liệu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] W. Wang, *Revisions on the Model of Toyota Prius in ADVISOR 3.1*, SAE Tech., 2002-01-0993, 2002.
- [2] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, pp. 461-469, Springer, 2012
- [3] Advanced Vehicle Simulator, *ADVISOR of the National Renewable Energy Laboratory (NREL) of US Department of Energy*, 2002.
- [4] Mehrdad Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, *Morden electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: Fundamentals, theory, and design*, 2nd ed 2010: CRC Press.
- [5] M. Amiri, et al., *Feed-forward modelling and fuzzy logic based control strategy for powertrain efficiency improvement in a parallel hybrid electric vehicle*, Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 15, 2009, pp. 191-207.
- [6] Miller JM. Hybrid Electric Vehicle Propulsion System Architectures of the e-CVT Type. *IEEE Trans. on Power Electronic* 2006: 756-767

- [7] Guzzella L and Sciarretta A. *Vehicle Propulsion Systems*. 3rd ed. New York: Springer Heidelberg, 2013. p. 87-91.
- [8] Rajamani R. *Vehicle Dynamics and Control*. 2nd ed. New York: Springer, 2012. p. 248-253.

Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:

Huỳnh Quốc Việt

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM, Việt Nam

Email: viethq@hcmute.edu.vn