

MÔ HÌNH HÓA VÀ MÔ PHỎNG DÒNG NĂNG LƯỢNG TRONG HỆ THỐNG XE HYBRID SỬ DỤNG OCTAVE

MODELING AND SIMULATION OF ENERGY FLOW IN HYBRID VEHICLE SYSTEMS USING OCTAVE

Lê Thượng Hiền*, Ngô Sỹ Đồng, Nguyễn Thanh Thủy

Trường Đại học Điện lực

*Email: hienlt@epu.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày phương pháp mô hình hóa toán học và mô phỏng hệ thống điều khiển xe Hybrid (HEV) dựa trên cấu trúc bộ chia công suất (Power Split Device - PSD). Nghiên cứu tập trung vào việc xây dựng hệ phương trình động lực học cho Động cơ đốt trong (ICE), hai máy điện (MG1, MG2) và hệ thống lưu trữ năng lượng (Battery). Các thuật toán điều phối năng lượng của bộ điều khiển xe (HV ECU) và sự ảnh hưởng của phụ tải điều hòa (A/C) được tích hợp để đánh giá trạng thái sạc (SoC) của pin. Kết quả mô phỏng trên phần mềm Octave cho thấy sự tương quan chặt chẽ giữa các thành phần cơ - điện trong hệ thống.

Từ khóa: Xe hybrid; Bộ chia công suất; Mô phỏng.

ABSTRACT

This paper presents a mathematical modeling and simulation method for a Hybrid Vehicle (HEV) control system based on a Power Split Device (PSD) architecture. The study focuses on developing the dynamic equations for the Internal Combustion Engine (ICE), two electric motors (MG1, MG2), and the energy storage system (Battery). Energy coordination algorithms for the HV ECU controller and the influence of the air conditioning (A/C) load are integrated to evaluate the battery's State of Charge (SoC). Simulation results using Octave software show a strong correlation between the electromechanical components in the system.

Keywords: Hybrid Vehicle; PSD; Octave Simulation.

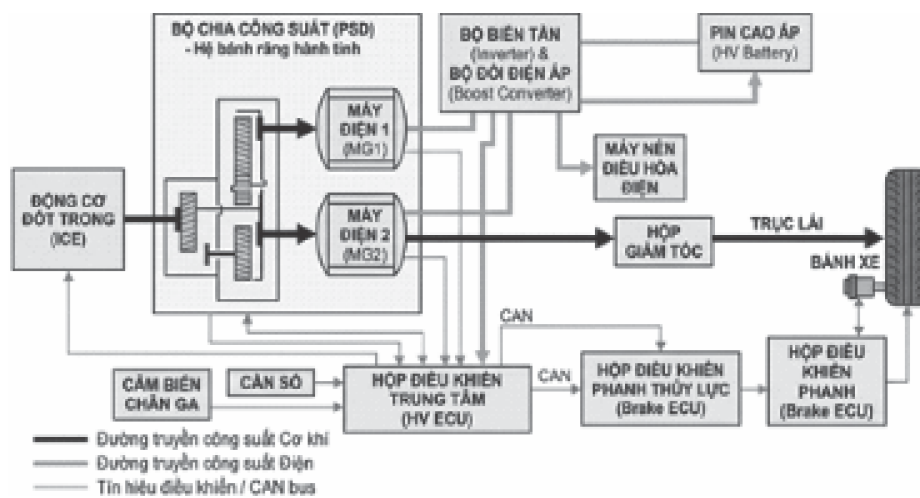


1. GIỚI THIỆU

Hệ thống xe Hybrid, đặc biệt là dòng xe sử dụng bộ truyền động hành tinh (như Toyota Prius), đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa hiệu suất nhiên liệu. Sơ đồ hệ thống bao gồm sự phối hợp phức tạp giữa các đơn vị điều khiển điện tử (ECU), bộ biến tần (Inverter) và các thành phần cơ khí [1, 2]. Việc mô hình hóa chính xác dòng năng lượng là bước tiên quyết để phát triển các thuật toán điều khiển tối ưu.

Hệ thống bao gồm các khối chức năng chính được kết nối thông qua mạng CAN và các đường truyền công suất (Hình 1):

- HV ECU: Trung tâm điều phối, nhận tín hiệu từ cảm biến bàn đạp ga và phanh.
- Planetary Gear Unit (PSD): Bộ bánh răng hành tinh kết nối ICE, MG1 và MG2.
- Hệ thống điện áp cao: Bao gồm Pin HV, Inverter, Boost Converter và A/C Converter.



Hình 1. Sơ đồ hệ thống cấu trúc xe Hybrid và nguồn năng lượng

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC

2.1. Động học bộ chia công suất (PSD)

Mối quan hệ vận tốc góc giữa bánh răng mặt trời (Sun - MG1), bánh răng bao (Ring - MG2) và giá hành tinh (Carrier - ICE) được xác định bởi tỷ số răng $k = \frac{Z_r}{Z_s}$.

$$\omega_c = \frac{k}{k+1} \omega_r + \frac{1}{k+1} \omega_s \quad (1)$$

Trong đó:

+ ω_c : Tốc độ quay của giá hành tinh, kết

nối trực tiếp với trục khuỷu động cơ xăng (ICE).

+ ω_r : Tốc độ của bánh răng bao, tỉ lệ thuận với vận tốc xe (kết nối với MG2 và vi sai).

Để minh họa trực quan mối quan hệ này, sơ đồ đòn bẩy (Lever Analogy) được sử dụng để phân tích sự cân bằng tốc độ và mô-men.

2.2. Động lực học mô-men xoắn và Pin

Trạng thái sạc (SoC) được xác định dựa trên tổng dòng điện xả từ các thành phần:

$$SoC(t) = SoC(0) - \int_0^t \frac{(T_{mg1} \omega_s + T_{mg2} \omega_r + P_{ac} + P_{aux})}{V_{batt} \cdot C_{cap} \cdot 3600} d\tau \quad (2)$$

Trong đó:

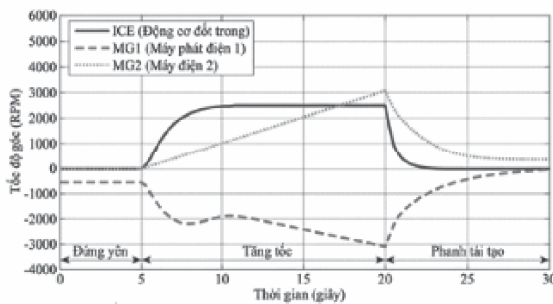
Ký hiệu	Tên gọi	Đơn vị	Ý nghĩa vật lý
SoC(t)	Trạng thái sạc tại thời điểm t	%	Tỉ lệ năng lượng còn lại trong pin so với dung lượng định mức.
SoC(0)	Trạng thái sạc ban đầu	%	Mức pin tại thời điểm bắt đầu mô phỏng (ví dụ: 60%).
$T_{mg1} \cdot \omega_s$	Công suất điện MG1	W	Công suất tức thời của máy phát MG1. Thường có giá trị âm (đang nạp pin).
$T_{mg2} \cdot \omega_r$	Công suất điện MG2	W	Công suất tức thời của mô-tơ MG2. Dương khi kéo xe, âm khi phanh tái tạo.
P_{ac}	Công suất điều hòa	W	Năng lượng tiêu thụ bởi máy nén điện (Electric Inverter Compressor).
P_{aux}	Công suất phụ tải	W	Năng lượng cho hệ thống 12V (đèn, ECU, quạt) qua bộ DC-DC Converter.
V_{batt}	Điện áp pin	V	Điện áp định mức của khối pin cao áp
C_{cap}	Dung lượng pin	Ah	Khả năng lưu trữ điện tích của pin.
$d\tau$	Biến tích phân	-	Đại diện cho bước thời gian siêu nhỏ trong quá trình tính toán.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

Mô phỏng được thực hiện trên Octave trong 30 giây với các giai đoạn: Đứng yên (0-5s), Tăng tốc (5-20s) và Phanh tái tạo (20-30s).

3.1. Phân tích tốc độ góc các thành phần

Hình 2 cho thấy sự phối hợp giữa ICE và các mô-tơ. Khi xe đứng yên nhưng cần bật điều hòa hoặc sạc pin, MG1 quay để khởi động ICE.



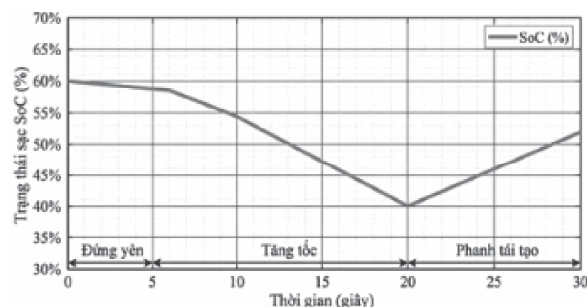
Hình 2. Tốc độ góc (RPM) của ICE, MG1 và MG2 trong các chu trình lái.

Kết quả mô phỏng minh chứng rõ rệt cho khả năng biến thiên vô cấp điện tử (e-CVT) của bộ chia công suất. Khác với hộp số cơ khí truyền thống, tốc độ của ICE trong mô hình không phụ thuộc tuyến tính vào tốc độ xe. Khi xe tăng tốc (từ giây thứ 5 đến 20), tốc độ MG1 giảm xuống giá trị âm. Theo phương trình (1), việc này cho phép tốc độ của ICE duy trì ở mức 2500 v/p là vùng có hiệu suất nhiệt tối ưu ngay cả khi tốc độ xe đang thay đổi. Kết quả này tương đồng với các thực nghiệm trên dòng xe Toyota Prius thế hệ thứ 3 được công bố trong nghiên cứu của Guzzella [2], nơi ICE được giữ ở đường đặc tính tiêu hao nhiên liệu thấp nhất.

3.2. Biến thiên trạng thái sạc (SoC)

Hình 3 thể hiện sự sụt giảm (SoC) khi hệ thống sử dụng điện để hỗ trợ tăng tốc và duy trì máy nén điều hòa ($P_{ac} = 1500W$). Tại giây thứ 20, khi thực hiện phanh tái tạo, MG2 đảo chiều mô-men để nạp lại điện, làm đường cong SoC đi lên. So sánh với nghiên cứu của K. Chau [3] thì hiệu suất thu hồi năng lượng

trong mô hình đạt khoảng 65-70% (sau khi trừ tổn thất tại biến tần). Kết quả này nằm trong dải cho phép của các hệ thống phanh phối hợp.



Hình 3. Biến thiên trạng thái sạc SoC của Pin cao áp.

3.3. Phân bổ mô-men xoắn

Sự phân bổ mô-men giữa phanh điện (MG2) và phanh thủy lực được điều khiển bởi bộ ECU để đảm bảo an toàn và thu hồi năng lượng tối đa [3, 4].

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã cung cấp một cái nhìn chi tiết về sự tương tác giữa các thành phần điện và cơ khí trong hệ thống hybrid. Việc sử

dụng Octave để giải hệ phương trình động lực học thời gian thực cho thấy đây là một công cụ mạnh mẽ, tiết kiệm chi phí cho việc thiết kế và thử nghiệm sơ bộ các chiến thuật quản lý năng lượng (EMS). ♦

Ngày nhận bài: **29/12/2025**

Ngày phản biện: **15/01/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Toyota Motor Corporation, “*Toyota Hybrid System - Service Guide*”, 2022.
- [2]. L. Guzzella and A. Sciarretta, “*Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*”. Springer, 2013.
- [3]. Chau, K.T., “*Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application*”. John Wiley & Sons Ltd., Singapore., 2015.
- [4]. Zipan Nie, Nigel Schofield, “*Analysis and Comparison of Power Electronic Converters for Conventional and Toroidal Switched Reluctance Machines*”. Energy and Power Engineering, Vol.9, No.4, April 2017, 241-259.