

## Tối ưu hóa quản lý năng lượng trên ô tô lai kiểu song song dựa trên giải thuật quy hoạch động

Optimization of energy management in parallel hybrid vehicles based on dynamic programming algorithm

Trần Văn Hùng<sup>1</sup>, Phạm Hoàng Tú<sup>2</sup>, Đoàn Thanh Sơn<sup>2</sup>, Châu Trung Thành<sup>3</sup>,  
Hứa Huỳnh Đức<sup>3</sup>, Châu Trung Tín<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Bình Dương

<sup>2</sup>Trường Đại học Văn Lang

<sup>3</sup>Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

Tác giả liên hệ: Trần Văn Hùng. Email: tvhung@bdu.edu.vn

**Tóm tắt:** Ô tô lai điện đang chứng tỏ được ưu điểm về tiết kiệm nhiên liệu và thân thiện với môi trường, để nâng cao ưu điểm này ô tô lai điện cần có một chiến lược tối ưu hóa và quản lý năng lượng hiệu quả. Nghiên cứu này trình bày phương pháp áp dụng và triển khai chiến lược quản lý năng lượng ô tô lai điện kiểu song song dựa trên giải thuật quy hoạch động. Giải thuật được triển khai mô phỏng đánh giá thông qua việc áp dụng chu trình lái thử trong đô thị (USSD) của cơ quan Bảo vệ Môi trường Hoa kỳ (EPA) trên phần mềm Matlab. Kết quả mô phỏng thể hiện hiệu suất tiết kiệm nhiên liệu trên chu trình thử tương ứng với mỗi trạng thái nạp khác nhau của pin.

**Từ khóa:** *Quản lý năng lượng; quy hoạch động; tối ưu hóa; xe lai điện*

**Abstract:** In this paper, the P&O algorithm in the technique of controlling maximum power point trackers applied in inverters to obtain the maximum power generated from the solar system is presented. Solar panels have non-linear voltage and current characteristics that depend on temperature and irradiance reaching PV panels and PV arrays have a unique point of being able to generate power maximum at each time point. The characteristics of solar radiation reaching the photovoltaic system are not stable at sunny times of the day, it is often changed by other factors such as partial cloud cover, total cloud cover or intensity, radiation varies by hour, by day and by season. As a result, the conversion of photovoltaic energy into electricity of PV panels will be changed. The power generated by the PV system is unstable, leading to low conversion efficiency. The application of algorithms in MPPT control technique to find the point that can generate the maximum power at any time in order to maximize the power received from the solar system. This paper will present simulation results to prove the correctness of the proposed method.

**Keywords:** *Dynamic Programming; Energy management; HEVs; Optimization; USSD*

### 1. Đặt vấn đề

Thiếu nhiên liệu và ô nhiễm môi trường đang là thách thức lớn đối với sự phát triển của mỗi quốc gia. Đứng trước tình hình đó có nhiều biện pháp được đề xuất để giảm tình trạng này, nổi bật trong đó có chuyển đổi các loại phương tiện giao thông sử dụng nhiên liệu hóa thạch truyền

thống bằng các loại phương tiện sử dụng năng lượng mới. Ô tô hybrid được xem là loại phương tiện sử dụng năng lượng mới vì có hệ truyền động kết hợp giữa một động cơ điện và một động cơ đốt trong. Một số ô tô hybrid có thể sạc điện (plug-in hybrid) sử dụng điện lưới để sạc nhằm tăng hiệu suất về nhiên liệu và quãng

đường đi. Ô tô hybrid nổi bật lên với ưu điểm về tính kinh tế, lượng khí thải thấp và phạm vi hoạt động rộng. Do đó, loại phương tiện này nhận được sự quan tâm rộng rãi và phát triển nhanh chóng. Song song với sự phát triển của khoa học kỹ thuật, ô tô hybrid cũng ngày càng được phát triển mạnh mẽ và tiến bộ hơn. Bộ điều khiển hybrid (HCU) được xem là thành phần cốt lõi của hệ thống điều khiển hybrid. Bộ điều khiển này chịu trách nhiệm điều phối việc phân bổ mô men xoắn của động cơ đốt trong và động cơ điện. Bên cạnh đó, bộ điều khiển HCU cũng kiểm soát các quá trình như chuyển số, đóng ngắt ly hợp để đạt hiệu suất tiết kiệm nhiên liệu tối ưu và sự thoải mái khi vận hành ô tô.

Mặt khác, quản lý năng lượng cũng là một nhiệm vụ quan trọng của HCU. Việc quản lý năng lượng này cần phải có chiến lược cụ thể, có thể nói đây là vấn đề kiểm soát việc phân phối công suất giữa nhiều nguồn công suất khác nhau để tạo lực đẩy xe đi trong khi vẫn đáp ứng các điều kiện ràng buộc cụ thể. Trong những năm gần đây, có nhiều nghiên cứu về điều khiển tối ưu và đã xuất hiện nhiều thuật toán mới đặc biệt là áp dụng vào các chiến lược quản lý năng lượng trên xe lai. Nhìn chung, các thuật toán điều khiển và quản lý năng lượng trên xe điện hybrid có thể được chia thành hai loại: thuật toán điều khiển dựa trên quy tắc và thuật toán điều khiển dựa trên lý thuyết tối ưu hóa. Các thuật toán điều khiển dựa trên lý thuyết tối ưu hóa được chia thành các thuật toán tối ưu hóa thời gian thực và thuật toán tối ưu hóa toàn cục.

Đối với chiến lược điều khiển dựa trên quy tắc, hệ thống truyền động được điều khiển dựa trên phỏng đoán hoặc trực giác.

Nghiên cứu [1] trình bày chiến lược điều khiển kết hợp hiệu suất tức thời của động cơ đốt trong, động cơ điện và pin với các điều kiện vận hành thực tế của động cơ có đốt trong, động cơ điện, nhiệt độ pin và phanh tái sinh để tìm ra sự kết hợp tốt nhất giữa năng lượng của hai động cơ. Từ đó giúp xác định điểm làm việc tối ưu của cả hai động cơ này theo nguyên lý hiệu suất tối ưu của hệ thống. Tài liệu [2] đề xuất chiến lược điều khiển mờ dùng tỉ lệ mô men xoắn cần thiết với mô men xoắn tối ưu của động cơ, trạng thái nạp của pin (SoC) để làm dữ liệu đầu vào. Đầu ra là hệ số mô men xoắn tối ưu của động cơ, kết quả đã nâng cao khả năng tiết kiệm nhiên liệu. Nghiên cứu [3] đã tối ưu hóa chiến lược điều khiển mờ thông qua các điều kiện ràng buộc về hiệu suất kinh tế và hiệu suất phát thải của thuật toán di truyền để đạt được hiệu quả kinh tế tốt hơn và giảm phát thải trong các điều kiện NEDC điển hình. Các nghiên cứu về chiến lược điều khiển dự trên quy tắc được thực hiện dựa trên các dữ liệu thử nghiệm và kinh nghiệm của các kỹ sư. Điểm yếu của chiến lược này không thể thay đổi thích nghi sau khi vận hành ô tô, do đó không thể khắc phục được sự biến đổi các tham số của ô tô gây ra bởi sự giảm độ bền mỗi của kim loại tại các bộ phận. Bên cạnh đó, chiến lược cũng có những hạn chế về thời gian thực và độ ổn định của hệ thống nên không thể giảm mức tiêu thụ nhiên liệu và lượng khí phát thải một cách tốt nhất.

Mặt khác, tài liệu [4] đề xuất chiến lược giảm thiểu mức tiêu thụ tương đương (ECMS) dựa trên kỹ thuật Heuristic. Chiến lược này triển khai xác định nhu cầu mô-men xoắn của điều kiện làm việc hiện tại từ sự khác biệt giữa tốc độ của chu kỳ và tốc độ xe thực tế; xác định chế độ

làm việc hiện tại thông qua chiến lược điều khiển. Năng lượng điện trong hệ thống hybrid tương đương với mức tiêu thụ nhiên liệu ở dạng hệ số tương đương và thuật toán ECMS được sử dụng để xác định mức phân bổ năng lượng tối ưu tức thời nhằm xác định mức tiêu thụ nhiên liệu tương đương tối thiểu. Tương tự, nghiên cứu [5] đã sử dụng thông số mô men xoắn yêu cầu linh hoạt để tối ưu hóa lệnh chuyển đổi và phân bổ mô men xoắn dựa trên thuật toán ECMS. Nghiên cứu [6] đề xuất phương pháp quản lý năng lượng dựa trên nguyên lý tối thiểu Pontryagin (A-PMP) gần đúng, sử dụng hàm Hamilton gần đúng để cùng tối ưu hóa việc phân bổ mô-men xoắn, lệnh chuyển số và hiệu suất lão hóa pin trong khung PMP gần đúng. Mặc dù thuật toán điều khiển tối ưu hóa thời gian thực bỏ qua ảnh hưởng của nhiều điều kiện, chẳng hạn như điều kiện lái xe và quãng đường. Tuy nhiên, hiệu quả điều khiển của thuật toán không tốt bằng thuật toán tối ưu toàn cục.

Tài liệu [7] đề xuất giải thuật quy hoạch động nhanh tối ưu hóa gần đúng (Rapid-DP) dựa trên nền tảng của phương pháp DP, giúp giảm thời gian xử lý và đưa ra quyết định một cách hiệu quả. Kết hợp với tính năng tối ưu hóa bầy đàn (PSO), đã chứng minh rằng cấu hình đa chế độ với thông số thành phần tốt nhất là tiết kiệm nhiên liệu nhất. Tương tự, tài liệu [8] đã đề xuất hai phương pháp để cải thiện việc triển khai DP, nhờ đó thời gian tính toán đã giảm tới 66% khi nghiên cứu ba cấu trúc liên kết hệ thống lực hybrid khác nhau. Nghiên cứu [9] trình bày bài toán phân bổ nhu cầu công suất truyền động tối ưu giữa các bộ truyền động khác nhau (động cơ đốt trong và động cơ điện) trong xe plug-in hybrid sử dụng quy

hoạch động ngẫu nhiên để tối ưu hóa chiến lược quản lý năng lượng của hệ thống hybrid. Về việc cải thiện khả năng tiết kiệm nhiên liệu, chiến lược quản lý năng lượng được tối ưu hóa toàn cục thực sự có thể cải thiện hiệu quả kiểm soát, nhưng cần phải biết trước điều kiện làm việc của xe. Mặt khác, khi quãng đường của điều kiện làm việc tăng lên, lượng tính toán và thời gian tính toán của phương pháp tối ưu hóa toàn cục cũng tăng lên đáng kể.

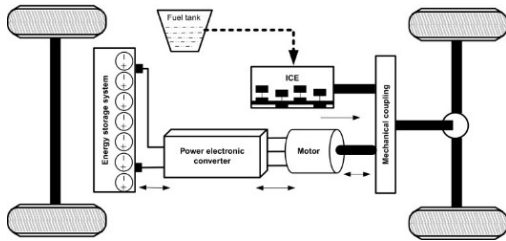
Nhìn chung, chiến lược điều khiển dựa trên tối ưu hóa cho thấy hiệu quả tiết kiệm nhiên liệu tốt hơn so với chiến lược điều khiển dựa trên quy tắc, nhưng chiến lược điều khiển dựa trên quy tắc được áp dụng nhiều hơn khi triển khai với vai trò là bộ điều khiển phương tiện theo thời gian thực. Quy hoạch động là một trong những chiến lược điều khiển dựa trên tối ưu hóa mang lại hiệu suất tiết kiệm nhiên liệu vượt trội [2]. Dynamic program (DP) là thuật toán nổi tiếng có thể giải quyết vấn đề phức tạp bằng cách chia nó thành các vấn đề con đơn giản và biểu diễn nó dưới dạng đệ quy. Trong phân tích xe lai, DP có thể được sử dụng để tìm ra chiến lược điều khiển tối ưu cho hệ thống truyền động xe nhất định đối với chu trình lái xe được xác định trước.

Trong nghiên cứu này, thuật toán DP được triển khai nghiên cứu và mô phỏng trên HEV loại song song với chu trình lái xe được định trước. Trong phần 2, mô hình toán phương tiện được mô tả và phần 3 trình bày chiến lược quy hoạch động DP để phân bổ năng lượng. Kết quả mô phỏng được trình bày ở phần 4 và cuối cùng là kết luận ở phần 5.

## **2. Mô hình hóa hệ thống lai song song**

### **2.1. Cấu trúc hệ thống truyền động**

Sơ đồ nguyên lý, cấu trúc hệ thống xe hybrid song song được thể hiện trên Hình 1. Đối tượng nghiên cứu sử dụng cấu trúc song song một trục. Mô men đầu ra của động cơ động cơ đốt trong và động cơ điện được truyền tới các bánh xe bằng thiết bị kết hợp mô men, hộp số và bộ giảm tốc chính. Giao tiếp thời gian thực giữa bộ điều khiển thành phần và bộ điều khiển phương tiện được điều khiển bởi bộ điều khiển phương tiện.



**Hình 1.** Sơ đồ nguyên lý, cấu trúc hệ thống xe hybrid song song

Trong ô tô hybrid, các bộ phận như động cơ đốt trong, động cơ điện và hộp số có đặc tính động học phức tạp và khó có thể mô tả toán học toàn bộ quá trình động học. Vì vậy, nghiên cứu bỏ qua các yếu tố thứ cấp ảnh hưởng đến hệ thống nhằm đơn giản hóa và tạo điều kiện thuận lợi cho việc thiết kế các mô hình thành phần và quy tắc điều khiển, đồng thời đảm bảo mô hình có thể phản ánh được đặc tính động cơ bản của xe điện hybrid thực tế.

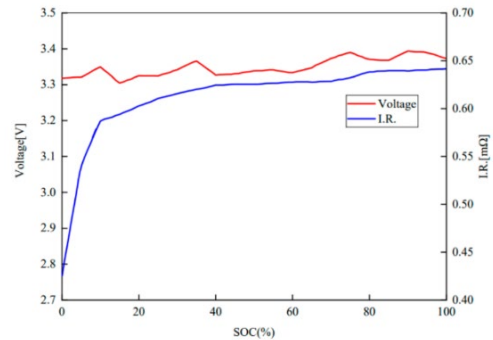
## 2.2. Các mô hình thành phần chính

### 2.2.1. Mô hình hóa pin

Pin là thiết bị lưu trữ năng lượng cực kỳ quan trọng đối với xe hybrid. Trong nghiên cứu này, tác giả phân tích khả năng tiết kiệm nhiên liệu và công suất của hệ thống hybrid ở điều kiện một chu trình kéo dài trong hơn 23 phút. Điện áp hở mạch và điện trở nội (R<sub>int</sub>) có sự thay đổi lớn nên ảnh hưởng không đáng kể [11].

Do đó, tác giả chọn mô hình Rint để áp dụng nghiên cứu.

Việc mô tả chi tiết các đặc tính của nguồn điện và các yếu tố ảnh hưởng rất phức tạp nên tác giả chỉ xét điện áp mạch hở và R<sub>int</sub> của pin là hàm của SoC theo dữ liệu thực nghiệm [12], và mối quan hệ chức năng được thể hiện trong đồ thị Hình 2. Từ đồ thị Hình 2, khi SoC của pin lớn hơn 10%, điện áp mạch hở của pin thay đổi trơn tru và phạm vi dao động tối đa chỉ là 4,29%; trong phạm vi SoC từ 0% đến 100%, R<sub>int</sub> của pin thay đổi nhỏ và phạm vi dao động tối đa chỉ là 5,08%. Nguồn pin và R<sub>int</sub> của pin ổn định.



**Hình 2.** Đồ thị liên hệ giữa trạng thái nạp, điện áp và công suất pin.

Mô hình pin nguồn chủ yếu được thiết lập bởi các hàm SoC. SoC hiện tại của pin nguồn được tính toán thông qua giá trị SoC ban đầu, điện dung của pin và dòng điện trong mạch, được sử dụng để thu được giá trị điện áp hở mạch và điện trở. Thông số đầu vào của toàn bộ mô hình là dòng điện của pin  $I_{bat}$  và tham số đầu ra là điện áp pin  $V_{bat\_out}$ . Mô hình toán học của pin điện được là:

$$V_{bat\_out} = V_{bat\_oc} - R_{bat} \cdot I_{bat} \quad (1)$$

$$R_{bat} = f_{batR}(x_{soc}) \quad (2)$$

$$V_{bat\_oc} = f_{bat_{oc}}(x_{soc}) \quad (3)$$

Trong đó:  $V_{bat\_out}$  là điện áp cực của pin;  $I_{bat}$  là dòng nạp và xả của pin;  $R_{bat}$  là điện trở nội tương đương của pin;  $V_{bat\_oc}$  là điện áp mạch hở thay đổi theo SoC.

SoC được tính bằng cách sử dụng thuật toán tích phân theo giờ:

$$SoC(t) = \frac{C \cdot SoC(t_0) - \int_{t_0}^t I_L dt}{C} \quad (4)$$

Trong đó:  $C$  là công suất của dòng điện (A.h);  $SoC_{t_0}$  là giá trị SoC ban đầu tại thời điểm  $t_0$

### 2.2.2. Mô hình động cơ đốt trong

MAP mức tiêu thụ nhiên liệu và mô-men xoắn của động cơ xăng điều khiển điện tử được thu thập bằng băng thử để mô tả các đặc tính bên ngoài của động cơ [13]. Mô hình toán học của động cơ bao gồm mô đun tính toán ga hiện tại, mô đun tính toán mô men xoắn và mô đun tính toán mức tiêu thụ nhiên liệu.

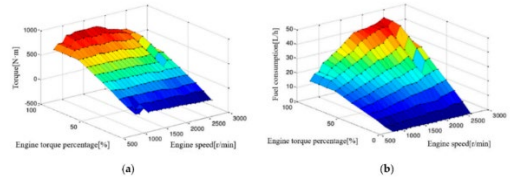
Việc tính toán ga động cơ cần xét đến ba trạng thái điều khiển của động cơ. Trạng thái đầu tiên là điều khiển tốc độ không tải của động cơ. Ở trạng thái đầu tiên, việc tính toán điều chỉnh PI được thực hiện theo tốc độ hiện tại và tốc độ không tải. Trạng thái thứ hai là điều khiển mômen động cơ, trong đó ga hiện tại của động cơ bằng với lệnh ga của động cơ. Trạng thái thứ ba là điều khiển tốc độ động cơ, đạt được bằng cách điều chỉnh tốc độ hiện tại và tốc độ mục tiêu. Sau khi tính toán ga ở ba trạng thái điều khiển, ga thực tế của động cơ lấy ba giá trị lớn nhất.

Mô đun tính toán mô men xoắn đầu ra tính toán mô men xoắn đầu ra của động cơ bằng tốc độ đầu ra của động cơ và lệnh khởi động động cơ, thể hiện trên Hình 3a.

Mô hình toán học của mô đun tính mô men xoắn:

$$T_{eng} = f(\alpha, n) \quad (5)$$

Trong đó:  $\alpha$  là ga của động cơ, phạm vi từ 0–100%;  $n$  là tốc độ động cơ hiện tại (rpm) và  $T_{eng}$  là mô-men xoắn thực tế của động cơ (Nm), dựa trên tốc độ động cơ hiện tại và các mức ga hiện tại.



(a) Mô men động cơ, (b) Tiêu hao nhiên liệu của động cơ

**Hình 3.** Bản đồ đặc tính mô-men xoắn động cơ và mức tiêu thụ nhiên liệu.

Mô-đun tính toán mức tiêu thụ nhiên liệu có thể thu được mức tiêu thụ nhiên liệu bằng cách nhập các thông tin như giá trị góc mở bướm ga và tốc độ đầu ra, như trên Hình 3b. Mô hình toán học của module tính toán tiêu hao nhiên liệu là

$$\dot{V}_{fuel} = f(T_{eng} n) \quad (6)$$

Trong đó:  $\dot{V}_{fuel}$  là mức tiêu thụ nhiên liệu tức thời (L/h) dựa trên mô men xoắn và tốc độ hiện tại.

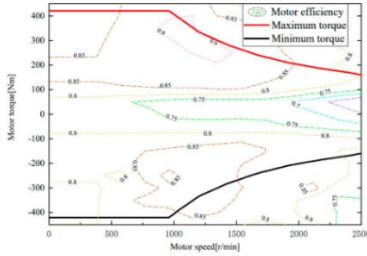
### 2.2.3. Mô hình hóa động cơ điện

Động cơ điện loại PMSM, mô hình toán học động cơ điện bao gồm hai mô đun phụ: mô đun tính toán mô men xoắn hiện tại và mô đun tính toán dòng điện đầu ra [13]. Mô hình toán của mô đun tính toán mô men dòng điện là:

$$T_{mot} = \min(T_{cmd}, T_{max}) \quad (7)$$

$$T_{max} = f(V_{bat}, n_{mot}) \quad (8)$$

Trong đó:  $T_{mot}$  là mô men đầu ra thực tế của động cơ;  $T_{cmd}$  là giá trị yêu cầu mô men xoắn;  $n_{mot}$  là tốc độ động cơ;  $V_{mot}$  là điện áp động cơ;  $T_{max}$  là mô-men xoắn cực đại của động cơ, có được từ hàm của tốc độ và điện áp động cơ. Mỗi quan hệ chức năng được thể hiện trong Hình 4.



**Hình 4.** Sơ đồ đặt tính hiệu suất động cơ  
 Mô hình toán học của module tính toán dòng điện ngõ ra là:

$$I_{mot} = \begin{cases} P_{mot} \times 1000 / (\eta_{mot} \times V_{mot}), (P > 0) \\ P_{mot} \times 1000 \eta_{mot} / V_{mot}, (P \leq 0) \end{cases} \quad (9)$$

$$\eta_{mot} = f(n_{mot}, T_{mot}) \quad (10)$$

Trong đó:  $P_{mot}$  là công suất ra của động cơ;  $\eta_{mot}$  là hiệu suất của động cơ;  $I_{mot}$  là dòng điện động cơ.

#### 2.2.4. Mô hình hóa hệ thống truyền lực

Dựa trên đường cong quy tắc bánh răng lên/xuống, mô hình hộp số được thiết lập cho hộp số tự động (AT) bao gồm: mô đun tính toán bánh răng hiện tại, mô đun tính toán mô men xoắn đầu ra và mô đun tính toán mô men quán tính. Ba mô đun tính toán tính toán tốc độ trục đầu vào, bánh răng hiện tại, mô men xoắn đầu ra và mô men quán tính đầu ra theo các tham số đầu vào, chẳng hạn như lệnh bánh răng, tốc độ đầu ra, mô men xoắn trục đầu vào và mô men quán tính đầu vào. Mô hình toán học là:

$$T_{out} = T_{in} \times f(x_{gb}) \times 0.95 \quad (10)$$

$$n_{in} = \begin{cases} n_{in} \times f(x_{gb}), x_{gb} \neq 0 \\ \frac{60}{2\pi} \int \frac{T_{in} - 0.008 \times n_{in\_init}}{T_{in}} + n_{in\_init}, x_{gb} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Trong đó,  $T_{in}$  là mô men đầu vào hộp số (Nm),  $T_{out}$  là mô men đầu ra của hộp số (Nm),  $f(x_{gb})$  là hàm của giá trị lệnh bánh răng để thu được tỷ số truyền,  $n_{in}$  là tốc độ của trục sơ cấp hộp số (rpm), và  $n_{in\_init}$  là tốc độ vào hộp số lúc bắt đầu chuyển số (rpm).

#### 2.2.5. Mô hình hóa phương tiện

Lực cản khi lái xe bao gồm lực cản lăn, lực cản dốc, lực cản tăng tốc, lực cản gió và các loại lực cản khác. Mô tơ và động cơ cung cấp lực dẫn động vượt qua lực cản của xe trong quá trình lái xe để duy trì chuyển động bình thường của xe.

Mô hình xe trong bài viết này dựa trên phương trình cân bằng chuyển động của phương tiện hybrid loại song song. Phương trình cân bằng như sau:

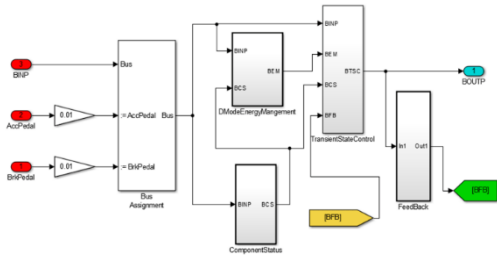
$$F = mgf \cos \alpha + mg \sin \alpha + \frac{C_D A}{21.15} u^2 + \delta m \frac{du}{dt} \quad (12)$$

Trong đó:  $F$  là động năng của xe,  $m$  là khối lượng của xe,  $g$  là gia tốc trọng trường,  $f$  là hệ số lực cản lăn,  $\alpha$  là độ dốc,  $CD$  là hệ số cản,  $A$  là diện tích đón gió,  $u$  là tốc độ của xe và  $\delta$  là hệ số chuyển đổi khối lượng quay.

#### 2.3. Mô hình điều khiển

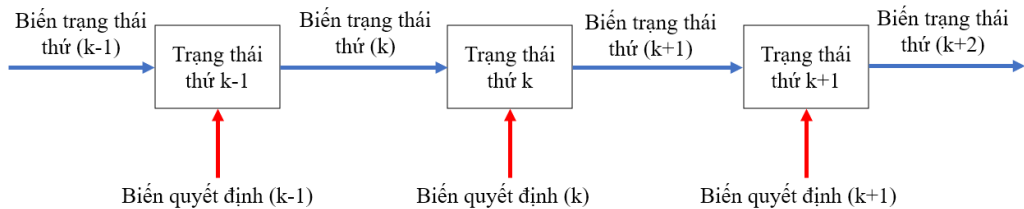
Bộ điều khiển xe là một trong những thành phần cốt lõi của xe hybrid. Chức năng chính của bộ điều khiển là điều phối việc phân bổ mô-men xoắn của động cơ động cơ và hoàn thành các chức năng điều khiển nhất thời như sang số, ngắt ly hợp, khởi động và dừng động cơ, đảm bảo rằng xe sẽ lái bình thường. Hiệu ứng điều khiển ảnh hưởng trực tiếp đến công suất, tính kinh tế, sự thoải mái và an toàn của xe [14].

Xe hybrid được nghiên cứu trong bài báo này có ba chế độ làm việc khác nhau là thuần điện, thuần động cơ và dẫn động hybrid. Theo chế độ làm việc, dựa trên phần mềm MATLAB/Simulink, chiến lược thiết kế lai được phát triển bằng phương pháp thiết kế mô-đun. Mô hình bộ điều khiển của thử nghiệm mô phỏng thời gian thực được thể hiện trên Hình 5.



**Hình 5.** Mô hình điều khiển xe hybrid

Như được hiển thị trong Hình 5, mô hình bộ điều khiển phương tiện có bốn phần, trong đó các mô-đun chức năng là mô-đun



**Hình 6.** Quá trình điều phối năng lượng của quy trình quy hoạch động

Hình 6 biểu thị quy trình ra quyết định gồm nhiều giai đoạn về quản lý năng lượng. Như được trình bày trong Hình 6, trong quá trình ra quyết định nhiều giai đoạn, phương pháp lập trình động là một phương pháp tối ưu hóa không chỉ tách phân khúc hiện tại khỏi phân khúc tương lai mà còn kết hợp lợi ích hiện tại với lợi ích trong tương lai. Khi tìm kiếm chiến lược tối ưu cho toàn bộ bài toán, vì đã biết trạng thái ban đầu, quyết định ở một giai đoạn là một hàm của trạng thái ở giai đoạn đó. Do đó, các trạng thái của chiến lược tối ưu ở mỗi giai đoạn có thể được thay

phán đoán trạng thái thành phần, mô-đun quản lý năng lượng, mô-đun điều khiển phối hợp động và mô-đun phản hồi.

### 3. Chiến lược điều khiển dựa trên thuật toán lập quy hoạch động

#### 3.1. Lý thuyết quy hoạch động

Thuật toán quy hoạch động chia quá trình của bài toán thành nhiều giai đoạn liên kết với nhau và chọn các biến trạng thái, biến quyết định và hàm giá trị tối ưu một cách thích hợp để chuyển một bài toán lớn thành một nhóm các bài toán con cùng loại. Việc tính toán bắt đầu từ các điều kiện biên, đệ quy để tìm lời giải tối ưu. Trong lời giải của từng bài toán con, kết quả tối ưu hóa của các bài toán con trước đó được sử dụng tuần tự và lời giải tối ưu thu được từ bài toán con cuối cùng là toàn bộ bài toán.

đổi từng trạng thái một và lộ trình tối ưu được xác định.

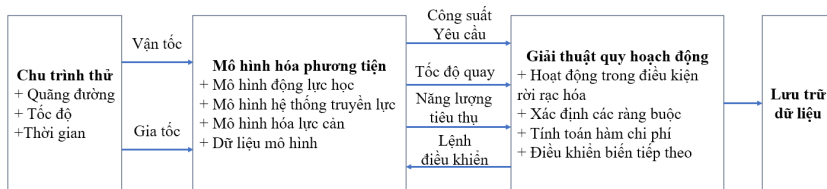
#### 3.2. Chiến lược kiểm soát

Biết được điều kiện đường đi trong tương lai, quãng đường được chia thành nhiều giai đoạn liên kết với nhau theo thời gian hoặc không gian và các thông tin lái xe của xe khi bắt đầu mỗi giai đoạn đều được biết như tốc độ, khả năng tăng tốc, tỷ số truyền, trạng thái sạc pin,... Các điều kiện khách quan khác là các biến trạng thái và các biến pha. Theo 3 biến số trên có thể đánh giá xem có cần thiết phải phân phối công suất giữa hệ thống truyền động điện và động cơ để đạt được mục tiêu giảm tiêu

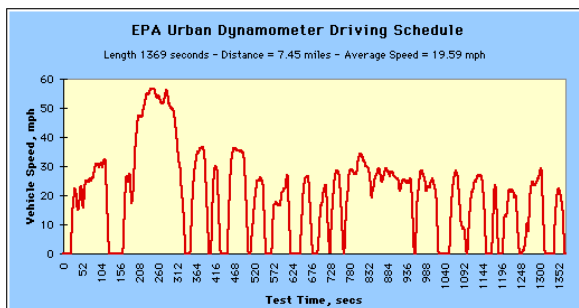
hao nhiên liệu và khí thải hay không. Bài toán quản lý năng lượng thực chất là bài toán quyết định nhiều giai đoạn với cấu trúc dây chuyền [11]. Việc thiết lập mô hình tối ưu hóa với mục tiêu là mức tiêu thụ nhiên liệu thấp nhất và áp dụng thuật toán quy hoạch động ở trên để giải kết quả tối ưu hóa của chiến lược điều khiển tối ưu là khả thi. Quá trình tính toán chiến lược quản lý năng lượng dựa trên lập trình động được thể hiện trên Hình 7. Điều kiện USSD được thể hiện trong Hình 8 là điều kiện vận hành cho mô phỏng. Để đáp ứng các yêu cầu về tốc độ và mô-men xoắn của xe trong quá trình lái xe, các bộ phận chính của xe điện hybrid trước tiên phải đáp ứng các ràng buộc bất đẳng thức sau trước khi thực hiện tính toán phân bố mô-men xoắn để có được trải nghiệm lái xe an toàn và ổn định.

$$\begin{cases} SoC_{\min} \leq SoC(k) \leq SoC_{\max} \\ \omega_{eng\_min} \leq \omega_{eng}(k) \leq \omega_{eng\_max} \\ T_{eng\_min} \leq T_{eng}(k) \leq T_{eng\_max} \\ \omega_{mot\_min} \leq \omega_{mot}(k) \leq \omega_{mot\_max} \\ T_{mot\_min} \leq T_{mot}(k) \leq T_{mot\_max} \end{cases} \quad (13)$$

Trong đó:  $SoC_{\min}$  và  $SoC_{\max}$  lần lượt là trạng thái sạc pin tối thiểu và tối đa;  $\omega_{eng\_min}$  và  $\omega_{eng\_max}$  tốc độ động cơ đốt trong tối thiểu và tối đa (rpm), tương ứng,  $\omega_{eng}(k)$  là tốc độ động cơ tại thời điểm k;  $T_{eng\_min}$  và  $T_{eng\_max}$  là mô men xoắn tối thiểu và tối đa của động cơ ở tốc độ  $\omega_{eng}(k)$ , tương ứng,  $T_{eng}(k)$  là mô men xoắn thực tế của động cơ ở tốc độ  $\omega_{eng}(k)$  và  $\omega_{mot\_min}$  và  $\omega_{mot\_max}$  lần lượt là tốc độ động cơ điện tối thiểu và tối đa,  $\omega_{mot}(k)$  là tốc độ động cơ điện tại thời điểm k;  $T_{mot\_min}$  và  $T_{mot\_max}$  là mô men quay tối thiểu và tối đa của động cơ điện ở tốc độ  $\omega_{mot}(k)$ , tương ứng, và  $T_{mot}(k)$  là mô men xoắn thực tế của động cơ điện ở tốc độ  $\omega_{mot}(k)$ .



Hình 7. Quá trình tính toán chiến lược quản lý năng lượng dựa trên DP



Hình 8. Chu trình thử USSD



Bài toán tối ưu hóa quản lý năng lượng cho xe hybrid thường lấy mức tiêu thụ nhiên liệu toàn diện làm hàm mục tiêu. Tùy theo nhu cầu tốc độ của xe, nhu cầu mô-men xoắn của các bộ phận công suất và nhu cầu chuyển số tại các thời điểm khác nhau, các biến trạng thái khác nhau sẽ được tạo ra. Hơn nữa, sự thay đổi các biến trạng thái tại từng thời điểm cũng sẽ có tác động đáng kể đến mức tiêu thụ nhiên liệu. Vì SoC của pin là một biến trạng thái thay đổi theo thời gian và SoC không có mối quan hệ trực tiếp giữa khoảng thời gian trước đó và khoảng thời gian tiếp theo, nên SoC được chọn làm biến trạng thái và mô-men xoắn động cơ và chuyển số hành động được coi là hai biến quyết định của thuật toán quy hoạch động.

Do đó, biến trạng thái  $x(k)$  của giai đoạn thứ  $k$  có thể được biểu thị bằng SoC của pin như sau:

$$x(k) = \{SoC(k)\}, k = 0, 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

Biến quyết định  $u(k)$  của giai đoạn thứ  $k$  được biểu diễn như sau với mô men động cơ  $T_{eng}(k)$  và chuyển đổi hành động giai đoạn  $(k)$ :

$$u(k) = \{T_{eng}(k), shift(k)\}, k = 0, 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

Đối tượng tối ưu hóa của bài viết này là mức tiêu thụ nhiên liệu của xe, do đó mức tiêu thụ nhiên liệu toàn diện của xe hybrid được lấy làm mục tiêu tối ưu hóa của chiến lược quản lý năng lượng. Do đó, hàm mục tiêu tối ưu hóa chi phí tích lũy  $J$  của hệ thống là tổng các hàm mục tiêu chi phí của từng giai đoạn và hàm mục tiêu chi phí giai đoạn  $L$  được định nghĩa là mức tiêu thụ nhiên liệu tương đương của giai đoạn thứ  $k$ , bao gồm mức tiêu thụ nhiên liệu của động cơ và mức tiêu thụ năng lượng điện tương đương [12].

$$J(k) = \min \sum_{k=0}^N L[x(k), u(k)] \quad (15)$$

$$L(x(k), u(k)) = m_f(k) + \frac{s \times Pe(k)}{H_l} \quad (16)$$

Trong đó:  $m_f(k)$  là lượng nhiên liệu tiêu hao do mô men đầu ra của động cơ tại thời điểm thứ  $k(g)$ ,  $H_l$  là nhiệt trị của xăng ( $J/kg$ ),  $s$  là hệ số tương đương xăng và điện và  $Pe(k)$  là năng lượng xả/sạc pin.

Do hiệu suất chuyển đổi năng lượng điện và năng lượng cơ học cao hơn hiệu suất chuyển đổi năng lượng nhiệt và năng lượng cơ học của nhiên liệu nên khái niệm hệ số tương đương xăng - điện  $s$  được dùng để chuyển đổi năng lượng điện tiêu thụ thành lượng nhiên liệu tiêu thụ và sau đó so sánh mức tiêu thụ nhiên liệu của xe hybrid [14]. Giá trị của hệ số tương đương xăng - điện có liên quan chặt chẽ đến điều kiện lái xe và SoC của ắc quy. Đối với các mô men xoắn yêu cầu khác nhau hoặc giá trị ban đầu và cuối cùng khác nhau của trạng thái sạc của pin, giá trị của  $s$  sẽ không nhất thiết phải giống nhau [15].

Toàn bộ hành trình được chia thành  $N$  giai đoạn theo bước thời gian và phương trình chuyển trạng thái sau được thiết lập trong không gian trạng thái rời rạc theo trình tự thời gian của các điều kiện vận hành tuần hoàn [14]:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)), k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (17)$$

Sau đó, phương trình (18) được thay thế để tính hàm mục tiêu chi phí  $L$  của giai đoạn tiếp theo. Trong điều kiện tuần hoàn, một giai đoạn cần đưa ra quyết định để chuyển sang giai đoạn tiếp theo, nghĩa là xác định biến quyết định  $u(k)$ . Các phán đoán được đưa ra ở mỗi giai đoạn thông qua các biến quyết định và đường dẫn tối ưu để các biến trạng thái chuyển sang giai đoạn tiếp theo sẽ được chọn. Bằng cách

này, quá trình tối ưu cho toàn bộ điều kiện làm việc được chọn theo các quy tắc trong toàn bộ chu trình là tối thiểu hóa hàm mục tiêu của chi phí tích lũy của hệ thống. Quá trình tối ưu này được mô tả bằng chuỗi biến điều khiển

$$U = \{u(0), u(1), u(2), \dots, u(N-1)\} \quad (18)$$

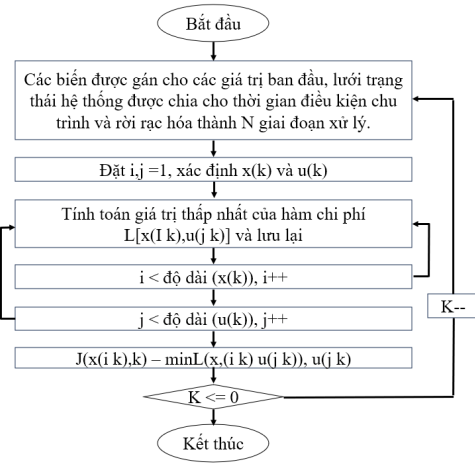
### 3.3. Lệnh điều khiển quá trình

Các biến trạng thái, biến quyết định và hàm mục tiêu chi phí trong bài toán quy hoạch động của quản lý năng lượng xe hybrid đã được xác định. Phần mềm chiến lược quản lý năng lượng dựa trên thuật toán lập trình động được phát triển trên nền tảng phần mềm MATLAB. Phương pháp này suy ra điều kiện làm việc thực tế của các bộ phận từ tốc độ mục tiêu của xe và gia tốc mục tiêu của điều kiện chu trình.

Xem xét các đặc tính nhất thời của xe và ảnh hưởng của số lần tính toán trong thuật toán, thời gian lấy mẫu của thuật toán được đặt thành 1s. Điều kiện USSD được sử dụng để rời rạc hóa các biến trạng thái của hệ thống thành lưới theo chuỗi thời gian của các điều kiện chu trình và điều kiện toàn bộ chu trình được rời rạc hóa thành N. Sau đó, theo các ràng buộc của hệ thống điện xe và mô hình động học của phương tiện, phạm vi khả thi của biến hệ thống được tính toán. Tùy theo tình hình nhu cầu của chu trình lái xe, mẫu xe tính toán từng chặng tại điểm lưới trong phạm vi khả thi. Cuối cùng, thuật toán quy hoạch động được sử dụng để tính toán để quy chiến lược phân phối năng lượng của các biến trạng thái nhằm giảm thiểu tổng mức tiêu thụ nhiên liệu.

Quá trình giải của thuật toán quy hoạch động được áp dụng từng bước theo mối quan hệ đệ quy được cung cấp bởi phương trình chuyển trạng thái của đối tượng tối

ưu. Lưu đồ của thuật toán quy hoạch động được thể hiện trong Hình 9.



Hình 9. Lưu đồ của thuật toán quy hoạch động

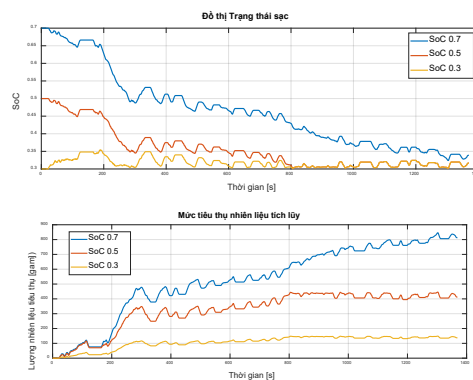
## 4. Kết quả mô phỏng

Mô phỏng được thực hiện trên ô tô lai có thông số như bảng 1:

Bảng 1. Thông số và đặc tính các thành phần của xe

Thành phần	Thông số và đặc tính
Động cơ đốt trong	4 xi lanh, 2.2 L, 113 kW/6000 rpm
Động cơ điện	50 kW
Hộp số	6 speed AT
Pin	5.5 Ah Li-ion battery
Trọng lượng xe	1700 kg

Kết quả mô phỏng được trình bày ở biểu đồ hình 10:



Hình 10. Đồ thị tương đương trạng thái sạc và mức độ tiêu thụ tích lũy nhiên liệu ở các trạng thái nạp 0.7, 0.5 và 0.3

Từ biểu đồ hình 10, có thể thấy rõ rằng khi SoC ban đầu cao thì sẽ sử dụng nhiều năng lượng hơn từ pin và do đó mức tiêu thụ nhiên liệu vẫn ở mức thấp. Mức tiêu thụ nhiên liệu trong chu kỳ truyền động này chẳng hạn như SoC ban đầu bằng 0,7 là khoảng 850g, mặc dù điều này có vẻ không thực tế là do giá trị giả định về mức tiêu thụ nhiên liệu trên mỗi đơn vị công suất động cơ là rất cao. Tương tự như vậy, ở các giá trị SoC là 0,5 và 0,3 khi đó mức nhiên liệu tiêu thụ thấp (khoảng 450 và 150) tương đương với các SoC. Việc đặt và quản lý SoC ở các mức khác nhau để trình bày quá trình tính toán và phân bố năng lượng phù hợp với từng trường hợp của thuật toán DP. Dù ở mức SoC nào, thuật toán DP vẫn thể hiện được sự phân bố tối ưu về nhiên liệu.

## 5. Kết luận

Ô tô hybrid đang được xem là một lựa chọn tốt do cân bằng được yếu tố về tiết kiệm năng lượng và độ dài quãng đường đi không giới hạn. Việc áp dụng giải thuật DP vào để phân phối và điều khiển tối ưu năng lượng cho xe hybrid có thể nâng cao hiệu suất quá trình điều khiển. Tuy nhiên, khuyết điểm lớn nhất của giải thuật DP là phải biết trước được quá trình và các điều kiện trong quá trình di chuyển. Nhưng nhìn chung nếu khắc phục được khuyết điểm vừa nêu thì giải thuật DP thể hiện khả năng điều khiển tối ưu rất tốt, có thể thích nghi ở nhiều mức SoC khác nhau. Mô phỏng được thực hiện theo các giá trị SOC ban đầu khác nhau và các chu kỳ lái xe khác nhau. Kết quả cho thấy với chiến lược DP có thể duy trì SOC trong phạm vi mục tiêu và khả năng tiết kiệm nhiên liệu được cải thiện trong các chu kỳ truyền động khác nhau. Điều này cho thấy

phương pháp có khả năng thích ứng tốt với điều kiện vận hành.

Nghiên cứu này tập trung vào khả năng áp dụng tính toán và quy hoạch của giải thuật DP vào đối tượng xe hybrid nhằm tìm ra hàm tối ưu chi phí về năng lượng điều khiển, phân phối. Kết quả mô phỏng và giải thuật này đóng vai trò làm tài liệu và phương pháp nghiên cứu tham khảo cho các phương pháp nghiên cứu liên quan. Mặc dù một lượng khá lớn khối lượng công việc được thực hiện trong lĩnh vực này nhưng cũng không thể tránh khỏi một số hạn chế và thách thức: việc phân tích sự xuống cấp của pin nhiên liệu ở cấp hệ thống trong các điều kiện vận hành điển hình chưa được xem xét, chiến lược quản lý năng lượng dựa trên lập trình động có thể được áp dụng trong thời gian thực nhưng việc xác minh liên quan vẫn chưa được thực hiện và so sánh với các chiến lược khác. Những hạn chế và thách thức này cần được khám phá thêm trong nghiên cứu trong tương lai.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Zhao, X.; Guo, G. *Survey on Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles*. Acta Autom. Sin. 2016, 42, 321–334.
- [2] Hou, C.; Ouyang, M.; Xu, L.; Wang, H. *Approximate Pontryagin's minimum principle applied to the energy management of plug-in hybrid electric vehicles*. Appl. Energy 2014, 115, 174–189.
- [3] Xie, S.; Li, H.; Xin, Z.; Liu, T.; Wei, L. *A Pontryagin Minimum Principle-Based Adaptive Equivalent Consumption Minimum Strategy for a Plug-in Hybrid Electric Bus on a Fixed Route*. Energies 2017, 10, 1379.
- [4] Deng, Y.; Gong, J.; Wang, Y. *Energy Optimization and Simulation of HEV Using Mild Hybrid Control Strategy*. China J. Highw. Transp. 2008, 21, 114–120.

- [5] Chen, B.C.; Wu, Y.Y.; Tsai, H.C. *Design and analysis of power management strategy for range extended electric vehicle using dynamic programming*. Appl. Energy 2014, 113, 1764–1774.
- [6] Wang, G.; Yu, Y.; Liu, H.; Gong, C.; Wen, S.; Wang, X.; Tu, Z. Progress on design and development of polymer electrolyte membrane fuel cell systems for vehicle applications: A review. Fuel Process. Technol. 2018, 179, 203–228.
- [7] İnci, M.; Büyükc, M.; Demir, M.H.; İlbey, G. *A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing, and future aspects*. Renew. Sustain. Energy Rev. 2021, 137, 110648.
- [8] Wu, X.; Zhou, P.; Fu, J.; Liu, P.; Yang, Y.; Cai, Y.; Zeng, Z. *Research Progress on Energy Management Strategies of Fuel Cell Electric Vehicle Power Systems*. J. Xihua Univ. 2020, 39, 89–96.
- [9] Sorlei, I.-S.; Bizon, N.; Thounthong, P.; Varlam, M.; Carcadea, E.; Culcer, M.; Iliescu, M.; Raceanu, M. Fuel Cell Electric Vehicles—A Brief Review of Current Topologies and Energy Management Strategies. Energies 2021, 14, 252.
- [10] Wang, Y.; Sun, Z.; Chen, Z. *Development of energy management system based on a rule-based power distribution strategy for hybrid power sources*. Energy 2019, 175, 1055–1066
- [11] Enang, W.; Bannister, C. Modelling and control of hybrid electric vehicles (A comprehensive review). Renew. Sustain. Energy Rev. 2017, 74, 1210–1239. [12] Fares, D.; Chedid, R.; Panik, F.; Karaki, S.; Jabr, R. *Dynamic programming technique for optimizing fuel cell hybrid vehicles*. Int. J. Hydrogen Energy 2015, 40, 7777–7790.
- [12] Gong, Q.; Li, Y.; Peng, Z. *Trip-Based Power Management of Plug-In Hybrid Electric Vehicle with Two-Scale Dynamic Programming*. In Proceedings of the 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Arlington, TX, USA, 9–12 September 2007; pp. 12–19.
- [13] Tian, Ying, Jiaqi Liu, Qiangqiang Yao, and Kai Liu. 2021. "Optimal Control Strategy for Parallel Plug-in Hybrid Electric Vehicles Based on Dynamic Programming" *World Electric Vehicle Journal* 12, no. 2: 85. <https://doi.org/10.3390/wevj12020085>
- [14] Xu, L.; Ouyang, M.; Li, J.; Yang, F.; Lu, L.; Hua, J. *Application of Pontryagin's Minimal Principle to the energy management strategy of plugin fuel cell electric vehicles*. Int. J. Hydrogen Energy 2013, 38, 10104–10115.
- [15] Li, X.; Wang, Y.; Yang, D.; Chen, Z. *Adaptive energy management strategy for fuel cell/battery hybrid vehicles using Pontryagin's Minimal Principle*. J. Power Sources 2019, 440, 227105.

**Ngày nhận bài: 06/11/2023**

**Ngày hoàn thành sửa bài: 10/12/2023**

**Ngày chấp nhận đăng: 13/12/2023**