

Quản lý năng lượng cho ô tô điện theo hướng cực tiểu hóa tổn thất trên ắc quy bằng phương pháp quy hoạch động

Battery Loss Minimization Using Dynamic Programming for Energy Management in EVs

Bùi Đăng Quang*, Tạ Cao Minh

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội – Số 1, Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội

Đến Tòa soạn: 21-11-2018; chấp nhận đăng: 20-03-2020

Tóm tắt

Hầu hết các ô tô điện sử dụng ắc quy làm nguồn năng lượng chính vì vậy nâng cao tuổi thọ ắc quy là một hướng nghiên cứu quan trọng trong việc quản lý năng lượng bên cạnh hướng gia tăng quãng đường đi. Tổn thất trên ắc quy cũng là một trong những nguyên nhân làm giảm tuổi thọ ắc quy. Ngoài ra, đây cũng là yếu tố làm giảm khả năng di chuyển trong một lần sạc. Sử dụng hệ thống lưu trữ năng lượng lai giữa siêu tụ và ắc quy là giải pháp tốt trong quản lý năng lượng và được áp dụng trong bài báo này. Nhóm tác giả sử dụng phương pháp quy hoạch động để cực tiểu hóa tổn thất trên ắc quy. Kết quả này có thể được sử dụng làm tiêu chuẩn để so sánh với tổn thất của ắc quy trong chu trình chuẩn ECE sử dụng các phương pháp điều khiển thời gian thực.

Từ khóa: Quy hoạch động, tối ưu hóa, ô tô điện, hệ thống lưu trữ năng lượng lai, quản lý năng lượng.

Abstract

Almost all EVs use battery as the main energy storage system. Therefore, extending the battery's life is a particularly important area in Energy Management for EVs beside extending the vehicles' running distance. Battery's loss is one of the reasons to reduce the battery's lifetime. Moreover, the loss leads to a reduction in running distance of EVs. Hybrid Energy Store System (using battery and super capacitor), which is used in this paper, is a good solution in Energy Management for EVs. The authors use Dynamic Programming to minimize the battery loss and the results can be used as a benchmark for comparison with the real-time EV operation in ECE driving cycles.

Keywords: DP, Optimization, EVs, HESS, energy management.

1. Phần mở đầu

Ắc quy là một trong những thành phần quan trọng nhất và có giá trị cao nhất trên ô tô điện. Thiết bị này quyết định khả năng huy động công suất cho xe bên cạnh động cơ và bộ biến đổi công suất, nhưng quan trọng hơn cả, nó quyết định quãng đường có thể di chuyển của xe. Vì tính chất quan trọng của ắc quy nên gia tăng tuổi thọ ắc quy là vấn đề được nhiều đơn vị nghiên cứu về ô tô điện quan tâm. Để làm được việc này, chúng ta phải giảm thiểu các yếu tố ảnh hưởng xấu đến tuổi thọ ắc quy đó là: nhiệt độ làm việc, tần số của dòng điện, cường độ dòng điện nạp/xả và số lần nạp xả ắc quy [1].

Đối với hệ thống lưu trữ năng lượng (Energy Storage System - ESS) chỉ sử dụng ắc quy thì việc giảm thiểu các yếu tố ảnh hưởng xấu đến tuổi thọ ắc quy là rất khó khăn. Vì vậy khái niệm hệ thống lưu trữ năng lượng lai (Hybrid Energy Storage System – HESS) ra đời với thiết bị chính là ắc quy kết hợp với

một thiết bị phụ trợ khác nhằm hỗ trợ giảm thiểu các yếu tố gây hại cho ắc quy. Để đảm bảo khả năng hỗ trợ thì thiết bị lưu trữ năng lượng phụ trợ phải đảm bảo các yêu cầu sau:

- Mật độ công suất lớn
- Dòng điện huy động cũng như dòng nạp lớn
- Số lần nạp xả cao

Các thiết bị lưu trữ năng lượng phụ trợ phù hợp để kết hợp với ắc quy là bánh đà, siêu tụ, fuel-cell (pin nhiên liệu) [2, 3]. Trong các thiết bị trên thì siêu tụ đang được coi là phù hợp với các yêu cầu đặt ra ở trên ứng dụng trong ô tô điện cá nhân [4].

Trong quản lý năng lượng, quy hoạch động được coi là phương pháp tốt nhất để tối ưu hóa theo một (mono objective) hoặc nhiều (Multi objective) mục tiêu [5]. Tuy nhiên, phương pháp này có nhược điểm là không phù hợp để thực hiện điều khiển thời gian thực. Vì vậy, nó chỉ có thể được sử dụng để làm giá trị tham chiếu khi so sánh các phương pháp điều khiển tối ưu thời gian thực khác.

* Địa chỉ liên hệ: Tel: (+84) 332662000

Email: quang.buidang@hust.edu.vn

Phương pháp quy hoạch động một mục tiêu đã được áp dụng thành công đối với xe ô tô điện lai (HEVs) [6] nhằm tối ưu hóa lượng tiêu thụ nhiên liệu với biến trạng thái là năng lượng còn lại (SOC) của ắc quy. Cũng cùng mục tiêu là cực tiểu lượng tiêu thụ nhiên liệu [7] nhưng tác giả ngoài SOC còn xét thêm một biến trạng thái là vị trí của hộp số truyền thống. Ngoài ra, một số công bố đã áp dụng phương pháp quy hoạch động với nhiều mục tiêu có ràng buộc ví dụ trong [8] là tối ưu hóa tổn thất trên xe điện lai và chi phí vận hành trên xe ô tô điện lai (HEVs) với biến trạng thái là SOC của ắc quy, bản đồ hiệu suất của động cơ điện và bản đồ hiệu suất của động cơ đốt trong. Cũng cùng mục tiêu có ràng buộc như trong [8] thì trong [9] là xe điện sử dụng pin nhiên liệu (FCEVs) sử dụng hệ năng lượng lai (HESS) Fuel Cell và ắc quy với biến trạng thái là SOC của ắc quy, kết hợp với và bản đồ hiệu suất động cơ điện. Trong [10] sử dụng hệ HESS Fuel Cell, ắc quy và siêu tụ như vậy là hệ thống HESS có nhiều bậc tự do hơn với mục tiêu là giống với [8] và [9] khi đó biến trạng thái là SOC của ắc quy và siêu tụ cộng với bản đồ hiệu suất động cơ điện.

Như vậy phương pháp quy hoạch động đã được áp dụng với các đối tượng ô tô lai và ô tô điện sử dụng Fuel Cell và khác biệt là hàm mục tiêu, các ràng buộc và biến trạng thái.

Trong phạm vi bài báo, chiến lược tối ưu hóa mà nhóm tác giả áp dụng nhằm mục đích gia tăng tuổi thọ ắc quy. Vì vậy thông số được lựa chọn để tối ưu hóa là tổn thất nhiệt trong quá trình hoạt động của ắc quy.

2. Mô hình hóa hệ thống

Bảng 1 trình bày cấu trúc hệ thống sử dụng để nghiên cứu. Hệ thống sẽ gồm các thành phần được mô hình hóa như sau:

(a) Hệ thống lưu trữ năng lượng và bộ điều khiển dòng năng lượng, bao gồm.

- Ắc quy Li-ion
- Siêu tụ điện
- Bộ biến đổi DC-DC

(b) Bộ biến đổi, động cơ và thành phần động lực học của xe ô tô điện, có thể được hiểu tổng quan là khối tạo công suất yêu cầu đối với hệ thống lưu trữ năng lượng

2.1 Mô hình hóa bộ biến đổi DC-DC

Cấu trúc bộ biến đổi DC-DC được trình bày trong cấu hình tổng quát của toàn bộ hệ thống trên Bảng 1. Mô hình hóa của bộ biến đổi DC-DC được cho bởi:

$$\begin{cases} u_{chop} = \frac{1}{m} u_{SC} \\ i_{chop} = m \cdot i_{SC} \end{cases} \quad (1)$$

trong đó: u_{chop} và u_{SC} là điện áp bộ biến đổi DC-DC và điện áp trên siêu tụ; i_{chop} và i_{SC} lần lượt là dòng điện của bộ biến đổi DC-DC và dòng điện siêu tụ; m là hệ số điều chế của bộ biến đổi DC-DC.

Hệ thống lưu trữ năng lượng kết hợp siêu tụ và ắc quy dẫn đến các mối quan hệ về dòng điện và điện áp trong hệ được biểu diễn bởi:

$$\begin{cases} u_{bat} = u_{chop} = \frac{1}{m} u_{SC} \\ i_{tract} = i_{bat} + i_{chop} = i_{bat} + m \cdot i_{SC} \end{cases} \quad (2)$$

Với u_{bat} và i_{bat} là điện áp và dòng điện ắc quy; i_{tract} là dòng điện DC-link theo yêu cầu của phụ tải.

2.2 Mô hình hóa siêu tụ

Trong phạm vi bài báo, siêu tụ có thể được mô hình hóa bằng mô hình tối giản như sau:

$$u_{SC}(t) = U_{SC}(0) - \frac{1}{C_{SC}} \int_0^t i_{SC} dt \quad (3)$$

Trong đó C_{SC} là điện dung và $U_{SC}(0)$ biểu diễn trạng thái điện áp ban đầu của siêu tụ.

2.3 Mô hình hóa ắc quy

Tương tự như siêu tụ, nhóm tác giả sử dụng mô hình đơn giản để mô hình hóa ắc quy, trong đó V_{OC} đại diện cho điện áp hở mạch của ắc quy và r_{bat} là nội trở của ắc quy đại diện cho quá trình tự xả và tổn hao trên ắc quy:

$$u_{bat} = V_{OC} - r_{bat} \cdot i_{bat} \quad (4)$$

3. Áp dụng phương pháp quy hoạch động trong quản lý năng lượng cho ô tô điện

3.1 Bài toán tối ưu trong quản lý năng lượng cho ô tô điện

Trong bài báo này, bài toán tối ưu trong quản lý năng lượng được đặt ra với mục đích cực tiểu hóa tổn thất trên ắc quy trong quá trình hoạt động và qua đó tối ưu hóa năng lượng tiêu thụ của xe cũng như tăng tuổi thọ của ắc quy.

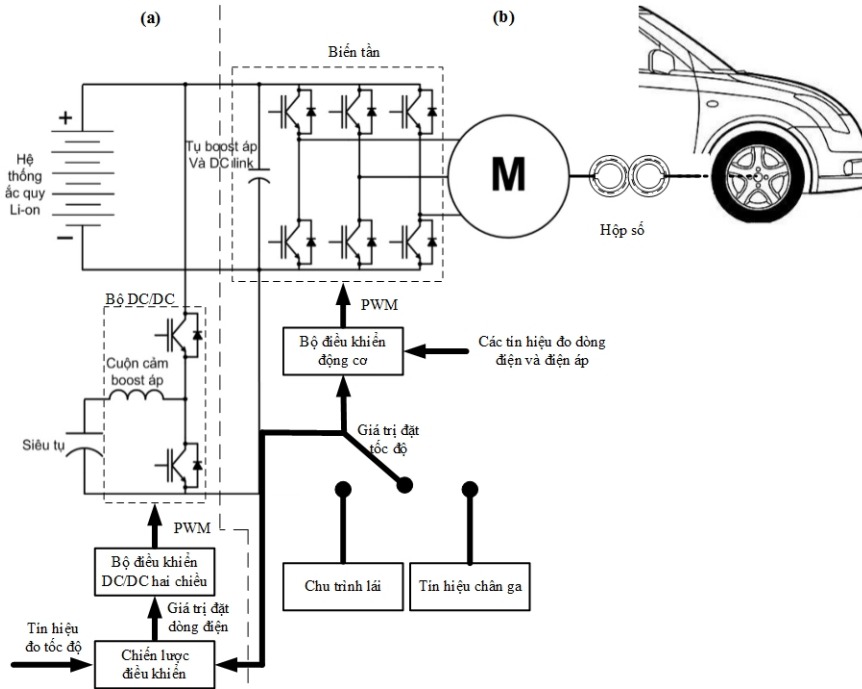
Dựa trên các phương trình mô hình hóa các đối tượng trong hệ thống, phương trình trạng thái biểu diễn mối quan hệ giữa biến trạng thái là điện áp siêu tụ u_{SC} và biến điều khiển là dòng điện ắc quy i_{bat} được xây dựng như sau:

$$\frac{du_{sc}}{dt} = \frac{1}{C_{sc}} \frac{V_{OC} - r_{bat} i_{bat}}{u_{sc}} (i_{bat} - i_{tract}(t)) \quad (5)$$

Với mục tiêu cực tiểu hóa tổn thất trên ắc quy, hàm mục tiêu được xác định bởi:

$$J = \int_0^T r_{bat} i_{bat}^2 dt = \int_0^T g(i_{bat}) dt \quad (6)$$

Với T là thời gian hoạt động của hệ thống. Nhiệm vụ của việc giải bài toán tối ưu là xác định luật điều khiển $i_{bat}^*(t)$ nhằm cực tiểu hóa hàm mục tiêu (6).



Bảng 1. Cấu trúc hệ năng lượng lai ắc quy và siêu tụ cho ô tô điện

3.2 Phương pháp quy hoạch động (DP) và điều kiện áp dụng phương pháp quy hoạch động

Phương pháp quy hoạch động (DP) dựa trên nguyên lý tối ưu của Bellman [11] với phát biểu mọi khúc cuối của quỹ đạo trạng thái tối ưu đều tối ưu

Để có thể áp dụng phương pháp quy hoạch động tính toán tối ưu, ta cần có [11]:

- Các tham số đều phải biết trước
- Xây dựng mô hình đối tượng để với chu trình chạy xe là biết trước có thể xác định được tiêu thụ năng lượng trong toàn dải của xe
- Các ràng buộc đối với các biến trạng thái và giới hạn vật lý
- Hàm mục tiêu (hàm tối ưu)
- Xác định trạng thái yêu cầu của đầu và cuối chu trình

Bước đầu tiên phải làm là với các tham số đã biết, xây dựng mô hình mô phỏng để khảo sát nhu cầu

năng lượng của ô tô điện trong một chu trình lái cho trước.

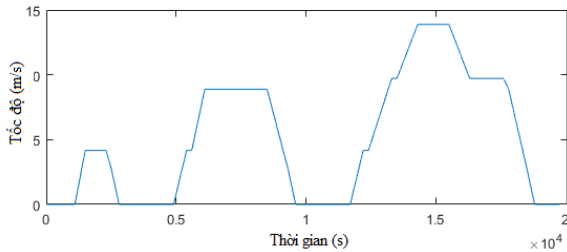
Nhóm tác giả chọn chu trình chuẩn nội đô của châu Âu ECE [12] như trên Bảng 2. Đây là chu trình chuẩn để đánh giá tiêu hao nhiên liệu nội đô và hỗn hợp tại châu Âu và Việt Nam cho tiêu chuẩn EURO 3, EURO 4 và EURO 5.

Bảng 1. Bảng các tham số của chu trình ECE

Tên thông số	Giá trị
Thời gian toàn chu trình	195 s
Quãng đường đi	0,99 km
Tốc độ trung bình	18,26 km/h
Gia tốc tối đa	1,06 m/s ²
Gia tốc giảm tốc tối đa	-0,83 m/s ²
Gia tốc trung bình	0,64 m/s ²
Gia tốc giảm tốc trung bình	-0,75 m/s ²
Thời gian dừng	64 s
Số lần dừng	3

Bảng 2. Bảng các tham số của xe

Thông số	Giá trị	Đơn vị
M	1171	kg
A_f	2,37	m^2
R	0,285	m
P	1,25	kg/m^3
C_d	0,35	
P_M định mức	47	kW



Bảng 2. Biểu đồ chu trình chuẩn ECE



Bảng 3. Ô tô điện trong phòng thí nghiệm



Bảng 4. Siêu tụ điện Nesscap trong phòng thí nghiệm

HESS của mô hình gồm:

- Hai siêu tụ (Bảng 4): 62 F/125VDC
- Hệ thống ắc quy: 40Ah/330VDC với nội trở ắc quy là 120 mΩ

Xây dựng mô hình mô phỏng Matlab bằng phương pháp EMR (Energetic Macroscopic Representation) ta thu được dòng điện yêu cầu đối với HESS như Bảng 5. Như vậy ta cần xây dựng các ràng buộc, các điều kiện biên để bắt đầu triển khai phương pháp quy hoạch động. Trong phạm vi bài báo mục tiêu của phương pháp quy hoạch động là cực tiểu hóa tổn thất trên ắc quy.

Các giới hạn đối với siêu tụ:

- Dòng nạp xả tối đa i_{SC_max} : 200 A
- Điện áp tối đa cho phép u_{SC_max} : 236 VDC
- Điện áp tối thiểu u_{SC_min} : 125VDC

Điều kiện đầu $u_{SC}(0)$: 118 VDC (đầy tương đương với 95% điện áp định mức)

Điều kiện cuối $u_{SC}(T)$: 118 ±2 VDC (Việc chọn điều kiện đầu và cuối của siêu tụ đây là để đảm bảo khả năng hỗ trợ ắc quy huy động công suất ngắn hạn trong quá trình khởi động và năng lượng hoàn toàn được huy động từ ắc quy. Siêu tụ chỉ hỗ trợ cho ắc quy trong các điều kiện ảnh hưởng xấu tới tuổi thọ ắc quy)

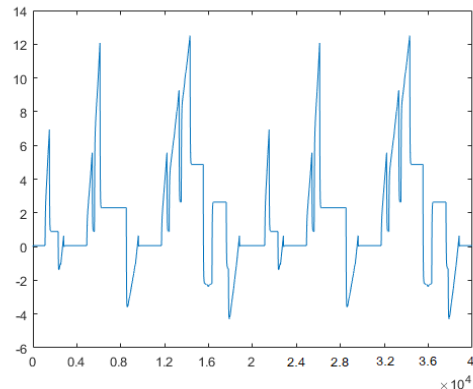
Các giới hạn đối với ắc quy:

Dòng nạp tối đa: 0 A (Nhằm mục đích tối thiểu hóa số lần nạp xả của ắc quy, một trong những yếu tố ảnh hưởng xấu đến tuổi thọ ắc quy)

Dòng xả tối đa: 40 A tương ứng với dòng xả định mức của ắc quy

Điều kiện đầu : Ắc quy đầy

Các ràng buộc với biến điều khiển i_{bat} và biến trạng thái $u_{SC}(t)$ được cho bởi:



Bảng 5. Dòng điện phụ tải yêu cầu i_{tract} (A)

$$\begin{cases} u_{SC_min} \leq u_{SC} \leq u_{SC_max} \\ u_{SC}(0) = u_{SC}(T) \\ 0 \leq i_{bat} \leq i_{tract} \end{cases} \quad (7)$$

Phương trình trạng thái và hàm mục tiêu đã được đưa ra theo (5) và (6).

3.3 Ứng dụng phương pháp quy hoạch động trong bài toán tối ưu

Xét hệ được mô tả bởi phương trình trạng thái (5) với các ràng buộc (7), phương pháp quy hoạch động được sử dụng nhằm tìm giá trị đặt tối ưu $i_{bat}^*(t)$ sao cho hàm mục tiêu (6) là cực tiểu.

Phương trình trạng thái (5) có thể được biểu diễn lại như sau:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{SC} u_{SC}^2 \right) = (V_{OC} - r_{bat} i_{bat}) (i_{bat} - i_{tract}(t)) \quad (8)$$

Đặt $x(t) = \frac{1}{2} C_{SC} u_{SC}^2(t)$ là biến trạng thái mới.

Phương trình mô tả hệ thống với biến trạng thái $x(t)$, i_{bat} là biến điều khiển và $i_{tract}(t)$ được coi là nhiễu biến thiên biết trước được cho bởi:

$$\frac{dx}{dt} = -r_{bat} i_{bat}^2 + (V_{OC} + r_{bat} i_{tract}(t)) i_{bat} - V_{OC} i_{tract}(t) \quad (9)$$

$$= f(x, i_{bat})$$

Chọn biến đồng trạng thái λ sao cho:

$$\frac{d\lambda}{dt} = -\lambda \cdot \frac{\partial f(x, i_{bat})}{\partial x} + \frac{\partial g(i_{bat})}{\partial x} \quad (10)$$

Các điều kiện ràng buộc với λ thỏa mãn:

$\lambda(0)$ tùy ý với $u_{SC}(0)$ là giá trị cố định và cho trước theo ràng buộc (7) dẫn đến $x(0)$ cũng sẽ cố định và biết trước.

$\lambda(T)$ cũng là tùy ý vì $u_{SC}(T)$ cũng là giá trị cố định và cho trước theo ràng buộc (7) dẫn đến $x(T)$ cũng sẽ cố định và biết trước.

Đặt hàm Hamilton như sau:

$$H = \lambda \cdot f(x, i_{bat}) - g(i_{bat})$$

$$= \lambda (-r_{bat} i_{bat}^2 + (V_{OC} + r_{bat} i_{tract}(t)) i_{bat} - V_{OC} i_{tract}(t)) - r_{bat} i_{bat}^2 \quad (11)$$

Nghiệm của bài toán tối ưu hay giá trị đặt tối ưu $i_{bat}^*(t)$ là nghiệm của phương trình sau:

$$\frac{\partial H}{\partial i_{bat}} = \lambda (-2r_{bat} i_{bat}^* + V_{OC} + r_{bat} i_{tract}(t)) - 2r_{bat} i_{bat}^* = 0 \quad (12)$$

Giải phương trình (12), giá trị đặt tối ưu $i_{bat}^*(t)$ được xác định như sau:

$$i_{bat}^*(t) = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{\lambda + 1} \cdot \left(\frac{V_{OC}}{r_{bat}} + i_{tract}(t) \right) \quad (13)$$

Với hàm Hamilton (11) thì phương trình trạng thái (9) và công thức của biến đồng trạng thái (10) trở thành:

$$u_{SC}(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot \left[A^2 \cdot \int_0^t -r_{bat} \cdot \left(\frac{V_{bat}}{r_{bat}} + i_{tract}(\tau) \right)^2 d\tau + A \cdot \int_0^t r_{bat} \cdot \left(\frac{V_{bat}}{r_{bat}} + i_{tract}(\tau) \right)^2 d\tau - \int_0^t V_{bat} i_{tract}(\tau) d\tau + x(0) \right]}{C}} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \lambda} = \\ = -r_{bat} \left(i_{bat}^*(t) \right)^2 + (V_{OC} + r_{bat} i_{tract}(t)) i_{bat}^*(t) - V_{OC} i_{tract}(t) \\ \frac{d\lambda}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Với $i_{bat}^*(t)$ tuân theo luật điều khiển (13). Giải hệ phương trình (14) dẫn đến kết quả $x(t)$ và $\lambda(t)$ là xác định. Từ đó, giá trị đặt tối ưu $i_{bat}^*(t)$ hoàn toàn được xác định theo (13).

Đặt $\frac{1}{2} \frac{\lambda}{\lambda + 1} = A$, giá trị đặt tối ưu (13) trở thành:

$$i_{bat}^*(t) = A \cdot \left(\frac{V_{bat}}{r_{bat}} + i_{tract}(t) \right) \quad (15)$$

Hệ phương trình (14) và (15) cho ta kết quả:

$$A = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4 \cdot a_2 \cdot a_0}}{2a_2} \quad (16)$$

với:

$$a_2 = \int_0^T \left[-r_{bat} \cdot \left(\frac{V_{OC}}{r_{bat}} + i_{tract}(t) \right)^2 \right] dt$$

$$a_1 = \int_0^T \left[r_{bat} \cdot \left(\frac{V_{OC}}{r_{bat}} + i_{tract}(t) \right)^2 \right] dt \quad (17)$$

$$a_0 = -\int_0^T V_{OC} i_{tract}(t) dt + x(0) - x(T)$$

Cùng với đó, biến trạng thái trung gian $x(t)$ được xác định:

$$x(t) = A^2 \cdot \int_0^t \left[-r_{bat} \cdot \left(\frac{V_{bat}}{r_{bat}} + i_{tract}(\tau) \right)^2 \right] d\tau +$$

$$+ A \cdot \int_0^t \left[r_{bat} \cdot \left(\frac{V_{bat}}{r_{bat}} + i_{tract}(\tau) \right)^2 \right] d\tau - \int_0^t V_{bat} i_{tract}(\tau) d\tau + x(0) \quad (18)$$

Với $x(t) = \frac{1}{2} C_{SC} u_{SC}^2(t)$, điện áp siêu tụ $u_{SC}(t)$ có thể được tính từ (18) như sau:

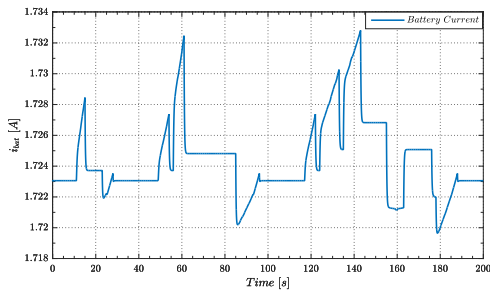
4. Kết quả mô phỏng và đánh giá

Sử dụng giá trị đặt tối ưu (15) trong mô phỏng với chu trình chuẩn ECE và dòng điện tải yêu cầu i_{tract} , kết quả thu được về dòng điện ắc quy, dòng điện siêu tụ, và điện áp siêu tụ lần lượt được trình bày trên Bảng 6, Bảng 7 và Bảng 8.

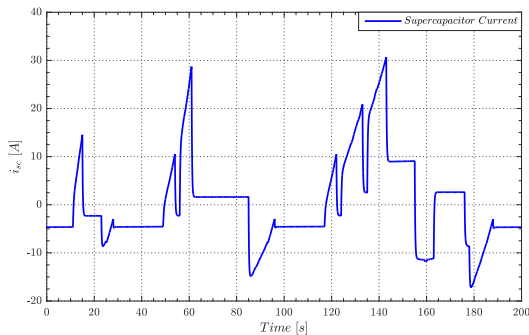
Trên Bảng 6 cho thấy hoàn toàn không có dòng nạp cho ắc quy, Như vậy, sự ảnh hưởng của số lần nạp xả ắc quy ảnh hưởng đến tuổi thọ đã được giảm thiểu.

Trên Bảng 7 cho thấy siêu tụ là thiết bị phụ trách quá trình thu hồi năng lượng khi xe giảm tốc (hãm tái sinh) và cũng trợ giúp ắc quy trong quá trình huy động công suất để tăng tốc bằng cách phát huy công suất ngắn hạn rất tốt.

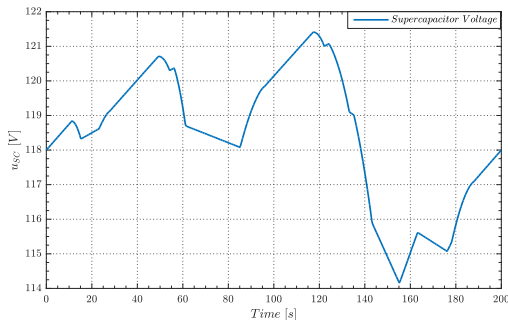
Trên Bảng 8 cho thấy điện áp ban đầu và điện áp cuối của siêu tụ đạt yêu cầu đặt ra.



Bảng 6. Dòng điện ắc quy



Bảng 7. Dòng điện siêu tụ



Bảng 8. Điện áp trên siêu tụ

Như vậy các điều kiện của phương pháp quy hoạch động đều được đảm bảo, nên kết quả là đáng tin cậy.

Tổng thất trên ắc quy cho một chu trình lái trong mô phỏng cho kết quả cụ thể là:

$$E_{loss DP BAT} = 0.0248 \text{ (Wh)}$$

5. Kết luận

Bài báo sử dụng phương pháp quy hoạch động để chọn giá trị đặt cho bộ DC-DC với mục đích chia tải cho ắc quy vào siêu tụ sao cho giảm thiểu tổn thất trên ắc quy cũng như hạn chế số lần nạp xả cho ắc quy. Kết quả của bài báo đã tạo ra một giá trị tham chiếu về tổn thất trên ắc quy để so sánh với kết quả của các phương pháp điều khiển đáp ứng thời gian thực trong việc nâng cao tuổi thọ ắc quy. Ngoài ra, kết quả bài báo còn minh chứng cho khả năng huy động công suất ngắn hạn rất tốt của siêu tụ cho quá trình tăng tốc cũng như đảm nhiệm tốt chức năng hãm tái sinh cho hệ thống trong quá trình giảm tốc .

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài cấp cơ sở T2017-PC-121 của trường Đại học Bách Khoa Hà Nội. Nhóm tác giả xin gửi lời cảm ơn đến Trung tâm Nghiên cứu, Ứng dụng và Sáng tạo Công nghệ và Viện Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa đã tạo điều kiện cho nhóm trong quá trình nghiên cứu.

Tài liệu tham khảo

- [1] T. Christen and M. W. Carlen, Theory of Ragone plots, Journal of Power Sources, vol. 91, pp. 210-216, 9th March 2000.
- [2] S. S. Williamson, Energy Management Strategies for Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles. New York: Springer, 2013.
- [3] K. T. Chau and Y. S. Wong, Overview of power management in hybrid electric vehicles, Energy Conversion and Management 43 (2002) 1953–1968.
- [4] C. C. Chan and K. T. Chau, An Overview of Power Electronics in Electric Vehicles, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44, 1997.
- [5] S. F. Tie and C. W. Tan, A review of energy sources and energy management system in electric vehicles, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 20, pp. 82–102, 2013.
- [6] E. Vinot, R. Trigui, Y. Cheng, C. Espanet, A. Bouscayrol, and V. Reinbold, Improvement of an EVT-Based HEV Using Dynamic Programming, IEEE Transaction on Vehicular Technology, vol. 63, pp. 40-50, 2014.
- [7] V. Ngo, T. Hofman, M. Steinbuch, and A. Serrarens, Optimal Control of the Gearshift Command for Hybrid Electric Vehicles, IEEE Transaction on Vehicular Technology, vol. 61, 2012.

- [8] A. A. Malikopoulos, A Multiobjective Optimization Framework for Online Stochastic Optimal Control in Hybrid Electric Vehicles, IEEE Transaction on Control System Technology, vol. 24, pp. 440-450, 2016.
- [9] D. Fares, R. Chedid, F. Panik, S. Karaki, and R. Jabr, Dynamic programming technique for optimizing fuel cell hybrid vehicles, international journal of hydrogen energy, vol. 40, pp. 7777-7790, 2015.
- [10] M. Ansarey, M. S. Panahi, H. Ziarati, and M. Mahjoob, Optimal energy management in a dual-storage fuel-cell hybrid vehicle using multi-dimensional dynamic programming, Journal of Power Sources, vol. 250, pp. 359-371, 2014.
- [11] D. E. Kirk, Optimal Control Theory: An Introduction. New York: Dover Publications, Inc., 1998.
- [12] S. L. T J Barlow, I S McCrae and P G Boulter, A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emission. United Kingdom: Willoughby Road, 2009.