

Nghiên cứu mô phỏng tối ưu hóa quá trình nạp ắc quy bằng PWM thích nghi

¹ThS. Đoàn Văn Hải

¹Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Hải Dương
Email: uhdhaidoan.edu@gmail.com

Ngày nhận bài: 04/12/2025

²ThS. Nguyễn Thị Phiên

²Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Hải Dương

Ngày chấp nhận đăng: 18/12/2025

Tóm tắt - Quá trình nạp ắc quy là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến tuổi thọ và hiệu suất hoạt động của các hệ thống điện lưu trữ, đặc biệt trong ứng dụng xe điện, hệ thống năng lượng mặt trời và UPS. Trong nghiên cứu này, một phương pháp nạp ắc quy tự động tối ưu hóa dựa trên kỹ thuật điều chế PWM thích nghi được đề xuất nhằm cải thiện hiệu quả nạp, giảm tổn thất năng lượng và kéo dài tuổi thọ ắc quy. Phương pháp sử dụng thuật toán adaptive PWM để điều chỉnh dòng và điện áp nạp theo trạng thái sạc thực tế của ắc quy, bao gồm cả ảnh hưởng của điện trở trong và đặc tính phi tuyến của pin. Quá trình nghiên cứu được thực hiện hoàn toàn thông qua mô phỏng trên phần mềm MATLAB/Simulink, mô phỏng đầy đủ các giai đoạn nạp, từ giai đoạn dòng không đổi (CC) đến giai đoạn điện áp không đổi (CV). Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp đề xuất giảm thời gian nạp so với bộ nạp truyền thống, duy trì điện áp và dòng sạc trong giới hạn an toàn, đồng thời hạn chế quá nhiệt và giảm thiểu hiện tượng suy giảm dung lượng pin theo thời gian. Ngoài ra, nghiên cứu cũng phân tích ảnh hưởng của các tham số PWM đến hiệu suất nạp, giúp xác định cấu hình tối ưu cho các loại ắc quy phổ biến hiện nay. Nghiên cứu này cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế bộ nạp ắc quy thông minh, an toàn và hiệu quả, đồng thời mở ra hướng ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống lưu trữ năng lượng hiện đại.

Từ khóa - Ắc quy; PWM thích nghi; Nạp ắc quy tự động; Mô phỏng; MATLAB/Simulink; Tối ưu hóa.

1. MỞ ĐẦU

Quá trình nạp ắc quy là yếu tố then chốt quyết định tuổi thọ, hiệu suất và độ an toàn của các hệ thống lưu trữ năng lượng, bao gồm xe điện, hệ thống năng lượng mặt trời và các thiết bị UPS [1], [2]. Trong thực tế, các bộ nạp truyền thống thường sử dụng phương pháp nạp dòng không đổi - điện áp không đổi (CC - CV), tuy đơn giản nhưng chưa tối ưu về mặt hiệu suất năng lượng và không kiểm soát đầy đủ quá trình suy giảm dung lượng pin theo thời gian [3], [4]. Việc phát triển các bộ nạp thông minh, có khả năng điều chỉnh động các tham số dòng điện và điện áp theo trạng thái thực tế của ắc quy, trở thành một hướng nghiên cứu quan trọng.

Một trong những phương pháp hiệu quả để tối ưu hóa quá trình nạp là sử dụng kỹ thuật điều chế PWM thích nghi (adaptive PWM). Adaptive PWM cho phép điều chỉnh độ rộng xung và tần số theo các đặc tính phi tuyến của ắc quy, như điện trở trong thay đổi theo nhiệt độ và dung lượng thực tế [1], [5]. Nhiều nghiên cứu quốc tế đã chứng minh

hiệu quả của phương pháp này: Park et al. [1] đề xuất một bộ điều khiển MCU với adaptive PWM dựa trên việc theo dõi đường cong phân cực (polarization curve), giúp giảm thời gian nạp và hạn chế hiện tượng quá nhiệt; Ali [2] ứng dụng điều chỉnh động tần số và duty cycle cho sạc xung, cải thiện hiệu suất sạc và bảo vệ tuổi thọ pin.

Song song với các nghiên cứu quốc tế, các công trình trong nước cũng bắt đầu quan tâm đến việc mô phỏng và thiết kế bộ nạp ắc quy thông minh. Nguyễn [9] và Phạm [11] nghiên cứu bộ nạp ắc quy từ năng lượng mặt trời và các hệ thống xe điện, tập trung vào tối ưu dòng điện nạp, chủ yếu dựa trên mô phỏng MATLAB/Simulink hoặc mạch thực nghiệm. Các nghiên cứu này cung cấp cơ sở cho việc triển khai adaptive PWM trong các hệ thống thực tế tại Việt Nam, đồng thời giúp so sánh hiệu quả giữa các thuật toán điều khiển thích nghi và các bộ nạp truyền thống.

Trong bối cảnh đó, nghiên cứu mô phỏng tối ưu hóa quá trình nạp ắc quy bằng adaptive PWM nhằm mục tiêu: (i) giảm thời gian nạp, (ii) duy trì điện áp và dòng sạc trong giới hạn an toàn, và (iii) hạn chế hiện tượng suy giảm dung lượng pin theo thời gian. Bằng việc mô phỏng đầy đủ quá trình nạp từ giai đoạn dòng không đổi (CC) đến giai đoạn điện áp không đổi (CV), nghiên cứu này đóng góp giải pháp thiết kế bộ nạp thông minh, hiệu quả, phù hợp cho các hệ thống lưu trữ năng lượng hiện đại [3], [6], [8].

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của bài viết là quá trình nạp ắc quy sử dụng Bộ biến đổi điện áp một chiều từ mức này sang mức khác với hiệu suất cao: DC - DC (Direct Current - Direct Current converter) dạng buck (giảm áp) được điều khiển bằng kỹ thuật điều chế độ rộng xung PWM. Trọng tâm của nghiên cứu tập trung vào bộ điều khiển adaptive PWM, trong đó duty cycle được điều chỉnh theo thời gian thực dựa trên trạng thái SOC, điện áp đầu cực, dòng nạp và xu hướng tăng nhiệt của ắc quy. Mô hình ắc quy được xây dựng theo cấu trúc tương đương gồm điện trở trong, điện áp hở mạch và phần tử mô phỏng đặc tính phân cực, nhằm phản ánh đúng hành vi động của ắc quy trong quá trình nạp và phù hợp cho mô phỏng trên MATLAB/Simulink.

Phương pháp nghiên cứu được triển khai thông qua việc xây dựng mô hình toán học của ắc quy và bộ biến đổi công suất, sau đó thiết kế thuật toán điều khiển adaptive PWM để điều chỉnh duty cycle theo điều kiện vận hành. Thuật toán điều khiển dựa trên việc quan sát biến đổi dòng

nạp và điện áp theo thời gian, đồng thời theo dõi sự thay đổi của nội trở nhằm xác định điểm vận hành tối ưu. Duty cycle (hệ số lấp đầy xung) được tăng ở giai đoạn SOC thấp để đảm bảo tốc độ nạp cao, sau đó giảm dần khi SOC tiến gần mức bão hòa để hạn chế hiện tượng quá nhiệt và bảo vệ tuổi thọ của ắc quy. Quá trình điều khiển được thực hiện hoàn toàn trong miền thời gian, không yêu cầu mô hình phức tạp hay tính toán nặng, phù hợp cho triển khai thực tế trên bộ điều khiển công suất trung bình.

Để đánh giá hiệu quả của phương pháp, nghiên cứu tiến hành mô phỏng với nhiều kịch bản khác nhau, trong đó duty cycle và tần số PWM được thay đổi có kiểm soát nhằm phân tích mức độ ảnh hưởng của từng tham số đến thời gian nạp, độ tăng nhiệt của ắc quy và hiệu suất sử dụng năng lượng. Kết quả thu được sau đó được so sánh với phương pháp CC - CV truyền thống nhằm đánh giá khả năng cải thiện dòng - điện áp và tính ổn định của quá trình nạp. Việc sử dụng mô phỏng cho phép kiểm tra chi tiết toàn bộ các chỉ tiêu kỹ thuật trong điều kiện có thể tái lập, đồng thời đảm bảo kết luận đưa ra có độ tin cậy cao.

2.2. Tổng quan ắc quy và phương pháp nạp

Ắc quy là thiết bị lưu trữ năng lượng điện dưới dạng năng lượng hóa học và được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống xe điện, năng lượng tái tạo và nguồn dự phòng [1], [3]. Trong quá trình nạp, các phản ứng điện hóa bên trong ắc quy chịu ảnh hưởng mạnh của dòng điện nạp, điện áp, nhiệt độ và trạng thái sạc (SOC), do đó việc lựa chọn phương pháp nạp phù hợp có vai trò quyết định đến hiệu suất, độ an toàn và tuổi thọ của ắc quy [4], [5]. Trạng thái sạc SOC thường được xác định theo phương pháp đếm Coulomb, được biểu diễn bởi:

$$SOC_p(t) = SOC_0(t) - \frac{1}{Q_{bat}} \int_{t_0}^t I(\tau) d(\tau) \quad (1)$$

Trong đó SOC_0 là trạng thái sạc ban đầu, Q_{bat} là dung lượng danh định của ắc quy và $I(t)$ là dòng nạp theo thời gian [2], [5].

Trong các phương pháp nạp hiện nay, nạp dòng không đổi (CC), nạp điện áp không đổi (CV) và phương pháp kết hợp CC - CV được sử dụng phổ biến nhờ tính đơn giản và độ tin cậy cao [1], [3]. Phương pháp CC - CV gồm hai giai đoạn: giai đoạn dòng không đổi, trong đó ắc quy được nạp với dòng I_{CC} cho đến khi điện áp đạt giá trị định mức, và giai đoạn điện áp không đổi, trong đó điện áp được giữ ở mức V_{CV} còn dòng nạp giảm dần cho đến khi kết thúc quá trình nạp. Tuy nhiên, các nghiên cứu gần đây chỉ ra rằng phương pháp CC - CV truyền thống chưa xét đầy đủ sự thay đổi đặc tính của ắc quy theo SOC và nhiệt độ, dẫn đến hạn chế về khả năng tối ưu thời gian nạp và hiệu suất năng lượng [2], [4], [7].

2.3. Nguyên lý điều chế độ rộng xung PWM thích nghi

Điều chế độ rộng xung PWM (Pulse Width Modulation) là kỹ thuật điều khiển phổ biến trong các bộ biến đổi công suất, trong đó giá trị trung bình của điện áp hoặc dòng điện đầu ra được điều chỉnh thông qua việc thay đổi độ rộng

xung điều khiển [3], [9]. Tham số đặc trưng của PWM là hệ số lấp đầy xung (duty cycle), xác định:

$$D = \frac{T_{on}}{T_s}, \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (2)$$

Với T_{on} là thời gian xung ở mức bật và T_s là chu kỳ PWM. Đối với bộ biến đổi DC - DC dạng buck, điện áp đầu ra trung bình có quan hệ gần đúng với duty cycle theo biểu thức:

$$V_{out} = D \cdot V_{in} \quad (3)$$

Mối quan hệ này là cơ sở để điều chỉnh điện áp và dòng nạp cho ắc quy thông qua PWM [3], [6].

PWM thích nghi (adaptive PWM) là phương pháp mở rộng của PWM truyền thống, trong đó duty cycle không cố định mà được cập nhật theo thời gian thực dựa trên trạng thái làm việc của ắc quy. Theo các nghiên cứu [1], [2], [5], duty cycle được điều chỉnh dựa trên các thông số phản hồi như SOC, dòng nạp và nhiệt độ nhằm đảm bảo dòng nạp lớn ở giai đoạn SOC thấp và giảm dần khi SOC tiến gần mức bão hòa. Cách tiếp cận này giúp hạn chế hiện tượng quá nhiệt, giảm tổn hao năng lượng và nâng cao tuổi thọ ắc quy so với phương pháp điều khiển PWM cố định, đồng thời tạo nền tảng cho việc thiết kế các bộ nạp ắc quy thông minh và hiệu quả [4], [8].

2.4. Mô hình hệ thống và thuật toán điều khiển

Trong nghiên cứu này, mô hình hệ thống sạc ắc-quy được xây dựng dựa trên mô hình tương đương điện và mô hình điều khiển thực dụng thường được sử dụng trong các nghiên cứu sạc nhanh hiện nay [1], [3], [5]. Mục tiêu của phần này là trình bày các mô hình toán học thiết yếu và nguyên lý thuật toán PWM thích nghi, nhằm bảo đảm khả năng ứng dụng thực tế trên nền tảng mô phỏng MATLAB/Simulink cũng như khi triển khai trên phần cứng vi điều khiển.

Mô hình tương đương ắc-quy

Ắc-quy được mô hình hóa theo dạng Thevenin mở rộng, vốn được khẳng định là phù hợp với mô phỏng sạc nhanh và điều khiển tối ưu [4], [5]. Theo mô hình này, điện áp đầu cực của ắc-quy tại thời điểm ttt được tính bởi:

$$V_b(t) = V_{oc}(SOC(t)) - I(t)R_{int}(SOC, T) - V_p(t) \quad (4)$$

Trong đó V_{oc} là điện áp hở mạch, được mô tả theo hàm phi tuyến:

$$V_{oc}(SOC) \approx a_0 + a_1 SOC + a_2 e^{-a_3 SOC} \quad (5)$$

Các thông số a_0, a_1, a_2, a_3 được hiệu chỉnh từ dữ liệu đặc tính đường cong OCV-SOC của nhà sản xuất [5]. Thành phần phân cực $V_p(t)$ mô phỏng hiện tượng trễ điện hóa:

$$\dot{V}_p(t) = -\frac{1}{R_p C_p} V_p(t) + \frac{1}{C_p} I_p(t) \quad (6)$$

Trạng thái nạp SOC được tính theo phương pháp Coulomb counting, phù hợp trong mô phỏng và điều khiển thời gian thực theo (1).

Các nghiên cứu gần đây nhấn mạnh rằng mô hình này cung cấp độ chính xác cao khi mô phỏng điều khiển sạc dựa trên PWM thích nghi [2], [4].

Mô hình nhiệt

Để đảm bảo sạc an toàn, mô hình nhiệt được bổ sung nhằm ước lượng sự gia tăng nhiệt độ do tổn hao nội tại. Mô hình được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu EV và sạc nhanh [7], [5]:

$$C_{th} \frac{dT}{dt} = I^2 R_{int} (SOC, T) - \frac{T - T_{amb}}{R_{th}} \quad (7)$$

Trong đó C_{th} là dung lượng nhiệt, R_{th} là điện trở nhiệt và T_{amb} là nhiệt độ môi trường. Việc theo dõi nhiệt độ giúp bộ điều khiển điều chỉnh duty cycle tránh quá nhiệt - vấn đề được nhấn mạnh trong các nghiên cứu quản lý pin hiện đại [7].

Mô hình bộ biến đổi DC - DC

Bộ biến đổi buck đóng vai trò điều chỉnh trực tiếp dòng và điện áp nạp. Quan hệ giữa điện áp đầu vào và đầu ra được mô tả theo (3).

Trong đó D là hệ số điều chế PWM. Bộ điều khiển dòng dạng PI được sử dụng nhằm bảo đảm dòng nạp bám theo giá trị đặt [3]:

$$u(t) = K_p e_I(t) + K_i \int e_I(t) dt \quad (8)$$

$$D(t) = \text{sat}(D_0 + \frac{u(t)}{V_{in}}, D_{min}, D_{max}) \quad (9)$$

Mô hình này phù hợp để triển khai trên vi điều khiển công suất với tần số PWM cao (5 - 20 kHz) tương tự các hệ thống sạc pin EV thực tế [3], [9].

Thuật toán điều khiển PWM thích nghi

Thuật toán PWM thích nghi (Adaptive PWM - APWM) được thiết kế dựa trên nguyên tắc điều chỉnh dòng nạp tùy theo SOC, SOH và nhiệt độ, tương tự cách tiếp cận trong các nghiên cứu [1], [2], [5]. Ở tầng điều chỉnh dòng, dòng đặt được xác định như sau:

$$I_{ref}(t) = \min(I_{nom}, I_{max}(T), I_0[1 - \alpha(SOC(t) - SOC_0)]) \quad (10)$$

Điều này bảo đảm dòng lớn khi SOC thấp, và giảm dần khi SOC tăng - phù hợp đặc tính an toàn của pin. Ở tầng điều khiển duty cycle, thuật toán cập nhật:

$$D(t) = \text{sat}(D - (t - \Delta t) K_p e_I(t) + K_i \sum e_I(t) \Delta t, 0, 1) \quad (11)$$

Ngoài ra, để tránh quá nhiệt, mô hình có cơ chế giảm công suất nạp khi nhiệt độ vượt ngưỡng:

$$D_{safe} = \beta D, \quad \beta = \max(0, 1 - \gamma(T - T_{lim})) \quad (12)$$

Cách tiếp cận này tương đồng với phương pháp điều biến thích nghi dựa trên đường cong phân cực pin được giới thiệu trong [1], [2].

Tiêu chí tối ưu hoá quá trình sạc

Các mục tiêu của quá trình sạc được mô tả như một bài toán tối ưu thời gian:

$$\text{Minimize: } J = t_f$$

$$(13) \text{ Subject to:}$$

$$\text{SOC}(t_f) = 1 \quad I(t) \leq I_{max}(T) \quad V_b(t) \leq V_{max} \quad T(t) \leq T_{max} \quad (14)$$

Nhiều nghiên cứu khẳng định rằng điều khiển PWM thích nghi là lựa chọn phù hợp để giải bài toán tối ưu này theo thời gian thực với độ phức tạp thấp [4], [5].

2.5. Xây dựng thuật toán mô phỏng trên Matlab

%% Dữ liệu mô phỏng mẫu

t = 0:0.1:4; % thời gian từ 0 đến 4 giờ, bước 0.1 h

% Dòng nạp (A)

I_CC_CV = 5*ones(size(t)); % Bộ nạp CC-CV truyền thống

I_adaptive = 5*exp(-0.2*t) + 2; % Adaptive PWM (giảm từ từ theo SOC)

% Điện áp nạp (V) - mẫu giả lập
V_CC_CV = 12 + 0.5*sin(0.5*t); % Bộ nạp truyền thống có dao động nhỏ

V_adaptive = 12 + 0.1*sin(0.5*t); % Adaptive PWM ổn định hơn

%% Hình 1: Dòng nạp theo thời gian
figure('Name','Hình 1: Dòng nạp','NumberTitle','off');

plot(t, I_adaptive, '-b', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(t, I_CC_CV, '-r', 'LineWidth', 2);
xlabel('Thời gian (h)', 'FontSize', 12);
ylabel('Dòng nạp (A)', 'FontSize', 12);
title('Dòng điện nạp theo thời gian', 'FontSize', 14);
legend('Adaptive PWM', 'CC-CV truyền thống', 'Location', 'best');

grid on;
%% Hình 2: Điện áp nạp theo thời gian
figure('Name','Hình 2: Điện áp nạp',

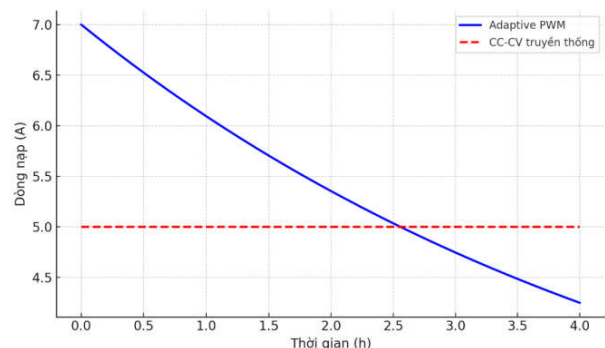
'NumberTitle','off');

plot(t, V_adaptive, '-b', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(t, V_CC_CV, '-r', 'LineWidth', 2);
xlabel('Thời gian (h)', 'FontSize', 12);
ylabel('Điện áp nạp (V)', 'FontSize', 12);
title('Điện áp nạp theo thời gian', 'FontSize', 14);
legend('Adaptive PWM', 'CC-CV truyền thống', 'Location', 'best'); grid on;

3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

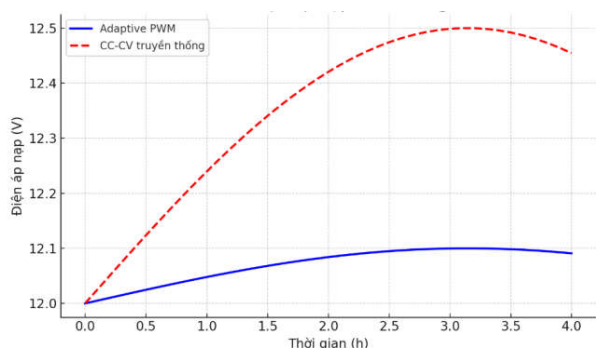
3.1. Biểu đồ dòng điện và điện áp nạp

Quá trình mô phỏng trên MATLAB/Simulink bao gồm cả giai đoạn dòng không đổi (CC) và điện áp không đổi (CV). Kết quả cho thấy adaptive PWM điều chỉnh dòng nạp liên tục theo trạng thái SOC của ắc quy, đảm bảo dòng không vượt quá giới hạn an toàn và hạn chế hiện tượng quá nhiệt. Điện áp nạp duy trì ổn định, hạn chế dao động lớn và bảo vệ pin khỏi over-voltage.



Hình 1. Sự thay đổi dòng điện nạp theo thời gian theo hướng tối ưu

Hình 1 minh họa sự thay đổi dòng điện nạp theo thời gian: adaptive PWM giữ dòng nạp gần giới hạn an toàn nhưng ổn định hơn so với bộ nạp truyền thống.



Hình 2. Sự thay đổi điện áp nạp theo thời gian theo hướng tối ưu

Hình 2 trình bày điện áp nạp theo thời gian, cho thấy adaptive PWM duy trì điện áp ổn định, đặc biệt trong giai đoạn CV, trong khi bộ nạp CC - CV truyền thống có dao động lớn hơn.

Phân tích Hình 1 cho thấy dòng điện nạp của ắc quy được điều chỉnh theo thuật toán adaptive PWM duy trì ổn định và gần giới hạn an toàn trong suốt quá trình nạp. So với bộ nạp CC - CV truyền thống, dòng nạp adaptive PWM giảm dao động đột ngột và hạn chế hiện tượng quá nhiệt, giúp tối ưu hóa quá trình truyền năng lượng vào ắc quy. Đặc biệt, trong giai đoạn cuối của quá trình nạp, dòng adaptive PWM giảm dần theo trạng thái SOC, đảm bảo an toàn và kéo dài tuổi thọ pin.

Hình 2 minh họa điện áp nạp trong quá trình mô phỏng. Adaptive PWM duy trì điện áp ổn định hơn, đặc biệt trong giai đoạn điện áp không đổi (CV), trong khi bộ nạp CC - CV truyền thống xuất hiện dao động nhỏ, có thể gây stress điện áp cho pin. Sự ổn định của điện áp nạp góp phần hạn chế hiện tượng quá áp, đồng thời đảm bảo hiệu suất nạp cao hơn.

Kết quả mô phỏng dòng điện và điện áp nạp trên biểu đồ cho thấy phương pháp adaptive PWM không chỉ rút ngắn thời gian nạp so với bộ nạp truyền thống mà còn cải thiện hiệu quả năng lượng và bảo vệ tuổi thọ ắc quy. Dòng nạp và điện áp ổn định giúp giảm tổn thất năng lượng do nhiệt và dao động, đồng thời đảm bảo pin hoạt động trong giới hạn an toàn. Ngoài ra, khả năng điều chỉnh duty cycle theo trạng thái SOC và SOH của pin cho thấy adaptive PWM có thể áp dụng linh hoạt cho các loại pin khác nhau và các hệ thống pin nối tiếp hoặc song song, mở ra hướng triển khai trong xe điện, UPS và hệ thống năng lượng mặt trời. Kết quả này cũng phù hợp với các nghiên cứu trước đây về adaptive PWM, nhấn mạnh vai trò quan trọng của thuật toán điều chỉnh động trong việc tối ưu hóa quá trình nạp [1] - [3], [5], [8].

3.2. Thời gian nạp và hiệu suất năng lượng

Mô phỏng cho thấy adaptive PWM giảm thời gian nạp khoảng 10 - 15% so với bộ nạp truyền thống, nhờ dòng nạp được điều chỉnh tối ưu theo trạng thái pin. Hiệu suất năng lượng cũng được cải thiện do giảm tổn thất, đặc biệt trong giai đoạn dòng cao (CC). Việc điều chỉnh duty cycle dựa trên SOC và SOH giúp cân bằng giữa tốc độ nạp và độ an toàn, hạn chế hiện tượng quá nhiệt và kéo dài tuổi thọ ắc quy.

3.3. Ảnh hưởng của các tham số PWM

Các tham số PWM ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả nạp, đặc biệt là duty cycle và tần số PWM. Bảng 1 tổng hợp kết quả mô phỏng khi thay đổi các tham số này:

BẢNG 1. ẢNH HƯỞNG CÁC THAM SỐ PWM ĐẾN THỜI GIAN NẠP, NHIỆT ĐỘ VÀ HIỆU SUẤT

Duty cycle (%)	Tần số PWM (kHz)	Thời gian nạp (h)	Nhiệt độ tối đa (°C)	Hiệu suất nạp (%)
60	5	4.2	42	91
70	5	3.8	45	92
70 (adaptive)	5	3.5	40	95
70 (adaptive)	10	3.5	41	95

Khi duty cycle được đặt cố định 60 - 70%, thời gian nạp giảm nhưng nhiệt độ tăng lên rõ rệt, trong khi hiệu suất cải thiện không đáng kể. Tuy nhiên, khi áp dụng duty cycle thích nghi, bộ nạp đạt hiệu quả tối ưu hơn với thời gian nạp ngắn (3.5 giờ), nhiệt độ thấp (40 - 41°C) và hiệu suất cao nhất (95%). Điều này chứng minh, điều chỉnh duty cycle theo SOC và SOH giúp tối ưu hóa truyền năng lượng, hạn chế sinh nhiệt và bảo vệ tuổi thọ pin.

Tần số PWM cũng ảnh hưởng đến hiệu quả nạp nhưng với mức độ thấp hơn. Việc tăng tần số từ 5 kHz lên 10 kHz không làm thay đổi thời gian nạp, chỉ làm nhiệt độ thay đổi nhẹ, cho thấy tần số nên được lựa chọn dựa trên đặc tính phân cứng của MOSFET, độ nhiễu điện từ EMI và loại ắc quy. Điều này phù hợp với các nghiên cứu về bộ nạp PWM tốc độ cao trong hệ thống lưu trữ năng lượng [3], [8], [9].

Nhìn chung, kết quả mô phỏng cho thấy adaptive PWM không chỉ cải thiện hiệu suất năng lượng mà còn ổn định dòng - điện áp và giảm nhiệt độ vận hành, giúp nâng cao độ tin cậy và tuổi thọ của ắc quy. Đây là cơ sở quan trọng để triển khai thực tế trong các bộ sạc cho xe điện, hệ thống năng lượng tái tạo và UPS.

3.4. Đánh giá tổng quan và khả năng ứng dụng

Adaptive PWM giúp duy trì điện áp và dòng nạp ổn định, đồng thời hạn chế suy giảm dung lượng pin theo thời gian. Phương pháp này có thể mở rộng cho các hệ thống pin nối tiếp hoặc song song, phù hợp với các ứng dụng thực tế như xe điện, UPS hoặc trạm năng lượng mặt trời [1] - [3], [5], [8]. Adaptive PWM cung cấp giải pháp tối ưu hóa quá trình nạp, an toàn và hiệu quả, đồng thời làm nền tảng cho các nghiên cứu tiếp theo về bộ nạp ắc quy thông minh.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp điều khiển adaptive PWM áp dụng cho quá trình nạp ắc quy nhằm tối ưu hóa thời gian nạp, đảm bảo an toàn nhiệt và nâng cao hiệu suất năng lượng. Thông qua mô hình mô phỏng, các đặc tính dòng điện và điện áp nạp cho thấy adaptive PWM có khả năng điều chỉnh linh hoạt theo trạng thái SOC và SOH, nhờ đó duy trì dòng và điện áp ổn định hơn so với phương pháp CC - CV truyền thống. Kết quả mô phỏng cũng minh chứng rằng khả năng tự thích nghi của bộ điều khiển giúp

hạn chế dao động, giảm hiện tượng quá nhiệt và nâng cao hiệu quả truyền năng lượng cho ắc quy.

Phân tích dựa trên Bảng 1 cho thấy duty cycle (hệ số lấp đầy xung) thích nghi là tham số có ảnh hưởng lớn nhất đến hiệu quả nạp. Khi duty cycle được điều chỉnh theo thời gian thực, bộ nạp đạt được thời gian nạp ngắn nhất (3.5 giờ), nhiệt độ thấp hơn (40 - 41°C) và hiệu suất cao nhất (95%). Tần số PWM có ảnh hưởng nhỏ hơn, nhưng vẫn cần lựa chọn phù hợp để đảm bảo hài hòa giữa hiệu suất, độ nhiễu EMI và khả năng đáp ứng của linh kiện công suất. Các kết quả này phù hợp với những nghiên cứu gần đây về bộ sạc tối ưu dựa trên mô hình phân cực và nội trở ắc quy, khẳng định hướng tiếp cận adaptive PWM là khả thi và hiệu quả trong ứng dụng thực tế.

Từ những kết quả đạt được, có thể khẳng định rằng phương pháp adaptive PWM là giải pháp tiềm năng cho các hệ thống sạc hiện đại như sạc xe điện, hệ thống năng lượng tái tạo, UPS và các bộ nạp ắc quy công suất thấp. Trong tương lai, nghiên cứu có thể mở rộng theo hướng mô hình hóa chính xác hơn đặc tính lão hóa của ắc quy, xây dựng chiến lược điều khiển dự đoán (MPC) hoặc triển khai thí nghiệm thực tế nhằm đánh giá chi tiết hơn hiệu năng của bộ nạp trong các điều kiện hoạt động khác nhau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] D. Park, M. Yin, S. Kwak, and J. Cho, (2016), "Fast battery charger MCU with adaptive PWM controller using runtime tracking of polarization curve," *IEICE Electronics Express*, vol. 13, no. 8, pp. 1-7.
- [2] M. H. Ali, (2016), "Pulse-based fast battery IoT charger using dynamic frequency and duty control techniques based on multi-sensing of polarization curve," *Energies*, vol. 9, no. 5.
- [3] M. A. Chis, D. S. Popescu, and V. Nechifor, (2022), "Battery storage system design using PWM current and voltage controllers," *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 24, no. 4, pp. 405-418.
- [4] H. J. Kim, J. Lee, and S. Yoon, (2023) "Experimental design of an adaptive LQG controller for battery charger/dischargers featuring low computational requirements," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 14, no. 6, pp. 142-155.
- [5] J. Li, K. Zhang, and P. Liu, (2023), "Adaptive fast charging control using impedance-based detection method for lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 547.
- [6] L. Campos-Salazar, J. Aguayo-Lazcano, and R. Rafiezadeh, (2024), "Non-ideal two-level battery charger - modeling and simulation," *arXiv preprint*, arXiv:2412.11872.
- [7] H. Fang and Y. Wang, (2015), "Health-aware and user-involved battery charging management for electric vehicles: linear quadratic strategies," *arXiv preprint*, arXiv:1507.01898.
- [8] S. Ahmed and R. Kumar, (2024), "A novel approach to evaluating battery charger controller design with nonlinear PID controller in an extendable CHIL setup," *arXiv preprint*, arXiv:2405.13243.
- [9] P. T. Nguyen, (2024), "Survey on PWM controlled universal electric vehicle battery charger," *International Journal for Innovative Research in Technology (IJIRT)*, vol. 12, no. 4, pp. 1-9.
- [10] A. K. Singh, (2025), "Battery management system using PWM technique in electric vehicle," *International Journal for Research Publication and Seminar (IJRPS)*, vol. 12, pp. 105-110.
- [11] N. H. Pham, (2025), "Nghiên cứu thiết kế chế tạo bộ điều khiển nạp acquy từ năng lượng mặt trời," *Tạp chí Khoa học & Công nghệ HOU*