

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CHO TRẠM SẠC NHANH XE ĐIỆN TRÊN CƠ SỞ LƯỚI ĐIỆN MỘT CHIỀU SIÊU NHỎ

DESIGN OF A SLIDING MODE CONTROLLER FOR AN ELECTRIC VEHICLE FAST CHARGING STATION BASED ON A DC MICROGRID

Lê Thành Doanh^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huinh5804.2025.379>

TÓM TẮT

Công nghệ sạc nhanh cho xe điện (EV) đã trở thành một giải pháp hiệu quả nhằm khắc phục hạn chế về thời gian sạc kéo dài của các hệ thống sạc truyền thống. Tuy nhiên, việc tích hợp các trạm sạc nhanh xe điện (EVFCS) vào lưới điện lại đặt ra nhiều thách thức như dao động điện áp, gia tăng áp lực lên lưới phân phối và suy giảm chất lượng điện năng. Bài báo này trình bày phương pháp điều khiển tiên tiến là điều khiển trượt (SMC) cho trạm sạc nhanh xe điện hoạt động trong môi trường lưới điện một chiều siêu nhỏ (DC Microgrid - DCMG) có tích hợp các nguồn phát điện phân tán từ năng lượng tái tạo. Các mô phỏng được thực hiện trong môi trường MATLAB/Simulink để đánh giá hiệu quả của các bộ điều khiển dưới nhiều điều kiện vận hành khác nhau. Kết quả cho thấy, phương pháp này cải thiện đáng kể hiệu suất của hệ thống, SMC cho khả năng đáp ứng nhanh, thời gian quá độ ngắn hơn và độ bền vững cao.

Từ khóa: Trạm sạc nhanh xe điện, điều khiển trượt, điều khiển mờ, lưới điện một chiều siêu nhỏ.

ABSTRACT

Fast-charging technology for electric vehicles (EV) has emerged as an effective solution to overcome the limitation of long charging times in conventional charging systems. However, integrating electric vehicle fast charging stations (EVFCS) into the power grid poses several challenges, such as voltage fluctuations, increased stress on the distribution network, and degradation of power quality. This paper presents an advanced control method - Sliding Mode Control (SMC) - applied to an EV fast charging station operating within a DC microgrid environment integrated with renewable distributed generation sources. Simulations are carried out in the MATLAB/Simulink environment to evaluate the controller's performance under various operating conditions. The results demonstrate that the proposed method significantly improves the overall system performance, providing faster dynamic response, shorter transient time, and higher robustness compared to conventional approaches.

Keywords: Electric vehicle fast charging station, sliding mode control, fuzzy logic control, DC microgrid.

¹Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực

*Email: doanhlt@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 24/8/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 28/10/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/11/2025

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, số lượng xe điện trên toàn cầu tăng nhanh nhờ các cải tiến về hiệu suất năng lượng và phạm vi hoạt động. Tuy nhiên, thời gian sạc lâu vẫn là một trong những rào cản lớn hạn chế sự phổ biến rộng rãi của xe điện [1]. Các bộ sạc chậm cấp độ 1 và cấp độ 2 thường mất từ 4 đến 16 giờ để sạc đầy pin [2], trong khi bộ sạc nhanh cấp độ 3 (DC fast charger) có thể sạc phần

lớn dung lượng pin chỉ trong khoảng 30 phút, mang lại tính tiện dụng cao hơn cho người dùng. Dù vậy, công suất lớn của các bộ sạc nhanh (50 ÷ 240kW) có thể gây ra dao động điện áp, tổn thất điện năng và tải tác động đột ngột cho lưới phân phối, đặc biệt trong các khu vực dân cư.

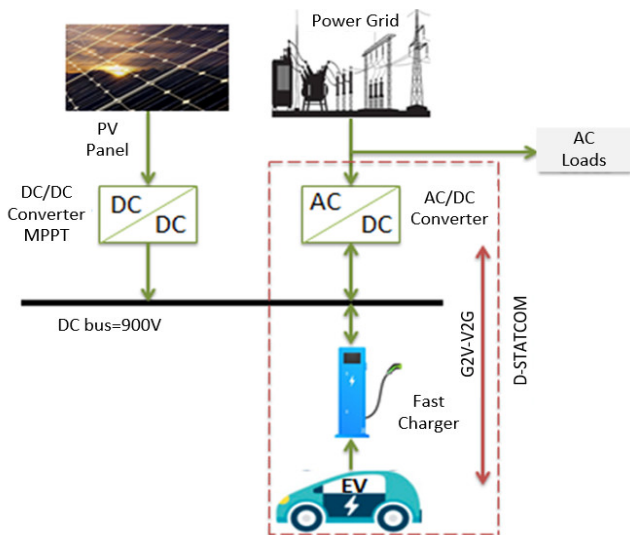
Một hướng tiếp cận hiệu quả là tích hợp các trạm EVFCS vào lưới điện một chiều siêu nhỏ DCMG có sử dụng nguồn năng lượng tái tạo phân tán (Distributed

Generation Systems-DGS) như hệ thống quang điện (PV) [3]. Cấu trúc DCMG giúp tăng hiệu suất, đơn giản hóa điều khiển và cải thiện khả năng phối hợp giữa các nguồn năng lượng. Nhiều công trình nghiên cứu đã đề xuất các chiến lược điều khiển và quản lý năng lượng trong EVFCS nhằm duy trì trạng thái sạc (state-of-charge - SOC), tối ưu chi phí vận hành, và tận dụng công nghệ xe điện nối lưới (Vehicle-to-Grid - V2G) để hỗ trợ ổn định điện áp và cân bằng tải [4].

Tuy nhiên, các nghiên cứu trước đây hiếm khi xem xét việc sử dụng trực tiếp pin xe điện như một nguồn điện DC cho D-STATCOM nhằm cải thiện chất lượng điện áp trong chế độ V2G. Để khắc phục khoảng trống này, bài báo đề xuất một mô hình DCMG tích hợp hệ thống năng lượng tái tạo, trạm sạc nhanh cấp độ 3 và bộ chuyển đổi hai chiều được điều khiển bằng các thuật toán thông minh SMC. Mục tiêu là giảm hiện tượng quá điều chỉnh điện áp, tăng khả năng ổn định và nâng cao tính bền vững trước các động học phi tuyến của hệ thống [5, 6].

2. MÔ TẢ HỆ THỐNG

Xét một hệ thống lưới điện DCMG nối lưới, bao gồm trạm sạc EVFCS và một hệ thống pin mặt trời PV có công suất đỉnh 120 kW, hoạt động ở chế độ bám điểm công suất cực đại (MPPT - Maximum Power Point Tracking), như được thể hiện trong hình 1.

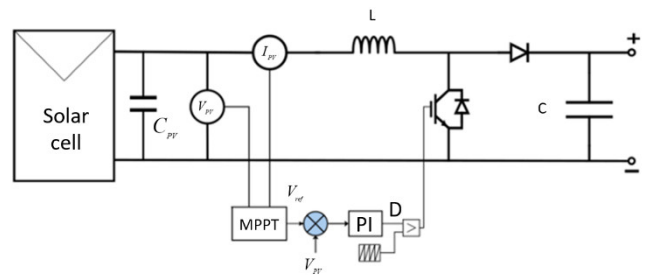


Hình 1. Mô hình trạm sạc nhanh

Do khả năng cải thiện hiệu suất vận hành của lưới điện và giảm công suất cực đại của tải, cấu hình DCMG được lựa chọn thay vì hệ thống xoay chiều truyền thống. Trong đó, nguồn PV được sử dụng như nguồn phát điện phân tán, nhờ đặc tính linh hoạt và khả năng tương thích cao với trạm sạc EVFCS, vượt trội hơn so với các nguồn năng lượng có tính ngẫu nhiên như điện gió.

2.1. Hệ thống pin mặt trời (PV) và thuật toán điều khiển

Mô hình PV được xây dựng dựa trên bộ điều khiển nguồn dòng, thể hiện trong hình 2.



Hình 2. Mô hình pin mặt trời PV và điều khiển MPPT

Mối quan hệ giữa dòng điện và điện áp của cell PV được xác định theo công thức:

$$I = I_{pv} - I_s \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{pa}} \quad (1)$$

Trong đó: I_s là dòng bão hòa của đi-ốt; I_{pv} là dòng quang điện phụ thuộc nhiệt độ.

$$I_{pv} = I_{pv0} (1 + K_1 (T - 300)) \quad (2)$$

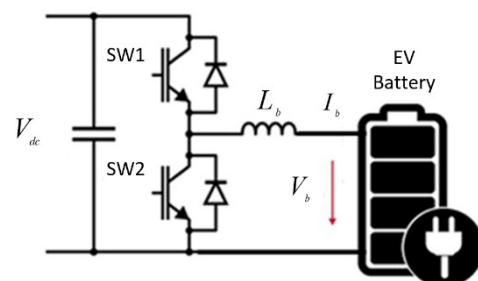
$$I_s = K_2 T^3 e^{\frac{qV_g}{KT}} \quad (3)$$

Với K_1 , K_2 là hằng số đặc trưng của mô hình PV; T là nhiệt độ hoạt động của cell PV; q là điện tích electron; n là hệ số chất lượng đi-ốt; L là hằng số Boltzmann.

Hệ thống PV được nối với DC bus thông qua bộ chuyển đổi DC/DC kiểu boost. Mục tiêu của bộ biến đổi này là duy trì hoạt động của hệ thống tại điểm công suất cực đại, thông qua thuật toán MPPT kết hợp bộ điều khiển PI.

2.2. Thiết kế trạm sạc nhanh xe điện (EVFCS)

Sơ đồ tương đương của trạm sạc nhanh EV được thể hiện trong hình 3. Nghiên cứu sử dụng pin lithium-ion, do loại pin này có chu kỳ sạc xả dài, mật độ năng lượng và công suất cao, phù hợp với các ứng dụng sạc nhanh.



Hình 3. Mô hình pin xe điện và bộ sạc

Mô hình pin được xây dựng dựa trên mô hình chuẩn của SimPowerSystems, gồm nguồn điện áp biến thiên E_{batt} mắc nối tiếp với điện trở trong R_0 . Giá trị SOC được

theo dõi để tránh xả pin sâu hoặc sạc quá mức. Điện áp đầu ra của pin và SOC được tính như sau:

$$V_{\text{batt}} = E_{\text{batt}} - I_{\text{batt}} R_0 \quad (4)$$

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(0) - \frac{100}{Q} \int I_{\text{batt}}(t) dt \quad (5)$$

Trong đó: Q là dung lượng cực đại của pin.

Pin xe điện được nối với DC bus thông qua bộ sạc hai chiều ngoài xe, sử dụng hai transistor IGBT hoạt động bổ sung lẫn nhau. Bộ sạc cho phép dòng điện hai chiều:

- Khi ở chế độ sạc (Grid-to-Vehicle, G2V), bộ sạc hoạt động như mạch buck: công suất từ PV và lưới cấp vào pin.

- Khi ở chế độ xả (Vehicle-to-Grid, V2G), bộ sạc hoạt động như mạch boost: năng lượng từ pin được đưa ngược trở lại lưới.

Mối quan hệ giữa điện áp và chu kỳ xung điều khiển được mô tả bởi:

2.3. Bộ nghịch lưu nối lưới (Inverter)

Một bộ nghịch lưu nguồn áp hai chiều được sử dụng để kết nối DCMG với lưới điện xoay chiều, thông qua máy biến áp hạ áp ba pha và bộ lọc LCL như Hình 4. Bộ nghịch lưu chuyển đổi điện áp DC bus thành điện áp AC, cho phép trao đổi công suất giữa DCMG và lưới điện chính. Bộ lọc LCL để loại bỏ sóng hài và đảm bảo dòng điện đầu ra có dạng hình sin mịn. Việc lựa chọn thông số bộ lọc được xác định dựa trên các yếu tố như điện áp DC, tần số đóng cắt, hệ số điều chế và mức méo hài cho phép. Hệ thống điều khiển bộ nghịch lưu bao gồm vòng điều khiển điện áp ngoài và vòng điều khiển dòng điện trong, sử dụng bộ điều khiển PI. Bên cạnh đó, mạch khóa pha (PLL) được dùng để đồng bộ pha giữa điện áp lưới và bộ nghịch lưu, đảm bảo trao đổi công suất hiệu quả và ổn định.

3. HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN ĐƯỢC ĐỀ XUẤT

Các hệ thống điều khiển cho DCMG có tích hợp trạm sạc EVFCS đề xuất gồm ba bộ điều khiển độc lập: Bộ điều khiển cho hệ thống PV - duy trì hoạt động tại điểm công suất cực đại (MPPT); Bộ điều khiển cho bộ nghịch lưu (Inverter Controller) - đảm bảo ổn định điện áp DC bus và điều khiển trao đổi công suất với lưới điện; Bộ điều khiển cho bộ sạc hai chiều của xe điện (EV Charger Controller) - điều chỉnh dòng sạc/xả của pin nhằm giảm dao động điện áp và dòng khởi động. Mục tiêu chung của hệ thống điều khiển là duy trì cân bằng công suất trong microgrid và ổn định điện áp bus DC ở mức định danh 900V.

3.1. Điều khiển bộ nghịch lưu (Inverter Control)

Bộ nghịch lưu (VSI - Voltage Source Inverter) chịu trách nhiệm giữ ổn định điện áp DC bus ở mức 900V, ngay cả

khi công suất phát và tải thay đổi. Chiến lược điều khiển được xây dựng theo phương pháp điều khiển vector dq, gồm:

- Một vòng điện áp ngoài (Outer Voltage Loop): điều chỉnh điện áp DC bus;

- Hai vòng dòng điện trong (Inner Current Loops): điều khiển dòng điện tác dụng (I_d) và phản kháng (I_q).

Hệ thống điều khiển sử dụng ba bộ điều khiển PI với thông số đã được hiệu chỉnh ($K_p = 4,5$; $K_i = 200$). Để đồng bộ pha giữa điện áp lưới và bộ nghịch lưu sử dụng mạch khóa pha PLL.

3.2. Điều khiển bộ sạc hai chiều (EV Charger Control)

Bộ sạc hai chiều của xe điện sử dụng bộ biến đổi DC/DC kiểu buck-boost, có tính phi tuyến mạnh do sự thay đổi của tải và điện áp đầu vào. Để nâng cao hiệu quả điều khiển, bài báo đề xuất sử dụng bộ điều khiển trượt, mục tiêu chính của bộ điều khiển là: Giảm hiện tượng quá điện áp và dòng khởi động lớn, duy trì dòng sạc nhanh ổn định, nâng cao khả năng đáp ứng động và độ ổn định của hệ thống.

Điều khiển trượt là phương pháp điều khiển phi tuyến có khả năng đối phó tốt với nhiễu và biến thiên tải, đặc biệt thích hợp cho các bộ biến đổi công suất của trạm sạc nhanh. Trong bộ điều khiển SMC, dòng điện pin được chọn làm biến trạng thái điều khiển chính.

Bề mặt trượt s được định nghĩa như sau:

$$s = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 \quad (6)$$

$$\text{Với: } x_1 = i_{\text{ref}} - i_{\text{bat}}; \quad x_2 = \int (i_{\text{ref}} - i_{\text{bat}}) dt$$

Trong đó, α_1, α_2 là các hệ số trượt được xác định thực nghiệm để đảm bảo tốc độ hội tụ và ổn định.

Luật điều khiển của SMC được chọn:

$$u = \frac{1}{2}(1 + \text{sign}(s)) \quad (7)$$

Phương pháp này đảm bảo dòng điện bám sát giá trị đặt với sai số nhỏ, đồng thời có khả năng phản ứng nhanh với các thay đổi đột ngột của tải hoặc điện áp đầu vào.

Trong mô hình được đề xuất, pin xe điện được tích hợp vào D-STATCOM thông qua bộ chuyển đổi hai chiều. Khi vận hành ở chế độ V2G, pin cung cấp công suất phản kháng và công suất tác dụng cần thiết để duy trì điện áp tại điểm nối chung (PCC - Point of Common Coupling). Điện áp DC phía D-STATCOM được giữ ổn định, đảm bảo khả năng điều khiển nhanh và chính xác khi điện áp lưới thay đổi. Trong trường hợp xuất hiện hiện tượng sụt áp, pin EV sẽ xả năng lượng để bù công suất thiếu hụt, giúp

đưa điện áp lưới trở về giá trị danh định. Bộ điều khiển trượt SMC cũng được áp dụng để điều khiển dòng điện của D-STATCOM. SMC có ưu điểm vượt trội trong việc bám theo dòng tham chiếu nhanh, chống nhiễu tốt và đảm bảo ổn định ngay cả khi lưới chịu biến động tải đột ngột. Khi xảy ra sự cố sụt áp, SMC sẽ nhanh chóng điều chỉnh dòng phản kháng để bù công suất thiếu, giúp đưa điện áp lưới trở lại giá trị danh định chỉ trong vài chu kỳ.

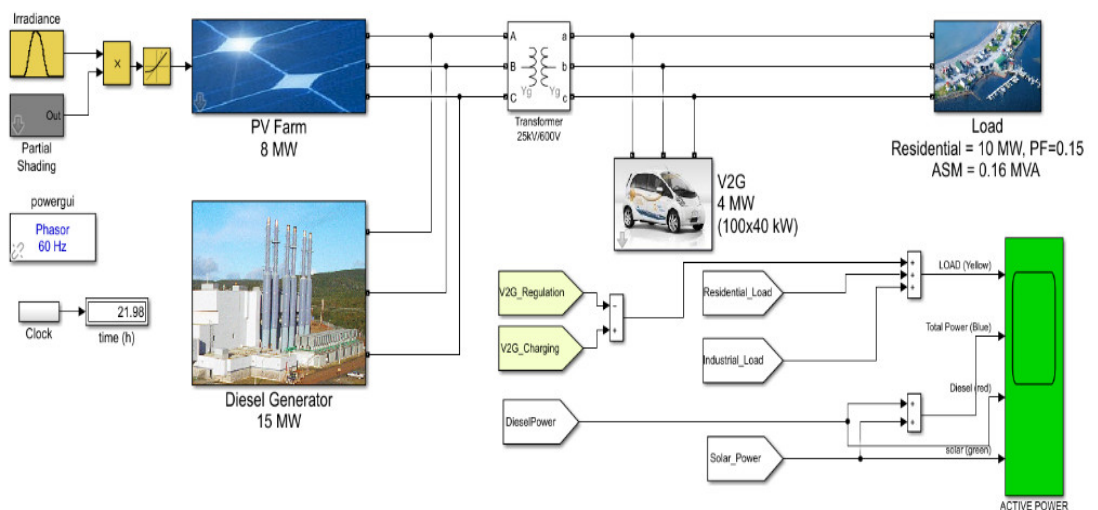
4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Trong phần trên, bài báo đã xây dựng bộ điều khiển cho trạm sạc EVFCS. Mô hình mô phỏng được thực hiện trên Matlab/Simulink. Lưới điện siêu nhỏ được chia thành bốn phần quan trọng: Một máy phát điện diesel, đóng vai trò là máy phát điện cơ sở; Một trang trại quang điện để sản xuất năng lượng tái tạo; một hệ thống V2G được lắp đặt bên cạnh tải của lưới điện. Quy mô của lưới điện siêu nhỏ tương đương với khoảng một nghìn hộ gia đình, có 100 xe điện trong mô hình cơ sở, nghĩa là tỷ lệ giữa xe hơi và hộ gia đình là 1:10. Kết quả của bộ điều khiển TC cho động cơ cảm ứng tuyến tính được so sánh với bộ điều khiển điều khiển trượt thông thường. Tham số mô phỏng như thể hiện trong bảng 1.

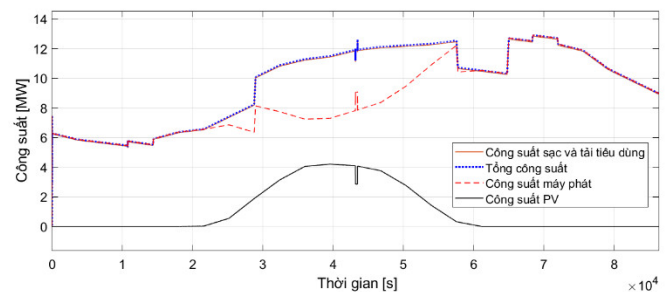
Bảng 1. Tham số mô phỏng

Tham số hệ thống	Giá trị
Số mô-đun PV nối tiếp	10
Điện cảm bộ chuyển đổi PV, L	$3 \cdot 10^{-3} \text{H}$
Điện dung bộ chuyển đổi PV, C_{PV}	$1 \cdot 10^{-3} \text{F}$
Điện áp lưới, V_{grid}	$25 \cdot 10^3 \text{V}$
Cuộn cảm bộ lọc, L_{grid}	$50 \cdot 10^{-6} \text{H}$
Tụ lọc, C_{filter}	$50 \cdot 10^{-6} \text{F}$
Dung lượng pin, C_b	100Ah
Điện cảm của bộ sạc hai chiều, L_{char}	$10 \cdot 10^{-6} \text{H}$
Tụ của bộ sạc hai chiều, C_{char}	$50 \cdot 10^{-6} \text{F}$

Sơ đồ cấu trúc mô phỏng hệ thống được thể hiện trên hình 4.

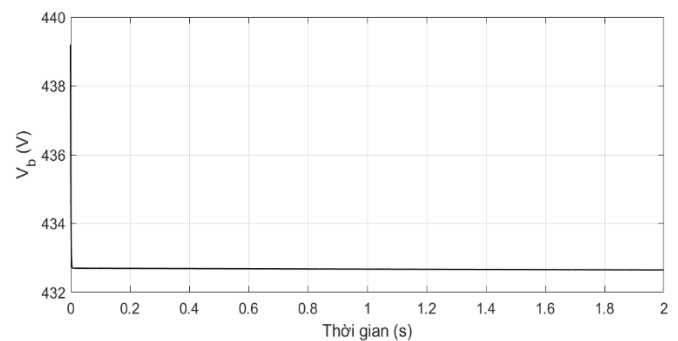


Hình 4. Sơ đồ mô phỏng điều khiển trạm sạc nhanh

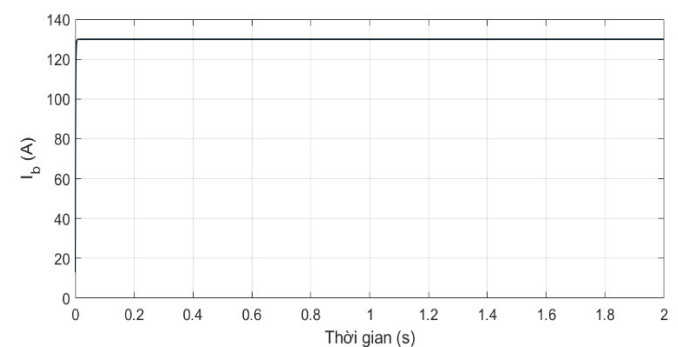


Hình 5. Công suất của các thành phần trong hệ thống

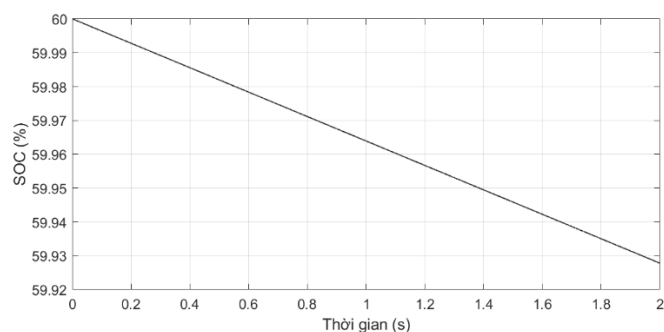
Trường hợp 1: $V_{dc,ref} = 900\text{V}$; $I_b = 130\text{A}$; Bức xạ PV: $0 \div 0.4\text{s} = 1000\text{W/m}^2$; sau đó giảm dần về $\approx 200\text{W/m}^2$ đến 2s .



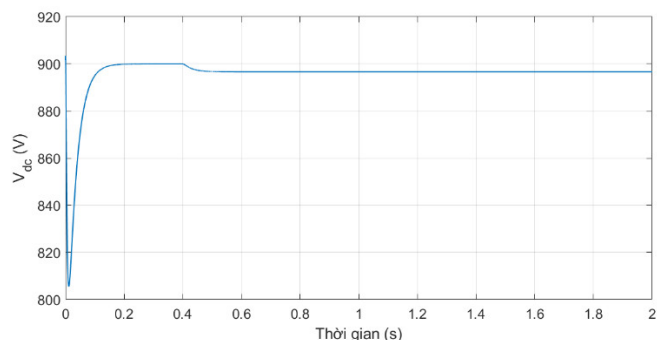
Hình 6. Điện áp sạc



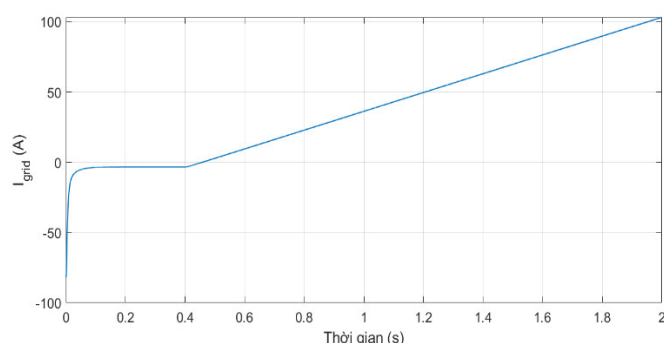
Hình 7. Dòng điện sạc



Hình 8. Trạng thái sạc



Hình 9. Điện áp trên bus một chiều



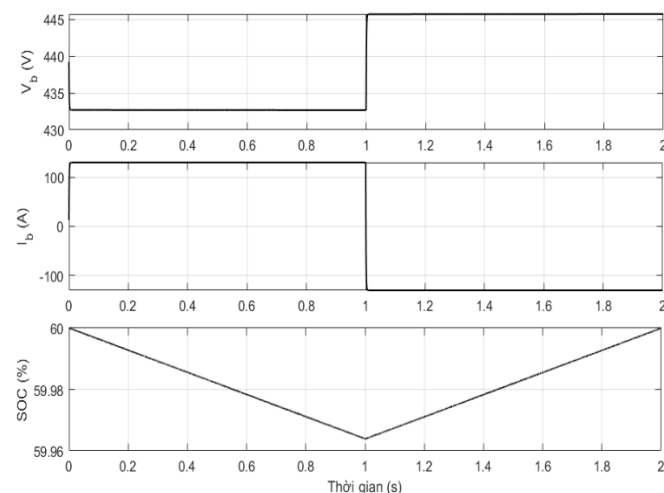
Hình 10. Dòng điện lưới

Trên hình 6, 7, I_b bám $\sim 130A$ ổn định, điện áp V_b ổn định, không có quá điều chỉnh. Cho thấy bộ điều khiển đều bám dòng tốt trong điều kiện bức xạ mặt trời thay đổi chậm. SOC giảm nhẹ từ $\sim 60\%$ xuống $\sim 59,92\%$ trong 2s phù hợp với chế độ nạp (dòng từ bus vào pin). Hình 9 cho thấy khi PV giảm ($\approx 0,4 \div 0,5s$), V_{dc} hạ từ $\sim 900 \div 905V$ về $\sim 895 \div 900V$ rồi ổn định, không rung lớn chứng tỏ vòng điều khiển giữ bus tốt; phần thiếu công suất đã được I_{grid} bù.

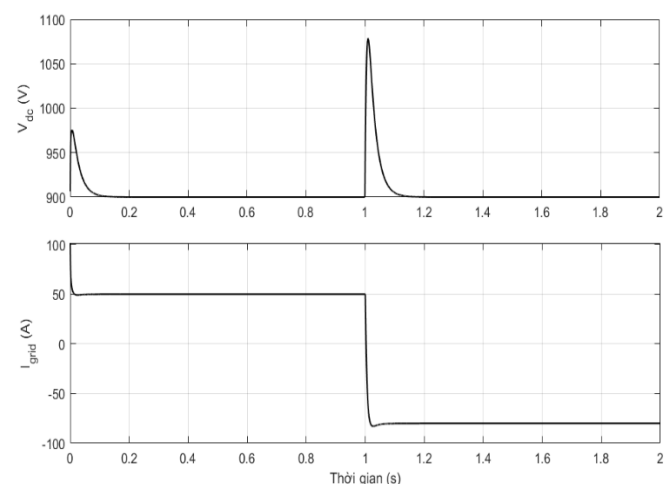
Trường hợp 2: Từ $0 \div 1s$, $I_b = +130A$ (sạc); $1 \div 2s$, $I_b = -130A$ (xả); V_{dc} vẫn điều khiển bám 900V; lưới hấp thụ (nhận công suất).

Hình 12 cho thấy, V_{dc} có quá điều chỉnh $\sim 1,08kV$ ngay sau 1s rồi nhanh chóng về 900V, đây là quá độ do đảo chiều công suất; với SMC được tinh chỉnh tốt, đỉnh và thời gian hồi phục ngắn; I_{grid} đổi dấu rõ ràng tại 1s ($\approx +45A \rightarrow$

$\approx -80A$), thể hiện đổi chiều trao đổi công suất với lưới khi pin từ nạp sang phát. Bộ SMC (đặc trưng bởi mặt trượt và điều khiển theo dấu sai lệch) hạn chế đáng kể thời gian quá độ của V_{dc} và giữ ổn định vòng dòng, trong khi vẫn đảm bảo lưới nhận và cấp đúng công suất. Đây chính là ý nghĩa cốt lõi của điều khiển SMC: bền vững trước bất định và chuyển chế độ.



Hình 11. Trạng thái sạc xả của pin



Hình 12. Điện áp bus DC và dòng lưới

Nhận xét:

Từ các kết quả mô phỏng thấy rằng bộ điều khiển SMC đề xuất có những ưu điểm sau:

- Bền vững và phản ứng nhanh: Ở chuyển chế độ $G2V \leftrightarrow V2G$, giảm t_s của V_{dc} và giữ vòng dòng ổn định, hạn chế quá điều chỉnh ngay cả khi công suất đổi dấu.

- Phân bổ công suất ổn định giữa PV - Lưới - Pin: Khi PV giảm, bus vẫn ổn định $\sim 900V$, dòng điện lưới I_{grid} tự bù, cho thấy SMC hoạt động hài hòa với vòng giữ bus để "đệm" năng lượng qua pin. SMC đạt độ bám cao, đáp ứng nhanh và ổn định, đặc biệt trong các tình huống phi

tuyến, nhiều đo hoặc thay đổi chế độ vận hành. Khả năng điều khiển mạnh mẽ, bền vững với sai lệch mô hình giúp SMC đảm bảo an toàn vận hành và cải thiện chất lượng điện năng trong DC microgrid.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất và đánh giá một chiến lược điều khiển trượt cho trạm sạc nhanh xe điện trong lưới DC microgrid, nhằm nâng cao khả năng ổn định điện áp DC-link, đảm bảo bám dòng sạc chính xác và hỗ trợ lưới điện trong các tình huống vận hành phức tạp. Phương pháp này không chỉ đảm bảo chất lượng sạc mà còn góp phần nâng cao độ tin cậy và khả năng tương tác của hệ thống EVFCS với lưới điện thông minh hiện đại.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. International Energy Agency, *Global EV Outlook 2019: Scaling up the transition to electric mobility*. 2019.
- [2]. M. Nour, H. Ramadan, A. Ali, C. Farkas, "Impacts of plug-in electric vehicles charging on low voltage distribution network," in *2018 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*, 357-362, 2018.
- [3]. S. Wang, L. Lu, X. Han, M. Ouyang, X. Feng, "Virtual-battery based droop control and energy storage system size optimization of a DC microgrid for electric vehicle fast charging station," *Appl. Energy*, 259, 114146, 2020.
- [4]. S. Wang, K. Kuang, X. Han, Z. Chu, L. Lu, M. Ouyang, "A model-based continuous differentiable current charging approach for electric vehicles in direct current microgrids," *J. Power Sources*, 482, p. 229019, 2021.
- [5]. I. Alhurayyis, A. Elkhateb, D. J. Morrow, "Bidirectional DC-DC Resonant Converter Design for Electric Vehicle Charging Stations Integration to MVDC Grids," in *2020 9th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, 236-241, 2020.
- [6]. P. Sivaraman, T. Logeswaran, J. S. S. Raj, S. Boopathimanikandan, "Design and Analysis of Sliding Mode Control for Battery Charging Applications," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 995, 1, p. 12002, 2020.

AUTHOR INFORMATION

Le Thanh Doanh

Faculty of Electrical Engineering, Electric Power University, Vietnam