

RESEARCH AND SIMULATION OF A HYBRID SUPERCAPACITOR-LITHIUM BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM FOR SOLAR ENERGY

Bui Van Huy*, Trinh Trong Chuong, Quach Duc Cuong

Hanoi University of Industry

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	27/9/2023	In a solar power system, solar energy is converted into electrical energy through solar panels. However, solar energy is unstable, and dependent on weather conditions and time of day. Therefore, integrating energy storage systems into solar power systems is very important. Hybrid structures combining supercapacitors and Lithium batteries are considered effective in the field of energy storage. The combination of supercapacitors and Lithium in energy storage aims to harness the advantages of both, including fast charging and discharging capabilities, as well as the high power density of supercapacitors and the high energy storage capacity of Lithium batteries. The objective of this research is to determine the coordinated control strategy of supercapacitors and Lithium-ion batteries in order to highlight the benefits of combining supercapacitors and Lithium-ion batteries in energy storage systems through modeling and simulation. Control loops and power circuits are calculated and verified using Matlab Simulink software. The simulation results demonstrate that the control strategy meets the specified requirements for the response.
Revised:	14/11/2023	
Published:	15/11/2023	
KEYWORDS		
Lithium Battery		
Supercapacitor		
Solar systems		
Energy Storage		
Distributed sources		

NGHIÊN CỨU VÀ MÔ PHỎNG HỆ NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI CÓ KHO ĐIỆN LAI GHEP GIỮA SIÊU TỤ VÀ PIN LITHIUM

Bùi Văn Huy*, Trịnh Trọng Chương, Quách Đức Cường

Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 27/9/2023	Trong một hệ thống điện mặt trời, năng lượng mặt trời được chuyển đổi thành điện năng thông qua các tấm pin mặt trời. Tuy nhiên, năng lượng mặt trời không ổn định, phụ thuộc vào điều kiện thời tiết và thời điểm trong ngày. Do đó, việc tích hợp sử dụng các hệ thống lưu trữ năng lượng trong các hệ thống điện mặt trời là rất quan trọng. Các cấu trúc lai ghép giữa siêu tụ và Pin Lithium được coi là hiệu quả trong lĩnh vực kho điện. Việc kết hợp siêu tụ và Lithium trong hệ lưu trữ năng lượng nhằm tận dụng những ưu điểm của cả hai, bao gồm khả năng sạc và xả nhanh, cũng như mật độ lưu trữ công suất lớn của siêu tụ và khả năng lưu trữ công suất lớn của Pin Lithium. Mục tiêu của nghiên cứu này là xác định được chiến lược điều khiển phối hợp siêu tụ và Pin Lithium qua đó làm nổi bật những lợi ích của việc kết hợp siêu tụ và Pin Lithium trong hệ kho điện thông qua việc mô hình hóa và mô phỏng. Các vòng điều khiển, mạch công suất được tính toán và mô phỏng kiểm chứng bằng phần mềm Matlab Simulink. Kết quả mô phỏng cho thấy chiến lược điều khiển cho kết quả đáp ứng được yêu cầu đặt ra.
Ngày hoàn thiện: 14/11/2023	
Ngày đăng: 15/11/2023	
TỪ KHÓA	
Pin Lithium	
Siêu tụ	
Hệ thống Điện mặt trời	
Kho điện	
Nguồn phân tán	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.8852>

* Corresponding author. Email: buivanhuy@hau.edu.vn

1. Giới thiệu

Hệ thống lưu trữ năng lượng trong hệ thống điện năng lượng mặt trời đóng vai trò quan trọng trong việc cung cấp nguồn điện ổn định và liên tục. Hệ thống lưu trữ năng lượng được sử dụng để lưu trữ năng lượng dư thừa được tạo ra bởi các tấm pin mặt trời khi sản lượng điện mặt trời vượt quá nhu cầu. Khi không có năng lượng mặt trời (ví dụ: vào ban đêm hoặc khi trời nhiều mây), hệ thống lưu trữ sẽ cung cấp năng lượng cần thiết để duy trì hoạt động của hệ thống. Hệ thống lưu trữ năng lượng cũng giúp duy trì sự ổn định và phân phối năng lượng trong hệ thống điện mặt trời. Hệ thống lưu trữ năng lượng cho phép lưu trữ năng lượng mặt trời dư thừa để sử dụng sau này. Điều này tối ưu hóa việc sử dụng các nguồn năng lượng tái tạo và giảm sự phụ thuộc vào lưới điện quốc gia hoặc các nguồn năng lượng không tái tạo.

Pin Lithium mang lại một số lợi thế đáng chú ý cho việc lưu trữ năng lượng điện. Thứ nhất, những loại pin này có mật độ năng lượng cao, cho phép lưu trữ một lượng năng lượng đáng kể ở dạng nhỏ gọn và nhẹ. Ngoài ra, chúng còn có hiệu suất sạc/xả cao, giảm thiểu thất thoát năng lượng trong quá trình lưu trữ và truy xuất. Với vòng đời dài, pin lithium có thể chịu đựng hàng nghìn chu kỳ sạc và xả mà vẫn duy trì dung lượng của chúng. Hơn nữa, pin lithium có tỷ lệ tự xả thấp, đảm bảo duy trì năng lượng trong thời gian dài mà không cần sạc lại thường xuyên. Mặt khác, khả năng mở rộng của chúng cho phép dễ dàng mở rộng hoặc giảm dung lượng lưu trữ để đáp ứng các nhu cầu năng lượng cụ thể, pin lithium không chứa kim loại nặng độc hại và dễ quản lý hơn về khi sản xuất và thải bỏ, do đó, chúng được coi là thân thiện với môi trường [1], [2]. Cấu tạo và những ưu điểm của Pin Lithium đã được trình bày khá cụ thể trong [3].

Siêu tụ (Supercapacitor) hay còn gọi là siêu tụ điện (Ultracapacitor-UC) khác với tụ điện thông thường ở chỗ có mật độ năng lượng rất cao. Nguyên lý tích trữ năng lượng của siêu tụ là nhờ tích điện từ tĩnh chứ không phải là quá trình điện hóa của Pin Lithium, vì vậy siêu tụ điện có mật độ năng lượng cao hơn Pin Lithium [4], [5]. Siêu tụ điện như một thiết bị lưu trữ năng lượng ngắn hạn được sử dụng để bù đắp cho sự biến động nhanh về công suất, trong khi Pin Lithium như một thiết bị lưu trữ năng lượng dài hạn được sử dụng để đáp ứng nhu cầu năng lượng dài hạn. Khi đó, việc kết hợp hai thiết bị lưu trữ năng lượng này sẽ rất thuận lợi để đạt được tốc độ và dung lượng trao đổi năng lượng và công suất. Một số đặc điểm nổi bật của siêu tụ cũng được trình bày khá đầy đủ trong [5], [6].

Đối với các kho lưu trữ năng lượng này, vai trò của các bộ biến đổi điện tử công suất rất quan trọng, những công trình [7] – [10] cũng đã đề cập đến điều khiển các bộ biến đổi DC-DC trong việc điều khiển luồng năng lượng trao từ kho điện (có thể là siêu tụ hoặc Pin Lithium) đến lưới hoặc các hệ thống xe điện.

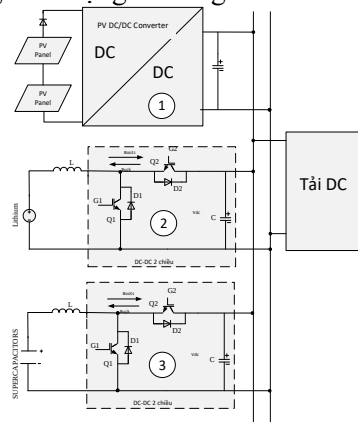
Trong bài báo này, nhóm tác giả tập trung nghiên cứu, thiết kế và mô phỏng một hệ thống điện mặt trời nối lưới có khả năng tích trữ năng lượng bằng cách sử dụng hệ lai ghép giữa Pin Lithium và siêu tụ. Trọng tâm chính của nghiên cứu là thiết lập chiến lược điều khiển phối hợp quá trình sạc và xả của kho điện lai ghép, cũng như tính toán thiết kế mạch lực và các bộ điều khiển cho các bộ biến đổi DC-DC, nhằm đảm bảo ổn định và cân bằng quá trình trao đổi năng lượng.

2. Phương pháp tính toán, thiết kế và xây dựng mô hình mô phỏng hệ thống

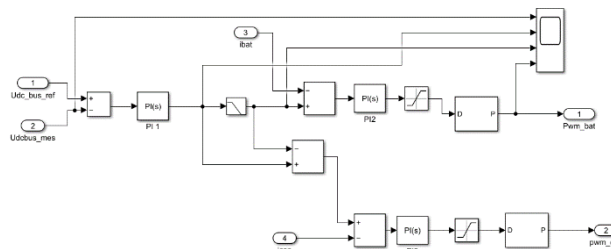
Hệ thống năng lượng trên hình 1 mô tả hệ thống điện mặt trời cung cấp năng lượng điện một chiều vào DC bus, năng lượng từ DC- bus sẽ cung cấp năng lượng cho tải DC và nạp điện cho siêu tụ và Pin Lithium. Bộ biến đổi DC-DC nối giữa Pin mặt trời phải đảm bảo việc thực thi thuật toán bám công suất cực đại. Hai thiết bị lưu trữ năng lượng là Pin Lithium và siêu tụ này được liên kết với một bus điện áp một chiều chung thông qua các bộ biến đổi DC/DC tương ứng. Bộ DC/DC này là bộ biến đổi hai chiều để đảm bảo khả năng phóng nạp năng lượng trên các thiết bị lưu trữ điện.

Chiến lược điều khiển cho hệ thống như sau: Pin Lithium đóng vai trò chính trong việc cân bằng năng lượng DC dài hạn, khi có sự thay đổi về tải tiêu thụ hoặc năng lượng cung cấp từ hệ

thống điện mặt trời. Pin Lithium đóng vai trò như ổn định năng lượng ngắn hạn, đáp ứng được những biến động về công suất nhanh của hệ thống.



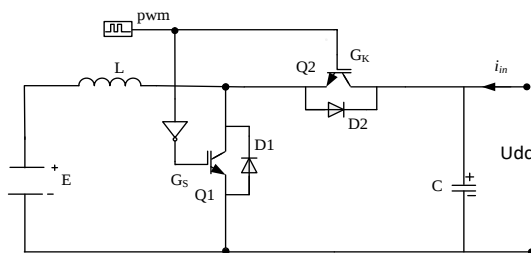
Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống điện mặt trời có kho điện lai ghép



Hình 2. Cấu trúc điều khiển phối hợp giữa Pin Lithium và siêu tụ

Hình 2 mô tả cấu trúc bộ điều khiển phối hợp giữa Pin và siêu tụ. Vòng điều khiển bên ngoài là vòng điều khiển giữ ổn định điện áp một chiều, vòng này quyết định đến việc cân bằng năng lượng trong hệ thống. Nếu điện áp một chiều được cân bằng thì điều này cho thấy tổng công suất phát từ dàn Pin mặt trời, công suất xả từ các kho điện sẽ cân bằng với công suất tiêu thụ và công suất nạp vào các kho điện. Đầu ra bộ điều khiển này sẽ là giá trị dòng điện tổng cần phải bơm vào DC bus từ các kho điện. Dòng điện đặt sẽ được đưa qua khâu lọc thông thấp để lọc bỏ những tín hiệu biến động nhanh trước khi làm giá trị đặt cho vòng điều khiển dòng điện nạp xả Pin, phần còn lại của dòng điện tổng sẽ đưa vào làm giá trị đặt cho vòng điều khiển dòng nạp xả của siêu tụ. Cả Pin Lithium và siêu tụ đều được nối với DC- bus thông qua bộ biến đổi DC-DC hai chiều, ở mục tiếp theo đây sẽ nghiên cứu cấu trúc và mô hình bộ biến đổi này.

2.1. Cấu trúc và mô hình bộ biến đổi DC-DC hai chiều ([8] – [10])



Hình 3. Cấu trúc mạch lực bộ DC-DC hai chiều

Hình 3 mô tả cấu trúc mạch lực bộ biến đổi DC-DC hai chiều, quy ước chiều dương của dòng điện ứng với trạng thái nạp điện, khi dòng điện ứng với trạng thái xả (phóng), khi đó dòng điện sẽ mang dấu âm. Với cấu trúc này, giả sử các van IGBT được coi là lý tưởng, thời gian chuyển mạch là vô cùng nhỏ, bộ biến đổi DC-DC làm việc ở chế độ mà dòng điện chạy qua cuộn dây là liên tục. Tín hiệu điều khiển đóng mở hai van IGBT Q_1 và Q_2 là hai tín hiệu điều khiển theo phương pháp đảo ngược nhau như trong [7], [8].

Dưới đây sẽ phân tích hai chế độ là chế độ nạp và chế độ xả.

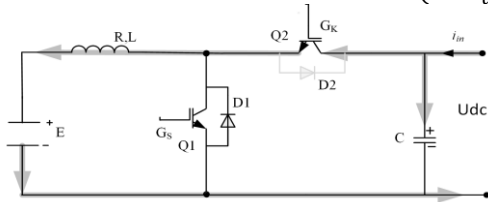
2.1.1. Chế độ nạp: Ở chế độ này van Q_2 sẽ phối hợp làm việc với D_1 , có hai trường hợp

Khi Q_2 dẫn dòng ($G_k = 1$), sơ đồ mạch lực như hình 4, hệ phương trình mô tả trạng thái hoạt động hệ thống như (1):

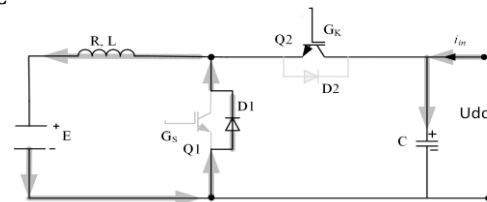
$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{-R}{L} i_L + \frac{(U_{dc}-E)}{L} \\ \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{-1}{C} i_L + \frac{i_{in}}{C} \end{cases} \quad (1)$$

Nếu Q_1 dẫn dòng ứng với $G_k = 0$, sơ đồ mạch lực như hình 5 phương trình mô tả như (2):

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{-R}{L} i_L + \frac{-E}{L} \\ \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{i_{in}}{C} \end{cases} \quad (2)$$



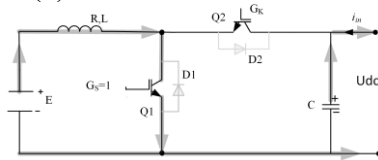
Hình 4. Chế độ nạp và $G_k=1$



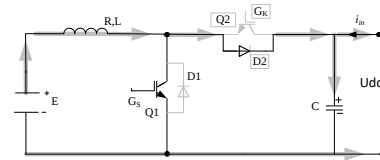
Hình 5. Chế độ nạp với $G_k = 0$

2.1.2. Chế độ xả: Van Q_1 sẽ phối hợp làm việc với D_2 , cũng có hai trường hợp xảy ra

Khi Q_1 dẫn dòng, tức $G_s = 1$, khi đó sơ đồ mạch tương đương như hình 6. Hệ phương trình mô tả cho như (3).



Hình 6. Chế độ xả ứng với $G_s=1$



Hình 7. Chế độ xả với $G_s=0$

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{-R}{L} i_L + \frac{-E}{L} \\ \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{i_{in}}{C} \end{cases} \quad (3)$$

Khi Q_1 khóa (ứng với $G_s = 0$), sơ đồ mạch tương đương cho như hình 7 và phương trình vi phân như (4).

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{-R}{L} i_L + \frac{(U_{dc}-E)}{L} \\ \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{-1}{C} i_L + \frac{i_{in}}{C} \end{cases} \quad (4)$$

Đặt chung một biến h , biến h được xác định như (5).

$$h = \begin{cases} 1 & \text{khi } G_s = 0 \text{ và } G_k = 1 \\ 0 & \text{khi } G_s = 1 \text{ và } G_k = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Hai van Q_1 và Q_2 được điều khiển hoạt động bằng hai tín hiệu nghịch đảo trạng thái của nhau. Điều này cho thấy có thể viết gọn các hệ từ (1) đến (4) bằng một hệ phương trình (6).

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{-R}{L} i_L + \frac{(h \cdot U_{dc} - E)}{L} \\ \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{-1}{C} i_L \cdot h + \frac{i_{in}}{C} \end{cases} \quad (6)$$

Viết (6) dưới dạng ma trận như (7), nhìn vào đây ta thấy cấu trúc này có dạng phi tuyến.

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{U}_{dc} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1/L \\ -1/C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ U_{dc} \end{bmatrix} h + \begin{bmatrix} -E/L \\ i_{in}/C \end{bmatrix} \quad (7)$$

Đặt các biến trạng thái x_1, x_2 là giá trị trung bình dòng điện chạy qua cuộn cảm L và điện áp trên tụ điện C , viết lại (7) thành (8).

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{-R}{L}x_1 + \frac{1}{L}x_2h - \frac{E}{L} \\ \dot{x}_2 = \frac{-1}{C}x_1h + \frac{1}{C}i_{in} \end{cases} \quad (8)$$

Tuyến tính hóa (8) xung quanh điểm làm việc ta có (9).

$$\begin{cases} x_1 = X_{1e} + \tilde{x}_1 \\ x_2 = X_{2e} \\ h = H + \tilde{h} \end{cases} \quad (9)$$

Tại điểm làm việc (X_{1e} , X_{2e}), thay vào (8) ta có

$$\begin{cases} 0 = \frac{-R}{L} \cdot X_{1e} + \frac{1}{L} X_{2e} \cdot H - \frac{E}{L} \\ 0 = -\frac{1}{C} \cdot X_{1e} \cdot H + \frac{1}{C} i_{in} \end{cases} \quad (10)$$

Tuyến tính hóa (8) xung quanh điểm làm việc (X_{1e} , X_{2e}), ta thu được (11)

$$\dot{\tilde{x}}_1 = \frac{-R}{L} \cdot (X_{1e} + \tilde{x}_1 + \frac{1}{L} X_{2e} \cdot (H + \tilde{h})) - \frac{E}{L} \quad (11)$$

Kết hợp (10) và (11) ta có (12).

$$\dot{\tilde{x}}_1 = \frac{-R}{L} \cdot \tilde{x}_1 + \frac{1}{L} X_{2e} \cdot \tilde{h} \quad (12)$$

Từ (12), ta dễ dàng xác định được hàm truyền đạt giữa dòng chạy qua cuộn cảm và hệ số điều chế như (13).

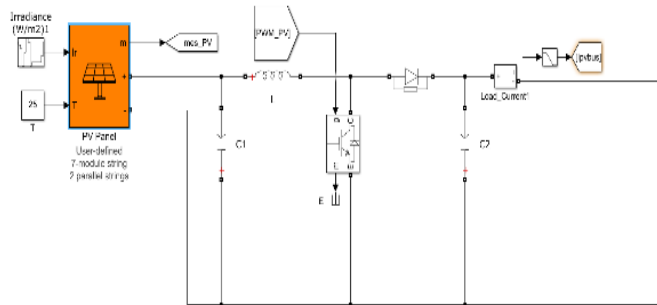
$$G_i(s) = \frac{\tilde{x}_1(s)}{\tilde{h}(s)} = \frac{X_{2e}/R}{(\frac{L}{R})s+1} = \frac{K_1}{T_1s+1} \quad (13)$$

Hàm truyền có dạng khâu bậc 1, ta hoàn toàn có thể lựa chọn bộ điều khiển PI quen thuộc để tổng hợp bộ điều khiển này.

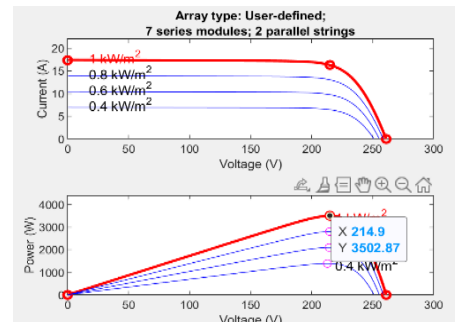
2.2. Tính toán, mô phỏng hệ thống

2.2.1. Khối nguồn phát Pin mặt trời

Khối nguồn phát Pin mặt trời gồm có hai phần tử chính là Mảng Pin mặt trời và bộ biến đổi tăng áp DC-DC, bộ DC-DC này đảm nhận thuật toán bám công suất cực đại như hình 8. Mảng Pin mặt trời tạo gồm hai chuỗi Pin, mỗi chuỗi là 7 tấm Pin mắc nối tiếp nhau có hệ thống nhận ánh sáng thông qua tấm PV Panel.



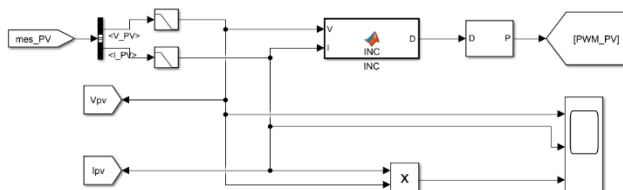
Hình 8. Khối Pin mặt trời và bộ DC-DC



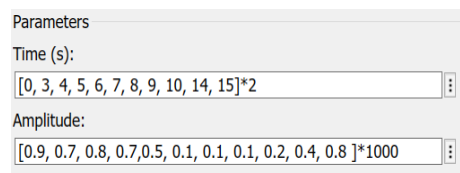
Hình 9. Đồ thị đặc tính P-I và P-V

Ta có đặc tính P-I và P-V như hình 9, căn cứ vào hình này ta thấy công suất dàn pin sẽ đạt cỡ 3500W ứng với điện áp cỡ 215V. Bộ biến đổi DC-DC kết nối năng lượng phát ra từ mảng Pin mặt trời với DC-bus. Bộ biến đổi này gồm có 4 linh kiện điện tử cơ bản đó là cuộn cảm L, van bán dẫn S (có thể MOSFET hoặc IGBT), diode D và tụ điện C. Nguồn điện áp DC ngõ vào được nối với cuộn cảm. Để thiết kế bộ Boost thì ta cần có định điện áp đầu vào là khoảng 214V và công suất khoảng 3500W, điện áp một chiều DC bus chọn bằng 250V, tần số đóng cắt van chọn là 10kHz, từ đó ta tính được $L = 0,0021$ H, $C = 6,7424 \cdot 10^{-6}$.

Việc điều khiển bộ DC-DC tăng áp này nhằm đảm bảo công suất chuyển từ phía Pin mặt trời vào DC-Bus là lớn nhất, điện áp đầu ra bộ biến đổi này được giữ xung quanh giá trị mong muốn là 300V, điện áp đầu vào bộ biến đổi DC-DC được điều khiển sao cho đảm bảo công suất phát ra từ Pin mặt trời là cực đại. Hiện nay, có rất nhiều thuật toán bám công suất cực đại tuy nhiên trong bài báo này tác giả vẫn dùng phương pháp quen thuộc là INC. Hình 10 mô tả nguyên lý điều khiển bộ biến đổi DC-DC nhằm đảm bảo bám công suất cực đại, dòng điện và điện áp của dây Pin được đo về thực hiện thuật toán bám công suất cực đại để đưa vào khâu tính toán bám công suất cực đại, đầu ra của khối tính toán này là hệ số điều chế D của mạch Boost.

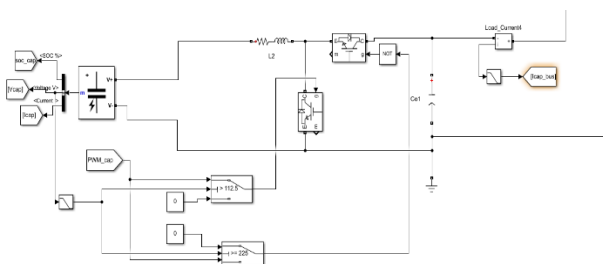


Hình 10. Bộ DC-DC nối PV với DC-Bus



Hình 11. Kịch bản biến đổi cường độ ánh sáng theo thời gian

2.2.2. Kho điện dung siêu tụ



Hình 12. Sơ đồ khối kho điện dung siêu tụ

Parameters	Stern	Self-discharge
Rated capacitance (F)	8	
Equivalent DC series resistance (Ohms)	8.9e-3	
Rated voltage (V)	250*0.9	
Number of series capacitors	37	
Number of parallel capacitors	1	
Initial voltage (V)	250*0.9*sqrt(5/8)	
Operating temperature (Celsius)	25	

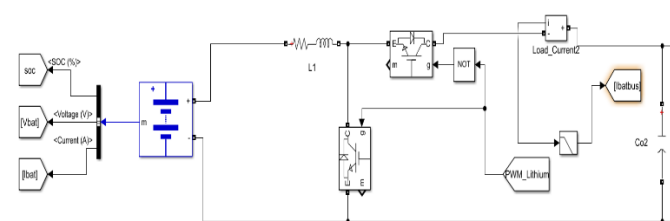
Hình 13. Thông số siêu tụ

Công suất tối đa cung cấp cho DC bus cỡ $P_{maxreq} = 3,5kW$, khi siêu tụ được nạp năng lượng, điện áp của siêu tụ tăng dần đến giá trị tối đa U_{cmax} . Khi siêu tụ xả năng lượng, điện áp siêu tụ cũng giảm dần đến giá trị U_{cmin} , lựa chọn U_{scmin} hợp lý để siêu tụ không bị xả ở mức năng lượng quá thấp. Theo [6] ta chọn $U_{scmin} = U_{scmax}/2$ và tính được điện dung siêu tụ như (14).

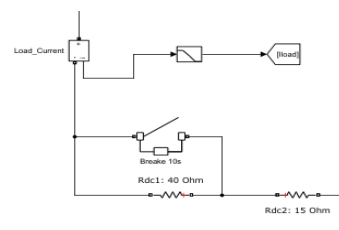
$$C_{sc} = \frac{\left(\frac{8}{3}\right) \cdot P_{maxreq} \cdot \Delta t_{max}}{\frac{1}{2} U_{scmax}^2} \quad (14)$$

Lựa chọn U_{scmax} dựa theo giá trị điện áp DC bus, theo [6], nên chọn $U_{scmax} = 0,9 \cdot U_{dc} = 225V$. Thông số siêu tụ dùng để mô phỏng cho như hình 13. Thông số của cuộn dây và tụ điện trong hình 12 được tính tương tự như các mạch boost, $L = 0,0013H$, $C = 6,1224 \cdot 10^{-5} F$.

2.2.3. Kho điện dung Pin Lithium



Hình 14. Khối lưu trữ năng lượng dùng Pin Lithium



Hình 15. Tải một chiều

Pin Lithium sẽ được liên kết với DC- bus thông qua bộ biến đổi DC-DC hai chiều như hình 14. Trong hệ thống sẽ dung hệ thống Pin có điện áp tổng là 48V, dung lượng tổng của hệ thống

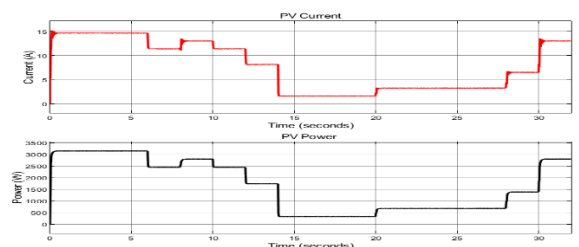
Pin là 7,5Ah. Tương tự như mục 2.2.2 ta cũng tính được thông số của mạch DC-DC ứng với hệ thống Pin là với $L = 4,7491.10^{-4}$ H, $C = 5,0678.10^{-5}$ (F).

2.2.4. Tải

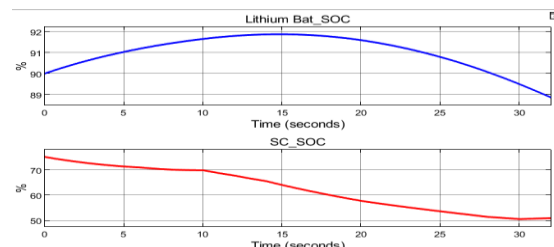
Mô hình tải như hình 15 lúc ban đầu có ba điện trở $R_{dc1,2}$ với điện trở tương đương là 45Ω , sau 10s máy cắt đóng chỉ còn điện trở $R_{dc2}=15\Omega$.

3. Kết quả và bàn luận

Với các tính toán, thiết kế ở mục 2, tiến hành mô phỏng. Hình 16 mô tả dòng điện và công suất phát ra bơm vào DC-bus. Việc dòng điện và công suất phát của dàn pin thay đổi là do kịch bản thay đổi cường độ ánh sáng giả định như hình 11. Kết quả mô phỏng trên hình 18 và hình 19 thể hiện điện áp và dòng điện trên Pin Lithium và Siêu tụ. Dòng điện âm ứng với trạng thái các thiết bị lưu trữ điện đang phóng điện, dòng điện dương ứng với trạng thái nạp điện. Dựa vào kết quả mô phỏng trên hình 17, 18, 19, ta thấy siêu tụ phản ứng nhanh hơn nhiều so với Pin Lithium nhằm đáp ứng kịp với các sự biến động của nguồn năng lượng phát ra từ Pin mặt trời tại các thời điểm có sự thay đổi cường độ ánh sáng và sự thay đổi phụ tải.

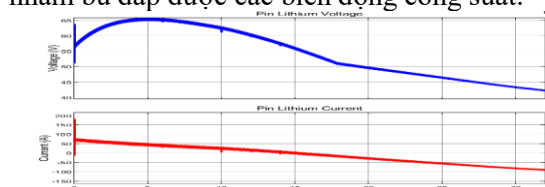


Hình 16. Dòng điện và công suất phát từ PV

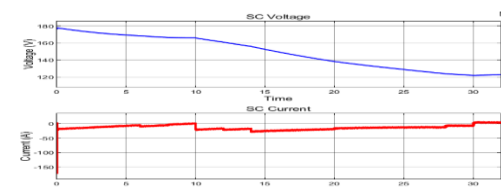


Hình 17. SOC của Pin Lithium và siêu tụ

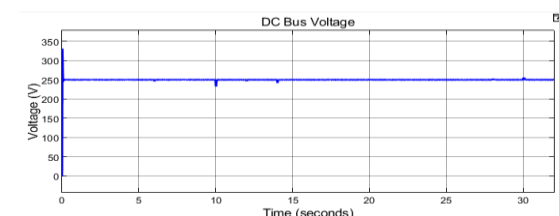
Kết quả mô phỏng trên hình 20 và hình 21 cho thấy mặc dù có sự thay đổi nguồn phát năng lượng từ Pin mặt trời và sự biến động của phụ tải, điện áp một chiều DC- Bus vẫn được giữ ở mức giá trị đặt là 250V, điều này được đảm bảo là do việc điều khiển phóng nạp các kho điện nhằm bù đắp được các biến động công suất.



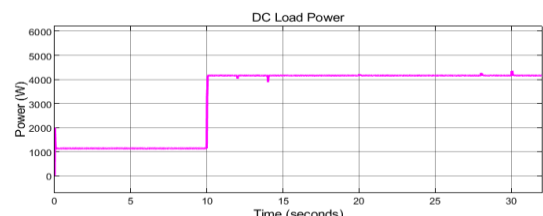
Hình 18. Dòng điện và điện áp của Pin Lithium



Hình 19. Điện áp và dòng điện phóng/nạp của siêu tụ



Hình 20. Điện áp DC-bus



Hình 21. Công suất tải phía một chiều

4. Kết luận

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu và mô phỏng hệ thống lưu trữ năng lượng lai ghép giữa Pin Lithium và siêu tụ. Đóng góp chính của bài báo là đã xây dựng được chiến lược điều khiển nạp xả phối hợp giữa siêu tụ và Pin Lithium nhằm ổn định điện áp một chiều trung gian DC-bus,

cân bằng quá trình trao đổi năng lượng ngay cả khi có sự biến động về năng lượng phát từ Pin mặt trời hoặc có sự biến động từ tải. Kết quả nghiên cứu sẽ là tiền đề quan trọng để triển khai các hệ thống thực nghiệm trên các thiết bị thực tế.

Lời cảm ơn

Bài báo này được thực hiện với sự hỗ trợ kinh phí từ đề tài NCKH cấp trường Mã số: 13-2023-RD/HĐ-ĐHCN.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. Michalczuk, L. Grzesiak, and B. Ufnalski, "A lithium battery and ultracapacitor hybrid energy source for an urban electric vehicle," *Electrical Review*, vol. 88, no. 4B, pp. 158-162, 2012.
- [2] J.W. Dixon and M.E. Ortuzar, "Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no.6, pp. 2806-2814, 2010.
- [3] Z. Ghassan, S. A. Rajendra, N.E. S'anchez, and A.B. Wilber, "Lithium-ion battery-packs for solar home systems: Layout, cost and implementation perspectives," *Journal of Energy Storage*, vol. 32, 2020, Art. no. 101985, doi: 10.1016/j.est.2020.101985.
- [4] Y. Zhang, Z. Jiang, and X. Yu, "Control Strategies for Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems," *IEEE Energy 2030 Conference*, 2008, pp. 1-6
- [5] G. Wang, H. Wang, B. Zhong, L. Zhang, and J. Zhang, "Supercapacitor's Applications," in *Electrochemical Energy Storage and Conversion*, Taylor & Francis Group, LLC, 2016, pp. 479 492, doi:10.1201/b19061-27.
- [6] T. A. Pham, "Controls of Supercapacitor Energy Storage Systems Integrated in Remote Area Wind-Diesel Power Supply Systems," Doctoral Dissertation in Control Engineering and Automation, Hanoi University of Science and Technology, 2015
- [7] T. A. Pham, V. C. Nguyen, X. D. Cao, and P. Q. Nguyen, "A Predictive Control Approach for Bidirectional DC-DC Power Converter in Supercapacitor Energy Storage Systems," *Journal of Computer Science and Cybernetics*, vol. 31, no. 2, pp. 123-132, 2015, doi: 10.15625/1813-9663/31/2/4413.
- [8] M. E. Glavin, "A Stand-alone Photovoltaic Supercapacitor Battery Hybrid Energy Storage System," *Power Electronics and Motion Control Conference*, 2008, pp. 1688-1695.
- [9] J. Zhang, "Bidirectional DC-DC Power Converter Design Optimization, Modeling and Control," Doctoral Dissertation in Electrical Engineering, the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008.
- [10] X. Zhang, X. W. Z. Feng, and X. Guo, "A New Control Strategy for Bi-Directional DC-DC Converter in Electric Vehicle," *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEMS.2011.6073569.