

CHIẾN LƯỢC ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG ĐIỆN MẶT TRỜI MÁI NHÀ KẾT HỢP VỚI ẮC QUY THEO HƯỚNG TỰ SẢN TỰ TIÊU

CONTROL STRATEGY FOR ROOFTOP SOLAR PV SYSTEMS COMBINED WITH BATTERIES TOWARDS SELF-CONSUMPTION

Ma Thị Thương Huyền*, Vũ Hoàng Giang

Trường Đại học Điện lực, Việt Nam¹

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: huyenmtt@epu.edu.vn

(Nhận bài / Received: 16/5/2024; Sửa bài / Revised: 24/6/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 25/9/2024)

Tóm tắt - Để hạn chế ảnh hưởng do tính chất bất định của các nguồn năng lượng tái tạo tới quá trình vận hành an toàn và ổn định của lưới điện, nâng cao hiệu suất sử dụng năng lượng cho hộ tiêu thụ, sử dụng hệ thống lưu trữ năng lượng là giải pháp đang được nhiều quốc gia quan tâm và thực hiện. Bài báo trình bày chiến lược quản lý và điều khiển vận hành phóng, nạp của hệ thống lưu trữ kiểu ắc quy trên cơ sở đảm bảo nhu cầu của phụ tải cho một hộ tiêu thụ có lắp đặt hệ thống điện mặt trời mái nhà. Thuật toán điều khiển thực hiện nạp cho ắc quy vào những thời điểm công suất của nguồn điện mặt trời dư thừa và giờ thấp điểm, cho ắc quy phóng điện vào giờ cao điểm nhằm giảm chi phí tiền điện cho hộ tiêu thụ và san bằng đồ thị phụ tải. Kết quả mô phỏng cho thấy, chi phí tiền điện của hộ tiêu thụ đã được giảm đáng kể xác nhận tính hiệu quả của thuật toán đề xuất.

Từ khóa - Ắc quy lưu trữ; điện mặt trời áp mái; hệ thống quản lý năng lượng; tự sản, tự tiêu

1. Đặt vấn đề

Hệ thống điện hiện nay ở Việt Nam đang được thiết kế và vận hành chủ yếu theo hướng truyền tải điện năng từ những nhà máy phát điện lớn qua lưới truyền tải và phân phối để cung cấp cho phụ tải điện. Sự phát triển mạnh mẽ của nguồn điện mặt trời mái nhà (PV) trong những năm gần đây đã tạo ra thay đổi lớn đối với lưới điện phân phối. Do tính chất bất định của nguồn điện mặt trời, tích hợp một lượng lớn nguồn điện này vào lưới gây ra những thách thức đối với công tác quản lý và vận hành lưới điện như các vấn đề về quá điện áp, dao động điện áp, dòng điện ngược gây quá tải đường dây và máy biến áp, ảnh hưởng tới hoạt động tin cậy của hệ thống bảo vệ rơ le [1], [2]. Chính sách khuyến khích phát triển điện mặt trời mái nhà theo hướng tự sản tự tiêu nhằm giảm gánh nặng lên lưới điện được nhiều nước áp dụng trong đó có Việt Nam. Các nghiên cứu đã cho thấy, chiến lược điều khiển nhằm tối đa hóa khả năng tự tiêu thụ năng lượng mặt trời trong các hệ thống quang điện dân dụng sẽ trở nên hiệu quả hơn khi kết hợp ắc quy lưu trữ vào hệ thống hoặc sử dụng các biện pháp điều chỉnh phụ tải (DR) ở phía hộ tiêu thụ [3], [4].

Cùng với sự phát triển của công nghệ chế tạo, giá thành ắc quy ngày càng giảm và tuổi thọ của ắc quy được cải thiện đáng kể trong những năm vừa qua [5]. Xu hướng lắp đặt các hệ thống ắc quy tích hợp với hệ thống điện mặt trời mái nhà ngay tại các hộ tiêu thụ thương mại, công nghiệp,

Abstract - In order to mitigate the impact of the intermittent nature of renewable energy sources on the safe and secure operation of the power grid, and to enhance energy efficiency, the application of energy storage systems is a preferred solution that received much attention in many countries. This paper presents a strategy for managing and controlling the charging and discharging modes of a battery storage system based on ensuring the load requirements for consumers who have installed rooftop photovoltaic (PV) systems. The control algorithm is simulated to implement the charging mode of the battery during surplus solar power periods and off-peak hours, and the discharging mode of the battery during peak hours to reduce electricity costs for households and level the load profile. Simulation results show that, the payment of electricity has been significantly reduced which confirms the efficiency of the proposed algorithm.

Key words - Battery storage system; PV system; energy management system; self-consumption

và dân dụng ngày càng tăng. Hệ thống quản lý năng lượng thông minh (EMS) cho phép các hộ tiêu thụ sở hữu hệ thống PV-ắc quy có thể giám sát và đưa ra chiến lược phù hợp để điều khiển vận hành hệ thống.

Tối đa hóa khả năng tự tiêu thụ trong các hệ thống điện mặt trời áp mái kết hợp với ắc quy là chiến lược thường được sử dụng. Theo đó, hệ thống EMS sẽ được cài đặt điều khiển sao cho lượng điện năng từ nguồn năng lượng mặt trời được tiêu thụ nhiều nhất có thể và công suất thừa được lưu trữ vào trong ắc quy để sử dụng vào buổi tối. Ắc quy chỉ nạp công suất thừa từ nguồn PV với khả năng nạp lớn nhất cho phép [6]. Nhằm khuyến khích người dân tự nguyện tham gia vào chương trình DR, giảm công suất tiêu thụ vào giờ cao điểm, biểu giá bán điện theo thời gian sử dụng (ToU) được nhiều Công ty Điện lực (CTDL) áp dụng. Chiến lược điều khiển sử dụng điện lưới để nạp cho ắc quy vào những thời điểm giá điện thấp, sau đó sử dụng điện năng đã lưu trữ để cung cấp cho phụ tải vào thời điểm giá điện cao theo biểu giá (ToU) làm giảm đáng kể tổng chi phí tiêu thụ điện năng cho hộ tiêu thụ [7]. Các chiến lược điều khiển này có ưu điểm đơn giản và hiệu quả nhưng điểm hạn chế của chúng là không áp dụng được cho những hệ thống nguồn phân tán phức tạp [8].

Bên cạnh hai chiến lược dựa trên thuật toán Heuristic như kể trên các thuật toán tối ưu cũng được sử dụng rộng rãi. Hệ thống EMS gồm 2 lớp: lớp trên sử dụng thuật toán tối ưu tuyến tính nguyên thực hỗn hợp (MILP) nhằm tối ưu

¹ Electric Power University, Vietnam (Huyen Ma-Thi-Thuong, Hoang-Giang Vu)

hóa năng lượng sử dụng cho hộ tiêu thụ và lớp dưới nhằm xác định công suất đặt tối ưu cho bộ điều khiển theo thời gian thực được các tác giả sử dụng cho hệ thống quản lý năng lượng của một hộ gia đình [9]. Thuật toán quy hoạch động (DP) được các tác giả sử dụng trong bài báo [10] nhằm tối thiểu hóa giá trị hiện tại dòng (NPV) trong một năm có xét tới giá thành điện năng (ToU), tuổi thọ của ắc quy và đặc tính điều chỉnh phụ tải DR. Cùng với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ trí tuệ nhân tạo, các mô hình quản lý năng lượng dựa trên thuật toán học sâu (Deep learning), internet vạn vật (IoT) cũng được đề xuất trong nhiều nghiên cứu [11], [12] nhằm thu thập, giám sát và tối ưu hóa việc tự tiêu thụ năng lượng. Tuy nhiên, các thuật toán điều khiển này đều khá phức tạp, khối lượng tính toán lớn, chi phí đầu tư cho cơ sở hạ tầng cao.

Ắc quy là bộ phận ảnh hưởng lớn tới vốn đầu tư, quá trình vận hành ổn định và hiệu quả của hệ thống. Tuy vậy, hầu hết các nghiên cứu đề cập ở trên chưa xem xét tới trạng thái của ắc quy trong các chế độ vận hành. Bài báo [13] đã trình bày phương pháp quản lý năng lượng sử dụng logic mờ (Fuzzy Logic) có xét tới tình trạng sức khỏe của ắc quy. Theo đó tuổi thọ của ắc quy được nâng cao thông qua chiến lược điều khiển thông minh loại bỏ những chu kỳ phóng/nạp không cần thiết. Cụ thể, ắc quy phóng điện trong thời gian phụ tải đỉnh và nạp điện từ lưới dựa trên kết quả dự báo điện năng.

Với mục tiêu chính là tự sản tự tiêu, việc sử dụng thêm hệ thống ắc quy sẽ hạn chế tối đa công suất ngược trên lưới phân phối, hạn chế được các ảnh hưởng tiêu cực tới lưới. Ngoài ra, hệ thống PV kết hợp với ắc quy cũng có thể tham gia vào các dịch vụ phụ trợ như việc điều chỉnh điện áp, điều chỉnh tần số của lưới điện [14], [15].

Trong nghiên cứu [8] các tác giả đã thực hiện so sánh bảy chiến lược điều khiển hệ thống PV-ắc quy, bao gồm ba chiến lược dựa trên phương pháp Heuristic, hai chiến lược dựa trên phương pháp tối ưu hóa, và hai chiến lược dựa trên công nghệ trí tuệ nhân tạo. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng việc sử dụng chiến lược quản lý năng lượng phức tạp hơn có thể không cải thiện hiệu suất và khả năng kinh tế của hệ thống PV-ắc quy bởi chất lượng dữ liệu đầu vào kém và hoạt động liên tục ảnh hưởng xấu tới tuổi thọ ắc quy. Kết quả mô phỏng của nhóm nghiên cứu cũng cho thấy các chiến lược dựa trên thuật toán Heuristic được điều chỉnh tốt có thể đưa ra các giải pháp gần tối ưu khi so sánh với chiến lược sử dụng kỹ thuật tối ưu hóa MILP.

Nhiều quốc gia trên thế giới đã triển khai các dự án thí điểm với mục tiêu hiệu rõ hiệu quả của các chiến lược kiểm soát khác nhau đối với hoạt động tự tiêu dùng. Các yếu tố như vị trí địa lý, khí hậu và hồ sơ năng lượng hộ gia đình đều ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả của các chiến lược này. Thực tế cho thấy, điện năng phát ra của các nguồn PV nên được tích trữ trong ESS trong những khoảng thời gian có công suất phát lớn và sử dụng lại vào ban đêm thay vì nhận điện năng từ lưới điện [16]. Ở Vương quốc Anh, thời gian khấu hao tài sản cố định dài hơn do thiếu hụt sự hỗ trợ về công nghệ PV từ chính phủ. Mặc dù vậy sự kết hợp PV và ESS đã làm gia tăng đáng kể lợi nhuận của hệ thống [17]. Cơ chế chính sách hỗ trợ thúc đẩy sự tích hợp của ESS vào các hệ thống sử dụng năng lượng tái tạo như điện gió và mặt

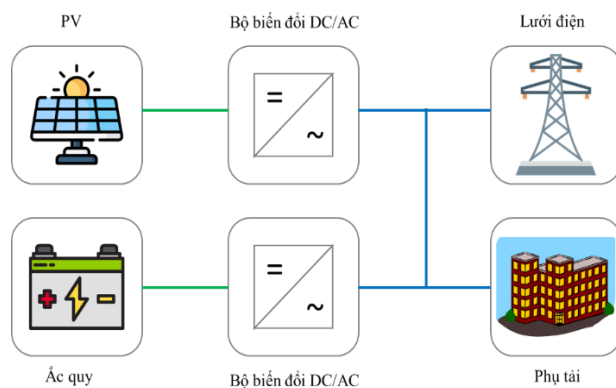
trời. Một ví dụ điển hình là tại Đức, chính phủ trợ cấp lên tới 30 % chi phí đầu tư cho ESS đối với các hệ thống điện mặt trời gia đình [18]. Mô hình đề xuất trong [19] cho thấy, các hộ tiêu thụ chỉ phải trả 0,05 \$/kWh để lưu trữ điện năng phát ra của PV nhưng có thể bán trở lại lưới điện với giá 0,17 \$/kWh. Đặc điểm tiêu thụ điện của các hộ tiêu thụ khác nhau sẽ có hệ số tự tiêu thụ khác nhau. Tại Anh, hệ số tự tiêu thụ điện mặt trời của các hộ tiêu dùng dân cư nằm trong khoảng 31-37% trong khi đối với các hộ tiêu thụ không thuộc nhóm này có hệ số cao hơn và đạt từ 40-50% [20].

Bài báo này trình bày phương pháp điều khiển hệ thống ắc quy của một hộ tiêu thụ thương mại có lắp đặt hệ thống điện mặt trời áp mái theo định hướng tự sản, tự tiêu. Thuật toán điều khiển với mục tiêu tận dụng tối đa công suất của nguồn PV theo biểu giá điện thời gian thực có xét đến trạng thái của ắc quy nhằm giảm chi phí mua điện từ lưới điện đồng thời tham gia điều chỉnh đồ thị phụ tải của hệ thống.

2. Cấu trúc hệ thống và thuật toán điều khiển

2.1. Cấu trúc hệ thống điện mặt trời mái nhà tích hợp với ắc quy

Hai cấu trúc của hệ thống điện mặt trời mái nhà kết hợp với ắc quy thường dùng hiện nay là hệ thống kết nối một chiều (DC coupled system) và hệ thống kết nối xoay chiều (AC coupled system) [21]. Với cấu trúc theo kiểu một chiều, PV và ắc quy được kết nối với nhau thông qua các bộ biến đổi DC-DC hiệu suất cao. Sau đó, bộ nghịch lưu được sử dụng để biến đổi dòng điện từ một chiều sang xoay chiều để cung cấp cho phụ tải. Cấu trúc này có ưu điểm là hiệu suất cao, chi phí thấp, nhưng bị giới hạn về lượng công suất và điện năng qua nghịch lưu. Ngược lại, với cấu trúc xoay chiều, PV và ắc quy được nối với lưới điện xoay chiều qua bộ biến đổi DC-AC riêng nên có thể vận hành linh hoạt hơn, khả năng kết nối giữa hệ thống PV và ắc quy với lưới điện xoay chiều cao hơn, tuy nhiên hiệu suất thấp hơn và vốn đầu tư cao hơn so với cấu trúc một chiều.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc của hệ thống điện mặt trời mái nhà kết hợp với ắc quy

Trong nghiên cứu này, hệ thống điện mặt trời mái nhà nối lưới kết hợp với ắc quy để cung cấp điện cho phụ tải có sơ đồ cấu trúc kết nối kiểu xoay chiều như Hình 1 được lựa chọn để phù hợp với tình hình thực tế của Việt Nam. Các phần tử chính của hệ thống bao gồm: pin mặt trời, ắc quy và phụ tải điện. Các tấm pin mặt trời mái nhà (PV) được nối với phía xoay chiều (phụ tải và lưới điện) thông qua một bộ nghịch lưu (bộ biến đổi DC/AC). Bộ biến đổi của

PV được điều khiển bám điểm công suất cực đại (MPPT) để tận dụng tối đa năng lượng mặt trời. Công suất đặt của hệ thống PV được chọn tương ứng với công suất phụ tải. Tuy nhiên, do phụ tải luôn thay đổi nên có những thời điểm công suất của hệ thống PV lớn hơn công suất phụ tải.

Hệ thống ắc quy nối với lưới điện xoay chiều thông qua bộ biến đổi DC/AC để biến đổi dòng điện xoay chiều thành một chiều hoặc ngược lại tùy theo chế độ làm việc của ắc quy. Nhiệm vụ của ắc quy là lưu trữ toàn bộ điện năng từ nguồn PV khi công suất nguồn PV phát ra lớn hơn công suất của phụ tải để công suất dư thừa không phát ngược vào lưới điện. Phần công suất lưu trữ được sử dụng vào những thời điểm nguồn PV không đủ cung cấp cho phụ tải. Do đó, dung lượng của ắc quy cần được chọn sao cho có thể lưu trữ hết lượng điện năng thừa từ hệ thống PV. Công suất nạp/phóng của ắc quy có giá trị giới hạn là P_{Batmax} . Công suất của ắc quy (P_{Bat}) mang dấu âm để chỉ trạng thái ắc quy nạp điện và mang dấu dương chỉ trạng thái ắc quy phóng điện. Ngoài ra, có thể chọn chế độ nạp chậm với dung lượng nạp bằng $k.P_{Bat}$, với hệ số $k < 1$. Dung lượng nạp (hoặc phóng) của ắc quy tại thời điểm t được xác định theo công thức (1).

$$E_{Bat}(t) = E_{Bat}(t - 1) + P_{Bat}(t) \cdot \Delta T \quad (1)$$

Phụ tải điện được xét đến trong nghiên cứu là một hộ tiêu thụ điện thuộc nhóm đối tượng khách hàng kinh doanh, nối với lưới điện ở cấp điện áp 380 V, thực hiện mua bán điện theo biểu giá giờ cao điểm, giờ bình thường và giờ thấp điểm, hộ tiêu thụ có tham gia chương trình điều chỉnh đồ thị phụ tải (DR) của CTĐL.

Hệ thống được trang bị các đồng hồ đo thông minh để đo lường công suất (công suất của phụ tải, công suất của hệ thống PV, công suất của ắc quy và công suất trao đổi với lưới điện) theo thời gian thực. Các đồng hồ đo thông minh được nối với hệ thống quản lý, điều khiển, nơi thực hiện chức năng giám sát, điều khiển vận hành toàn bộ hệ thống.

2.2. Thuật toán điều khiển

Bài báo sử dụng thuật toán Heuristic để điều khiển vận hành hệ thống ắc quy dựa trên ba nguyên tắc sau:

- Sử dụng tối đa công suất phát ra từ hệ thống điện mặt trời bằng cách nạp cho ắc quy từ nguồn PV khi PV thừa công suất.

- Điều khiển theo biểu giá bán điện theo thời gian thực: Ắc quy sẽ phóng điện để cung cấp cho phụ tải vào giờ cao điểm, và nạp từ lưới điện với một dung lượng phù hợp đủ để dự phòng.

- Đảm bảo tuổi thọ của ắc quy bằng cách quản lý trạng thái nạp (SOC) và chu kỳ nạp/ phóng, tránh tình trạng nạp/ phóng liên tục và không cần thiết. Trạng thái nạp của ắc quy phải nằm trong giới hạn an toàn nhằm tránh hiện tượng quá nạp hoặc phóng quá sâu gây cạn kiệt ắc quy:

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (2)$$

Trong đó: SOC_{min} và SOC_{max} tương ứng là giới hạn dưới và giới hạn trên của trạng thái nạp.

Toàn bộ quá trình điều khiển phải đảm bảo đáp ứng đủ công suất cho phụ tải điện:

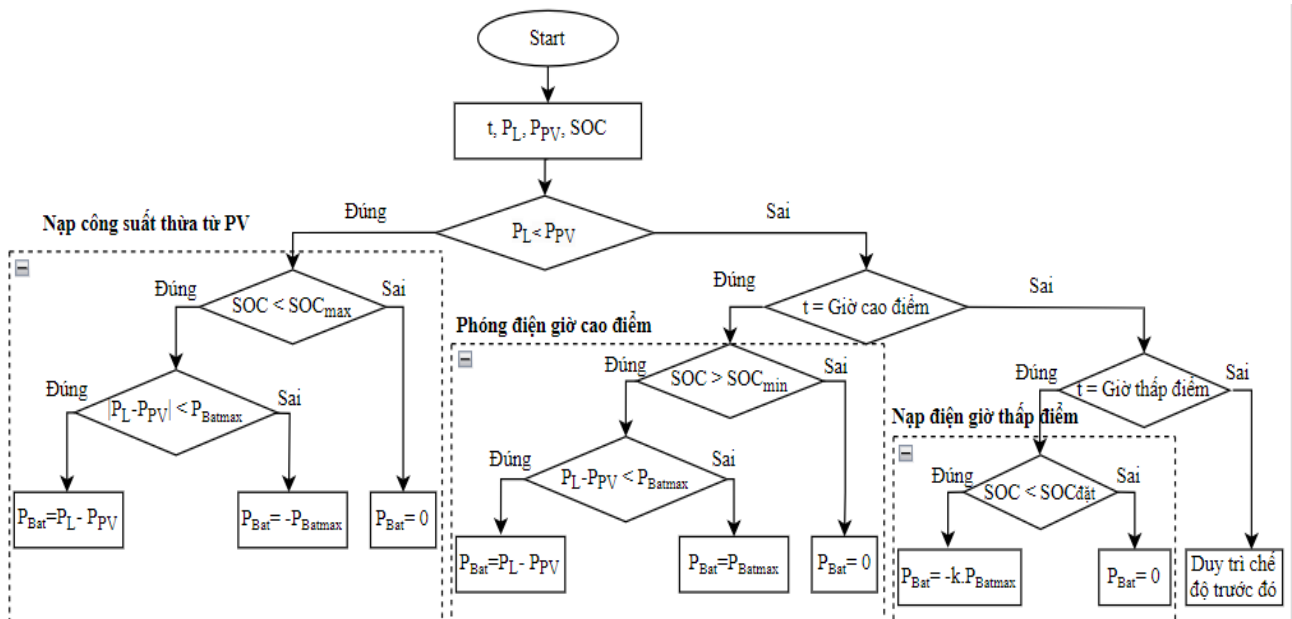
$$P_{PV}(t) + P_{Bat}(t) + P_{L\text{v\`o}i}(t) = P_L(t) \quad (3)$$

Chi phí tiêu thụ điện năng từ lưới được xác định theo công thức:

$$C = \sum_{i=0}^T C_i \cdot A_i \quad (4)$$

Trong đó, C : Chi phí mua điện (đồng); C_i : Giá thành điện năng tại giờ thứ i (đồng/kWh); A_i : Lượng điện năng nhận từ lưới điện trong giờ thứ i (kWh).

Trên cơ sở các nguyên tắc điều khiển đã trình bày ở trên, thuật toán điều khiển chế độ nạp của ắc quy được đề xuất với lưu đồ thuật toán trên Hình 2.



Hình 2. Thuật toán điều khiển chế độ làm việc của ắc quy

2.2.1. Trường hợp công suất của nguồn PV lớn hơn công suất của phụ tải: ắc quy nạp công suất thừa từ hệ thống điện mặt trời

Nếu công suất phát của PV (P_{PV}) lớn hơn công suất của phụ tải (P_L) và trạng thái nạp của ắc quy nhỏ hơn giới hạn trên ($SOC < SOC_{max}$) thì công suất thừa từ PV sẽ được nạp vào trong ắc quy với khả năng nạp lớn nhất. Công suất nạp được xác định theo công thức (5).

$$P_{Bat}(t) = \max\{P_L(t) - P_{PV}(t), -P_{Batmax}\} \quad (5)$$

Khi ắc quy được nạp đầy, công suất thừa từ PV được phát lên lưới (nếu có sự thỏa thuận cho phép của CTĐL). Ngược lại, ở chế độ tự sản, tự tiêu, công suất phát từ PV cần được cắt giảm để không phát vào lưới điện. Trong nghiên cứu hiện tại, công suất giới hạn P_{Batmax} đã được chọn đáp ứng được yêu cầu nạp hết công suất thừa nhằm mục đích tận dụng hết công suất phát ra của nguồn năng lượng mặt trời.

2.2.2. Trường hợp công suất của nguồn PV nhỏ hơn công suất của phụ tải

+ Ắc quy làm việc theo chế độ phóng điện vào giờ cao điểm:

Chế độ này được thực hiện vào giờ cao điểm, khi đó ắc quy sẽ phóng điện để cung cấp cho phụ tải nhằm hạn chế mua điện với giá cao từ CTĐL. Công suất phóng được xác định theo công thức (6):

$$P_{Bat}(t) = \min\{P_L(t) - P_{PV}(t), P_{Batmax}\} \quad (6)$$

Phần công suất thiếu sẽ được bù bằng công suất từ lưới điện.

+ Ắc quy nạp điện vào giờ thấp điểm:

Vào giờ thấp điểm, điện năng từ lưới điện được tiêu thụ để nạp cho ắc quy tới một dung lượng nhất định nhằm tận dụng thời điểm giá thành điện năng thấp. Có thể chọn chế độ nạp chậm với công suất nạp nhỏ, với dung lượng đủ cho dự phòng nhằm mục tiêu điều chỉnh đồ thị phụ tải của lưới điện thông qua giá trị đặt của trạng thái nạp, $SOC_{đặt}$. Giá trị $SOC_{đặt}$ có thể tùy chỉnh dựa trên dữ phụ tải ngày của tuần trước và dự báo thời tiết để ước lượng công suất phát của PV.

Ngoài hai trường hợp kể trên, trong khung giờ trung bình, ắc quy có thể tiếp tục duy trì trạng thái phóng hoặc nạp trước đó hoặc không làm việc tùy theo cài đặt của người sử dụng.

3. Kết quả mô phỏng và bàn luận

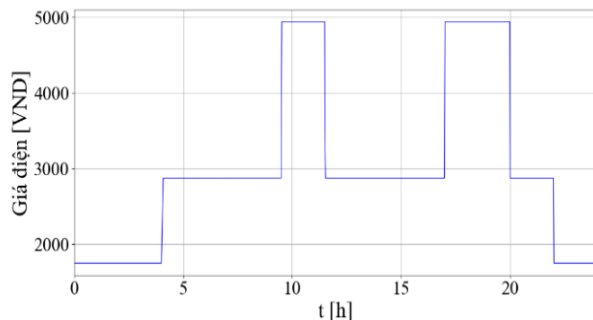
Mục này giới thiệu kết quả mô phỏng ứng dụng thuật toán điều khiển đã trình bày ở mục 2 cho một hệ thống điện mặt trời mái nhà có tích hợp hệ thống ắc quy.

Mô phỏng được tiến hành trong các điều kiện sau:

- Hệ thống điện mặt trời mái nhà có công suất lắp đặt là 608 kWp.
- Phụ tải có công suất lớn nhất là 615 kW.
- Giá điện theo giờ như được minh họa trên Hình 3 [14].
- Đặc tính công suất phát của hệ thống PV và công suất phụ tải được thể hiện trên Hình 4.
- Hệ thống lưu trữ sử dụng ắc quy Lithium, có dung

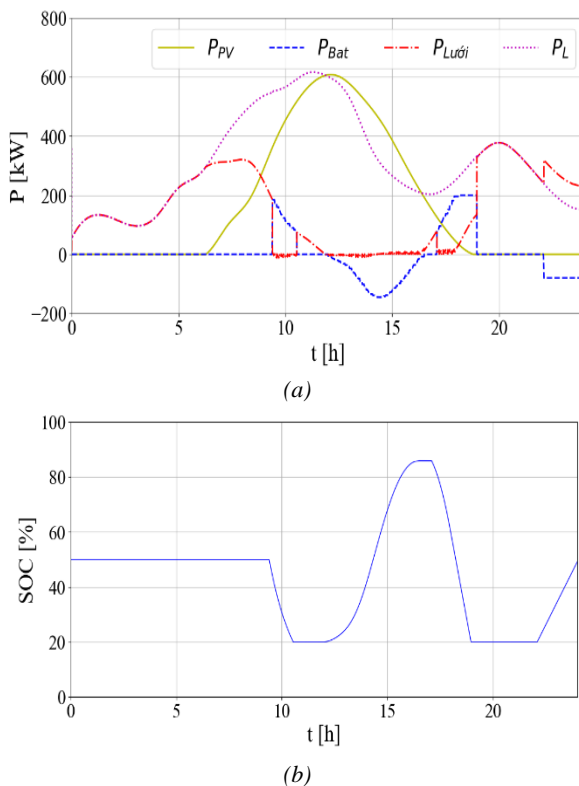
lượng 500 kWh; công suất cực đại $P_{Batmax} = 200$; các giới hạn trạng thái nạp là $SOC_{min} = 20\%$ và $SOC_{max} = 90\%$, trạng thái nạp ban đầu $SOC = 50\%$.

- Đặt chế độ cho ắc quy nạp chậm trong khoảng thời gian từ 22 h đến 24 h, với công suất nạp 80 kW, $SOC_{đặt} = 50\%$, ắc quy có thể phóng hết trong khoảng thời gian cao điểm sáng hôm sau, sẵn sàng cho chế độ nạp tối đa công suất dư thừa từ PV.



Hình 3. Giá điện theo giờ trong ngày

Thực hiện mô phỏng trong thời gian 1 ngày (24 giờ) theo thuật toán đã mô tả trong Mục 2.2, ta có đáp ứng công suất của PV, phụ tải, ắc quy và trao đổi với lưới điện như trên Hình 4.

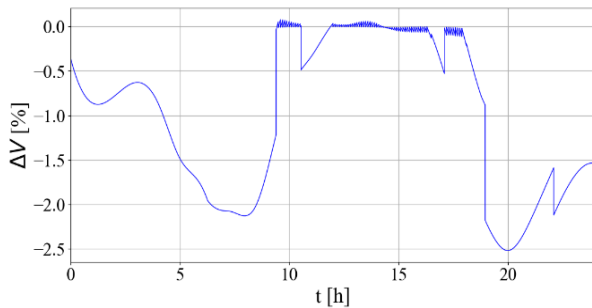


Hình 4. Đáp ứng công suất của hệ thống (a); trạng thái nạp (b)

Nhận thấy trong khoảng thời gian từ 11h54 tới 16h27 công suất PV lớn hơn công suất của phụ tải, ắc quy được nạp điện, SOC tăng từ 20% tới 85,91%. Từ 9h30 (cao điểm sáng), ắc quy phóng điện cho tới 10h34, SOC giảm từ 50% xuống giới hạn 20%, ắc quy ngừng làm việc. Trong khoảng cao điểm chiều (từ thời điểm 17h), ắc quy

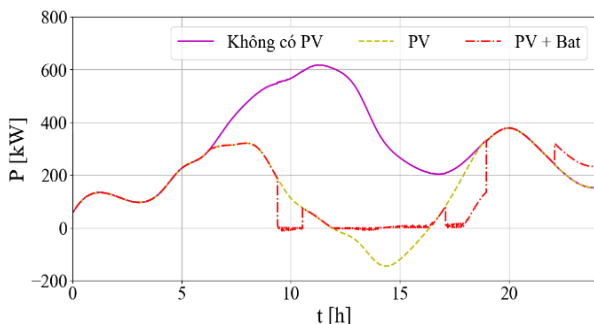
cũng phóng điện với công suất tăng dần cho tới giá trị phóng lớn nhất là 200 kW. Áp quy ngừng làm việc khi dung lượng giảm tới 20% dung lượng định mức tại thời điểm 18h58. Từ 22h, áp quy nạp chậm với công suất nạp 80 kW để tiêu thụ điện vào giờ thấp điểm, dung lượng nạp đạt 49,1% dung lượng định mức. Công suất liên lạc với lưới ($P_{Lưới}$) luôn dương chứng tỏ hệ thống không phát ngược công suất lên lưới.

Hình 5 thể hiện độ lệch điện áp trên tải so với giá trị định áp định mức. Có thể thấy độ lệch lớn nhất khoảng 2,5% nằm trong giới hạn cho phép theo tiêu chuẩn của Việt Nam [22].



Hình 5. Độ lệch điện áp trên tải

Hình 6 so sánh công suất trao đổi với lưới điện trong ba trường hợp: không có PV, có PV và có PV kết hợp với áp quy. Khi không có PV, hộ tiêu thụ nhận toàn bộ công suất từ lưới điện về để cung cấp cho phụ tải, trường hợp này hộ số tự tiêu thụ bằng không. Trường hợp có PV, vào ban ngày, công suất nhận từ lưới về giảm đáng kể, đặc biệt trong khoảng thời gian từ 11h54 tới 16h27 công suất điện mặt trời lớn hơn công suất phụ tải, phần công suất thừa này (phần đồ thị nằm dưới trục hoành) sẽ phát ngược lên lưới (nếu được sự cho phép của CTĐL) hoặc phải cắt giảm, không tận dụng được hết năng lượng mặt trời sẵn có để phát điện. Kết hợp hệ thống áp quy và PV cho phép tận dụng được hết lượng điện năng thừa từ PV và sử dụng lượng điện năng đó để cấp điện cho phụ tải vào giờ cao điểm. Nhờ đó, trong khoảng thời gian này hộ tiêu thụ không nhận công suất từ lưới điện. Kết quả mô phỏng cho thấy, kết hợp áp quy với PV có thể tối đa hóa sử dụng công suất phát của nguồn điện PV, đồng thời giảm tới 200 kW công suất tiêu thụ vào giờ cao điểm, đồng thời nâng đáy đồ thị phụ tải buổi tối thêm 80 kW.



Hình 6. Công suất liên hệ với lưới trong ba trường hợp: không có PV, có PV và có PV kết hợp với áp quy

Bảng 1. Chi phí điện năng phải trả cho CTĐL

Kịch bản	Không có PV, Bat	Chỉ có PV	Có PV+Bat
Chi phí (x10 ⁶ VND/ngày)	25,10	12,22	10,31

Kết quả tính toán chi phí hóa đơn tiền điện phải trả cho CTĐL trong Bảng 1 cho thấy, sử dụng thêm hệ thống áp quy sẽ giúp cho hộ tiêu thụ giảm đáng kể chi phí mua điện. Cụ thể, hộ tiêu thụ lắp đặt và sử dụng hệ thống PV sẽ tiết kiệm được 51,31% chi phí phải trả cho CTĐL, khi có thêm hệ thống áp quy sẽ tiết kiệm được 58,92% chi phí.

Như vậy, kết quả mô phỏng đã minh họa tính hiệu quả của các trường hợp từ đó cho thấy tính hiệu quả của thuật toán trình bày được đề xuất.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày phương pháp điều khiển áp quy kết hợp với hệ thống điện mặt trời mái nhà với mục tiêu chủ yếu là tự sản, tự tiêu và tham gia điều chỉnh phụ tải dựa trên biểu giá điện theo thời gian sử dụng. Phương pháp đã đề xuất có thể tận dụng tối đa công suất phát ra từ hệ thống điện mặt trời mái nhà để cung cấp cho phụ tải, hạn chế phát ngược công suất lên lưới điện, giảm thiểu tác động của điện mặt trời lên lưới. Phương pháp điều khiển này cho thấy lợi ích đối với cả hộ tiêu thụ và đơn vị quản lý vận hành lưới điện, cụ thể là giảm được đáng kể hóa đơn tiền điện của hộ tiêu thụ, góp phần giảm công suất yêu cầu từ lưới điện vào giờ cao điểm và tăng sử dụng điện vào giờ thấp điểm. Chiến lược có xét đến điều khiển cắt giảm công suất phát của hệ thống điện mặt trời để giảm công suất giới hạn của áp quy có thể là chủ đề nghiên cứu triển vọng tiếp theo. Từ đó xác định dung lượng phù hợp để tối thiểu hóa chi phí chung của toàn hệ thống.

Lời cảm ơn: Các tác giả xin trân trọng gửi lời cảm ơn đến TS Lê Xuân Thành, Trường Đại học Mỏ Địa chất đã giúp đỡ trong việc thực hiện các tính toán và thảo luận về các mô phỏng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] B. Jin, "Impact of renewable energy penetration in power systems on the optimization and operation of regional distributed energy systems", *Energy*, vol. 273, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127201.
- [2] R. A. Ufa, Y. Y. Malkova, V. E. Rudnik, M. V. Andreev, and V. A. Borisov, "A review on distributed generation impacts on electric power system", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 47, pp. 20347–20361, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.142>.
- [3] G. Lorenzi and C. A. S. Silva, "Comparing demand response and battery storage to optimize self-consumption in PV systems", *Appl. Energy*, vol. 180, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.103.
- [4] J. Moshövel *et al.*, "Analysis of the maximal possible grid relief from PV-peak-power impacts by using storage systems for increased self-consumption", *Appl. Energy*, vol. 137, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.07.021.
- [5] IEA, "Global EV Outlook 2023 – Analysis - IEA", 2023.
- [6] J. Struth *et al.*, "A Critical Review of the Effect of Grid Integrated PV-Storage-Systems Self-Consumption", *Ires 2013*, no. November, p. 54, 2013.
- [7] V. T. Tran, K. M. Muttaqi, and D. Sutanto, "A Robust Power Management Strategy with Multi-Mode Control Features for an Integrated PV and Energy Storage System to Take the Advantage of

- ToU Electricity Pricing”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 2, 2019, doi: 10.1109/TIA.2018.2884622.
- [8] D. Azuatalam, K. Paridari, Y. Ma, M. Förstl, A. C. Chapman, and G. Verbič, “Energy management of small-scale PV-battery systems: A systematic review considering practical implementation, computational requirements, quality of input data and battery degradation”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, 2019. doi: 10.1016/j.rser.2019.06.007.
- [9] M. Elkazaz, M. Sumner, E. Naghiyev, S. Pholboon, R. Davies, and D. Thomas, “A hierarchical two-stage energy management for a home microgrid using model predictive and real-time controllers”, *Appl. Energy*, vol. 269, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115118.
- [10] Y. Li *et al.*, “Optimal battery schedule for grid-connected photovoltaic-battery systems of office buildings based on a dynamic programming algorithm”, *J. Energy Storage*, vol. 50, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104557.
- [11] M. M. Alam, M. H. Rahman, M. F. Ahmed, M. Z. Chowdhury, and Y. M. Jang, “Deep learning based optimal energy management for photovoltaic and battery energy storage integrated home micro-grid system”, *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-19147-y.
- [12] C. Zedak, A. Belfqih, J. Boukherouaa, A. Lekbich, and F. El Mariami, “Photovoltaic and Battery Systems Control and Monitoring for Energy Management using IoT”, in *Proceedings of 2021 9th International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2021*, 2021. doi: 10.1109/IRSEC53969.2021.9741199.
- [13] A. Sorour, M. Fazeli, M. Monfared, A. A. Fahmy, J. R. Searle, and R. P. Lewis, “Forecast-Based Energy Management for Domestic PV-Battery Systems: A U.K. Case Study”, *IEEE Access*, vol. 9, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3072961.
- [14] C. Jamroen, A. Pannawan, and S. Sirisukprasert, “Battery Energy Storage System Control for Voltage Regulation in Microgrid with High Penetration of PV Generation”, in *Proceedings - 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2018*, 2018. doi: 10.1109/UPEC.2018.8541888.
- [15] H. Almasalma and G. Deconinck, “Simultaneous Provision of Voltage and Frequency Control by PV-Battery Systems”, *IEEE Access*, vol. 8, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3018086.
- [16] S. M. Tercan, A. Demirci, E. Gokalp, and U. Cali, “Maximizing self-consumption rates and power quality towards two-stage evaluation for solar energy and shared energy storage empowered microgrids”, *J. Energy Storage*, vol. 51, p. 104561, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104561>.
- [17] Y. Wang, R. Das, G. Putrus, and R. Kotter, “Economic evaluation of photovoltaic and energy storage technologies for future domestic energy systems—A case study of the UK”, *Energy*, vol. 203, p. 117826, 2020.
- [18] H. Ruf, “Limitations for the feed-in power of residential photovoltaic systems in Germany – An overview of the regulatory framework”, *Sol. Energy*, vol. 159, pp. 588–600, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.072>.
- [19] N. Mukisa, R. Zamora, and T. T. Lie, “Store-on grid scheme model for grid-tied solar photovoltaic systems for industrial sector application: Costs analysis”, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 41, p. 100797, 2020.
- [20] P. Kästel and B. Gilroy-Scott, “Economics of pooling small local electricity prosumers - LCOE & self-consumption”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2015.06.057.
- [21] H. Yahoui, H.-G. Vu, T.-T.-H. Ma, and T.-K. Tran, “A control strategy for DC Smart Grids operation”, in *2019 First International Symposium on Instrumentation, Control, Artificial Intelligence, and Robotics (ICA-SYMP)*, 2019, pp. 230–233. doi: 10.1109/ICA-SYMP.2019.8646312.
- [22] The Ministry of Industry and Trade, “Circular No. 30/2019/TT-BCT dated November 18, 2019 of the Ministry of Industry and Trade on amending and supplementing a number of articles of the Circular No. 25/2016/TT-BCT and the Circular No. 39/2015/TT-BCT, Vietnam”, 2019.