

# TỐI ƯU HOÁ CHẾ ĐỘ VẬN HÀNH CỦA HỆ THỐNG ĐIỆN MẶT TRỜI, ĐIỆN GIÓ KẾT HỢP PIN LƯU TRỮ SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP QUY HOẠCH TUYẾN TÍNH NGUYÊN THỰC HỖN HỢP

OPTIMAL OPERATION OF SOLAR/WIND TURBINE SYSTEM COMBINED WITH BATTERY USING MIXED-INTEGER LINEAR PROGRAMMING

Nguyễn Thị Hoài Thu<sup>1,\*</sup>,  
Phạm Năng Văn<sup>1</sup>, Đinh Tuấn Anh<sup>1</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.039>

## TÓM TẮT

Trong các năm gần đây, năng lượng tái tạo đang ngày càng phát triển và trở thành xu thế, việc sử dụng năng lượng tái tạo trong hệ thống điện đã trở nên phổ biến. Từ đó phát sinh ra nhiều vấn đề trong hệ thống như: cần phân bổ thời gian hoạt động của các nguồn cho hợp lý, cần mua bán điện bao nhiêu tại thời điểm nào thì thích hợp... Do đó ở trong bài báo này chúng tôi đã tính toán phân chia công suất tối ưu cho một hệ thống lưới điện siêu nhỏ gồm có pin mặt trời, tuabin gió, pin lưu trữ bằng cách sử dụng phương pháp quy hoạch tuyến tính nguyên thực hỗn hợp (MILP). Hàm mục tiêu của bài toán là xác định công suất từng giờ trong ngày tới của các nguồn, công suất sạc, xả của pin lưu trữ sao cho chi phí bán điện từ hệ thống là lớn nhất khi giá điện thay đổi trong ngày. Từ kết quả mô phỏng cho thấy là sử dụng phương pháp MILP đem lại kết quả đáng tin cậy, có tính khả thi và có thể áp dụng được trong thực tế.

**Từ khóa:** Nguyên thực tuyến tính hỗn hợp, tối ưu hoá, pin mặt trời, pin lưu trữ, tuabin gió, chế độ vận hành.

## ABSTRACT

In recent years, renewable energy was increasingly developing and becoming a trend, it became popular in the power system. As a result, many problems arise such as the operating time of the sources needing to be allocated reasonably, and how to trade energy appropriately,... Therefore, in this article, we have calculated the optimal power distribution for a microgrid system consisting of a solar panel, a wind turbine, and storage batteries by using the Mixed-integer linear programming (MILP) method. The objective function of the problem is to determine the day-ahead hourly capacity of the sources, and the charging and discharging capacity of the storage battery so that the profit from the system is the largest when the power price changes during the day. From the simulation results, it is shown that using the MILP method brings reliable results, proving it is feasible in reality.

**Keywords:** Mixed-integer linear programming, optimising, solar panel, storage battery, wind turbine, operation mode.

<sup>1</sup>Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

\*Email: [thu.nguyenthioai@hust.edu.vn](mailto:thu.nguyenthioai@hust.edu.vn)

Ngày nhận bài: 21/10/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 03/02/2023

Ngày chấp nhận đăng: 15/3/2023

## 1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, với nhu cầu sử dụng năng lượng nói chung và điện năng nói riêng đang ngày càng tăng cao cộng thêm việc các nhiên liệu hóa thạch truyền thống đang dần cạn kiệt thì việc sử dụng năng lượng tái tạo (RE) đang dần trở thành xu thế. Do đó các quốc gia rất tập trung chú trọng phát triển năng lượng tái tạo cũng như cố gắng tận dụng triệt để được nguồn tài nguyên vô tận này [1, 2]. Tuy nhiên hệ thống điện gió, điện mặt trời có nhược điểm là có tính bất định cao, do đó để tăng tỉ lệ RE trong hệ thống điện cần kết hợp các nguồn năng lượng này với pin lưu trữ tạo thành lưới siêu nhỏ (MG). MG có thể vận hành ở chế độ độc lập hoặc nối lưới.

Để vận hành hệ thống MG này, cần tối ưu hóa công suất sạc/xả của pin lưu trữ và công suất trao đổi với lưới. Trong các nghiên cứu trước đây, Dufo-López [3] trình bày một chiến thuật phân phối công suất sử dụng thuật toán di truyền (GA) cho hệ thống điện mặt trời/gió/thủy điện/diesel/hệ thống hydrogen. Trong [4], các tác giả sử dụng phương pháp quy hoạch động để giải bài toán tối ưu. M. Yousif áp dụng phương pháp tối ưu bầy đàn (PSO) cho các hệ thống MG phân tán [5].

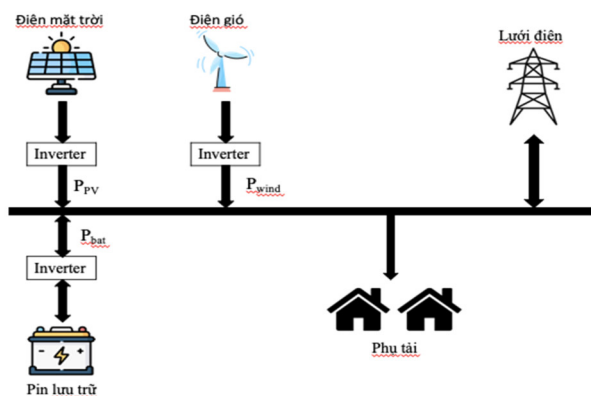
Các phương pháp tối ưu trên có ưu điểm là xét được với hệ thống phi tuyến tính, nhưng kết quả có thể chỉ là tối ưu địa phương. Xét bài toán này với giả thiết hiệu suất các inverter là không đổi, khi đó bài toán trở thành tuyến tính. Do đó, trong nghiên cứu này chúng tôi đề xuất sử dụng phương pháp quy hoạch tuyến tính nguyên thực hỗn hợp (MILP) sẽ cho ra kết quả tối ưu toàn cục để tính toán nghiên cứu phân chia công suất tối ưu cho một hệ thống lưới điện siêu nhỏ gồm có điện mặt trời, tuabin gió, pin lưu trữ.

## 2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Với đặc tính của các nguồn năng lượng tái tạo như công suất phát hoàn toàn phụ thuộc vào điều kiện thiên nhiên (vận tốc gió, bức xạ mặt trời), do đó có thể không đảm bảo cung cấp điện cho phụ tải. Xu thế hiện tại trên thế giới thường kết hợp các bộ lưu trữ năng lượng với hệ thống

năng lượng tái tạo [6]. Ngoài ra hệ thống năng lượng tái tạo còn được kết nối với lưới để khắc phục nhược điểm trên.

Hệ thống lưu trữ rất đa dạng và phong phú và cần có khả năng đáp ứng nhanh có thể giải quyết được vấn đề thiếu hoặc thừa năng lượng khi có sự thay đổi thời tiết cũng như thay đổi phụ tải [7]. Hình 1 là mô hình tổng quan hệ thống được sử dụng nghiên cứu. Hệ thống nghiên cứu có kết nối với lưới nhằm trao đổi công suất với lưới từ đó tạo ra lợi nhuận về mặt kinh tế thông qua việc mua bán điện năng. Lưới điện có 2 trạng thái đó là nhận công suất hoặc bơm công suất cho hệ thống. Việc bán điện cho lưới bị giới hạn: để giảm thiểu việc xâm nhập của năng lượng tái tạo vào hệ thống nhằm gây mất ổn định tần số, hoặc biến động mạnh trong thị trường điện...



Hình 1. Mô hình của hệ thống siêu nhỏ

### 2.1. Tua bin gió

Hệ thống điện gió có vai trò quan trọng của hệ thống nghiên cứu, khi là nguồn cung cấp công suất lớn nhất trong toàn bộ hệ thống.

Khả năng phát công suất của tuabin gió phụ thuộc vào vận tốc gió tại mỗi thời điểm. Khi vận tốc gió vượt qua vận tốc nhỏ nhất để phát công suất ( $V_i$ ), tuabin gió bắt đầu sản sinh công suất điện. Khi vận tốc gió quá vận tốc tối đa ( $V_o$ ), tuabin gió ngừng phát công suất để bảo vệ tuabin. Thông số của một tuabin gió được cho trong bảng 1 [8].

Bảng 1. Thông số mô hình kỹ thuật của tua bin gió

$P_{dm}$	$V_i$	$V_o$	$V_r$	$\eta$
4,6	2,4	20	10,3	0,87

Trong đó:

$P_{dm}$ : Công suất định mức của tuabin gió (kW).

$V_i$ : Vận tốc gió nhỏ nhất để tuabin gió có thể phát công suất (m/s).

$V_o$ : Vận tốc gió lớn nhất để tuabin gió có thể phát công suất (m/s).

$V_r$ : Vận tốc gió để tuabin gió có thể phát công suất định mức (m/s).

$\eta$ : Hiệu suất của inverter.

Đặc tính công suất phát của tuabin được thể hiện trong công thức (1).

$$P = \begin{cases} 0 & V(t) \leq V_i \\ a \cdot (V(t))^3 - b \cdot P_{dm} & V_i < V(t) < V_r \\ P_{dm} & V_r \leq V(t) < V_o \\ 0 & V(t) \geq V_o \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} a = \frac{P_{dm}}{V_r^3 - V_i^3} \\ b = \frac{V_{tc}^3}{V_r^3 - V_i^3} \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó:

$V(t)$ : vận tốc gió thời điểm  $t$  (m/s).

$V_{min}$ : vận tốc gió nhỏ nhất thời điểm  $t$  (m/s).

$V_{max}$ : vận tốc gió lớn nhất thời điểm  $t$  (m/s).

$V_r$ : vận tốc gió cho công suất định mức của điện gió (m/s).

### 2.2. Pin mặt trời

Khả năng phát công suất của tấm pin quang điện phụ thuộc chính vào lượng bức xạ mặt trời chiếu tới. Bên cạnh đó nó còn phụ thuộc vào nhiệt độ trên tấm pin. Đặc tính phát công suất của tấm pin quang điện được biểu diễn bằng công thức (3) [9]. Thông số của một mẫu pin quang điện được thể hiện trong bảng 2 [10].

$$P_{PV} = P_{dmPV} \cdot \frac{S}{S_{dm}} \cdot [1 + N_T \cdot (T_c - T_{tc})] \quad (3)$$

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} \quad (4)$$

Bảng 2. Thông số mô hình điện mặt trời

$S_{dm}$	$N_T$	$T_{tc}$	NOCT	$P_{dmPV}$	$\eta$
1	-0,00485	25	48	3	0,9

Trong đó:

$P_{PV}$ : Công suất pin mặt trời (kW).

$P_{dmPV}$ : Công suất định mức của pin mặt trời (kW).

$S$ : Bức xạ mặt trời ( $kW/m^2$ ).

$S_{dm}$ : Bức xạ mặt trời sinh ra công suất tối đa ( $kW/m^2$ ).

$T_{tc}$ : Nhiệt độ tiêu chuẩn ( $^{\circ}C$ ).

$N_T$ : Hệ số công suất nhiệt ( $\frac{1}{^{\circ}C}$ ).

$T_c$ : Nhiệt độ tế bào quang điện ( $^{\circ}C$ ).

$T_a$ : Nhiệt độ không khí ( $^{\circ}C$ ).

NOCT: Nhiệt độ hoạt động bình thường của tế bào quang điện ( $^{\circ}C$ ).

### 2.3. Hệ thống lưu trữ năng lượng

Mô hình hệ thống tích hợp cả pin lưu trữ để đảm bảo đáp ứng cấp điện cho phụ tải một cách nhanh chóng và liên tục.

Trạng thái vận hành của pin lưu trữ ( nạp hay xả) phụ thuộc vào chiến thuật phân chia công suất của hệ thống. Trong trường hợp chung thì pin sẽ nạp điện khi công suất điện sản sinh từ nguồn năng lượng tái tạo lớn hơn công suất tiêu thụ của tải và sẽ xả khi công suất tiêu thụ của tải lớn hơn công suất sinh ra.

Phương trình năng lượng của pin lưu trữ ở thời điểm  $t$  được biểu diễn theo công thức (5).

$$E_{BA}(t) = E_{BA}(t) \cdot (1 - \sigma) + \left( P_{BA.sac}(t - 1) \cdot \eta_{sac} \cdot \eta_{inv} - \frac{P_{BA.xa}(t-1)}{\eta_{xa} \cdot \eta_{inv}} \right) \cdot \Delta t \quad (5)$$

Với:

$$\eta_{inv} = 95\%, \eta_{sac} = 95\%, \eta_{xa} = 95\%, \sigma = 0,0002$$

Trong đó:

$E_{BA}$ : Công suất của pin lưu trữ (Wh).

$P_{BA.sac}$ : Công suất sạc của pin lưu trữ (W).

$P_{BA.xa}$ : Công suất xả của pin lưu trữ (W).

$\eta_{inv}$ : Hiệu suất của inverter.

$\eta_{sac}$ : Hiệu suất sạc của pin lưu trữ.

$\eta_{xa}$ : Hiệu suất xả của pin lưu trữ.

$\sigma$ : Hiệu xuất tự xả hàng giờ.

### 3. MÔ HÌNH BÀI TOÁN

Với mục tiêu là tối đa hóa lợi nhuận thu được thông qua việc mua bán điện chính là chi phí bán điện trừ đi chi phí mua điện, bài toán được xây dựng với hàm mục tiêu và ràng buộc như sau:

#### 3.1. Hàm mục tiêu

Tối đa hóa lợi nhuận thu được trong một ngày (24h):

$$\text{Max} \{ \sum_1^{24} P_{grid} [C_{sale} \cdot s + C_{buy} \cdot (1 - s)] \} \quad (6)$$

Trong đó:

$C_{sale}$ : Giá bán điện (C/kWh)

$C_{buy}$ : Giá mua điện (C/kWh)

$s = 1$  khi bán điện ( $P_{grid} > 0$ )

$s = 0$  khi mua điện ( $P_{grid} < 0$ )

#### 3.2. Ràng buộc

- Ràng buộc về cân bằng công suất của hệ thống:

Cân bằng công suất là điều kiện bắt buộc để một hệ thống điện hoạt động trong chế độ xác lập. Trong hệ thống PV/Wind/Battery nối lưới, Battery vừa đóng vai trò là nguồn cung cấp vừa là tải tiêu thụ. Quy ước  $P_{bat}$  dương khi pin xả và  $P_{bat}$  âm khi pin sạc.  $P_{grid}$  dương khi hệ thống bán điện cho lưới còn  $P_{grid}$  âm khi hệ thống mua điện từ lưới. Phương trình cân bằng công suất của hệ được mô tả theo công thức (7):

$$P_{PV}(t) + P_w(t) - P_{tai}(t) + P_{bat} - \Delta p_t = P_{grid} \quad (7)$$

Trong đó  $\Delta p_t$  là lượng công suất thừa không được sử dụng của hệ thống năng lượng tái tạo khi đã cung cấp đủ cho phụ tải, bán cho lưới max và pin đã đầy.

- Ràng buộc về giới hạn kỹ thuật của hệ thống pin lưu trữ năng lượng:

$$E_{batmin} \leq E_{bat}(t) \leq E_{batmax} \quad (8)$$

Trong đó:

$E_{batmax}$ : Mức năng lượng tối đa của hệ thống pin lưu trữ (kWh).

$E_{batmin}$ : Mức năng lượng tối thiểu của hệ thống pin lưu trữ (kWh).

$E_{bat}(t)$ : Mức năng lượng của hệ thống pin lưu trữ trong giờ t (kWh).

- Ràng buộc về giới hạn công suất bán điện cho lưới:

Năng lượng tái tạo là các nguồn năng lượng có tính bất định cao nên khi nối các nguồn năng lượng này vào lưới điện thì hệ thống sẽ gặp các vấn đề về kỹ thuật. Do đó việc giới hạn công suất truyền vào lưới từ hệ thống năng lượng tái tạo nhằm giúp cho hệ thống hoạt động ổn định:

$$P_{grid}(t) \leq P_{gridmax} \quad (9)$$

Trong đó:

$P_{grid}(t)$ : Công suất hệ thống truyền vào lưới tại thời điểm t (kW).

$P_{gridmax}$ : Công suất tối đa hệ thống có thể truyền vào lưới (kW).

- Ràng buộc về năng lượng trong hệ thống pin lưu trữ: Để đảm bảo ngày hôm sau pin vẫn có năng lượng để đáp ứng các nhu cầu của tải nên năng lượng của pin không đổi sau một ngày:

$$E(0) = E(24) \quad (10)$$

### 4. THUẬT TOÁN QUY HOẠCH TUYẾN TÍNH NGUYÊN THỰC HỖN HỢP (MILP)

Với giả thiết hiệu suất inverter là không đổi, bài toán phân chia công suất cho lưới siêu nhỏ trở thành bài toán quy hoạch tuyến tính. Vì vậy, phương pháp quy hoạch tuyến tính nguyên thực hỗn hợp (MILP) được đề xuất để giải bài toán này. Bài toán tuyến tính nguyên thực hỗn hợp là một bài toán quy hoạch tuyến tính, trong đó có một vài biến là các số nguyên. Nếu tất cả các biến nguyên phải có giá trị nhị phân 0/1 thì bài toán được gọi là 0/1 MILP. Bài toán MILP được xây dựng ở dạng như sau:

$$\text{min } z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

Thỏa mãn các ràng buộc:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}^e x_j = b_i^e \quad ; i=1,2,\dots,m_e$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}^g x_j \geq b_i^g \quad ; i=1,2,\dots,m_g$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}^l x_j \leq b_i^l \quad ; i=1,2,\dots,m_l$$

$$x_j \geq 0 \quad ; j=1,2,\dots,n$$

$$x_j \in N \quad ; j=1,2,\dots,n_1 \quad (n_1 \leq n)$$

Trong đó, N được sử dụng để mô tả tập {0,1,2,...}.

Chi tiết thuật toán để giải bài toán MILP có thể tham khảo trong tài liệu [11].

### 5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

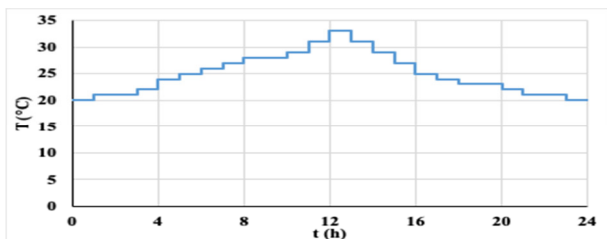
#### 5.1. Dữ liệu đầu vào của bài toán

##### 5.1.1. Dữ liệu đầu vào của pin mặt trời

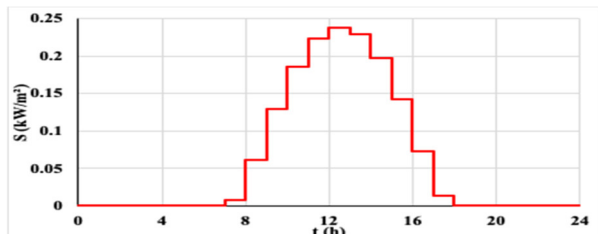
Giả sử có dữ liệu dự báo của ngày tới về nhiệt độ không khí, lượng bức xạ mặt trời chiếu tới như hình 2, 3.

##### 5.1.2. Dữ liệu đầu vào của tua bin gió

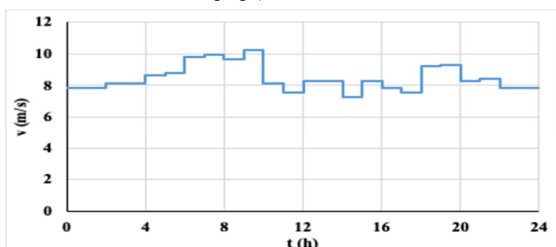
Tương tự, giả sử vận tốc gió trong ngày tới được dự báo và biểu diễn theo hình 4.



Hình 2. Nhiệt độ trong ngày tới



Hình 3. Bức xạ mặt trời trong ngày tới

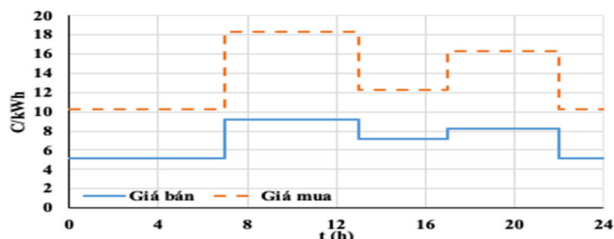


Hình 4. Vận tốc gió trong ngày tới

**5.1.3. Dữ liệu về giá mua bán điện**

Giả sử dữ liệu về giá mua bán điện trong ngày được dự báo và được tính như trên hình 5.

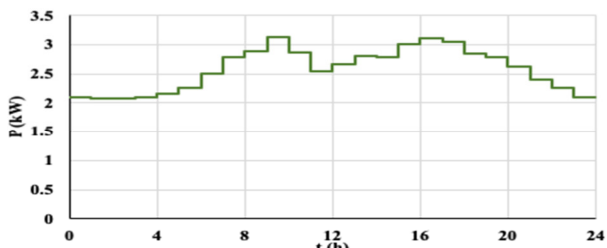
Giá mua bán điện vào những lúc cao điểm, khi mà tải trong những thời điểm này lớn hơn so với các thời điểm khác trong ngày, sẽ tăng giá. Ngược lại, vào khoảng thời gian thấp điểm, giá mua bán giảm đi.



Hình 5. Giá mua bán điện trong ngày

**5.1.4. Dữ liệu phụ tải**

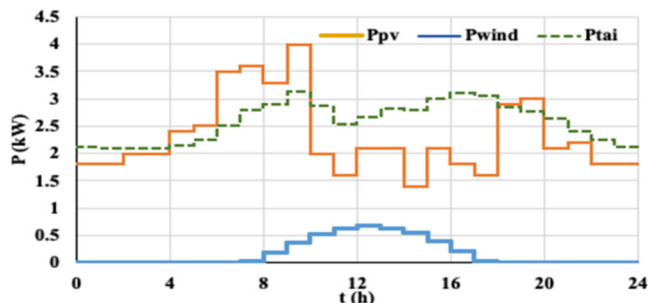
Giả sử công suất của phụ tải được dự báo và mô tả theo hình 6.



Hình 6. Công suất của phụ tải trong ngày

**5.2. Kết quả**

Với hiệu suất inverter ứng với pin mặt trời là 0.9, hiệu suất inverter ứng với tuabin gió là 0.87, công suất của các nguồn điện mặt trời, điện gió và công suất của tải được mô tả ở hình 7.



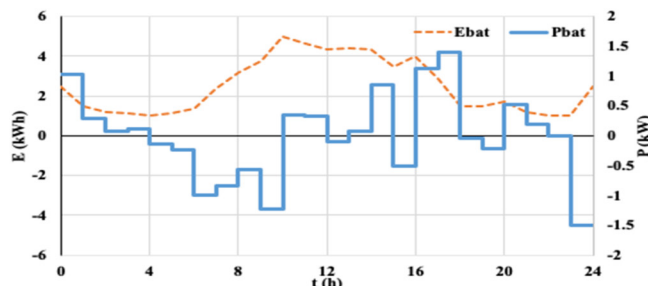
Hình 7. Công suất của nguồn điện mặt trời, điện gió và phụ tải trong ngày

Do hệ thống đang xét là hệ thống siêu nhỏ cũng như là việc giới hạn công suất mua bán của lưới do các yếu tố khách quan khác, bài báo này xét đến hai trường hợp:

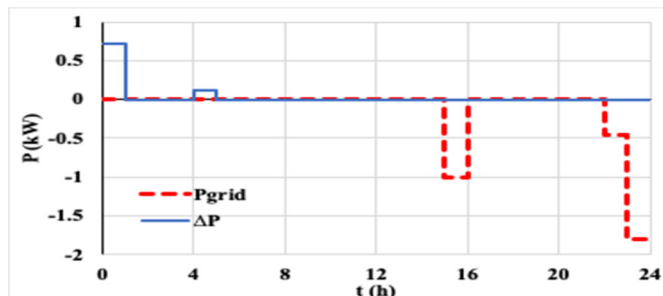
- Trường hợp 1: Lưới không nhận công suất từ hệ thống
- Trường hợp 2: Lưới nhận công suất tối đa là 2kW.

**5.2.1. Trường hợp 1: Lưới không mua điện từ hệ thống siêu nhỏ**

Do hệ thống siêu nhỏ không thể bán điện cho lưới, tuy nhiên, nếu thiếu công suất cấp cho tải, hệ thống vẫn có thể mua từ lưới để bù vào. Kết quả của hàm mục tiêu là -35.76, nghĩa là sau một ngày hệ thống mất 35,76 Cent để hoạt động bình thường.



Hình 8. Công suất trao đổi và năng lượng pin trong ngày trong trường hợp 1



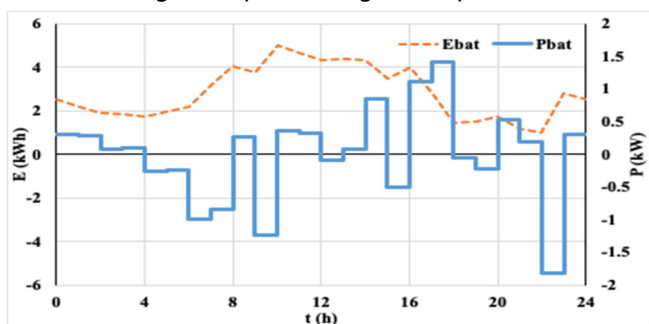
Hình 9. Công suất mua từ lưới và lượng công suất thừa trong ngày trong trường hợp 1

Hình 8 mô tả công suất trao đổi và năng lượng của pin lưu trữ theo từng giờ. Theo đó, trong vài giờ đầu nguồn chỉ bao gồm điện gió không thể cung cấp đủ công suất cho tải, pin lưu trữ phải xả năng lượng để bù vào. Tuy nhiên, sau đó

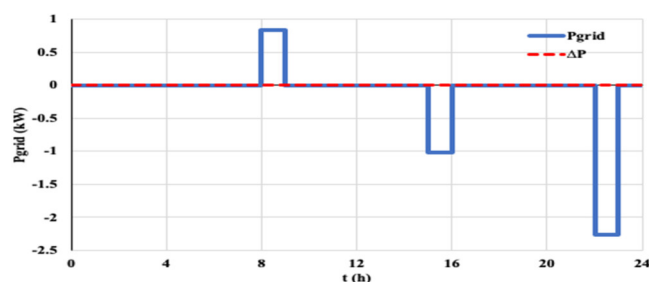
nguồn đã có thể cung cấp đủ cho phụ tải nên pin lưu trữ đã tích trữ năng lượng và đạt giới hạn năng lượng tối đa vào lúc 10 giờ. Do hệ thống siêu nhỏ không thể cung cấp đủ năng lượng cho tải nên phải mua điện từ lưới để bù công suất còn thiếu hụt. Để tối thiểu lượng chi phí, hệ thống có xu hướng mua điện vào thời gian thấp điểm (giá mua thấp) (hình 9). Do không thể bán điện cho lưới, thêm vào đó pin lưu trữ được sạc đầy nên trong khoảng thời gian đầu xuất hiện công suất không được sử dụng, dẫn tới lãng phí năng lượng.

**5.2.2. Trường hợp 2: Công suất trao đổi với lưới tối đa là 2kW**

Kết quả hàm mục tiêu đạt giá trị -28,04, hệ thống siêu nhỏ cần phải chi trả 28,04 Cent để hoạt động bình thường. Công suất trao đổi và năng lượng pin trong từng giờ của pin lưu trữ được mô tả ở hình 10. Tương tự như trường hợp 1, trong khoảng thời gian đầu nguồn không thể cung cấp đủ cho phụ tải nên pin xả năng lượng để bù công suất. Tuy nhiên do có thể bán điện cho lưới, và để tối ưu hoá lợi nhuận, pin có xu hướng sạc năng lượng vào thời gian thấp điểm, và bán vào giờ cao điểm. Do đó, trong trường hợp này, công suất thừa không xuất hiện (hình 11). Tuy nhiên, nửa sau của ngày, công suất của nguồn là không đủ để cấp công suất cho phụ tải nên hệ thống siêu nhỏ phải mua điện từ lưới, và mua vào thời gian thấp điểm để giảm chi phí.



Hình 10. Công suất trao đổi và năng lượng pin trong ngày theo trường hợp 2



Hình 11. Công suất mua bán điện trong trường hợp 2

**6. KẾT LUẬN**

Bài báo trình bày về việc phân chia công suất trong ngày tới cho lưới điện siêu nhỏ bao gồm pin mặt trời, tuabin gió và pin lưu trữ có trao đổi công suất với lưới sử dụng phương pháp MILP. Phương pháp này đã tối ưu hoá lợi nhuận thu được của hệ thống dựa trên cơ sở các ràng buộc của thiết bị, hệ thống cũng như giá mua bán điện. Kết quả mô phỏng đã chứng minh tính thực tế và có khả năng áp dụng vào thực tế của phương pháp quy hoạch tuyến

tính nguyên thực hỗn hợp cho bài toán tối ưu cho hệ thống lưới điện siêu nhỏ.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1]. E. Irmak, M. S. Ayaz, S. G. Gok, A. B. Sahin, 2014. *A survey on public awareness towards renewable energy in Turkey*. in 2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), pp. 932–937. doi: 10.1109/ICRERA.2014.7016523.

[2]. F. Ayadi, I. Colak, I. Garip, H. I. Bulbul, 2020. *Targets of Countries in Renewable Energy*. in 2020 9th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), pp. 394–398. doi: 10.1109/ICRERA49962.2020.9242765.

[3]. R. Dufo-López, L. A. Fernández-Jiménez, I. J. Ramírez-Rosado, J. S. Artal-Sevil, J. A. Domínguez-Navarro, J. L. Bernal-Agustín, 2017. *Daily operation optimisation of hybrid stand-alone system by model predictive control considering ageing model*. Energy Conversion and Management, vol. 134, pp. 167–177, doi: 10.1016/j.enconman.2016.12.036.

[4]. I. Ranaweera, O.M. Midtgård, 2016. *Optimization of operational cost for a grid-supporting PV system with battery storage*. Renewable Energy, vol. 88, pp. 262–272, doi: 10.1016/j.renene.2015.11.044.

[5]. Muhammad Yousif, Qian Ai, Yang Gao, Waqas Ahmad, Wattoo, Ziqing Jiang, Ran Hao, 2020. *An optimal dispatch strategy for distributed microgrids using PSO*. CSEE journal of power and energy systems, vol. 6, no. 3.

[6]. S. M. Hakimi, S. M. Moghaddas-Tafreshi, 2009. *Optimal sizing of a stand-alone hybrid power system via particle swarm optimization for Kahnouj area in south-east of Iran*. Renewable Energy, vol. 34, no. 7, pp. 1855–1862, doi: 10.1016/j.renene.2008.11.022.

[7]. J. K. Kaldellis, D. Zafirakis, 2012. *Optimum sizing of stand-alone wind-photovoltaic hybrid systems for representative wind and solar potential cases of the Greek territory*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 107–108, pp. 169–178, doi: 10.1016/j.jweia.2012.04.013.

[8]. <https://www.folkecenter.eu/PDF/Wind/353.Catalogue-of-small-wind-turbines-8th-edition.pdf>

[9]. A. Maleki, F. Pourfayaz, 2015. *Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms*. Solar Energy, vol. 115, pp. 471–483, doi: 10.1016/j.solener.2015.03.004.

[10]. A. Maleki, M. G. Khajeh, M. Ameri, 2016. *Optimal sizing of a grid independent hybrid renewable energy system incorporating resource uncertainty, and load uncertainty*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 83, pp. 514–524, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.04.008.

[11]. C. A. Floudas, 1995. *Mixed-Integer Linear Optimization*. in Nonlinear and Mixed-Integer Optimization: Fundamentals and Applications, C. A. Floudas, Ed. Oxford University Press. doi: 10.1093/oso/9780195100563.003.00010.

**AUTHORS INFORMATION**

**Nguyen Thi Hoai Thu, Pham Nang Van, Dinh Tuan Anh**

School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Science and Technology