

TỐI ƯU LỊCH PHÁT ĐIỆN CỦA LƯỚI ĐIỆN SIÊU NHỎ ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN TIẾN HÓA SAI LỆCH

OPTIMIZATION OF GENERATION SCHEDULING USING DIFFERENTIAL EVOLUTION ALGORITHM

Lê Tuấn¹, Dương Minh Quân^{1*}, Nguyễn Bình Nam¹, Nguyễn Văn Tấn¹, Lê Xuân Châu²

¹Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng

²Học viện Hải quân

*Tác giả liên hệ: dmquan@dut.udn.vn

(Nhận bài: 19/9/2020; Chấp nhận đăng: 14/11/2020)

Tóm tắt - Nghiên cứu này đề xuất hệ thống quản lý năng lượng (EMS) dựa trên thuật toán Tiến hóa Sai lệch (DE) để tối ưu hóa hiệu suất của lưới điện siêu nhỏ khi có nguồn năng lượng tái tạo. Hệ lưới điện siêu nhỏ bao gồm máy phát điện phân tán (DG), Pin năng lượng mặt trời (PV) và Pin lưu trữ (batt). Ngoài ra, hệ được kết nối với hệ thống (Utility) nhằm trao đổi công suất khi chi phí mua bán phù hợp. Hiệu suất của EMS được tối ưu hóa bằng cách giảm thiểu chi phí vận hành của lưới điện đồng thời tối đa lợi nhuận từ lưới siêu nhỏ khi trao đổi công suất với hệ thống. Kết quả thu được sẽ được phân tích kỹ lưỡng bằng MATLAB, bao gồm công suất phát của máy phát điện và lưu trữ dựa trên dữ liệu đầu vào trong một ngày. Qua đó cho thấy, thuật toán đề xuất DE vượt trội về chất lượng và tốc độ hội tụ.

Từ khóa - Tối ưu hóa; Microgrid; lập lịch phát điện; quản lý năng lượng; thuật toán tiến hóa sai lệch

1. Đặt vấn đề

Nhu cầu năng lượng ngày càng tăng đã dẫn đến sự quan tâm hơn về việc đáp ứng nhu cầu này. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng, 20 đến 30 phần trăm nhu cầu năng lượng chi có thể được đáp ứng thông qua việc vận hành đơn vị phát điện tập trung hiện tại kết hợp quản lý nhu cầu phụ tải [1]. Một cách tiếp cận gần đây để giải quyết vấn đề sử dụng năng lượng là triển khai lưới điện siêu nhỏ tích hợp nguồn Năng lượng tái tạo, cùng với việc cung cấp hệ thống quản lý năng lượng có khả năng tối ưu chi phí vận hành và hạn chế khí thải ra môi trường.

Các nguồn năng lượng tái tạo có thể cung cấp đủ năng lượng để đáp ứng nhu cầu phụ tải nhưng chúng có một vấn đề đó là sự không chắc chắn công suất khả dụng, điều này đặt ra một thách thức trong việc sử dụng năng lượng tái tạo. Do tính chất đặc biệt này, sản lượng điện ở thời gian thực không hoàn toàn khớp so với dự báo. Từ đó, việc quản lý lưới điện trở nên khó khăn và nhà vận hành hệ thống phải sử dụng nguồn dự phòng để cung cấp điện liên tục. Nguồn năng lượng dự phòng này thường được huy động bằng cách sử dụng thêm các tổ máy phát điện hoặc mua năng lượng từ lưới chính, việc làm này có quan hệ mật thiết với yếu tố kinh tế và sự gia tăng phát thải ra môi trường [2]. Tuy nhiên, nếu hệ thống được quản lý tối ưu sao cho huy động các nguồn dự phòng một cách hiệu quả, đảm bảo sự cân bằng giữa cung và cầu.

Abstract - This work proposes a Differential Evolution (DE) algorithm based energy management system (EMS) to optimize the performance of a microgrid when the presence of renewable energy sources. The Micro-Grid system consists of a generator (DG), a Photovoltaic (PV) and a storage battery (batt). In addition to the Micro-grid system is connected to the system (Utility) to trading energy. The EMS efficiency is optimized by minimizing the operating costs, maximizing profit from the Micro-Grid when exchanging with the system using the DE algorithm. The obtained results will be analyzed by MATLAB, including the generating capacity of the generator and the storage system based on the input data in a day. This allows DE to overcome the algorithm of convergence quality and speed.

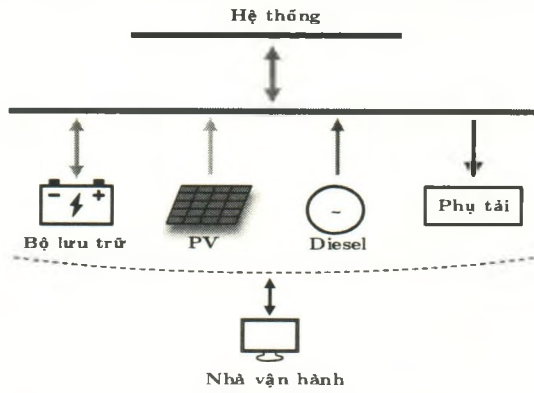
Key words - Optimization; Microgrid; generation scheduling; energy management system; differential evolution algorithm

Một hệ thống lưới siêu nhỏ có EMS được đề xuất trong nghiên cứu [3], trong đó tác giả sử dụng phương pháp tối ưu ngẫu nhiên để lập lịch dự phòng và quản lý năng lượng xét yếu tố phản hồi từ phụ tải. Với việc sử dụng các chương trình DR khác nhau và mô hình hóa sự bất định của các nguồn năng lượng gió và năng lượng mặt trời, kết luận với những lợi ích của việc khách hàng tham gia vào các chương trình quản lý phụ tải, đó là tiết kiệm điện và giảm phát thải ra môi trường. Quản lý vận hành lưới siêu nhỏ được đề cập trong [4] trong đó tác giả đặt mục tiêu tối ưu hóa chi phí vận hành bằng cách sử dụng thuật toán Tối ưu Bầy đàn (PSO). Trong [5], tác giả đã sử dụng các chương trình quản lý phụ tải cho việc lập lịch phát điện trong hệ thống gồm tuabin gió và bơm nhiệt. Một hệ thống quản lý năng lượng chuyên gia [6] được đề xuất trong đó tác giả phân tích sự không chắc chắn về công suất khả dụng của năng lượng tái tạo nhằm tối thiểu phát thải chất ô nhiễm và chi phí vận hành.

Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng thuật toán tiến hóa sai lệch nhằm tối ưu lịch phát điện của lưới điện siêu nhỏ. Với mục tiêu cực tiểu chi phí vận hành của lưới điện có kết nối với hệ thống thông qua việc điều khiển công suất phát của các phần tử trong lưới. Công suất phát của các phần tử trong hệ thống được trình bày rõ trong nghiên cứu này từ đó phục vụ việc lập lịch vận hành lưới điện siêu nhỏ.

¹ The University of Danang - University of Sciences and Technology (Le Tuan, Minh Quan Duong, Nguyen Binh Nam, Tan Nguyen Van)

² Naval Academy (Le Xuan Chau)



Hình 1. Cấu trúc lưới điện siêu nhỏ

2. Mô hình hóa

Trong phần này các phương trình toán của mô hình được trình bày cụ thể, chúng được triển khai và tính toán bằng ngôn ngữ MATLAB.

Nghiên cứu này nhằm đến việc ứng dụng thuật toán tối ưu hóa sai lệch để tối ưu chi phí vận hành của một lưới điện siêu nhỏ. Trong đó, cấu trúc của lưới điện siêu nhỏ được trình bày trong Hình 1. Các phần tử có khả năng điều phối trong lưới điện siêu nhỏ được giả định sẽ trao đổi công suất sao cho tối ưu nhất. Vì vậy để tối ưu việc chi phí vận hành của lưới với hệ thống, hàm mục tiêu được trình bày như sau:

$$\min_{P_{MG}, P_{dg}^t, P_{batt}^t} \sum_{t=1}^T \left[P_{MG}^t \cdot P_g^t + \sum_{i=1}^{n_{dg}} C_i(P_{dg}^{i,t}) + P_{batt}^t \right] \quad (1)$$

Trong đó:

P_{MG}^t công suất mua từ hệ thống trong thời gian t .

P_g^t là giá điện lưới bên ngoài tại thời điểm t .

$C(P_{dg}^{i,t})$ là hàm chi phí tiêu hao của máy phát Diesel thứ i phụ thuộc vào công suất phát $P_{dg}^{i,t}$ ở thời điểm t [5].

P_{batt}^t công suất phát của lưu trữ tại thời điểm t .

Cả hàm chi phí phải chịu những ràng buộc sau:

2.1. Cân bằng công suất tác dụng

Điện năng sản xuất và tiêu thụ luôn cân bằng tại mỗi thời điểm t .

$$\left(\sum_{i=1}^{n_{dg}} P_{dg}^{i,t} \right) + P_{batt}^t + \left(\sum_{i=1}^{n_{pv}} P_{pv}^{i,t} \right) - P_{load}^t - P_{MG}^t = 0 \quad (2)$$

với P_{load}^t là công suất tác dụng tiêu thụ của phụ tải ở thời điểm t .

2.2. Giới hạn công suất phát

Công suất phát của Diesel thứ i bị giới hạn bởi:

$$P_{dg,min}^t \leq P_{dg}^{i,t} \leq P_{dg,max}^t \quad (3)$$

Công suất truyền tải của Microgrid bị giới hạn bởi giới hạn trao đổi giữa lưới với hệ thống ($P_{MG,max}$) như sau:

$$|P_{MG}^t| < P_{MG,max} \quad (4)$$

Công suất phát của lưu trữ bị giới hạn bởi công nghệ như sau:

$$|P_{batt}^t| \leq P_{batt}^{max} \quad (5)$$

Ở đây $P_{dg,min}^t$ là giá trị nhỏ nhất của công suất thực do DG cung cấp. Trong khi $P_{dg,max}^t$, $P_{MG,max}$ và P_{batt}^{max} là giới hạn tối đa của DG, lưới và lưu trữ tương ứng.

2.3. Lưu trữ

Các mức năng lượng $e_{batt,t}$ của đơn vị lưu trữ phải phù hợp với công suất phát trong tất cả các giờ và bị giới hạn bởi dung lượng lưu trữ E_{batt} .

$$\begin{cases} e_{batt,t+1} = \eta_0 \cdot e_{batt,t} - \eta_1 [P_{batt,t+1}]^- - \eta_2^{-1} [P_{batt,t+1}]^+ \\ |e_{batt,t+1}| \leq E_{batt} \end{cases} \quad (6)$$

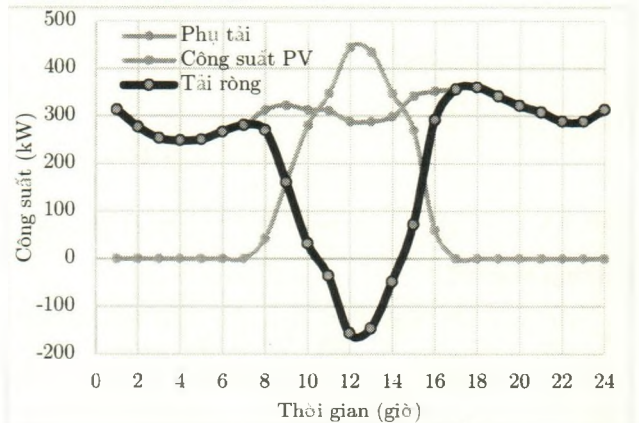
Phần dương và phần âm của một giá trị được ký hiệu là $[-]^- = \max/\min(\cdot, 0)$. Các thiết bị lưu trữ có thể có tổn thất rò rỉ η_0 , thời gian sạc η_1 , thời gian xả η_2 . Mức năng lượng có thể được đặt $e_{batt,t=0} = E_{batt}$.

3. Dữ liệu đầu vào

Lưới điện sử dụng trong nghiên cứu bao gồm máy phát điện diesel, nguồn năng lượng mặt trời và lưu trữ, thông qua thanh góp sẽ cung cấp công suất cho phụ tải cấp lưới điện siêu nhỏ và trao đổi với hệ thống nếu cần thiết.

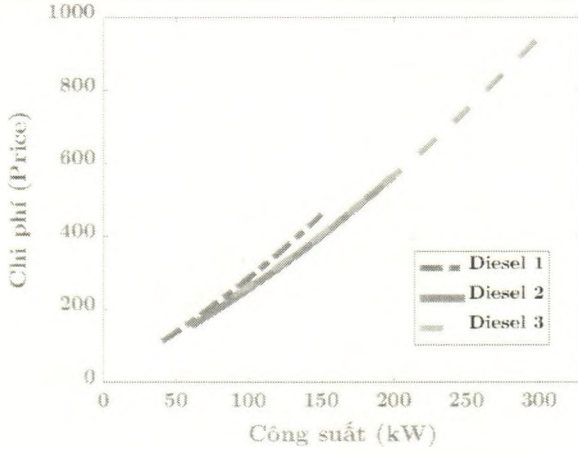
Các thành phần trong lưới điện siêu nhỏ sẽ được quản lý bởi nhà vận hành thông qua hệ thống EMS, nhà vận hành có quyền giám sát và điều khiển tất cả các thành phần trong lưới điện siêu nhỏ. Các thành phần trong lưới điện siêu nhỏ được thể hiện ở Hình 1.

Đề lập lịch vận hành lưới điện siêu nhỏ, nhà vận hành phải thu thập dữ liệu và dự báo dữ liệu phụ tải và điện mặt trời trước một ngày. Dữ liệu sử dụng trong nghiên cứu được tác giả trình bày trong Hình 2.



Hình 2. Đồ thị phụ tải và công suất PV

Đối với giá thầu của các máy phát điện phân tán diesel, chi phí tiêu hao nhiên liệu, giới hạn của các thể hệ máy phát hoạt động và định giá thời gian thực, tác giả tham khảo [7].



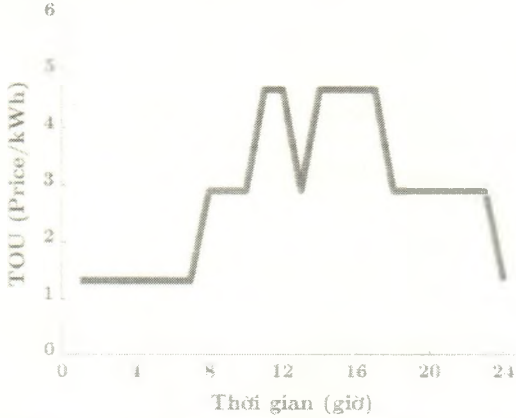
Hình 3. Đường cong chi phí của các máy phát Diesel

Hệ thống lưu trữ trữ (BATT) được sử dụng có đặc tính trình bày trong Bảng 1. Việc đánh giá ảnh hưởng của lưu trữ sẽ làm rõ được ý tưởng trong việc kết hợp vận hành lưu trữ, PV và trao đổi công suất với hệ thống trong lưới điện siêu nhỏ.

Bảng 1. Thông số hệ thống lưu trữ [7]

Công suất (kW)	Dung lượng (kWh)	Vòng đời (cycle)	SOC ban đầu	SOC max	SOC min	Hiệu suất
100	250	3000	0.3	1.0	0,3	0,95/0,95

Công suất trao đổi giữa lưới điện siêu nhỏ và hệ thống tương ứng với chi phí nhất định trong ngày (TOU), chi phí này thay đổi theo thời gian trong ngày. Nhằm hạn chế nhu cầu điện quá lớn trong giờ cao điểm cũng như khuyến khích sử dụng điện trong các giờ thấp điểm từ đó giảm gánh nặng cho hệ thống.



Hình 4. Chi phí trao đổi công suất thay thời gian (Time of Use)

4. Thuật toán DE

Thuật toán DE nhằm mục đích phát triển một tập hợp NP gồm các cá thể có D chiều, mỗi cá thể $X_{i,G} = \{x_{i,G}^1, \dots, x_{i,G}^D\}$, $i=1, \dots, NP$ đều có khả năng là nghiệm tối ưu và chúng luôn hướng đến điểm tối ưu toàn cục. Việc khởi tạo các cá thể ban đầu nên bao phủ không gian tìm kiếm càng nhiều càng tốt, bằng cách sử dụng phân phối chuẩn lên mỗi cá thể trong đó giới hạn bởi cực đại $X_{max} = \{x_{max}^1, \dots, x_{max}^D\}$ và cực tiểu $X_{min} = \{x_{min}^1, \dots, x_{min}^D\}$ của tham số đó.

$$x_{i,G}^j = x_{min}^j + \text{rand}(0,1) \cdot (x_{max}^j - x_{min}^j), \quad (7)$$

$$j = 1, 2, \dots, D$$

với $\text{rand}(0,1)$ đại diện cho một giá trị ngẫu nhiên có phân phối chuẩn trong phạm vi $[0, 1]$.

4.1. Đột biến cá thể

Sau khi khởi tạo, DE sẽ tạo ra vector đột biến $V_{i,G}$ tương ứng với mỗi cá thể $X_{i,G}$, hay còn gọi là vector mục tiêu, trong thế hệ hiện tại. Ứng với mỗi vector mục tiêu $X_{i,G}$, ở thế hệ G , có vector đột biến $V_{i,G} = \{v_{i,G}^1, v_{i,G}^2, \dots, v_{i,G}^D\}$ tương ứng. Các vector đột biến có thể được tạo bởi một số phương pháp nhất định. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp "DE/rand/1" như sau:

$$V_{i,G} = X_{r_1,G} + F \cdot (X_{r_2,G} - X_{r_3,G}) \quad (8)$$

Ký hiệu r_1, r_2, r_3 là các số nguyên không trùng nhau được tạo ngẫu nhiên trong phạm vi $[1, NP]$, tương tự tại mỗi cá thể i chúng cũng không trùng nhau. Các chỉ số này được tạo ngẫu nhiên một lần cho mỗi vector đột biến. Hệ số tỉ lệ F nhằm kiểm soát sự ảnh hưởng của vector sai lệch.

4.2. Crossover

Sau quá trình đột biến, DE tiến hành quá trình Crossover cho từng cặp vector đích $X_{i,G}$ và vector đột biến tương ứng $V_{i,G}$ để tạo ra một vector thử nghiệm $U_{i,G} = \{u_{i,G}^1, u_{i,G}^2, \dots, u_{i,G}^D\}$. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp Crossover nhị thức được định nghĩa như sau:

$$u_{i,G}^j = \begin{cases} v_{i,G}^j, & \text{rand}_j[0,1] \leq CR \quad \parallel \quad j = j_{\text{rand}} \\ x_{i,G}^j, & \neq \end{cases} \quad (9)$$

với $j = 1, 2, \dots, D$.

Trong công thức (9), CR là một hằng số được chọn trong khoảng $[0,1]$ nhằm kiểm soát phần giá trị tham số được sao chép từ vector đột biến; j_{rand} là số nguyên ngẫu nhiên được chọn trong phạm vi $[1, D]$. Toán tử Crossover nhị thức sao chép tham số thứ j của vector đột biến $V_{i,G}$ sang phần tử tương ứng trong vector thử nghiệm $U_{i,G}$ nếu $\text{rand}_j[0,1] \leq CR$ hoặc $j = j_{\text{rand}}$. Ngược lại, nó sẽ lấy giá trị tương ứng ở vector đích $X_{i,G}$. Điều kiện $j = j_{\text{rand}}$ được đưa ra để đảm bảo rằng, vector thử nghiệm sẽ khác với vector mục tiêu tương ứng của nó ít nhất một tham số.

4.3. Lựa chọn cá thể

Nếu giá trị của một số tham số của vector thử nghiệm mới được tạo vượt quá điều kiện ràng buộc tương ứng, DE sẽ điều chỉnh chúng một cách ngẫu nhiên trong phạm vi ràng buộc. Sau đó, các giá trị hàm mục tiêu của tất cả các vector thử nghiệm được đánh giá và quá trình lựa chọn sẽ được thực hiện. Giá trị hàm mục tiêu của mỗi vector thử nghiệm $f(U_{i,G})$ được so sánh với vector đích tương ứng của nó $f(X_{i,G})$ trong quần thể hiện tại. Nếu vector thử

nghiệm có giá trị hàm mục tiêu nhỏ hơn hoặc bằng với vector đích tương ứng, thì vector thử nghiệm sẽ thay thế vector đích và gia nhập vào quần thể của thế hệ tiếp theo.

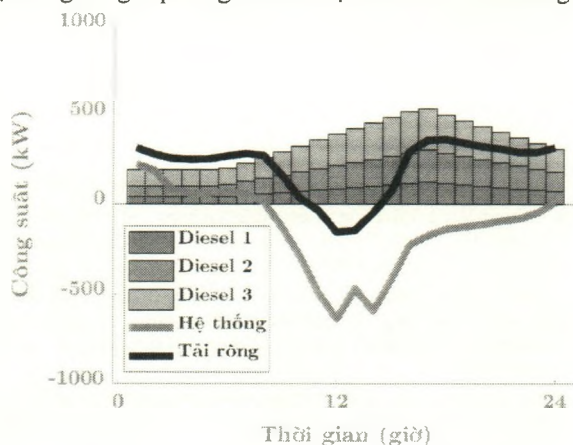
5. Kết quả nghiên cứu

5.1. Lập lịch phát điện

Lập lịch phát điện là một trong những bước quan trọng trong việc vận hành tối ưu một hệ thống điện. Việc lập lịch sẽ xác định được công suất phát và trạng thái của các đối tượng trong lưới, từ đó nhà vận hành sẽ điều phối hệ thống một cách thuận lợi, chính xác và tối ưu nhất.

Sau khi mô hình hóa hệ microgrid với ba máy phát diesel, hệ thống năng lượng mặt trời và hệ thống lưu trữ. Kết quả tối ưu cho thấy, để đáp ứng công suất tải ròng (netload) trong một ngày ta cần phối hợp toàn diện các thành phần trong lưới. Hình 5 trình bày công suất phát trong từng giờ của nguồn diesel và trao đổi công suất với hệ thống (utility) nhằm đáp ứng nhu cầu phụ tải (netload). Trong đó, netload là phụ tải thực sau trừ đi công suất năng lượng mặt trời.

Kết quả từ Hình 5 cho thấy, đường cong netload thay đổi không đồng đều, lồi xuống ở khoảng thời gian 12 giờ và tăng lên sau đó vài tiếng, nguyên do là vì năng lượng mặt trời đóng góp một lượng lớn công suất cho phụ tải, thậm chí thừa gần 200kWh điện năng lúc 12 giờ. Lượng điện năng này được phát ngược lên lưới nhằm bán cho hệ thống tương ứng với mức giá của TOU. Bên cạnh đó, các máy phát diesel kết hợp với trao đổi công suất với hệ thống đóng vai trò chủ chốt trong việc đáp ứng phụ tải ròng trong các khoảng thời gian không có nắng. Xuyên suốt 24 giờ các máy phát diesel làm việc liên tục, một mặt đáp ứng phụ tải ròng của microgrid, một tối ưu hóa lợi nhuận từ việc bán điện cho hệ thống với chi phí TOU lúc phụ tải cao điểm trong khoảng 12-15 giờ. Đường cong trao đổi công suất với lưới (utility) thay đổi phụ thuộc theo chi phí TOU ở Hình 4, thời điểm có giá điện cao microgrid sẽ tăng cường phát công suất lên hệ thống nhằm tối đa hóa lợi nhuận thu được từ việc bán điện. Các thời điểm còn lại việc trao đổi công suất tương tự dịch vụ phụ trợ từ hệ thống, phần đỉnh của đồ thị phụ tải sẽ được hệ thống cung cấp công suất hỗ trợ điều tần lưới Microgrid.

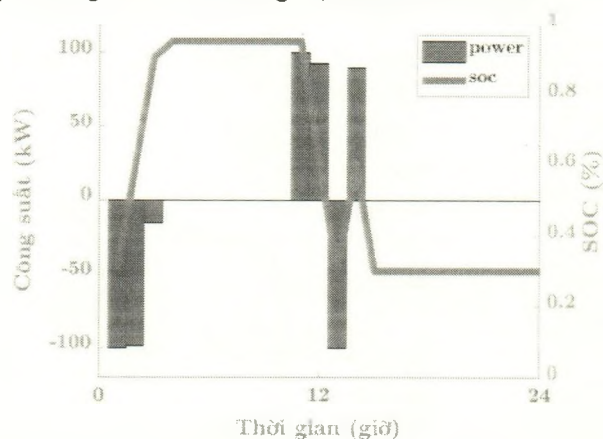


Hình 5. Lịch phát công suất của máy phát Diesel

Hệ thống lưu trữ sử dụng trong mô hình có công suất 55kW, dung lượng 88kWh, ngoài ra để đảm bảo tuổi thọ của tế bào lưu trữ nghiên cứu này yêu cầu giữ lại 20% năng lượng trong hệ. Ở Hình 6, trình bày 24 giờ hoạt động của

hệ thống lưu trữ trong microgrid. Sự hoạt động của lưu trữ phần lớn ảnh hưởng bởi chi phí phát điện diesel và chi phí trao đổi công suất với hệ thống.

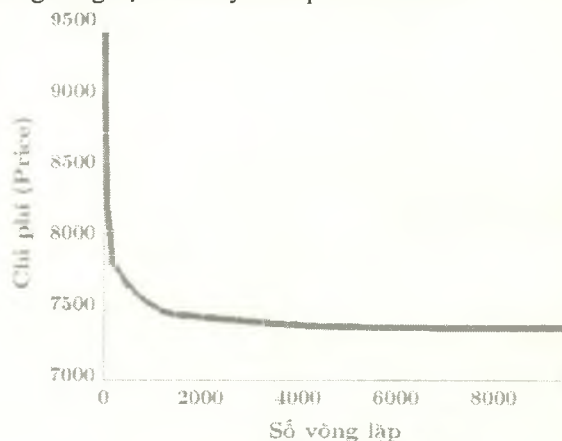
Ta thấy trong khoảng thời gian đầu, với chi phí TOU thấp, lưu trữ tích cực tích trữ điện năng đến khi nạp đầy (SOC = 100%). Đến trước 12 giờ trong ngày nhu cầu năng lượng tăng cao khi đó dẫn đến mức giá TOU tăng, hệ lưu trữ phát toàn bộ công suất lên hệ thống nhằm tối ưu hóa chi phí hệ thống. Tại thời điểm 12 giờ, chi phí TOU giảm nhẹ nguyên do là vì sự xâm nhập mạnh của năng lượng mặt trời, do đó khuyến khích lưu trữ tích trữ năng lượng. Sau khi chi phí TOU tăng, hệ lưu trữ cùng các máy phát diesel phát công suất lên hệ thống một cách tối ưu nhất.



Hình 6. Trạng thái hoạt động của BATT

5.2. Sự hội tụ

Để đánh giá sự hiệu quả của thuật toán, ta sử dụng đường cong hội tụ ở Hình 7. Đường cong hội tụ của thuật toán Tối ưu Sai lệch cho việc lập lịch phát điện có dạng đường cong logarit. Sau khoảng 4000 lần lặp bài toán đã gần như xác định được điểm tối ưu. Ở vòng lặp thứ 6000 có thể thấy mô hình đã xác định gần đúng điểm tối ưu hóa. Từ vòng lặp thứ 8000 trở đi, kết quả không thay đổi nhiều chứng tỏ nghiệm lúc này đã xấp xỉ tối ưu hóa.



Hình 7. Sự hội tụ của bài toán tối ưu

6. Kết luận

Lập lịch phát điện trong một ngày là công việc quan trọng đối với việc vận hành hệ thống điện, đặc biệt trong lưới điện có nhiều thành phần đặc biệt như hệ thống lưu trữ và chi phí trao đổi công suất với hệ thống. Để vận hành tối

ur hệ microgrid như vậy nghiên cứu này đã đề xuất một giải pháp khả thi và hiệu quả. Bên cạnh đó, khả năng ứng dụng của thuật toán tối ưu hóa tiến hóa sai lệch được khai thác trong lĩnh vực lập lịch phát điện. Từ đó, các nhà vận hành lưới có thể khai thác đề gia tăng sự tối ưu khi vận

hành hệ thống điện.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 102.02-2020.07.

Bảng 2. Lưu đồ thuật toán Tối ưu hóa Sai lệch trong việc tối ưu lịch phát điện của lưới điện siêu nhỏ

<p>Bước 1: Đặt giá trị thể hệ $G = 0$, và khởi tạo ngẫu nhiên một quần thể gồm NP cá thể $P_G = \{X_{1,G}, \dots, X_{NP,G}\}$ với</p> $X_{i,G} = \{x_{i,G}^1, \dots, x_{i,G}^D\}, i = 1, \dots, NP \text{ có phân phối chuẩn trong khoảng } [X_{\min}, X_{\max}], \text{ với } X_{\min} = \{x_{\min}^1, \dots, x_{\min}^D\} \text{ và } X_{\max} = \{x_{\max}^1, \dots, x_{\max}^D\}$
<p>Bước 2: WHILE điều kiện dừng chưa thỏa mãn DO</p> <p>Bước 2.1 Đột biến cá thể /* Tạo một vector đột biến $V_{i,G} = \{v_{i,G}^1, \dots, v_{i,G}^D\}$ cho mỗi vector đích $X_{i,G}$ */ FOR $i = 1$ to NP Tạo một vector đột biến $V_{i,G} = \{v_{i,G}^1, \dots, v_{i,G}^D\}$ cho mỗi vector đích $X_{i,G}$ thông qua công thức (9) END FOR</p> <p>Bước 2.2 Crossover /* Tạo một vector thử nghiệm $U_{i,G} = \{u_{i,G}^1, \dots, u_{i,G}^D\}$ cho mỗi vector đích $X_{i,G}$ */ /* Crossover nhị phân */ FOR $i = 1$ to NP $j_{\text{rand}} = \lfloor \text{rand}(0,1) * D \rfloor$ FOR $j = 1$ to D $u_{i,G}^j = \begin{cases} v_{i,G}^j, & \text{rand}_j[0,1] \leq CR \quad \parallel \quad j = j_{\text{rand}} \\ x_{i,G}^j, & \neq \end{cases}$ END FOR END FOR</p> <p>Bước 2.3 Lựa chọn cá thể /* Lựa chọn */ FOR $i = 1$ to NP Đánh giá vector thử nghiệm $U_{i,G}$ IF $f(U_{i,G}) \leq f(X_{i,G})$ and ($U_{i,G}$ thỏa mãn ràng buộc vật lý), THEN $X_{i,G+1} = U_{i,G}, f(X_{i,G+1}) = f(U_{i,G})$ IF $f(U_{i,G}) < f(X_{\text{best},G})$, THEN $X_{\text{best},G} = U_{i,G}, f(X_{\text{best},G}) = f(U_{i,G})$ END IF END IF END FOR</p> <p>Bước 2.4 Tăng giá trị $G = G + 1$</p>
<p>Bước 3: END WHILE</p>

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. Tiwari and L. Srivastava, "Generation scheduling and micro-grid energy management using differential evolution algorithm", in *2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, Mar. 2016, pp. 1–7, doi: 10.1109/ICCPCT.2016.7530218.
- [2] A. S. Gazafroudi, K. Afshar, and N. Bigdeli, "Assessing the operating reserves and costs with considering customer choice and wind power uncertainty in pool-based power market", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 67, pp. 202–215, 2015.
- [3] A. Zakariazadeh, S. Jadid, and P. Siano, "Stochastic multi-objective operational planning of smart distribution systems considering demand response programs", *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 111, pp. 156–168, 2014.
- [4] D. T. Viet, V. Van Phuong, M. Q. Duong, and Q. T. Tran, "Models for Short-Term Wind Power Forecasting Based on Improved Artificial Neural Network Using Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithms", *Energies*, vol. 13, no. 11, p. 2873, 2020.
- [5] A. Zakariazadeh, S. Jadid, and P. Siano, "Economic-environmental energy and reserve scheduling of smart distribution systems: A multiobjective mathematical programming approach", *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, pp. 151–164, 2014.
- [6] M. Motevasel and A. R. Seifi, "Expert energy management of a micro-grid considering wind energy uncertainty", *Energy Convers. Manag.*, vol. 83, pp. 58–72, 2014.
- [7] G. R. Aghajani, H. A. Shayanfar, and H. Shayeghi, "Presenting a multi-objective generation scheduling model for pricing demand response rate in micro-grid energy management", *Energy Convers. Manag.*, vol. 106, pp. 308–321, 2015.