

## Improve Particle Swarm Optimization Algorithm to Optimize the Profit of a Thermal Power Plant Using Different Revenue Models

Nguyen Ngoc Thiem<sup>1</sup>, Phan Minh Tan<sup>2</sup>, Nguyen Trung Thang<sup>2</sup>, Le Chi Kien<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Industrial University of Ho Chi Minh City, Vietnam

<sup>2</sup>Ton Duc Thang University, Vietnam

<sup>3</sup>Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam

\*Corresponding author. Email: [kienlc@hcmute.edu.vn](mailto:kienlc@hcmute.edu.vn)

### ARTICLE INFO

Received: 22/12/2021  
Revised: 15/2/2022  
Accepted: 12/3/2022  
Published: 30/8/2022

### KEYWORDS

Particle swarm optimization;  
Inertia weight;  
Constriction factor;  
Revenue model;  
Converge speed.

### ABSTRACT

In this research, three versions of particle swarm optimization algorithm such as conventional particle swarm optimization (PSO), particle swarm optimization with inertia weight and particle swarm optimization with constriction factor are applied for handling the economic load dispatch problem under the competitive electric market. The main work of the PSO algorithms is to determine the most optimal power output of generators to obtain total profit as much as possible for the power companies without violation of constraints. These algorithms are tested on three and ten generators system using two different revenue models. The results obtained from the algorithm simulation are compared to each other as well as to the other methods to evaluate the algorithm efficiency and robustness. As a result, the improved PSO algorithms are very strong to solve the economic load dispatch problem for profit optimization because they can obtain the highest profit, fast converge speed and simulation time.

## Cải Tiến Giải Thuật Tối Ưu Bầy Đàn Để Tối Ưu Hóa Lợi Nhuận Của Nhà Máy Nhiệt Điện Trong Các Mô Hình Doanh Thu Khác Nhau

Nguyễn Ngọc Thiêm<sup>1</sup>, Phan Minh Tân<sup>2</sup>, Nguyễn Trung Thắng<sup>2</sup>, Lê Chí Kiên<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại học Tôn Đức Thắng, Việt Nam

<sup>3</sup>Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

\* Tác giả liên hệ. Email: [kienlc@hcmute.edu.vn](mailto:kienlc@hcmute.edu.vn)

### THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 22/12/2021  
Ngày hoàn thiện: 15/2/2022  
Ngày chấp nhận đăng: 12/3/2022  
Ngày đăng: 30/8/2022

### TỪ KHÓA

Tối ưu bầy đàn;  
Vận tốc quán tính;  
Hệ số giới hạn;  
Mô hình doanh thu;  
Tốc độ hội tụ.

### TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, ba phiên bản của giải thuật tối ưu bầy đàn (PSO) bao gồm tối ưu bầy đàn cổ điển, tối ưu bầy đàn với vận tốc quán tính, và tối ưu bầy đàn với hệ số giới hạn được áp dụng để xử lý bài toán tối ưu hóa lợi nhuận của nhà máy nhiệt điện. Nhiệm vụ chính của các giải thuật PSO là xác định công suất phát và công suất dự trữ tối ưu của tổ máy phát điện để có được tổng lợi nhuận cao nhất cho các công ty sản xuất mà không vi phạm các ràng buộc. Các giải thuật này được áp dụng trên hai hệ thống ba và mười tổ máy với hai mô hình doanh thu khác nhau. Kết quả thu được từ việc lập trình các giải thuật PSO được so sánh với nhau để đánh giá hiệu quả và độ mạnh của các giải thuật, đồng thời cũng được so sánh với kết quả của các nghiên cứu trước để đánh giá hiệu quả của các giải thuật cải tiến. Từ kết quả so sánh dẫn đến kết luận rằng các giải thuật PSO cải tiến là một công cụ rất mạnh để giải quyết bài toán tối ưu hóa lợi nhuận của nhà máy nhiệt điện vì nó có thể thu được lợi nhuận cao nhất, tốc độ hội tụ nhanh với thời gian mô phỏng ngắn.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.71B.2022.1103>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

## 1. Giới thiệu

Giải thuật tối ưu bầy đàn (Particle Swarm Optimization - PSO) được xây dựng bởi Kennedy và Eberhart vào năm 1995. Nó là một trong những phương pháp tính toán nhằm tối ưu hóa một vấn đề bằng cách lặp đi lặp lại để cải thiện một giải pháp liên quan đến một thước đo chất nhất định (Meta-heuristic). Khả năng và hiệu quả của PSO đã được chứng minh qua nhiều bài toán tối ưu hóa trong hệ thống điện. Tuy vậy PSO vẫn còn nhiều hạn chế nên các nghiên cứu tiếp theo trong [1] đã chỉ ra các cải tiến giải thuật này để giải các bài toán tối ưu phức tạp hơn liên quan đến sự phối hợp giữa phát nhiệt và phát điện của các nhà máy nhiệt điện. Nghiên cứu trong [2] đã áp dụng PSO để tối ưu thông số điều khiển PID. Nghiên cứu [3] cũng đưa ra các cải tiến cho PSO và chứng minh sự hiệu quả của nó. Nghiên cứu [4] đã tiến hành so sánh hai cải tiến chính của PSO cho từng bài toán khác nhau. Như vậy, bước đầu tiên trong quá trình phát triển một giải thuật là học hỏi, mô phỏng lại các đặc tính của tự nhiên. Sau đó, áp dụng giải thuật đó vào các bài toán cụ thể trong kỹ thuật rồi khảo sát, đánh giá mức độ hiệu quả của giải thuật. Tiếp theo, các nhà nghiên cứu sẽ lại cải tiến và điều chỉnh các thông số cho phù hợp để đạt hiệu quả cao nhất. Đó là những việc làm mà các công trình nghiên cứu như trên thực hiện.

Tương tự vậy, bài báo này sẽ trình bày chi tiết thuật toán PSO cổ điển và hai phiên bản cải tiến là PSO có xét đến vận tốc quán tính (Particle Swarm Optimization with Inertia Weight – IWPSO) và PSO có xét đến hệ số giới hạn (Particle Swarm Optimization with Constriction Factor – CFPSO). Nhiệm vụ nghiên cứu chính trong bài báo này là áp dụng các phiên bản thuật toán PSO để xử lý bài toán điều phối tải kinh tế của hệ thống điện trong môi trường cạnh tranh nhằm tối đa lợi nhuận của các nhà máy phát điện. Các phương pháp này đã được thử nghiệm trên hệ thống ba tổ máy và hệ thống mười tổ máy với các ràng buộc khác nhau liên quan đến thị trường điện. Bài báo cũng thực hiện đánh giá độ hiệu quả của thuật toán cũng như so sánh các tính hiệu quả các phương pháp với nhau. Các kết quả mô phỏng về tổng lợi nhuận thu được từ các phiên bản PSO này được so sánh với các phương pháp khác như Differential Evolution Algorithm (DE) [5], Augmented Lagrange Hopfield Network (ALHN), Cuckoo Search Algorithm (CSA) [6], Lagrange Hopfield Network (HLN) để đánh giá hiệu quả của giải thuật cải tiến.

Bài báo đóng góp được các thuật toán cải tiến từ PSO cổ điển sử dụng cho các mô hình doanh thu khác nhau với độ tin cậy cao.

## 2. Giải thuật tối ưu bầy đàn cổ điển và cải tiến

### 2.1. Giải thuật tối ưu bầy đàn cổ điển

Giải thuật PSO được ứng dụng nhiều trong các lĩnh vực kỹ thuật khác nhau. Về mặt bản chất, giải thuật PSO sử dụng quá trình dịch chuyển của các cá thể để đánh giá học hỏi và tìm ra nghiệm tốt nhất. Mỗi cá thể được đại diện bởi vị trí và vận tốc của nó. Quá trình cập nhật vận tốc ảnh hưởng bởi vị trí và vận tốc của cá thể thứ  $d$ , cũng như vị trí và vận tốc của cá thể tốt nhất. Mô hình vận tốc và vị trí của các cá thể trong giải thuật PSO được biểu diễn như sau.

$$V_d^{\text{new}} = V_d + \alpha_1 r_1 (X_{\text{Best}} - X_d) + \alpha_2 r_2 (X_{G\text{Best}} - X_d); \quad d = 1, \dots, N_p \quad (1)$$

$$X_d^{\text{new}} = X_d + V_d^{\text{new}}; \quad d = 1, \dots, N_p \quad (2)$$

Công thức trên thể hiện quá trình dịch chuyển của các cá thể PSO phụ thuộc vào các đặc trưng là vận tốc mới  $V_d^{\text{new}}$  được xác định dựa trên cá thể tốt nhất bầy  $G_{\text{Best}}$  và vị trí tốt nhất  $X_{\text{Best}}$  như công thức (1).  $X_{G\text{Best}}$  là vị trí cá thể tốt nhất bầy. Vị trí mới  $X_d^{\text{new}}$  thì được xác định dựa trên  $X_d$  và vận tốc mới theo công thức (2). Lưu đồ giải thuật PSO cổ điển được trình bày trong Hình 1.

### 2.2. Giải thuật tối ưu bầy đàn có xét đến vận tốc quán tính

PSO thông thường đã được biết đến là công cụ mạnh mẽ và nhanh chóng trong việc giải quyết các bài toán tối ưu hóa nhưng nó vẫn có một số nhược điểm về việc dễ dàng bị mắc kẹt trong vùng cục bộ và hội tụ chậm cho các hệ thống lớn trong các điều kiện và ràng buộc hoạt động phức tạp. Vì lý do đó, bài báo này đã ứng dụng một phiên bản khác cải tiến PSO bằng cách xét đến vận tốc quán tính tức là xem xét tỉ lệ đóng góp của vận tốc bước trước đó đến vận tốc của bước hiện tại (IWPSO) như trình bày chi tiết như dưới đây.

Trong giải thuật IWPSO, một trọng số tỉ lệ vận tốc  $w$  được thêm vào công thức vận tốc của PSO ban đầu để cân bằng giữa tìm kiếm toàn cầu và địa phương. Trong bài báo này,  $w$  được đề xuất dưới dạng một mô hình hoàn toàn mới. Giá trị này thay đổi khi số lần lặp thay đổi. Vì vậy, mô hình vận tốc và trọng số  $w$  được trình bày như sau.

$$V_d^{new} = wV_d + \alpha_1 r_1 (X_{Best} - X_d) + \alpha_2 r_2 (X_{GBest} - X_d); d = 1, \dots, N_p \quad (3)$$

$$w = w_{max} \frac{w_{max} - w_{min}}{Max_L} L; L = 1, \dots, Max_L \quad (4)$$

Trong đó

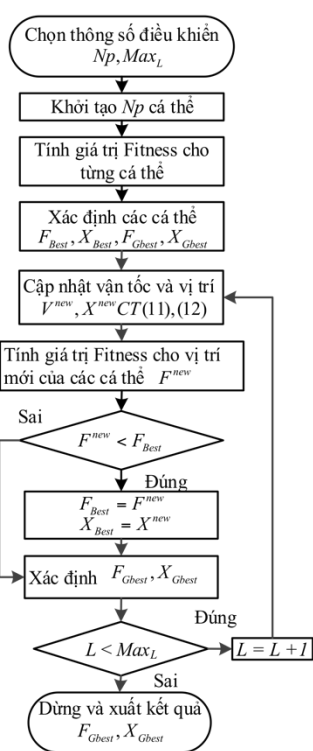
$\alpha_1, \alpha_2$ : hệ số đóng góp của thuật toán

$r_1, r_2$ : giá trị ngẫu nhiên giữa 0 và 1

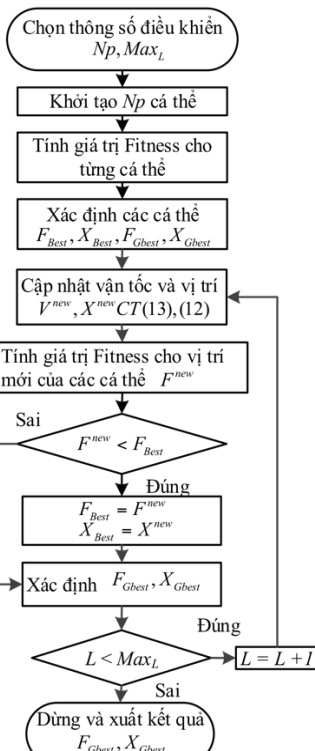
$w_{max}$ : giới hạn lớn nhất của hệ số  $w$

$w_{min}$ : giới hạn nhỏ nhất của hệ số  $w$

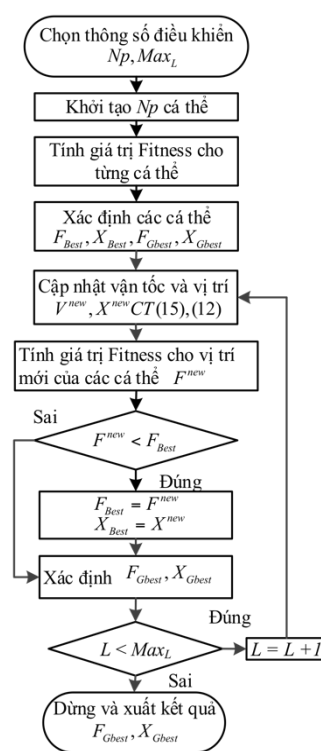
Quá trình dịch chuyển của các cá thể trong giải thuật IWPSO cũng phụ thuộc vào các đặc trưng như vận tốc mới  $V_d^{new}$  được xác định như công thức (3) dựa trên cá thể tốt nhất bầy  $G_{Best}$  và vị trí tốt nhất  $X_{Best}$  nhưng lại có thêm yếu tố của trọng số khối lượng  $w$  được tính như công thức (4) còn vị trí mới  $X_d^{new}$  thì được xác định dựa trên  $X_d$  và vận tốc mới được cập nhật tương tự như trên.  $Max_L$  là số vòng lặp tối đa. Lưu đồ giải thuật IWPSO được trình bày trong Hình 2.



Hình 1. Giải thuật PSO cổ điển



Hình 2. Giải thuật IWPSO



Hình 3. Giải thuật CFPSO

### 2.3. Giải thuật tối ưu bầy đàn có xét đến hệ số giới hạn

Hệ số  $F$  là một hệ số giới hạn khác được áp dụng trong nghiên cứu này bằng cách thêm hai hằng số gia tốc mới. Sự thay đổi của việc áp dụng hệ số này được trình bày như sau.

$$V_d^{new} = F[V_d + \alpha_1 r_1 (X_{best} - X_d) + \alpha_2 r_2 (X_{Gbest} - X_d)]; d = 1, \dots, N_p \quad (5)$$

$$F = 2 / |2 - \beta - \sqrt{\beta^2 - 4\beta}|; \beta = \alpha_1 + \alpha_2; \alpha_1 = \alpha_2 = 2.05 \quad (6)$$

Ở giải thuật CFPSO thì quá trình dịch chuyển của các cá thể khác với hai phiên bản trên ở công thức cập nhật vận tốc mới (5). Vận tốc mới lúc này được nhân với một hệ số giới hạn là  $F$  được tính như công thức (6) và vị trí mới  $X_d^{new}$  thì được xác định tương tự. Lưu đồ giải thuật IWPSO được trình bày trong Hình 3.

## 3. Mô hình bài toán

### 3.1. Hàm mục tiêu

Hàm mục tiêu cho bài toán phân bố tải kinh tế (ELD) được trình bày như bên dưới.

$$\text{Maximum TPF} = \text{TR} - \text{TFC} \quad (7)$$

Trong đó

TPF: tổng lợi nhuận thu được

TR: tổng doanh thu

TFC: tổng chi phí nhiên liệu

### 3.1.1. Mô hình doanh thu 1

Trong mô hình doanh thu này thì người mua chỉ hợp đồng xác định công suất lớn nhất có thể mua và giá của nó. Để đảm bảo tính ổn định cho hệ thống, nhà máy vẫn phải dự trữ một lượng công suất cho trường hợp khách hàng sử dụng vượt quá hợp đồng. Vì khách hàng dùng lỗi nên giá trả cho lượng dự trữ điện này đắt hơn giá hợp đồng mua công suất rất nhiều. Để mô hình toán cho vấn đề này thì bài báo [3] đã đưa ra một hệ số xác suất ( $\omega$ ) cho biết xác suất lượng dự trữ được sử dụng

$$TR = FSB \sum_{k=1}^N P_k + \omega FRP \sum_{k=1}^N RP_k \quad (8)$$

Trong đó,

FSP: giá cho công suất phát

FRP: giá cho công suất dự trữ

$P_k$ : công suất phát của các tổ máy thứ k

$RP_k$ : công suất phát dự trữ của các tổ máy thứ k

N: số tổ máy phát

### 3.1.2. Mô hình doanh thu 2

Trong trường hợp này, các nhà máy nhiệt điện được hợp đồng mua thêm lượng dự trữ nhưng với giá thấp hơn giá mua công suất phát mặt dù năng lượng dự trữ không được sử dụng. Nhưng khi năng lượng dự trữ được sử dụng thì khách hàng chỉ trả tiền cho lượng công suất vượt quá bằng với giá mua công suất phát. Vì vậy, giá của điện dự trữ ít hơn so với mô hình 1. Tổng doanh thu được tính như công thức bên dưới.

$$TR = FSB \sum_{k=1}^N P_k + [(1 - \omega)FRP + \omega FSB] \sum_{k=1}^N RP_k \quad (9)$$

### 3.1.3. Tổng chi phí nhiên liệu

Khi xét đến ảnh hưởng của thị trường điện thì hàm mục tiêu mới cho ELD có thêm phần công suất dự trữ của các tổ máy thứ k

$$FC_k(P_k + RP_k) = C1_k + C2_k(P_k + RP_k) + C3_k(P_k + RP_k)^2 \quad (10)$$

Trong đó

$FC_k$ : chi phí nhiên liệu của tổ máy thứ k

$C1_k, C2_k, C3_k$ : các hệ số của hàm chi phí nhà máy nhiệt điện

Chi phí này có tác động bởi xác suất khách hàng sử dụng lượng dự trữ nên công thức để tính tổng chi phí nhiên liệu được viết lại như bên dưới.

$$TFC_k = (1 - \omega) \sum_{k=1}^N FC_k(P_k) + \omega \sum_{k=1}^N FC_k(P_k + RP_k) \quad (11)$$

## 3.2. Các điều kiện ràng buộc

### 3.2.1. Ràng buộc công suất yêu cầu

Ràng buộc cân bằng công suất trong bài toán là về tổng công suất phát phải bằng tổn thất điện năng và công suất tải yêu cầu, do đó tổng công suất đầu ra của các tổ máy phát phải nhỏ hơn công suất tải yêu cầu ( $FP_D$ ).

$$\sum_{k=1}^N P_k \leq FP_D \quad (12)$$

### 3.2.2. Ràng buộc công suất dự trữ

Tổng công suất dự trữ của tất cả các tổ máy có thể thấp hơn nhu cầu dự trữ ( $FR_D$ ) miễn là tổng lợi nhuận cao và các công ty sản xuất có thể mua dự trữ thấp hơn nhu cầu dự trữ dự báo.

$$\sum_{k=1}^N RP_k \leq FR_D \quad (13)$$

### 3.2.3. Giới hạn công suất phát

Công suất phát của các tổ máy phát phải nằm trong giới hạn nhỏ nhất và giới hạn lớn nhất của nó. Giới hạn nhỏ nhất này là giới hạn do tính kinh tế, nếu phát nhỏ hơn nhà máy sẽ lỗ và giới hạn trên là giới hạn liên quan đến khả năng vật lý của máy phát, công suất định mức của máy phát được biểu diễn:

$$P_k^{\min} \leq P_k \leq P_k^{\max} \quad (14)$$

Trong đó

$P_k^{\min}$ : giới hạn công suất phát nhỏ nhất của tổ máy phát thứ k

$P_k^{\max}$ : giới hạn công suất phát lớn nhất của tổ máy phát thứ k

### 3.2.4. Giới hạn công suất dự trữ

Công suất dự trữ của các tổ máy phát phụ thuộc vào công suất phát và khả năng phát còn lại của tổ máy đó nên công suất dự trữ bị ràng buộc bởi điều kiện bên sau.

$$0 \leq RP_k \leq P_k^{\max} - P_k^{\min} \quad (15)$$

$$P_k + RP_k \leq P_k^{\max} \quad (16)$$

## 3.3. Áp dụng các giải thuật tối ưu bầy đàn để giải bài toán

### 3.3.1. Khởi tạo vị trí của mỗi cá thể

Trong các phiên bản PSO thì đều có chung các thông số là  $N_p$  cá thể mỗi cá thể được đại diện cho vị trí và vận tốc. Vị trí của mỗi cá thể  $X_d$  ( $d=1..N_p$ ) chứa các biến là công suất đầu ra và công suất dự trữ của các tổ máy phát. Số biến này phụ thuộc vào số máy phát của hệ thống.

$$X_d = \{P_{1,d}..P_{NG,d}, RP_{1,d}..RP_{NG,d}\} \quad (17)$$

Trong đó

NG: số lượng tổ máy phát

$P_{1,d}$ : công suất của tổ máy số 1 và của cá thể thứ d

$P_{NG,d}$ : công suất của tổ máy số NG và của cá thể thứ d

$RP_{1,d}$ : công suất dự trữ của tổ máy số 1 và của cá thể thứ d

$RP_{NG,d}$ : công suất dự trữ của tổ máy số NG và của cá thể thứ d

Công suất phát và công suất dự trữ được khởi tạo như công thức bên dưới nhằm đảm bảo các biến được khởi tạo luôn nằm trong giới hạn cho phép của nó.

$$P_{k,d} = P_k^{\min} + \text{rand}(P_k^{\max} - P_k^{\min}); k = 1, \dots, NG \quad (18)$$

$$RP_{k,d} = RP_k^{\min} + \text{rand}(RP_k^{\max} - RP_k^{\min}); k = 1, \dots, NG \quad (19)$$

Trong đó rand là giá trị ngẫu nhiên trong khoảng từ 0 đến 1.

Vận tốc của mỗi cá thể cũng được khởi tạo tương tự và có dạng như công thức sau.

$$V_d = \{VP_{1,d}..VP_{NG,d}, VRP_{1,d}..VRP_{NG,d}\} \quad (20)$$

Trong đó

$V_d$ : vận tốc của cá thể thứ d

$VP_{1,d}$ : biến vận tốc của công suất phát tổ máy phát số 1 của cá thể thứ d

$VP_{NG,d}$ : biến vận tốc của công suất phát tổ máy phát số NG của cá thể thứ d

$VRP_{1,d}$ : biến vận tốc của công suất dự trữ tổ máy phát số 1 của cá thể thứ d

$VRP_{NG,d}$ : biến vận tốc của công suất dự trữ tổ máy phát số NG của cá thể thứ d

Các biến này được khởi tạo theo công thức dưới với k ở đây là giá trị của biến thứ k, và k thuộc khoảng từ 1 tới NG.

$$VP_{k,d} = VP_k^{\min} + \text{rand}(VP_k^{\max} - VP_k^{\min}); k = 1, \dots, NG \quad (21)$$

$$VRP_{k,d} = VRP_k^{\min} + \text{rand}(VRP_k^{\max} - VRP_k^{\min}); k = 1, \dots, NG \quad (22)$$

Do đó mỗi một biến điều khiển đều có một giới hạn nhỏ nhất và giới hạn lớn nhất của nó.

$VP_k^{\min}$ : vận tốc của biến công suất phát máy phát thứ k nhỏ nhất

$VP_k^{\max}$ : vận tốc của biến công suất phát máy phát thứ k lớn nhất

$VRP_k^{\min}$ : vận tốc của biến công suất dự trữ máy phát thứ k nhỏ nhất

$VRP_k^{\max}$ : vận tốc của biến công suất dự trữ máy phát thứ k lớn nhất

Các giới hạn này được bài toán xác định từ đầu như công thức sau dựa trên các giới hạn của công suất phát và công suất dự trữ lớn nhất.

$$VP_k^{\max} = P_k^{\max}; VP_k^{\min} = -VP_k^{\max} \quad (23)$$

$$VRP_k^{\max} = RP_k^{\max}; VRP_k^{\min} = -VRP_k^{\max} \quad (24)$$

### 3.3.2. Tính giá trị của hàm mục tiêu

Hàm mục tiêu của bài toán được xây dựng như bên dưới.

$$Fitness_d = (TR - TFC) + PF[\sum_{k=1}^{NG}(P_{k,d}) - FP_D]^2 + PF[\sum_{k=1}^{NG}(PR_{k,d}) - FR_D]^2 + PF[\sum_{k=1}^{NG}(P_{k,d} + PR_{k,d}) - P_k^{\max}]^2 \quad (25)$$

Trong đó TR-TFC dùng để đánh giá tổng doanh thu là bao nhiêu vì thuật toán tối ưu hiện tại đang tìm hàm đánh giá với mục tiêu là cực tiểu. Còn bài toán ở đây là cực đại nên ta phải đảo dấu giá trị mục tiêu lại như trên.

### 3.3.3. Cập nhật vận tốc, vị trí của từng cá thể

Trong các phiên bản PSO, các nghiệm mới được tạo ra thông qua việc cập nhật vận tốc và vị trí của từng cá thể. Giá trị vận tốc phụ thuộc vào bốn tham số như vận tốc, vị trí cá thể, vị trí tốt nhất của cá thể và vị trí tốt nhất của toàn bầy ở vòng lặp trước. Sau mỗi lần tạo nghiệm mới, các nghiệm sẽ được ràng buộc trong giới hạn của nó. Nếu thấp hơn các giá trị tối thiểu, chúng được gán thành các giá trị tối thiểu đó và nếu cao hơn các giá trị tối đa, chúng được gán thành các giá trị tối đa đó.

## 4. Kết quả

Các mô hình doanh thu số 1 và 2 lần lượt được khảo sát trong 2 hệ thống: 3 tổ máy và 10 tổ máy. Kết quả tính toán được trình bày bên dưới.

### 4.1. Mô hình doanh thu 1

#### 4.1.1. Hệ thống 3 tổ máy

Để khảo sát các thông số, giá trị của vòng lặp lớn nhất được chọn từ 10 đến 100. Với mỗi một giá trị của vòng lặp lớn nhất, bài báo khảo sát 50 lần thành công cho PSO, IWPSO and CFPSO. Giá trị cực đại lợi nhuận thu được từ các phiên bản của thuật toán PSO được biểu diễn trong Hình 4.

Hình 4 là kết quả thu được khi giá trị của vòng lặp lớn nhất được chọn là 10 đến 100. Với mỗi giá trị của vòng lặp tối đa ta có khảo sát 50 lần thành công cho các giải thuật PSO, IWPSO, CFPSO, và giá trị tốt nhất của 50 lần chạy đó được vẽ đồ thị hình này. Từ Hình 4 ta thấy hai phiên bản cải tiến là IWPSO và CFPSO lần lượt là đường màu xanh dương và xanh lá cây có khả năng tìm kiếm giá trị cực đại lợi nhuận cao hơn PSO là đường màu đen khi số vòng lặp tối đa trong khoảng 10 đến 50. Từ kết quả này cũng cho thấy khi số vòng lặp tối đa có giá trị từ 20 trở đi thì IWPSO và CFPSO đã tìm được giá trị cực đại và ổn định không dao động nữa, trong khi giải thuật PSO lại vẫn còn dao động cho thấy khả năng tìm kiếm tối ưu của PSO cổ điển còn thấp.

#### 4.1.2. Hệ thống 10 tổ máy

Trong trường hợp này, số vòng lặp tối đa là được chọn là 60 và đặc tính hội tụ được thể hiện trong Hình 5. có thể cho ta thấy khả năng tìm kiếm của thuật toán IWPSO tốt hơn PSO cổ điển và CFPSO vì đường biểu diễn của nó luôn cao hơn hai đường còn lại. Điều này cũng chứng minh rằng số lần thành công của IWPSO nhiều hơn các phương pháp còn lại.

### 4.2. Mô hình doanh thu 2

#### 4.2.1. Hệ thống 3 tổ máy

Kết quả đặc tính hội tụ tốt nhất của 100 lần chạy thành công trong Hình 6 cho ta thấy sự hội tụ nhanh của PSO cổ điển nhưng giá trị cực tiểu lại tốt bằng hai phương pháp cải tiến chứng tỏ khả năng tìm kiếm kết quả tối ưu của cả ba cho hệ thống này là như nhau.

#### 4.2.2. Hệ thống 10 tổ máy

Giống như hệ thống 10 tổ máy ở trên, thông số dữ liệu được áp dụng tương tự nhưng hàm mục tiêu sử dụng mô hình doanh thu số 2. Bài báo tiến hành khảo sát và thu được kết quả cho trường hợp này đạt giá trị tối ưu khi số vòng lặp lớn nhất là 200. Kết quả thu được trong Hình 7 và Bảng 4.

Đặc tính hội tụ trong Hình 7 cho thấy thuật toán PSO cao hơn hai phương pháp còn lại nhưng các giá trị này nằm ở vùng cục bộ chưa phải là nghiệm toàn cục. Như vậy nếu một thuật toán chỉ tìm nghiệm cục bộ thì khả năng cao sẽ tìm được nghiệm nhưng nó lại không phải là nghiệm tốt nhất. Còn hai phiên bản cải tiến có cải thiện về bước nhảy nên có thể thoát ra vùng cục bộ để tìm nghiệm tối ưu toàn cục nhưng nó cũng có thể làm thuật toán đi lạc hướng không thể quay về nghiệm tối ưu nào, do đó giá trị trung bình các đường hội tụ thấp hơn thuật toán PSO.

**Bảng 1.** So sánh kết quả đối với hệ thống 3 tổ máy trong mô hình doanh thu 1

Giải thuật	Số vòng lặp tối đa	Số nghiệm mới tạo	Lợi nhuận cực đại
PSO	50	150	1.102,4437
CFPSO	25	75	1.102,4502
IWPSO	20	60	1.102,4502

**Bảng 2.** So sánh kết quả đối với hệ thống 10 tổ máy trong mô hình doanh thu 1

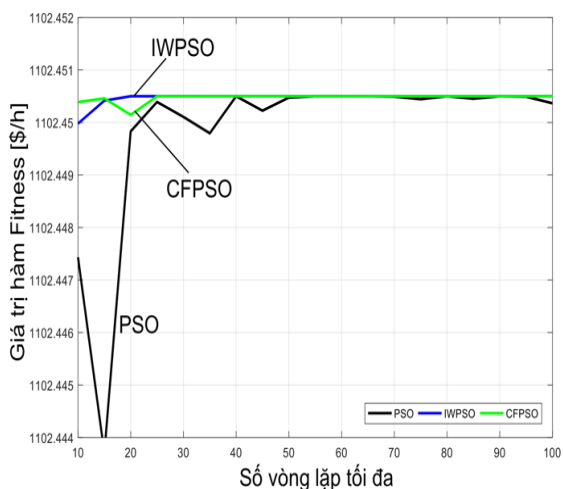
Giải thuật	Số vòng lặp tối đa	Số nghiệm mới tạo	Lợi nhuận cực đại
PSO	60	2400	14.337,03
CFPSO	60	2400	14.319,77
IWPSO	60	2400	14.479,18

**Bảng 3.** So sánh kết quả đối với hệ thống 3 tổ máy trong mô hình doanh thu 2

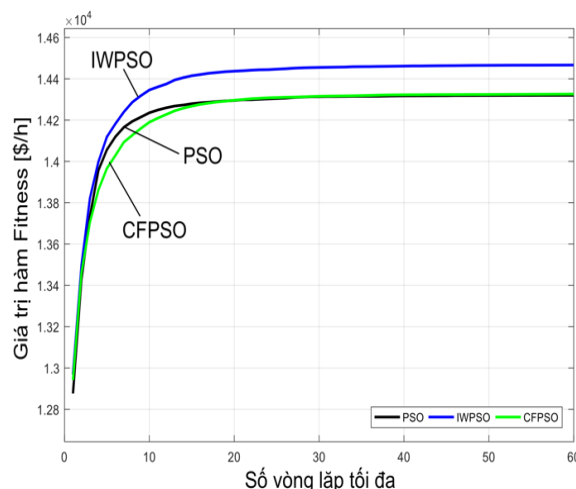
Giải thuật	Số vòng lặp tối đa	Số nghiệm mới tạo	Lợi nhuận cực đại
PSO	10	50	1.003,32
CFPSO	10	50	1.020,58
IWPSO	10	50	1.035,42

**Bảng 4.** So sánh kết quả đối với hệ thống 10 tổ máy trong mô hình doanh thu 2

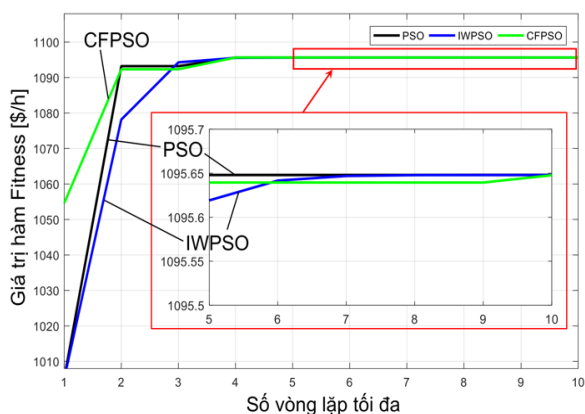
Giải thuật	Số vòng lặp tối đa	Số nghiệm mới tạo	Lợi nhuận cực đại
PSO	200	2500	13.266,39
CFPSO	200	2500	13.226,50
IWPSO	200	2500	13.149,22



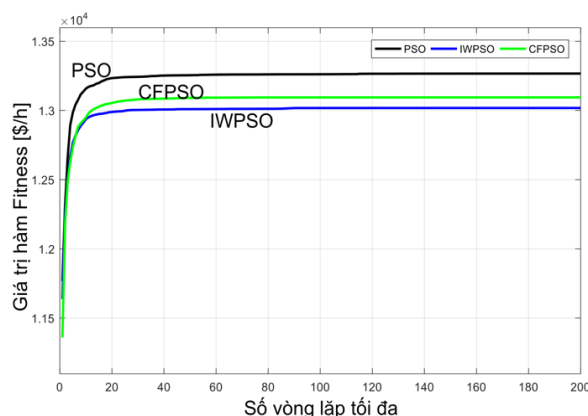
**Hình 4.** Lợi nhuận cực đại thu được đối với hệ thống 3 tổ máy trong mô hình doanh thu 1



**Hình 5.** Lợi nhuận cực đại thu được đối với hệ thống 10 tổ máy trong mô hình doanh thu 1



**Hình 6.** Lợi nhuận cực đại thu được đối với hệ thống 3 tổ máy trong mô hình doanh thu 2



**Hình 7.** Lợi nhuận cực đại thu được đối với hệ thống 10 tổ máy trong mô hình doanh thu 2

## 5. Kết luận

Kết quả so sánh ba giải thuật PSO, CFPSO, IWPSO khi áp dụng cho hai hệ thống thử nghiệm 3 tổ máy và 10 tổ máy sử dụng mô hình doanh thu thứ nhất thì giải thuật IWPSO là giải thuật tốt nhất, đặc biệt là khả năng tìm kiếm vượt trội các giải thuật kia. Hơn nữa, giải thuật IWPSO là phương pháp ổn định nhất và nhanh nhất vì nó có độ lệch chuẩn và có số lần tạo nghiệm mới nhỏ hơn so với các nghiệm cứu trước. Vì lý do này, có thể nhận xét rằng giải thuật IWPSO có thể được sử dụng như một kỹ thuật tối ưu hóa tốt cho bài toán điều độ tải kinh tế trong thị trường điện cạnh tranh cho mô hình doanh thu số 1, và có thể coi IWPSO một kỹ thuật đại diện cho giải thuật PSO để so sánh với các phương pháp khác.

Đối với mô hình doanh thu thứ 2, kết quả cho thấy lợi nhuận cao nhất của ba giải thuật PSO và các phương pháp trong các nghiên cứu trước tương đương nhau cho hệ thống 3 tổ máy nhưng khi áp dụng cho hệ thống 10 tổ máy, CFPSO tốt hơn so với các phiên bản PSO. Do đó CFPSO là một kỹ thuật tối ưu hóa được đề xuất để giải các bài toán tối ưu sử dụng mô hình doanh thu này.

Bài báo này cũng cho thấy những đóng góp chính đó là áp dụng ba giải thuật PSO để quản lý bài toán phân bố tải kinh tế trong thị trường điện cạnh tranh, đồng thời cho thấy điểm mạnh của hai giải thuật cải tiến so với PSO cổ điển. Ngoài ra, bài báo cũng chỉ định được các tham số điều khiển thích hợp nhất của cho mỗi hệ thống thử nghiệm.

## Lời cảm ơn

Công trình nghiên cứu này thuộc đề tài mã số B2020-SPK-02 được Bộ Giáo dục và Đào tạo Việt Nam tài trợ và được Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh chủ trì.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyen. T. T, and Vo. D. N, “Improved particle swarm optimization for combined heat and power economic dispatch”, *Scientia Iranica. Transaction D, Computer Science & Engineering, Electrical*, Vol. 23, No. 3, pp.1318-1334, 2016
- [2] Dubey. B. K, Singh. N. K, and Bhambri. S, “Optimization of PID controller parameters using PSO for two area load frequency control”, *IAES International Journal of Robotics and Automation*, Vol. 8, No.4, pp.256, 2019
- [3] Abdul-Adheem. W. R, “An enhanced particle swarm optimization algorithm”, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 9, No. 6, pp.4904-4907, 2019
- [4] Meziane. M. A, Mouloudi. Y, Draoui. A, “Comparative study of the price penalty factors approaches for Bi-objective dispatch problem via PSO”, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 10, No. 4, pp.3343-3349, 2020
- [5] Vo. D. N, Ongsakul. W, and Nguyen. K. P, “Augmented Lagrange Hopfield network for solving economic dispatch problem in competitive environment”, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1499, No. 1, pp.46-53, 2012
- [6] Duong T. L., Nguyen P. D., Phan V. D., Vo N. D. and Nguyen T. T., “Optimal load dispatch in competitive electricity market by using different models of hopfield lagrange network”, *Energies*, Vol. 12, No. 15, pp.2932, 2019



**Nguyen Ngoc Thiem** received the B.Eng. degree in electrical engineering from the Ho Chi Minh City University of Technology, Ho Chi Minh City, Vietnam, in 2000 and the M.Eng. degree in electrical engineering from the Ho Chi Minh City University of Engineering and Technology, Ho Chi Minh City, Vietnam, in 2015. He is currently working as a Lecturer in Faculty of Electrical Engineering Technology, Industrial University of Ho Chi Minh City, Vietnam. His research interest includes the thermal power plants, renewable energy, electricity transmission, and power system stability.



**Phan Minh Tan** received his M.Eng. degree in electrical engineering from Ton Duc Thang University in 2020 in Vietnam. Currently, he is teaching at Faculty Electrical and Electronics Engineering, Ton Duc Thang university. He has published about five papers. He is interested in the field of optimization algorithms, power system optimization, and renewable energies.



**Nguyen Trung Thang** received his M.Eng. and Ph.D. degree in electrical engineering from Ho Chi Minh City University of Technology and Education (HCMUTE), Vietnam, in 2010 and 2018 respectively. Currently, he is a research and head of power system optimization research group at Faculty Electrical and Electronics Engineering, Ton Duc Thang University. He has published over seventy papers including higher than forty ISI papers. His research fields are power system optimization, optimization algorithms, and renewable energies.



**Le Chi Kien** received the B.Eng. degree in electrical engineering from Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Ho Chi Minh City, Vietnam, in 1997, the M.Eng. degree in electrical engineering and the Ph.D. degree in energy-environment science from Nagaoka University of Technology, Nagaoka City, Japan, in 2002 and 2005 respectively. From 2005 he has worked at Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam and published over 30 journal papers. He is presently an associate professor in the Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam. His research interest includes magnetohydrodynamics, power generation system, power system optimization, optimization algorithms, and renewable energies.