

# NGHIÊN CỨU ÁP DỤNG THUẬT TOÁN PSO TỐI ƯU VẬN HÀNH HỆ THỐNG ĐA HỒ CHỨA THỦY ĐIỆN TRÊN LƯU VỰC SÔNG ĐÀ

Hồ Sỹ Mão

Trường Đại học Thủy lợi

**Tóm tắt:** Hệ thống đa hồ chứa thủy điện trên cùng một lưu vực sông có mối quan hệ thủy văn, thủy lợi và thủy lực. Vận hành bất kỳ một hồ chứa nào đều ảnh hưởng đến các hồ chứa khác do đó để vận hành tối ưu cần phải xét đến sự làm việc đồng thời của các hồ chứa. Bài toán vận hành hệ thống đa hồ chứa là bài toán rất phức tạp vì liên quan đến nhiều ẩn số và có mối quan hệ phi tuyến. Các phương pháp thuần túy toán học không giải quyết được vì số lượng quá lớn về tổ hợp tính toán và chiếm tài nguyên máy tính. Thuật toán PSO là thuật toán tìm kiếm thông minh có thể tìm được tối ưu tổng thể của bài toán hệ thống đa hồ chứa. Bài báo đưa ra cách áp dụng thuật toán PSO để tính toán hệ thống 4 hồ chứa điều tiết năm trên lưu vực sông Đà bao gồm Lai Châu, Bản Chát, Sơn La và Hòa Bình.

**Từ khóa:** Hệ thống đa hồ chứa, thuật toán PSO, thủy điện bậc thang

**Summary:** The multi-reservoir hydroelectric system within the same river basin has a hydrological, hydraulic, and irrigation relationship. The operation of any reservoir affects other reservoirs, so optimal operation requires considering the simultaneous operation of all reservoirs. The problem of operating a multi-reservoir system is very complex because it involves many variables and non-linear relationships. Purely mathematical methods cannot solve it because of the large number of combinations and computing resources. The PSO algorithm is an intelligent search algorithm that can find the overall optimal solution to the problem of a multi-reservoir system. This paper presents an application of the PSO algorithm to compute the operation of a four-reservoir system for regulating flow in the Da river basin, including the Lai Chau, Ban Chat, Son La, and Hoa Binh reservoirs.

**Keywords:** Multi-reservoir system, PSO algorithm, cascade hydropower

## 1. GIỚI THIỆU

Vận hành hệ thống đa hồ chứa điều tiết năm (dài hạn) là một vấn đề then chốt trong vận hành hệ thống tài nguyên nước của một quốc gia. Các hồ chứa lớn có vai trò quan trọng trong đảm bảo an ninh nguồn nước, lương thực, năng lượng trong đó vấn đề năng lượng hay sản xuất điện năng là một thành phần chính trong thiết kế và vận hành hồ chứa. Vận hành tối ưu phát điện đối với hệ thống hồ chứa

thủy điện lớn không chỉ mang lại lợi ích cho nền kinh tế quốc dân mà còn bảo đảm sự ổn định của hệ thống điện cho quốc gia mà có nguồn thủy điện trong hệ thống điện lớn như ở Việt Nam. Bài toán vận hành tối ưu đa hồ chứa là một bài toán rất phức tạp và đã được nhiều nhà nghiên cứu trên thế giới đề xuất và áp dụng nhiều phương pháp, thuật toán, công cụ để giải quyết. Trước thập niên 80 của thế kỷ 20 hầu hết các thuật toán tối ưu đều dựa trên nền tảng toán học như quy hoạch tuyến tính (LP), quy hoạch phi tuyến (NLP), hoặc quy hoạch động (DP). Kỹ thuật DP (Bellman, 1957)[1] được áp dụng nhiều trong tính toán

Ngày nhận bài: 17/4/2023

Ngày thông qua phản biện: 12/5/2023

Ngày duyệt đăng: 01/6/2023

vận hành hệ thống tài nguyên nước tuy nhiên nó có một nhược điểm là cần giải số lượng lớn về các tổ hợp tính toán trong quá trình tìm kiếm lời giải tối ưu do đó khi số lượng hồ chứa trong hệ thống tăng lên thì khả năng tính toán không đảm bảo thậm chí không thực hiện được do sự “bùng nổ về tổ hợp” và nhược điểm đó cũng được chính tác giả chỉ ra đó là “curse of dimensionality”. Các thuật toán phát triển từ DP để giải quyết các bài toán đa hồ chứa cũng được các nhà nghiên cứu đề xuất như hệ thống 4 hồ chứa giả định của Larson (1968)[2] với các điều kiện ràng buộc có thể tìm được nghiệm tối ưu tổng thể bằng LP và cũng được tác giả thực hiện bằng IDP. Bài toán như là một mô hình mẫu lý tưởng để các nghiên cứu sau này thử nghiệm để tìm ra các thuật toán mới Heidari et al (1971)[3] đã giải bài toán bằng kỹ thuật quy hoạch động sai phân (DDDP). Các thuật toán phát triển từ DP có khả năng giải các bài toán đa hồ chứa tuy nhiên các tổ hợp tính toán vẫn rất lớn và chiếm nhiều tài nguyên máy tính cũng như thời gian thực hiện. Với các bài toán thực tế khi các điều kiện ràng buộc và điều kiện biên phi tuyến tính thì sử dụng các thuật toán Quy hoạch động rất khó thành công. Hiện nay thuật toán tối ưu PSO là một kỹ thuật hiệu quả để giải quyết các bài toán tối ưu đa hồ chứa.

Thuật toán PSO dựa trên tìm kiếm thông minh để tìm các giải pháp tối ưu. Cụ thể PSO được mô tả dựa trên khả năng tìm kiếm thức ăn của đàn chim và được cải thiện dần qua từng thế hệ. Hiện nay, nhiều nhà nghiên cứu ở nhiều lĩnh vực áp dụng và cải tiến thuật toán PSO cho công trình nghiên cứu của mình. Một số công trình nghiên cứu trong phối hợp vận hành thủy nhiệt điện như S. Titus và A. Jeyakumar (2007)[4] đã sử dụng kỹ thuật PSO để giải quyết bài toán phối hợp thủy nhiệt điện với các vùng vận hành bị cấm; V. Hinojosa và C. Leyton (2012)[5] đã trình bày một cách tiếp

cận mới dựa trên tối ưu bầy đàn tiến hóa hỗn hợp-nhi phân (MB-EPSO) để giải quyết bài toán kết hợp thủy nhiệt điện; V. Jadoun et al (2015)[6] đã sử dụng kỹ thuật PSO được điều khiển động để giải quyết bài toán vận hành tối ưu hệ thống thủy nhiệt điện. Trong lĩnh vực tài nguyên nước, thuật toán PSO cũng ngày càng được ứng dụng rộng rãi cho các hệ thống hồ chứa đơn và đa mục tiêu. Kumar và Reddy (2007)[7] đã đề xuất một kỹ thuật tối ưu hóa bầy đàn đột biến đàn ưu tú (EMPSO), áp dụng nó cho một hệ thống đa hồ chứa giả định và một hồ chứa đa mục tiêu thực tế. J. Zhang et al (2010)[8] áp dụng cải tiến thuật toán PSO để vận hành tối ưu hệ thống 5 hồ chứa điều tiết dài hạn trên sông Minjiang, Trung Quốc. Thuật toán PSO cho thấy ngày càng phát huy hiệu quả khả năng ứng dụng để giải quyết các bài toán phức tạp đa hồ chứa.

Trong bài báo này tác giả muốn trình bày áp dụng thuật toán PSO cho hệ thống 4 hồ chứa lớn điều tiết dài hạn trên lưu vực sông Đà bao gồm Lai Châu, Bản Chát, Sơn La và Hòa Bình. Tác giả cũng sử dụng thuật toán di truyền GA để đánh giá và kiểm chứng kết quả.

## 2. THUẬT TOÁN PSO

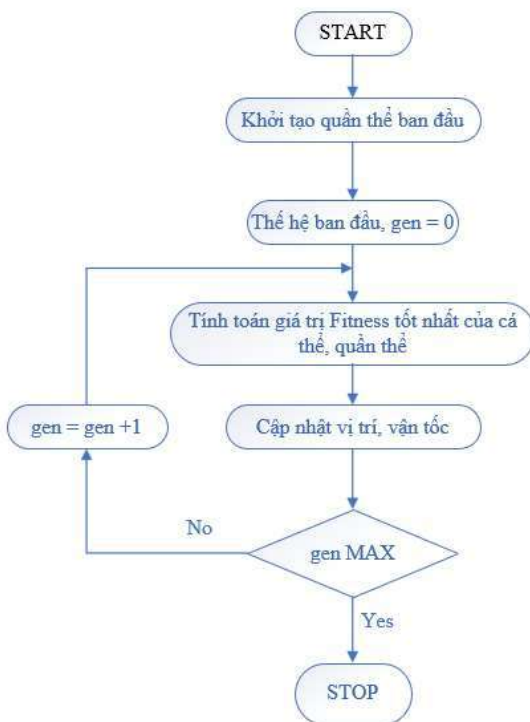
Thuật toán PSO ban đầu được đề xuất bởi Kennedy và Eberhart (1995)[9] dựa trên hành vi xã hội của các sinh vật như đàn chim hoặc đàn cá. Giống như nhiều kỹ thuật tính toán tiến hóa khác, chẳng hạn như GA, thuật toán PSO bắt đầu bằng cách tạo ra một tập hợp ban đầu các giải pháp tiềm năng ngẫu nhiên và tìm kiếm không gian giải pháp để đạt được mức độ phù hợp tối ưu theo cơ chế tối ưu hóa của nó, cải tiến từng cá thể và tập hợp (bầy đàn) thông qua một tính toán lặp đi lặp lại. Mỗi cá thể có hai thuộc tính, vị trí và vận tốc, được ký hiệu tương ứng là P (Positions) và V (Velocity), và việc cập nhật thuộc tính của chúng dựa trên kinh nghiệm của chính chúng và kinh nghiệm của các cá thể lân cận, tương ứng đại diện cho cấp độ nhận thức cá nhân và cấp độ nhận thức

xã hội. Giả sử không gian nghiệm là  $D$  chiều, vị trí của cá thể thứ  $i$  của một bầy có thể được biểu diễn bằng một vector  $D$  chiều,  $P_i = (p_{i1}^t, p_{i2}^t, \dots, p_{iD}^t)^T$ . Đối với  $t$  lần lặp lại trước đó, vị trí tốt nhất (best local) của cá thể  $i$  được đánh dấu là  $P_i = (p_{i1}^t, p_{i2}^t, \dots, p_{iD}^t)^T$  và cá thể tốt nhất trong bầy, với giá trị thích nghi toàn cục (best global) tốt nhất, được đánh dấu là  $P_g = (p_{g1}^t, p_{g2}^t, \dots, p_{gD}^t)^T$ . Do đó, vận tốc và vị trí mới của cá thể thứ  $i$  được điều chỉnh như sau:

$$v_{id}^{t+1} = \chi[\omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - p_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^t - p_{id}^t)] \quad (1)$$

$$p_{id}^{t+1} = p_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (2)$$

Trong đó  $d = 1, 2, \dots, D$ ;  $r_1$  và  $r_2$  là hai số ngẫu nhiên phân bố đều trong  $[0, 1]$ ;  $c_1$  và  $c_2$  là hai hệ số gia tốc lần lượt được gọi là mức độ nhận thức cá nhân và mức độ nhận thức xã hội;  $\omega$  là hệ số quán tính, và  $\chi$  là hệ số co thắt để đảm bảo khả năng hội tụ.

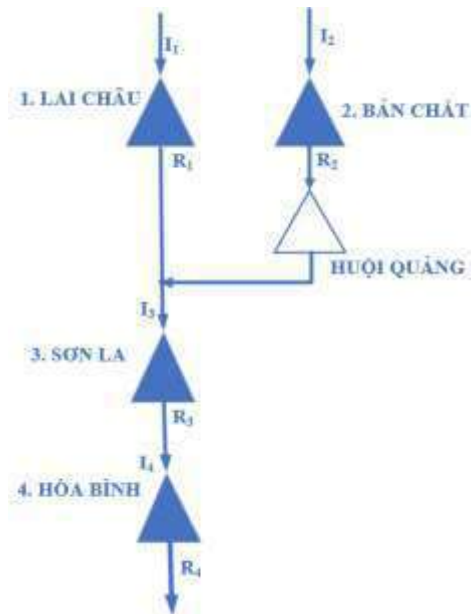


Hình 1: Lưu đồ thuật toán PSO

Quy trình thực hiện thuật toán PSO được thể hiện như Hình 1.

### 3. BÀI TOÁN ÁP DỤNG

Để đánh giá kỹ thuật tối ưu được đề xuất, hệ thống 4 hồ chứa điều tiết năm Lai Châu, Bản Chát, Sơn La và Hòa Bình (Hình 2), được xem là một trường hợp nghiên cứu để phát triển các chính sách vận hành tối ưu hồ chứa. Thủy điện Huội Quảng nằm bậc dưới thủy điện Bản Chát không được xét tới trong sơ đồ do hồ chứa này chỉ điều tiết ngày đêm. Đập thủy điện Lai Châu, Sơn La, Hòa Bình nằm trên dòng chính của sông Đà, còn đập thủy điện Bản Chát nằm trên nhánh Nậm Mu đổ vào hồ Sơn La. Hồ chứa Lai Châu, Bản Chát có nhiệm vụ chính là phát điện; hồ Sơn La ngoài nhiệm vụ phát điện còn có nhiệm vụ là phòng lũ; hồ chứa Hòa Bình là một hồ chứa đa mục tiêu về phòng lũ, phát điện, cấp nước thủy lợi, cấp nước sinh hoạt, duy trì chất lượng nước ở hạ du.



Hình 2: Hệ thống 4 hồ chứa điều tiết năm trên lưu vực sông Đà

Hồ thủy điện Lai Châu có dung tích hữu ích 0.8 tỷ  $m^3$ ; MNDBT là 295m; công suất lắp máy 1200MW. Hồ thủy điện Bản Chát có dung tích hữu ích 1.7 tỷ  $m^3$ ; MNDBT là 475m;

công suất lắp máy 220MW. Hồ chứa thủy điện Sơn La có dung tích hữu ích là 6.5 tỷ m<sup>3</sup>; dung tích phòng lũ là 4.0 tỷ m<sup>3</sup>; công suất lắp máy 2400MW. Hồ chứa thủy điện Hòa Bình có dung tích hữu ích là 6.06 tỷ m<sup>3</sup>; dung tích phòng lũ là 3.0 tỷ m<sup>3</sup>; công suất lắp máy 1920MW.

**Mô tả bài toán:**

Hàm mục tiêu được xem xét trong mô hình là tối đa hóa sản lượng thủy điện hàng năm của hệ thống 4 hồ chứa.

$$Max E = \sum_{i=1}^4 \sum_{t=0}^{11} 9.81 \eta_{i,t} Q_{i,t} H_{i,t} \Delta T_{i,t} \quad (3)$$

Trong đó điện năng E hàng năm (10<sup>6</sup> kWh); i- chỉ số hồ chứa trong mô hình; t = 0 ÷ 11 tương ứng với số tháng trong 1 năm;  $\eta_{i,t}$  hiệu suất tuốc bin; Q<sub>i,t</sub> lưu lượng xả ra từ tuabin thủy

điện hồ i trong giai đoạn t (m<sup>3</sup>/s); và H<sub>i,t</sub>, cột nước phát điện của thủy điện hồ i trong giai đoạn t (m); ΔT<sub>i,t</sub> thời gian phát điện trong giai đoạn t của hồ i (giờ).

Các điều kiện ràng buộc:

- Phương trình liên tục:

$$S_{i,t+1} = S_{i,t} + I_{i,t} + MR_{i,t} \quad (4)$$

Trong đó S<sub>i,t</sub>, I<sub>i,t</sub>, R<sub>i,t</sub> tương ứng là dung tích hồ chứa, dòng chảy vào hồ, lượng xả ra khỏi hồ chứa i tại giai đoạn t; S<sub>i,t+1</sub> là dung tích hồ chứa tại giai đoạn tiếp theo; M là ma trận hệ số thể hiện dòng chảy vào hoặc ra khỏi hồ chứa.

Hệ thống có 4 hồ chứa được quy định hồ 1: Lai Châu, hồ 2: Bản Chát, hồ 3 : Sơn La, hồ 4: Hòa Bình, phương trình liên tục biểu diễn như sau:

$$\begin{Bmatrix} S_1(t+1) \\ S_2(t+1) \\ S_3(t+1) \\ S_4(t+1) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ S_3(t) \\ S_4(t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} I_1(t) \\ I_2(t) \\ I_3(t) \\ I_4(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} R_1(t) \\ R_2(t) \\ R_3(t) \\ R_4(t) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

- Điều kiện ràng buộc về dung tích:

$$S_i^{min} \leq S_{i,t} \leq S_i^{max} \quad (6)$$

Trong đó S<sub>i</sub><sup>min</sup>, S<sub>i</sub><sup>max</sup> tương ứng là dung tích tối thiểu và dung tích toàn phần của hồ chứa i. Ngoài ra S<sub>i,t</sub> phải thỏa mãn đường cong đặc tính lòng hồ i và quy trình vận hành liên hồ chứa [10].

- Điều kiện ràng buộc về lưu lượng xả:

$$Q_i^{min} \leq Q_{i,t} \leq Q_i^{max} \quad (7)$$

Trong đó Q<sub>i</sub><sup>min</sup>, Q<sub>i</sub><sup>max</sup> tương ứng là lưu lượng xả qua tuốc bin tối thiểu và tối đa của hồ chứa i. Ngoài ra Q<sub>i,t</sub> phải thỏa mãn đường cong đặc tính vận hành lưu lượng của tuốc bin hồ i.

- Điều kiện ràng buộc về mực nước theo Quy trình vận hành liên hồ chứa :

$$Z_{i,t}^{min} \leq Z_{i,t} \leq Z_{i,t}^{max} \quad (8)$$

Trong đó Z<sub>i,t</sub><sup>min</sup>, Z<sub>i,t</sub><sup>max</sup> tương ứng là mực

nước tối thiểu và tối đa của hồ chứa i ở thời đoạn t theo quyết định của Quy trình vận hành liên hồ chứa.

- Điều kiện ràng buộc về công suất:

$$N_i^{min} \leq N_{i,t} \leq N_i^{max} \quad (9)$$

Trong đó N<sub>i</sub><sup>min</sup>, N<sub>i</sub><sup>max</sup> tương ứng là công suất phát tối thiểu và tối đa của nhà máy thủy điện hồ chứa i. Ngoài ra N<sub>i,t</sub> phải thỏa mãn đường cong đặc tính vận hành của tuốc bin thủy điện hồ i.

- Điều kiện ràng buộc về lưu lượng xả yêu cầu:

$$Q_{i,t} \geq Q_{i,t}^{yc} \quad (10)$$

Trong đó Q<sub>i,t</sub><sup>yc</sup> là lưu lượng xả yêu cầu hàng tháng của hồ chứa i, nó phụ thuộc vào nhu cầu lợi dụng tổng hợp nguồn nước cho các mục đích khác.

- Điều kiện ràng buộc về dung tích đầu và cuối chu kỳ tính toán:

$$S_{i,0}^{y+1} = S_{i,T}^y \quad (11)$$

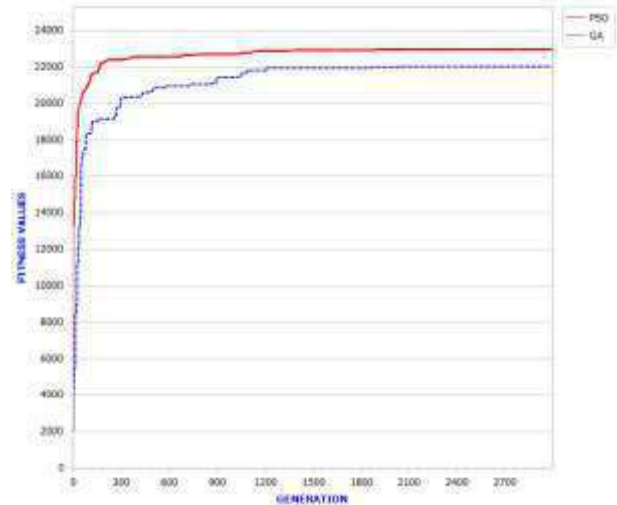
Trong đó  $S_{i,0}^{y+1}$  là dung tích đầu thời đoạn tính toán của năm tiếp theo của hồ chứa  $i$ ;  $S_{i,T}^y$  là dung tích cuối thời đoạn tính toán của năm hiện tại. Điều kiện này đảm bảo tính liên tục của mực nước hồ chứa giữa các năm tính toán liên tiếp nhau.

#### 4. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

Trong bài toán vận hành tối ưu hồ chứa bằng kỹ thuật PSO các cá thể được khởi tạo ban đầu gồm 2 tập thuộc tính tương ứng với vị trí và vận tốc ban đầu. Đối với trường hợp 4 hồ chứa Lai Châu, Bản Chát, Sơn La và Hòa Bình được tính toán với 12 bước thời gian (12 tháng) tương ứng có 48 biến quyết định được biểu diễn trong 2 tập thuộc tính. Do đó, mỗi cá thể đại diện cho một giải pháp tiềm năng cho bài toán bao gồm 48 giá trị thực được tạo ngẫu nhiên giữa các giới hạn dưới và trên được xác định trước, và đảm bảo các biến quyết định được gán là các biến liên tục và bao phủ toàn bộ không gian tìm kiếm. Chọn năm tính toán là năm kiệt thiết kế (P=95%) tương ứng với năm thủy văn điển hình 1992-1993. Kết quả tính toán được so sánh với phương pháp tính theo thuật toán di truyền GA.

Kích thước quần thể 1000 được chọn để có thể duy trì mức độ đa dạng về đặc tính của từng cá thể. Số lượng thế hệ được chọn là 3000. Sự thay đổi của giá trị hàm thích nghi tối đa với số thế hệ của 2 phương pháp được thể hiện trong Hình 3. Có thể quan sát thấy từ biểu đồ rằng PSO, GA liên tục cải thiện giải pháp qua từng thế hệ. Đường cong tạo ra từ PSO có độ dốc lớn hơn GA trước thế hệ 300 và đạt được giá trị thích nghi gần với giá trị tối đa trong khi đường cong GA đạt giá trị thích nghi nhỏ hơn tương đối nhiều. Trước thế hệ 1200 GA liên tục cập nhật các giá trị hàm thích nghi mới và dần đạt giá trị ổn định. Sau thế hệ 1200 tốc độ

cải thiện của 2 phương pháp chậm dần và đạt đến giá trị lớn nhất. Thời gian chạy của 2 phương pháp khoảng 30 phút trên máy tính Core i7-2.5GHz, RAM 32GB.

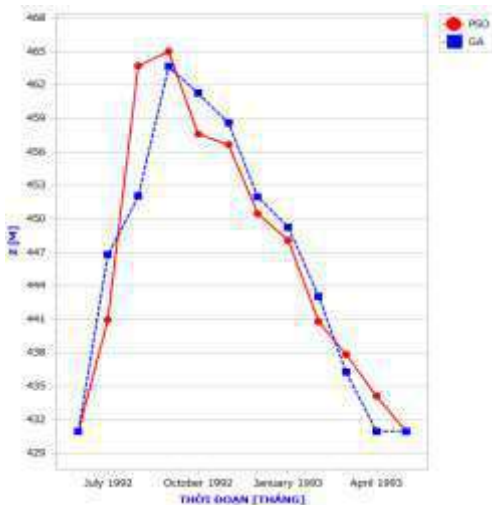


Hình 3: Sự thay đổi giá trị hàm Fitness theo thế hệ của 2 phương pháp

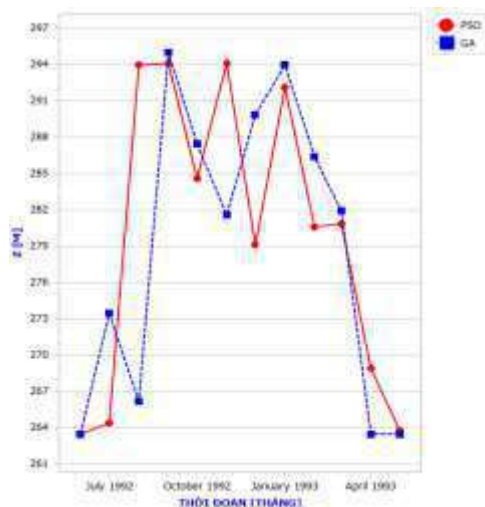
Giá trị hàm thích nghi tối đa chính là giá trị điện lượng trung bình năm lớn nhất của năm tính toán. Với số thế hệ được chọn là 3000 thì giá trị mục tiêu của hệ thống 4 hồ thu được từ PSO là 23003.3 (GWh), GA là 22042.5 (GWh). Điều đó cho thấy phương pháp PSO cho giải pháp tốt hơn so với GA. Để có được kết quả đó do cơ chế tìm kiếm giải pháp tối ưu của PSO dựa trên cải thiện mục tiêu của từng cá thể trong khi GA chỉ dựa vào cơ chế di truyền với vật liệu di truyền ít thay đổi (thay đổi một tỷ lệ nhỏ do đột biến qua từng thế hệ). Nếu trong quá trình khởi tạo ban đầu của GA không có bộ gen tốt thì GA khó đạt đến tối ưu tổng thể. Chính vì nguyên nhân đó PSO có thể cho các giải pháp tối ưu tổng thể trong các điều kiện hợp lý.

Giá trị mục tiêu về điện lượng còn phụ thuộc vào mực nước ban đầu. Đối với tính toán cho chuỗi năm thì mực nước đầu năm tính toán phải bằng với mực nước cuối năm của năm trước đó để đảm bảo tính liên tục. Trong bài báo này tác giả chọn năm tính toán là năm kiệt thiết kế và giả thiết mực

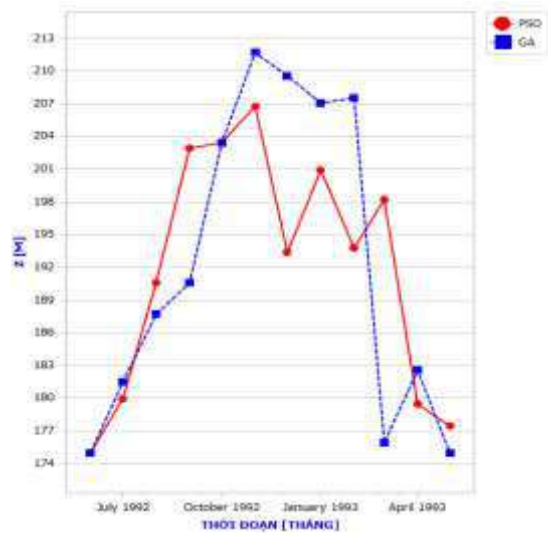
nước đầu thời đoạn tính toán là mực nước thấp nhất của các hồ chứa. Trong vận hành thực tế mực nước này cần phải xác định trước thông qua tính toán chuỗi năm hoặc thu thập từ số liệu vận hành. Hình 4, 5, 6 và 7 thể hiện sự thay đổi mực nước hồ chứa trong 12 tháng của 2 giải pháp do PSO và GA tính toán. Quỹ đạo mực nước được quyết định thông qua các giải pháp đạt giá trị tốt nhất của hàm mục tiêu. Mực nước của các hồ chứa đều có xu hướng tăng lên vào mùa lũ và giảm vào mùa kiệt. Do năm tính toán là năm kiệt thiết kế nên mực nước cuối thời đoạn tính toán của các hồ xuống về mực nước thấp nhất. Quỹ đạo mực nước do 2 phương pháp tuy có thay đổi nhưng phản ánh xu hướng chung của quá trình làm việc đồng thời của 4 hồ chứa.



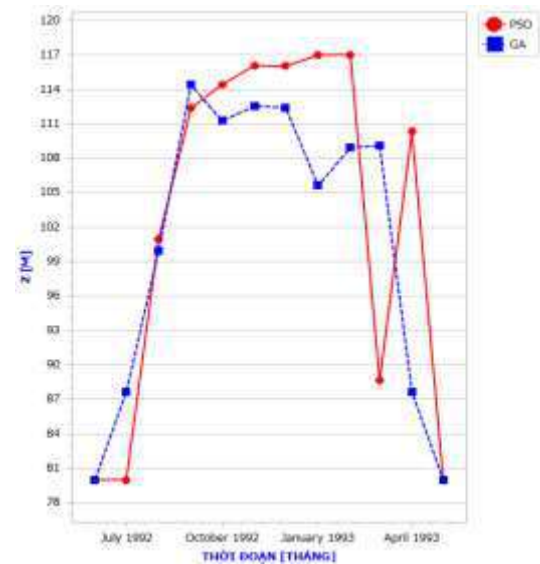
Hình 4: Mực nước hồ Bản Chát



Hình 5: Mực nước hồ Lai Châu



Hình 6: Mực nước hồ Sơn La



Hình 7: Mực nước hồ Hòa Bình

## 5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày cơ sở áp dụng thuật toán tối ưu PSO vào hệ thống đa hồ chứa thủy điện bậc thang. Tính toán áp dụng cho hệ thống 4 hồ chứa thủy điện điều tiết năm trên lưu vực sông Đà là Lai Châu, Bản Chát, Sơn La và Hòa Bình. Kết quả được so sánh với phương pháp sử dụng thuật toán tối ưu di truyền GA. Kết quả cho thấy phương pháp PSO cho giải pháp tốt hơn về giá trị hàm mục tiêu khi cùng số phân tử và thế hệ tính toán. Tốc độ hội tụ của PSO cũng nhanh hơn GA khi mới ở thế hệ thứ

300/3000 thì PSO gần đạt giá trị tối đa trong khi GA tiếp tục phải cải thiện giải pháp. Điều đó cho thấy PSO là kỹ thuật tối ưu có thể áp

dụng cho các bài toán hệ thống hồ chứa với hàm mục tiêu phi tuyến và điều kiện ràng buộc phức tạp.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bellman, R., 1957, *Dynamic Programming*, Princeton, New Jersey : Princeton University Press.
- [2] Larson, R. E., 1968, *State increment dynamic programming*, American Elsevier, New York.
- [3] Heidari, M., Chow, V. T., Kokotovic, P. V., and Meredith, D. D. (1971), *Discretedifferential dynamic programming approach to water resources systems optimization*, Water Resour. Res., 7(2), 273-283.
- [4] S. Titus and A. E. Jeyakumar, "Hydrothermal scheduling using an improved particle swarm optimization technique considering prohibited operating zone," *International Journal of Soft Computing*, vol. 2, pp. 313-319, 2007.
- [5] V. Hinojosa and C. Leyton, "Short-term hydrothermal generation scheduling solved with a mixed-binary evolutionary particle swarm optimizer," *Electric Power Systems Research*, vol. 92, pp. 162-170, 2012.
- [6] V. K. Jadoun, N. Gupta, K. Niazi, A. Swarnkar, and R. Bansal, "Short-term non-convex economic hydrothermal scheduling using dynamically controlled particle swarm optimization," in *Third Southern African Solar Energy Conference*, Kruger National Park, South Africa, 2015.
- [7] V D. Nagesh Kumar and M. Janga Reddy, " *Multipurpose reservoir operation using Particle Swarm optimization*," *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2007.
- [8] J. Zhang, Z. Wu, C. Cheng and S. Zhang, " *Improved particle swarm optimization algorithm for multi-reservoir system operation*," *Water Science and Engineering*, 2011.
- [9] Kennedy, J., and Eberhart, R., "Particle swarm optimization," *Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks*, 1995.
- [10] Quyết định 740/QĐ-TTg của thủ tướng, "Về việc ban hành Quy trình vận hành liên hồ chứa trên lưu vực sông Hồng" ngày 17 tháng 6 năm 2019.