

Xây dựng phần mềm xây dựng kế hoạch phát điện bằng thuật toán quy hoạch động

KHÔNG CAO PHONG¹

¹ Khoa Cơ – Điện, Trường Đại học Mở - Địa chất, khongcaophong@humg.edu.vn;

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 15/02/2020

Chấp nhận 16/3/2020

Đăng online 29/4/2020

Từ khóa:

Tối đa 5 từ, mô tả các nội dung chính liên quan đề tài (Font - Cambria; Style: Regular; Size: 10)

TÓM TẮT

Phần 'Tóm tắt' là đòi hỏi bắt buộc đối với mỗi bài báo. Tóm tắt gồm một đoạn văn ngắn gọn, độ dài không quá 250 từ, cung cấp đầy đủ nhưng xúc tích về các thông tin chính của bài báo gồm mục đích của nghiên cứu, các kết quả chính và các kết luận chính. Với yêu cầu này, tránh đưa các trích dẫn tham khảo vào tóm tắt. Nếu bắt buộc phải trích dẫn thì chỉ đưa tên tác giả và năm xuất bản của tài liệu tham khảo. Tương tự, tránh sử dụng các chữ viết tắt phi tiêu chuẩn hoặc bất thường. Nếu bắt buộc phải dùng chữ viết tắt thì chữ viết tắt phải được giải thích ở lần xuất hiện đầu tiên của nó trong tóm tắt.

Font - Cambria; Style: Italic; Size: 11

Paragraph - Alignment: Justified; Before: 6pt; After: 6pt; Line spacing: Exactly 11

© 2020 Trường Đại học Mở - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

1. Mở đầu

Vận hành tối ưu thủy điện vừa và nhỏ tại Việt Nam là một bài toán đa mục tiêu phức tạp, nhằm cân bằng giữa lợi ích kinh tế (sản lượng điện) và các mục tiêu xã hội (an toàn công trình, kiểm soát lũ, đảm bảo dòng chảy tối thiểu)[1]. Về mặt lý thuyết, các nghiên cứu tiên tiến đã chứng minh khả năng áp dụng hiệu quả các mô hình toán học và thuật toán trí tuệ nhân tạo, như Thuật toán Di truyền (GA) [2] và mô hình mô phỏng – tối ưu (Mike 11 và SCE) [3], để giải quyết bài toán vận hành hệ thống đa hồ chứa. Vai trò cốt lõi của các mô hình này là tối ưu hóa công suất phát điện từ nguồn nước được dự báo về hồ, bằng cách sử dụng dữ liệu quan trắc thời gian thực để đưa ra các quyết định điều tiết hợp lý [4]. Mục tiêu là tận

dụng tối đa lưu lượng đến hồ để phát điện, đặc biệt là vào giờ cao điểm, trong khi vẫn tuân thủ các quy định về mực nước trước lũ và dòng chảy tối thiểu cho hạ du.

Để khai thác tối ưu nguồn nước, các phương pháp hiện đại tập trung vào việc dự báo dòng chảy đến và ra quyết định tối ưu dựa trên dự báo đó.

Các mô hình học máy (Machine Learning - ML) đóng vai trò quan trọng trong việc dự báo dòng chảy đến (inflow forecasting). Ví dụ, mô hình trí tuệ nhân tạo LSTM (Long Short Time Memory) được sử dụng để dự đoán quyết định xả nước hàng giờ, giúp hỗ trợ các cách tiếp cận tối ưu hóa truyền thống, mặc dù hiệu suất của nó có thể bị ảnh hưởng bởi sự biến động lớn của dòng chảy đến. Các Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) được áp dụng để lập mô hình mưa-dòng chảy, dự báo dòng chảy vào hồ chứa và trữ lượng hồ chứa, hỗ trợ vận hành hồ chứa trong các sự kiện cực đoan như lũ lụt hoặc hạn hán. Máy học véc tơ hỗ trợ (SVM) cũng hiệu quả trong việc dự báo dòng chảy và mực nước hồ chứa [5].

*Tác giả liên hệ

E - mail: khongcaophong@humg.edu.vn

DOI:

Để tối ưu hóa các quyết định vận hành từ dữ liệu dự báo dòng chảy, công tác lập lịch và tối ưu hóa sản xuất thủy điện, các thuật toán học tăng cường, học tăng cường sâu, (Reinforcement Learning -RL, Deep Reinforcement Learning -DRL) được sử dụng để đưa ra chiến lược lập lịch trình sản xuất thủy điện dài hạn, nhằm tối ưu hóa doanh thu hàng năm dựa trên lưu lượng nước hàng tuần và giá điện[6][7]. Trong ngắn hạn, Lập trình quy hoạch động (Dynamic Programming - DP), Lập trình tuyến tính hỗn hợp số nguyên (Mixed-Integer Linear Programming - MILP) được sử dụng để tối đa hóa sản lượng năng lượng bằng cách tối ưu hóa lượng nước xả và việc bố trí các tổ máy tua bin, có tính đến dữ liệu dòng chảy đến trong tương lai và các điểm hiệu quả hoạt động [8].

Trong nội dung bài báo này để triển khai ứng dụng bài toán tối ưu hóa quyết định vận hành, một chương trình phần mềm sử dụng thuật toán Lập trình quy hoạch động được thiết kế để hỗ trợ ra quyết định cho các nhà máy thủy điện nhỏ. Chương trình thực hiện nhận dữ liệu dự báo dòng chảy theo ngày và hỗ trợ xây dựng kế hoạch nước xả.

2. Lập trình quy hoạch động (DP)

Lập trình động là một phương thức để thiết kế thuật toán. Cơ sở lý thuyết của nó được xây dựng trên hai tính chất quan trọng của bài toán:

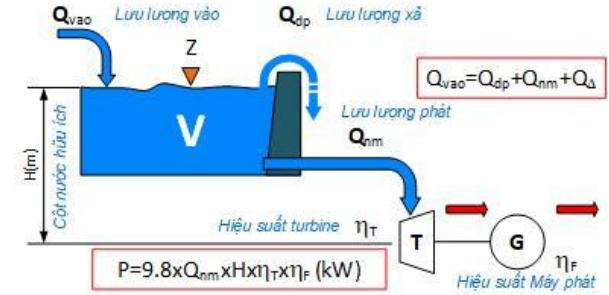
Tính tối ưu con (Optimal Substructure): Một lời giải tối ưu của bài toán ban đầu có thể được xây dựng từ các lời giải tối ưu của các bài toán con. Ví dụ, con đường ngắn nhất từ A đến C đi qua B sẽ bao gồm con đường ngắn nhất từ A đến B và con đường ngắn nhất từ B đến C.

Các bài toán con chồng lấp (Overlapping Subproblems): Cùng một bài toán con được giải đi giải lại nhiều lần trong quá trình giải quyết bài toán lớn. DP tận dụng tính chất này bằng cách lưu trữ kết quả của các bài toán con để tránh tính toán lặp lại.

Lập trình quy hoạch động cơ hai cách tiếp cận chính: Top-Down và Bottom-Up

Top-Down (Đệ quy có nhớ - Memoization): Giải bài toán từ trên xuống dưới (từ bài toán lớn đến bài toán con). Sử dụng đệ quy nhưng lưu kết quả vào một mảng hoặc từ điển để "ghi nhớ".

Bottom-Up (Lập - Tabulation): Giải bài toán từ dưới lên trên (từ bài toán con nhỏ nhất rồi xây dựng dần lên). Sử dụng vòng lặp để tính và lưu trữ kết quả của các bài toán con một cách tuần tự.



Hình 1. Giản đồ lưu lượng nhà máy

Bài toán tối ưu lưu lượng xả cho nhà máy thủy điện.

Ở các nhà máy thủy điện nước được thu gom từ một lưu vực của dòng sông tạo ra dòng chảy về hồ (Q_{vao}). Lượng nước trong hồ sẽ chảy về hạ lưu nhà máy thủy điện thông qua lưu lượng nước qua nhà máy (Q_{nm}) để phát điện và lưu lượng nước qua đập (Q_{dp}) trong các trường hợp xả dư. Chênh lệch lượng nước vào và ra (Q_Δ) sẽ được tích trữ dưới dạng thể tích nước trong lòng hồ. Quan hệ trên được thể hiện bằng phương trình cân bằng nước.

$$Q_{vao} = Q_{nm} + Q_{dp} + Q_{\Delta}$$

Lưu lượng nước qua nhà máy, chạy qua turbine quay máy phát, sẽ tạo ra công suất điện theo công thức:

$$P = \eta(Q, H) \times \rho \times g \times Q_{nm} \times H_{hi}$$

Trong đó: η(Q,H) là hiệu suất tổ máy bao gồm cả turbine và máy phát ở lưu lượng và cột áp tương ứng; ρ khối lượng riêng của nước, g gia tốc trọng trường, Q_{nm} lưu lượng phát và cột áp hữu ích H_{hi}.

Cột áp hữu ích được xác định bởi chênh lệch mức nước thượng lưu (H_{tl}) với mức nước hạ lưu (H_{hl}) và tổn thất cột áp (H_{tt}):

$$H_{hi} = H_{tl} - H_{hl} - H_{tt}$$

Trong đó: mức nước thượng lưu là hàm phụ thuộc thể tích nước (V) trong hồ $H_{tl} = f(V)$; Mức nước hạ lưu là hàm phụ thuộc lưu lượng xả

$H_{hl} = f(Q_{nm} + Q_{dp})$; tổn thất cột áp phụ thuộc vào lưu lượng qua nhà máy $H_u = f(Q_{nm})$

Bài toán tối ưu cho nhà máy thủy điện được xây dựng trong bài báo này sẽ là tổng năng lượng điện (E) thu được dựa trên dòng chảy về hồ và các ràng buộc kỹ thuật của nhà máy. Trong tương lai sẽ phát triển tiếp để tối ưu về kinh tế khi có dữ liệu dự báo về thị trường giá điện.

3. Xây dựng thuật toán DP cho Nhà máy Thủy điện

Để áp dụng DP, chúng ta cần định nghĩa bài toán qua 4 yếu tố cốt lõi:

a. Các giai đoạn

Đây là các bước thời gian mà tại đó chúng ta cần ra quyết định. Trong bài toán của nhà máy thủy điện, mỗi giờ trong chu kỳ vận hành được xác định là một giai đoạn ($t=1,2,...,T$, với T là tổng số giờ trong chuỗi dự báo).

b. Các trạng thái

Trạng thái được coi là biến số mô tả "tình trạng" của hệ thống tại mỗi giai đoạn. Nó chứa đủ thông tin để từ đó ta có thể ra quyết định cho giai đoạn tiếp theo mà không cần biết quá khứ. Đối với nhà máy thủy điện, biến trạng thái quan trọng nhất chính là **thể tích nước trong hồ chứa** V_t (Thể tích hồ chứa vào đầu giai đoạn t). Thể tích nước hồ là một biến liên tục, để DP hoạt động hiệu quả cần có một số hữu hạn các trạng thái. Do đó, V_t cần phải được rời rạc hóa.

Trong dải thể tích vận hành $[V_{min}, V_{max}]$ thể tích nước trong hồ chứa được rời rạc thành N mức trạng thái khác nhau: $V(1), V(2), ..., V(N)$. Đây là các trạng thái khả dĩ mà hồ chứa có thể ở tại mỗi giai đoạn.

c. Các quyết định

Quyết định ở đây là hoạt động vận hành của nhà máy thực hiện tại mỗi giai đoạn. Trong bài toán này, quyết định chính là **tổng lưu lượng nước xả xuống hạ lưu** $Q_{xa,t}$ (Tổng lưu lượng xả trong giai đoạn t bao gồm lưu lượng phát điện và lưu lượng xả tràn).

Tương tự như biến trạng thái, biến quyết định cũng cần **rời rạc hóa**. Dải lưu lượng xả $[0, Q_{xa,max}]$ được phân thành M mức khác nhau: $Q(1), Q(2), ..., Q(M)$.

d. Hàm chuyển trạng thái và Hàm lợi nhuận

Hàm chuyển trạng thái: Là hàm để xác định trạng thái tiếp theo sẽ như thế nào dựa trên trạng thái hiện tại và quyết định được lựa chọn. Trên nhà máy thủy điện chính là phương trình cân bằng nước:

$$V_{t+1} = V_t + (Q_{vào,t} - Q_{xa,t}) \cdot \Delta t$$

Trong đó $Q_{vào,t}$ là lưu lượng về hồ dự báo trong giai đoạn t .

Hàm lợi nhuận: Tính toán lợi ích thu được tại một giai đoạn t khi ở một trạng thái nhất định và thực hiện một quyết định nhất định. Trong nội dung bài báo này lợi nhuận được xác định là năng lượng (E)

$$E_t(V_t, Q_{xa,t}) = P(V_t, Q_{xa,t}) \cdot \Delta t$$

Trong đó hàm công suất $P(V_t, Q_{xa,t})$ là một hàm phi tuyến phức tạp

$$P = \eta(Q, H) \times \rho \times g \times Q \times H$$

4. Các bước tính của thuật toán DP

Thuật toán DP cho vận hành hồ chứa được thực xây dựng hiện theo 2 pha: **Tính toán ngược** và **Mô phỏng xuôi**.

Pha 1: Tính toán ngược

Tính toán ngược được thực hiện từ giai đoạn cuối cùng ($t=T$) lùi về giai đoạn đầu tiên ($t=1$).

Bước 1: Khởi tạo tại giai đoạn cuối ($t = T$)

Tạo một bảng lưu trữ $J_T(V_T)$: lợi nhuận tối ưu tại giai đoạn cuối T ứng với mỗi trạng thái thể tích V_T .

Với mỗi trạng thái thể tích khả dĩ $V_T^{(i)}$ (với $i=1...N$):

- Thử tất cả các quyết định xả khả dĩ $Q_{xa,T}^{(j)}$ (với $j=1...M$).
 - Tính lợi nhuận trước mắt: $E_T(V_T^{(i)}, Q_{xa,T}^{(j)})$.
 - **Giả định:** Tại cuối giai đoạn T , không có lợi ích tương lai nào nữa. Vậy $J_T(V_T^{(i)})$ chính là lợi nhuận lớn nhất có thể đạt được.
- $$J_T(V_T) = \max_{Q_{xa,T}} \{E_T(V_T, Q_{xa,T})\}$$
- Lưu lại quyết định $Q_{xa,T}^{(i)}$ đã tạo ra lợi nhuận tối đa này.

Bước 2: Vòng lặp quy hồi ($t = T-1, T-2, ..., 1$)

Với mỗi giai đoạn t đang xét:

- Tạo một bảng $J_T(V_T)$ và bảng quyết định tối ưu $Q_{xa,t}^*$.
- Với mỗi trạng thái thể tích khả dĩ $V_t^{(i)}$:
 - Với mỗi quyết định xả khả dĩ $Q_{xa,t}^{(j)}$:
 - **Tính lợi nhuận trước mắt:**
 $E_t(V_t, Q_{xa,t}) = P(V_t, Q_{xa,t}) \cdot \Delta t$
 - **Tính trạng thái tiếp theo:**
 $V_{t+1} = V_t + (Q_{vao,t} - Q_{xa,t}) \cdot \Delta t$
 - **Tra cứu lợi nhuận tương lai tối ưu:**
 Tìm giá trị $J_{t+1}(V_{t+1})$ từ bảng đã tính ở bước trước (giai đoạn t+1). Nếu V_{t+1} không rơi đúng vào các điểm rời rạc, thì thực hiện phép **nội suy tuyến tính** giữa hai điểm gần nhất.
 - **Tính tổng lợi nhuận:** Tổng = Lợi nhuận trước mắt + Lợi nhuận tương lai tối ưu.
 - Tìm quyết định $Q_{xa,t}^{(j)}$ cho ra tổng lợi nhuận lớn nhất.
 - Lưu tổng lợi nhuận lớn nhất đó vào $J_t(V_t^{(i)})$.
 - Lưu quyết định tối ưu tương ứng vào $Q_{xa,t}^*(V_t^{(i)})$.

Sau khi vòng lặp kết thúc tại $t=1$, một bộ các bảng "chính sách vận hành tối ưu" $Q_{xa,t}^*$ cho mọi trạng thái và mọi giai đoạn.

Pha 2: Mô phỏng xuôi

Quá trình mô phỏng xuôi sẽ tìm ra một đường đi (tập hợp các giá trị xả theo t) duy nhất tối ưu.

Bắt đầu tại giai đoạn đầu (t=1): Biết trạng thái ban đầu của hồ là V_{start} .

Mô phỏng tiến theo thời gian (t = 1, 2, ..., T):

- Tại giai đoạn t, trạng thái hiện tại là V_t .
- Tra cứu trong bảng chính sách đã tính ở Pha 1 để tìm ra quyết định tối ưu:

$Q_{loiuu,t} = Q_{xa,t}^*(V_t)$. (Dùng nội suy nếu V_t không rơi vào điểm rời rạc).

- Ghi nhận quyết định này.
- Tính trạng thái cho giai đoạn tiếp theo:

$$V_{t+1} = V_t + (Q_{vao,t} - Q_{xa,t}) \cdot \Delta t$$

- Lặp lại cho đến hết chu kỳ.

Kết quả cuối cùng của Pha 2 là một **lich vận hành tối ưu duy nhất** cho toàn bộ chu kỳ.

3. Xây dựng chương trình lập kế hoạch xả tối ưu

Trên cơ sở thuật toán DP, phần mềm xây dựng kế hoạch xả tối ưu được xây dựng với giao diện như trên hình.

Hình 2. Giao diện cài đặt tham số

Giao diện được xây dựng với các trang: cài đặt tham số; Dữ liệu đầu vào; và Đồ thị kết quả.

Tại trang cài đặt tham số cho phép thiết lập các thông số thể tích hồ chứa thủy điện, số lượng và thông số tổ máy cùng các đặc tính cơ bản của nhà máy. Trang dữ liệu đầu vào cho phép mở file dữ liệu dự báo dạng .csv, thiết lập lưới giá trị chạy tối ưu cho thể tích nước trong hồ và lưu lượng xả. Kết quả chạy tối ưu DP với năng lượng điện thu được cùng với các đồ thị mức, công suất, lưu lượng sẽ được trả về ở trang Đồ thị kết quả.

4. Kết quả và nhận xét

Sử dụng phần mềm đã xây dựng dữ liệu nhà máy thủy điện Thác Xăng với các thông số chính như trong Bảng đã được cài đặt.

Bảng 1. Thông số nhà máy.

TT	Tham số	Ký hiệu	Đ.vị	Giá trị
1	Hồ chứa			
1	Thiết kế xả lũ (Q1.0%)	MNLTK	m	183.00
2	Mức nước dâng	MND	m	183.00
3	Mức nước chết	MNC	m	182.00
4	Dung tích toàn bộ	W _{tb}	10 ⁶	43.89

5	Dung tích hữu ích	W_{hi}	m^3	3.96
6	Dung tích chết	W_c	$10^6 m^3$	39.93
II	Dòng xả			
1	Dòng xả cực đại	Q_{max}	M^3/s	90.14
2	Dòng xả trung bình	Q_{tb}	M^3/s	12.11
III	Cột nước			
1	Cột nước cực đại	H_{max}	M	30
2	Cột nước cực tiểu	H_{min}	M	25.8
3	Cột nước thiết kế	H_{tt}	M	25.8
IV	Thông số năng lượng			
1	Công suất trung bình	N_{tb}	MW	4.09
2	Công suất lắp đặt	N_{lm}	MW	20
3	Năng lượng phát năm	E_o	106 kWh	90.55
4	Số giờ phát	H_{cslm}	Giờ	4528
V	Thông số dự án			
1	Đập			
	Độ cao đỉnh đập		M	185.5
	Chiều cao cực đại	H	M	37
	Độ rộng thân đập		M	6
	Độ dốc hạ lưu			0.75
2	Cửa nhận nước			Bé tông
	Số cửa			2
	Chiều rộng cửa		$M \times m$	3.80
3	Nhà điều hành			Ngoài trời
	Số tổ máy			2
	Công suất	N_{lm}	MW	20
	Loại Tuabin			Kaplan

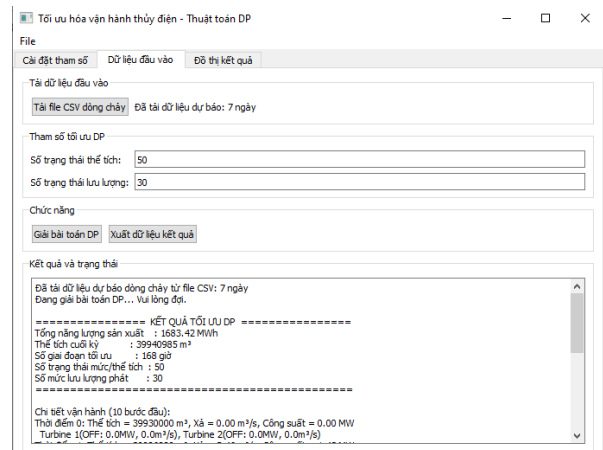
Dữ liệu dự báo dòng chảy trung bình (m^3/s) về hồ chứa trong 7 ngày được mở trong file .csv như sau:

Bảng 2. Dữ liệu nước trung bình 7 ngày

Ngày +	1	2	3	4	5	6	7
Lưu lượng	15.8	14.3	24	59.2	54.7	64	54.2

Dữ liệu lưu lượng nước về hồ trung bình như trong Bảng 2 chương trình thực hiện phân chia thành 24 bước thời gian/ngày. Giả định mức nước ban đầu là mức nước chết ($39930000m^3$), kết quả thu được sau khi chạy tối ưu với 50 mức thể tích và 30 mức lưu lượng phát như Hình 3. Với thông số chính như sau:

===== KẾT QUẢ TỐI ƯU DP =====
 Tổng năng lượng sản xuất : 1683.42 MWh
 Thể tích cuối kỳ : 39940985 m^3
 Số giai đoạn tối ưu : 168 giờ
 Số trạng thái mức/thể tích : 50
 Số mức lưu lượng phát : 30
 =====

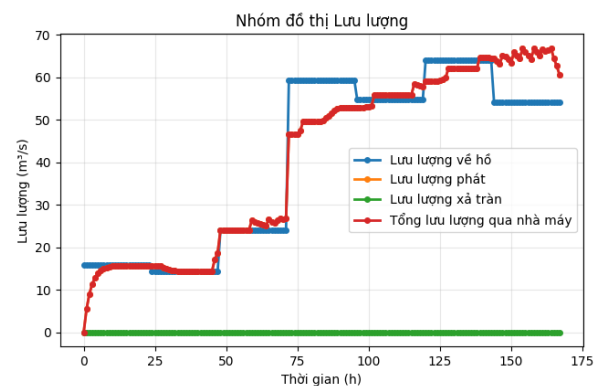


Hình 3. Kết quả giải bài toán tối ưu DP

Trong đó chương trình đã thực hiện tính toán khai thác hầu hết lượng nước về hồ (thể tích cuối kỳ 39940985 m^3) và tạo ra sản lượng điện 1683.42MWh.

Các biến động về lượng nước hồ, mức nước, lưu lượng dòng chảy, trạng thái và công suất phát của mỗi tổ máy.

Trên Hình 4 là hình ảnh nhóm các đồ thị lưu lượng của Nhà máy trong quá trình chạy tối ưu. Do lượng nước về hồ ở mức vừa đủ nên chương trình tối ưu thực hiện sử dụng toàn bộ lưu lượng nước về hồ cho lưu lượng phát. Lưu lượng xả tràn bằng không. Tổng lưu lượng qua nhà máy được lập kế hoạch sử dụng bám sát đường lưu lượng nước về hồ, đảm khai thác toàn bộ lượng nước. Do đó thể tích nước hồ cuối kỳ sắp xỉ giá trị đầu kỳ (3993000 m^3 đầu kỳ so với 39940985 m^3 cuối kỳ).

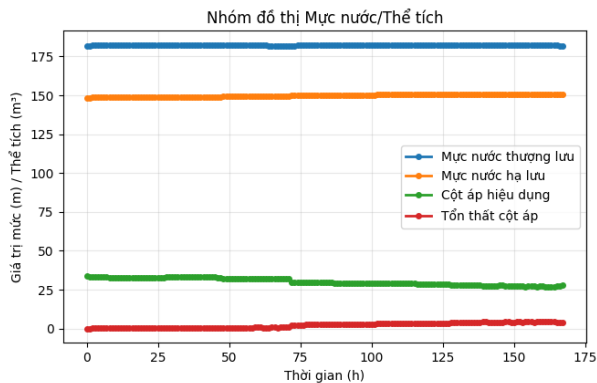


Hình 4. Các thành phần lưu lượng dòng chảy

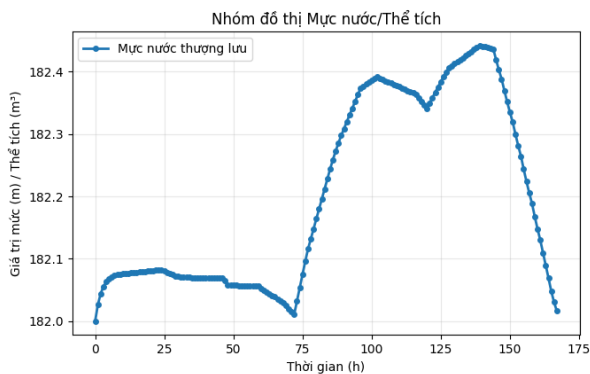
Tương ứng với các lưu lượng nước vận hành trong thời gian tối ưu, các mức nước thượng lưu, hạ lưu

và cột áp của Nhà máy được biểu diễn trên Hình 5, Hình 6.

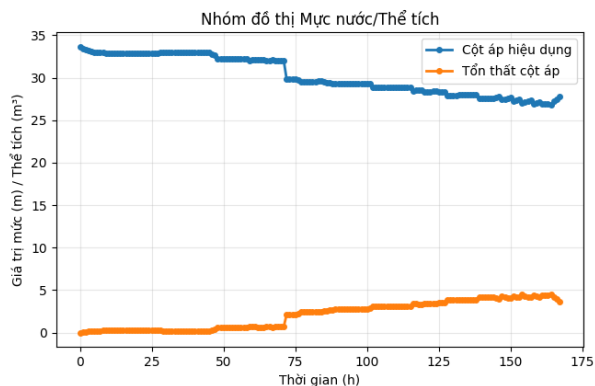
Trong đó mực nước thượng lưu được tối ưu duy trì trong khoảng trên mực nước chết và dưới mực nước dâng (182.0m đến 182.45m), mực nước hạ lưu thay đổi trong khoảng từ 148.25 m đến 150.75m.



Hình 5. Các thành phần mực nước



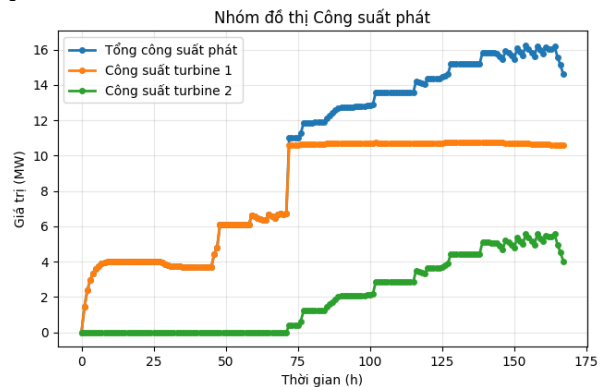
Hình 6. Mực nước thượng lưu



Hình 7. Cột áp hữu ích và tổn thất cột áp

Cột áp hữu ích (hiệu dụng) Hình 7 được duy trì trong khoảng từ 27m đến 33,5m, đảm bảo cột áp vận hành của turbine máy phát của Nhà máy.

Kết quả mô phỏng hoạt động phát điện của nhà máy được biểu diễn trên Hình 8. Theo kết quả chạy tối ưu lập trình quy hoạch động, trong khoảng 72 giờ đầu chỉ có tổ máy 1 hoạt động với công suất phát điện là khoảng 4Mw và 6Mw. Từ giờ thứ 72 cả hai tổ máy được lên kế hoạch đưa vào vận hành với tổ máy 1 hoạt động tối đa công suất (11Mw), tổ máy 2 được tăng dần công suất phát đến 6Mw.



Hình 8. Các thành phần công suất

Dựa trên các kết quả thu được cho thấy phần mềm đã thực hiện xây dựng được một kịch bản lưu lượng phát tối ưu theo thuật toán lập trình quy hoạch động. Dữ liệu kết quả cho thấy các thông số vận hành của Nhà máy đảm bảo trong các điều kiện giới hạn đặt ra.

Lời cảm ơn

Tác giả bài báo trân trọng cảm ơn công ty cổ phần Thủy điện Sử Pán đã hỗ trợ cung cấp dữ liệu Nhà máy để tác giả có thể thực hiện thử nghiệm với phần mềm.

Tài liệu tham khảo

- [1] MK, “Thủy điện vừa và nhỏ: ‘Bài toán’ cần ‘lời giải’ khoa học, thận trọng,” 2017. <https://baochinhphe.vn/thuy-dien-vua-va-nho-bai-toan-can-loi-giai-khoa-hoc-than-trong-102224681.htm>.
- [2] Hồ Sỹ Mão, “Nghiên cứu phương pháp vận hành tối ưu hệ thống đa hồ chứa thủy điện bậc thang bằng thuật toán di truyền,” *Khoa học kỹ thuật thủy lợi và*

- môi trường*, vol. 83, no. 1975, 2023.
- [3] V. N. Đ. P. Nguyễn Thanh Hảo^{1*}, Philippe Gourbesville², “Vận hành tối ưu hệ thống đa hồ chứa với dung tích phòng lũ hạn chế nhằm giảm lũ cho hạ lưu,” *Môi trường*, 2022, [Online]. Available: <https://tapchimoitruong.vn/chuyen-muc-3/van-hanh-toi-uu-he-thong-da-ho-chua-voi-dung-tich-phong-lu-han-che-nham-giam-lu-cho-ha-luu-28302>.
- [4] N. H. LƯU HƯƠNG GIANG, THANH MAI, “Vận hành thủy điện an toàn, hiệu quả,” 2022.
- [5] G. A. Caxaria, D. de Mesquita e Sousa, and H. M. Ramos, “Small Scale Hydropower: Generator Analysis and Optimization for Water Supply Systems,” *Proc. World Renew. Energy Congr. – Sweden, 8–13 May, 2011, Linköping, Sweden*, vol. 57, pp. 1386–1393, 2011, doi: 10.3384/ecp110571386.
- [6] L. Cahiers, Y. Villeneuve, S. Séguin, A. Chehri, and S. Séguin, “A survey on AI-based scheduling models , optimization and prediction for hydropower generation : Variants , challenges , and future directions A survey on AI-based scheduling models , optimization and prediction for hydropower generation : Variants , ch,” 2022.
- [7] S. Riemer-Sorensen and G. H. Rosenlund, “Deep reinforcement learning for long term hydropower production scheduling,” *SEST 2020 - 3rd Int. Conf. Smart Energy Syst. Technol.*, 2020, doi: 10.1109/SEST48500.2020.9203208.
- [8] L. Cahiers, Y. Villeneuve, A. Chehri, and K. Demeester, “Short-term hourly hydropower prediction : Evaluating LSTM and MILP-based methods Short-term hourly hydropower prediction : Evaluating LSTM and MILP-based methods Yoan Villeneuve Sara S ´ Abdellah Chehri Kenjy Demeester,” 2025.