

PHƯƠNG PHÁP PHÂN PHỐI CÔNG SUẤT THỦY ĐIỆN BẠC THANG TRÊN HỆ THỐNG ĐIỆN TÍCH HỢP NGUỒN NĂNG LƯỢNG TÁI TẠO- ÁP DỤNG CHO BẠC THANG THỦY ĐIỆN SÔNG ĐÀ

Hồ Sỹ Mão¹

Tóm tắt: Nguồn năng lượng tái tạo ngày càng chiếm tỷ trọng lớn trên hệ thống điện quốc gia. Tuy nhiên tính biến động nhanh và phụ thuộc hoàn toàn vào thời tiết nên khả năng tích hợp vào hệ thống điện đang là một thách thức cho ngành điện. Cần có nguồn năng lượng tích trữ có khả năng phản ứng linh hoạt để làm việc kết hợp với nguồn năng lượng tái tạo. Nguồn thủy điện từ các hệ thống bậc thang có hồ chứa dung tích lớn có khả năng tích nước để phát điện linh hoạt trên lưới điện có nguồn năng lượng tái tạo đang trở thành xu hướng hiện nay ở các quốc gia. Nghiên cứu này đề xuất phương pháp tính toán vận hành hệ thống thủy điện bậc thang phân phối công suất trên biểu đồ phụ tải của hệ thống điện tích hợp nguồn năng lượng tái tạo sử dụng thuật toán di truyền. Hệ thống bậc thang thủy điện trên sông Đà là đối tượng nghiên cứu áp dụng phân phối công suất trên hệ thống điện miền bắc Việt Nam có tích hợp nguồn điện mặt trời.

Từ khóa: Năng lượng tái tạo, thủy điện bậc thang, hệ thống điện.

1. GIỚI THIỆU

Trong bối cảnh hiện nay, hệ thống điện Việt Nam đang phải đối mặt với nhiều thách thức do sự gia tăng nhanh chóng của các nguồn năng lượng tái tạo, đặc biệt là điện mặt trời. Sự phát triển này mang lại lợi ích về môi trường và đa dạng hóa nguồn cung, tuy nhiên lại tạo ra áp lực lớn đối với công tác vận hành hệ thống điện do đặc tính biến động và khó dự báo của nguồn điện này. Tại Việt Nam, sự phân bố không đồng đều giữa nguồn và phụ tải càng làm vấn đề trở nên phức tạp hơn. Các nhà máy điện mặt trời chủ yếu tập trung tại khu vực miền Trung, trong khi nhu cầu tiêu thụ điện lớn lại nằm ở miền Bắc, đặc biệt trong mùa nắng nóng. Bên cạnh đó, năng lực truyền tải liên vùng còn hạn chế khiến việc truyền tải công suất từ miền Trung ra miền Bắc gặp khó khăn. Hệ quả là nhiều thời điểm xảy ra tình trạng dư thừa công suất điện mặt trời tại miền Trung dẫn đến phải cắt giảm phát, trong khi miền Bắc vẫn thiếu điện. Nguyên nhân cốt lõi là sự thiếu đồng bộ trong vận hành giữa các nguồn điện truyền thống và nguồn năng lượng tái tạo, đặc biệt trong các thời điểm điện mặt trời phát mạnh vào giữa trưa. Xét về đặc điểm phụ tải, biểu đồ phụ tải ngày của hệ thống điện thường có hai đỉnh rõ rệt. Đỉnh thứ nhất xuất hiện vào buổi sáng, khi các hoạt động sản xuất và sinh hoạt bắt đầu gia tăng, thường trong khoảng từ 9h00 đến 11h00. Đỉnh thứ hai, có giá trị cao hơn, xuất hiện vào buổi tối, từ 18h00 đến 20h00, do nhu cầu sử dụng điện sinh hoạt tăng mạnh. Khoảng thời gian giữa hai đỉnh này tạo thành một vùng phụ tải thấp,

thường được gọi là “thung lũng phụ tải”. Điểm đáng chú ý là thời gian này lại trùng với giai đoạn điện mặt trời phát công suất lớn nhất trong ngày, do bức xạ mặt trời đạt cực đại. Khi đó, để đảm bảo cân bằng công suất trong hệ thống, các nguồn điện truyền thống như thủy điện và nhiệt điện buộc phải giảm phát. Điều này làm cho độ sâu của “thung lũng phụ tải” càng gia tăng, tạo ra dạng biểu đồ phụ tải rỗng đặc trưng được gọi là “đường cong con vịt” (NREL, 2015). Hiện tượng này phản ánh sự mất cân đối nghiêm trọng giữa nguồn và phụ tải theo thời gian. Trong quá trình vận hành hệ thống điện, các nhà máy nhiệt điện thường được sử dụng để cung cấp phụ tải nền do có đặc tính vận hành ổn định nhưng khả năng thay đổi công suất chậm. Vì vậy, khi phụ tải biến động nhanh, đặc biệt vào các thời điểm chuyển tiếp như buổi chiều tối khi điện mặt trời giảm nhanh, nhiệt điện không thể đáp ứng kịp thời. Điều này đặt ra yêu cầu cần có các nguồn điện linh hoạt hơn để tham gia điều tiết phụ tải. Trong số các nguồn điện hiện có, thủy điện, đặc biệt là các hệ thống thủy điện bậc thang có hồ chứa điều tiết, được đánh giá là có khả năng đáp ứng tốt yêu cầu này. Nhờ khả năng tích trữ nước và điều chỉnh lưu lượng phát điện nhanh, thủy điện có thể giảm phát trong thời gian điện mặt trời dư thừa và tăng phát vào các giờ cao điểm khi nhu cầu phụ tải tăng. Quá trình này giúp làm giảm biên độ dao động của phụ tải rỗng, đồng thời giảm áp lực điều chỉnh công suất cho các nhà máy nhiệt điện. Hoạt động này thường được gọi là cắt đỉnh phụ tải hoặc phân phối lại công suất theo thời gian. Vấn đề phối hợp vận hành giữa thủy điện và các nguồn năng lượng tái tạo đã được nhiều

¹Trường Đại học Thủy lợi

nghiên cứu quốc tế quan tâm. Chẳng hạn (Wang và cộng sự, 2022) đã đề xuất phương pháp cắt đỉnh cho nhiều lưới điện nhằm nâng cao hiệu quả tích hợp năng lượng tái tạo. (Zhou và cộng sự, 2020) xây dựng mô hình tối ưu đa mục tiêu nhằm đồng thời giảm phụ tải đỉnh và tối đa hóa sản lượng điện. (Feng và cộng sự, 2024) xem xét tính không chắc chắn của điện mặt trời thông qua việc xây dựng các kịch bản phát điện khác nhau để đánh giá khả năng phối hợp vận hành giữa thủy điện và điện mặt trời. Bên cạnh đó, (Lei và cộng sự, 2023) đề xuất mô hình tối ưu hai tầng nhằm giải quyết đồng thời bài toán cắt đỉnh phụ tải và vận hành kinh tế trong điều kiện có xét đến sự biến động của nguồn năng lượng tái tạo. Ngoài ra, (Jin và cộng sự, 2022) đã chỉ ra rằng việc tăng tỷ lệ thâm nhập của điện mặt trời có thể làm nổi bật vai trò của hệ thống thủy điện bậc thang trong việc hỗ trợ vận hành hệ thống điện, đặc biệt thông qua khả năng điều tiết công suất linh hoạt. (Lin và cộng sự, 2024) tiếp cận vấn đề theo hướng tích hợp giữa vận hành ngắn hạn và dài hạn, trong đó các quyết định về mực nước hồ chứa được xem xét đồng thời với yêu cầu cắt đỉnh phụ tải hàng ngày nhằm tối ưu hóa hiệu quả vận hành tổng thể.

Từ những phân tích trên có thể thấy rằng việc xây dựng một phương pháp phân phối công suất hợp lý cho hệ thống thủy điện bậc thang là hết sức cần thiết trong bối cảnh hệ thống điện có tỷ lệ năng lượng tái tạo ngày càng cao. Do đó, nghiên cứu này đề xuất một phương pháp phân phối công suất linh hoạt cho hệ thống thủy điện bậc thang nhằm tăng cường khả năng hấp thụ nguồn năng lượng tái tạo, đồng thời nâng cao độ ổn định vận hành của hệ thống điện và giảm yêu cầu điều chỉnh công suất từ các nhà máy nhiệt điện.

2. BÀI TOÁN TỐI ƯU HÓA

2.1. Hàm mục tiêu

Mục tiêu của bài toán là xác định phương án phân phối công suất tối ưu cho hệ thống thủy điện bậc thang nhằm giảm mức độ dao động của phụ tải rông trên hệ thống điện, qua đó góp phần nâng cao độ ổn định vận hành. Để hiện thực hóa mục tiêu này, một hàm mục tiêu được xây dựng theo hướng tối thiểu hóa độ lệch của phụ tải rông theo thời gian, được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} F = \min \left[\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (R_t - \bar{R})^2 \right] \\ R_t = P_t^{SYS} - P_t^{RE} - \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{HYD} \\ \bar{R} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T R_t \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó F là độ lệch bình phương trung bình tải rông; R_t là tải rông trong thời điểm t ; $\bar{R}$ là tải rông trung bình trong thời đoạn T ; P_t^{SYS} là phụ tải hệ thống điện tại thời điểm t ; P_t^{RE} công suất từ nguồn điện năng lượng tái tạo; $P_{i,t}^{HYD}$ công suất từ nguồn bậc thang hồ chứa thủy điện; N là số nhà máy thủy điện trong bậc thang.

2.2. Điều kiện ràng buộc

2.2.1. Điều kiện ràng buộc hệ thống hồ chứa

- Phương trình liên tục:

$$S_{i,t+1} = S_{i,t} + I_{i,t} + [M] \cdot Q_{i,t} \cdot \Delta t \quad (2)$$

Trong đó $S_{i,t}$, $I_{i,t}$, $Q_{i,t}$ tương ứng là dung tích hồ chứa, dòng chảy vào hồ, lưu lượng xả ra khỏi hồ chứa i tại giai đoạn t ; $S_{i,t+1}$ là dung tích hồ chứa tại giai đoạn tiếp theo; M là ma trận hệ số $N \times N$, các phần tử thuộc ma trận M được biểu diễn bởi các số nguyên $-1, 0, 1$ tương ứng lượng xả ra khỏi hồ, không có dòng chảy vào hoặc ra, và lượng xả hồ trên chảy vào hồ.

- Điều kiện ràng buộc về dung tích:

$$S_i^{\min} \leq S_{i,t} \leq S_i^{\max} \quad (3)$$

Trong đó $S_i^{\min}$, $S_i^{\max}$ tương ứng là dung tích tối thiểu và dung tích toàn phần của hồ chứa i .

- Điều kiện ràng buộc về lưu lượng xả:

$$Q_i^{\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_i^{\max} \quad (4)$$

Trong đó $Q_i^{\min}$, $Q_i^{\max}$ tương ứng là lưu lượng xả qua tuốc bin tối thiểu và tối đa của hồ chứa i .

- Điều kiện ràng buộc về công suất:

$$P_i^{\min} \leq P_{i,t}^{HYD} \leq P_i^{\max} \quad (5)$$

Trong đó $P_i^{\min}$, $P_i^{\max}$ tương ứng là công suất phát tối thiểu và tối đa của nhà máy thủy điện hồ chứa i .

Công suất của nhà máy thủy điện của hồ thủy điện i , trong thời đoạn t được xác định theo công thức sau:

$$P_{i,t}^{HYD} = 9.81 \times \eta_{i,t} \times Q_{i,t} \times H_{i,t} \quad (5.1)$$

Trong đó $\eta_{i,t}$ là hiệu suất phát điện của nhà máy thủy điện hồ i ; $Q_{i,t}$ là lưu lượng phát điện được xác định trong công thức (2); $H_{i,t}$ là cột nước phát điện được xác định thông qua mực nước hồ, mực nước hạ lưu và tổn thất cột nước.

2.2.2. Điều kiện ràng buộc trên hệ thống điện

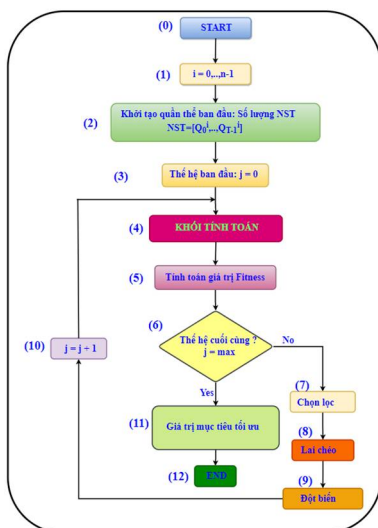
- Phương trình cân bằng công suất trên hệ thống điện:

$$P_t^{SYS} = R_t + P_t^{RE} + \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{HYD} \quad (6)$$

Công thức (6) thể hiện ràng buộc cùng làm việc trên hệ thống điện tại cùng một thời điểm trong đó hệ thống bậc thang thủy điện có vai trò phân phối công suất để giảm thiểu biến động cho phụ tải rông R_t (công suất từ nguồn nhiệt điện và các nguồn phát điện khác trừ nguồn NLTT); P_t^{RE} được xác định từ công suất phát điện lên lưới của các nguồn NLTT phát lên HTĐ tại thời điểm t .

3. PHƯƠNG PHÁP

Để giải quyết bài toán tối ưu hóa trong nghiên cứu này, việc lựa chọn một thuật toán phù hợp là yếu tố then chốt, đặc biệt khi bài toán có hàm mục tiêu phi tuyến và chịu nhiều ràng buộc phức tạp. Các phương pháp tối ưu truyền thống thường gặp khó khăn khi xử lý không gian nghiệm lớn, nhiều cực trị cục bộ và các biến quyết định liên tục. Trong khi đó, thuật toán di truyền (GA) thể hiện nhiều ưu điểm nổi bật. GA có khả năng tìm kiếm toàn cục tốt nhờ cơ chế tiến hóa quần thể, giúp giảm nguy cơ rơi vào nghiệm cục bộ. Do đó, nghiên cứu này lựa chọn thuật toán di truyền như một công cụ tối ưu hóa hiệu quả. GA là một phương pháp tìm kiếm ngẫu nhiên có định hướng, được phát triển dựa trên nguyên lý tiến hóa tự nhiên như chọn lọc, lai ghép và đột biến. Trong khuôn khổ bài toán này, mỗi phương án vận hành của hệ thống thủy điện được mã hóa dưới dạng một nhiễm sắc thể (NST), bao gồm các gen đại diện cho các biến quyết định, cụ thể là lưu lượng phát điện của từng hồ chứa tại các thời đoạn tính toán. Như vậy, mỗi NST tương ứng với một lời giải khả thi của bài toán. Tập hợp các NST tạo thành một quần thể, đại diện cho nhiều phương án vận hành khác nhau trong cùng một thế hệ. Để đánh giá chất lượng của từng phương án, một hàm thích nghi (fitness function) được xây dựng dựa trên hàm mục tiêu của bài toán. Hàm này phản ánh mức độ phù hợp của từng NST thông qua khả năng giảm dao động phụ tải ròng hoặc đạt được mục tiêu tối ưu đề ra. Đối với các NST vi phạm ràng buộc, một cơ chế hàm phạt được áp dụng nhằm làm giảm giá trị fitness, qua đó hạn chế sự tồn tại của các nghiệm không khả thi trong quần thể. Cách tiếp cận này giúp duy trì tính khả thi của lời giải mà vẫn đảm bảo quá trình tìm kiếm không bị gián đoạn. Thuật toán GA áp dụng cho bài toán này được trình bày như Hình 1.

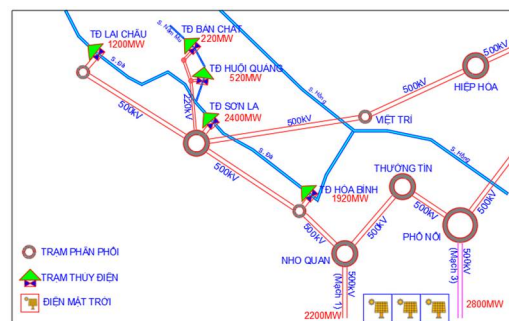


Hình 1. Sơ đồ khối thuật toán di truyền cho bài toán tối ưu hóa

Trong bài toán vận hành hệ thống hồ chứa thuật toán GA yêu cầu khởi tạo quần thể ban đầu được thực hiện bởi hàm ngẫu nhiên khởi tạo giá trị thực giữa các giới hạn dưới và trên tương ứng với lưu lượng phát điện từ nhỏ nhất đến lớn nhất của từng nhà máy thủy điện, do đó đảm bảo các biến quyết định được gán là các biến liên tục và bao phủ toàn bộ không gian tìm kiếm. Số lượng gen trong NST phụ thuộc vào số lượng các hồ chứa (n) và các bước thời gian được tính toán trong mô hình. Trong mô hình này được tính toán với T thời đoạn tương ứng có $T \times n$ biến quyết định được biểu diễn trong một NST được biểu diễn dưới dạng vectơ. Do đó, mỗi NST đại diện cho một giải pháp tiềm năng cho bài toán bao gồm $T \times n$ gen. Tập hợp các NST tạo thành một quần thể các giải pháp tính toán trong một thế hệ. Trong thuật toán di truyền, giá trị của hàm mục tiêu được sử dụng trực tiếp như thước đo độ thích nghi (fitness) của mỗi nhiễm sắc thể. Tại mỗi thế hệ, giá trị fitness được tính toán dựa trên hàm mục tiêu (1) và các điều kiện ràng buộc từ công thức (2)-(6) từ đó thuật toán tìm ra được giá trị mục tiêu tốt nhất trong từng thế hệ và cập nhật qua tất cả các thế hệ được thiết lập (Hồ Sỹ Mão, 2025).

4. TRƯỜNG HỢP NGHIÊN CỨU

Hệ thống bậc thang thủy điện sông Đà được lựa chọn trong nghiên cứu này bởi tầm quan trọng của bậc thang thủy điện này trong HTĐ quốc gia nói chung và miền Bắc nói riêng. Thông số chính của hệ thống bậc thang sông Đà được thể hiện trong Bảng 1. Kết nối của các nhà máy trên bậc thang sông Đà với HTĐ được thể hiện như Hình 2. Các nhà máy thủy điện Lai Châu, Sơn La và Hòa Bình được kết nối với hệ thống điện thông qua các trạm phân phối cấp điện áp 500 kV và 220 kV, trong khi đó các nhà máy Bản Chát và Huội Quan Sơn chỉ đầu nối ở cấp điện áp 220 kV. Lưới truyền tải 220 kV chủ yếu đảm nhận vai trò phân phối điện năng trong khu vực miền Bắc, phục vụ nhu cầu phụ tải miền. Ngược lại, lưới truyền tải 500 kV đóng vai trò là trục xương sống, đảm nhận chức năng truyền tải công suất quy mô lớn từ miền Bắc vào các khu vực miền Trung và miền Nam.



Hình 2. Sơ đồ hệ thống thủy điện sông Đà và lưới điện truyền tải

Hệ thống bậc thang thủy điện sông Đà kết nối với HTĐ thông qua lưới điện miền Bắc. Trong nghiên cứu này, lưới điện miền Bắc năm 2021 được chọn để nghiên cứu vì trong năm này nguồn công suất điện mặt trời chiếm tỷ lệ trên 25% công suất lắp đặt trên HTĐ. Thông số lắp đặt các nguồn công suất phát điện trên lưới điện miền Bắc được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 1. Thông số cơ bản của hệ thống bậc thang thủy điện sông Đà

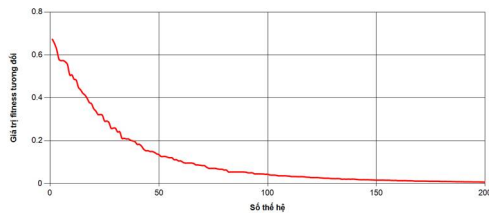
Hồ chứa	MNC [m]	MNDBT [m]	$Q_{TĐmin}$ [m ³ /s]	$Q_{TĐmax}$ [m ³ /s]	N_{min} [MW]	N_{max} [MW]
Bản Chất	431.0	465.0	54.7	273.3	44.0	220.0
Huội Quảng	368.0	370.0	76.6	383.1	104.0	520.0
Lai Châu	265.0	295.0	277.0	1.664.2	160.0	1.200.0
Sơn La	175.0	215.0	568.0	3.405.0	160.0	2.400.0
Hòa Bình	80.0	117.0	300.0	2.400.0	96.0	1.920.0

Bảng 2. Thông số HTĐ miền Bắc năm 2021

Nguồn điện	MW
HT Sông Đà	6.260.0
Nhiệt điện	12.670.0
Thủy điện	5.379.0
Điện mặt trời (miền Trung)	2.200.0
Nhập khẩu (Trung Quốc)	515.0

5. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

5.1. Phân tích độ hội tụ của thuật toán di truyền



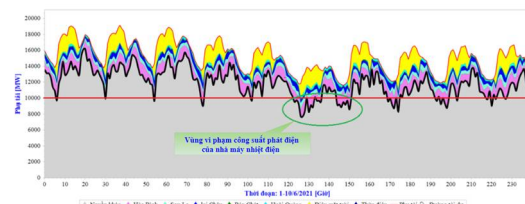
Hình 3. Biểu đồ sự thay đổi giá trị fitness qua từng thế hệ

Thuật toán GA cần phải thiết lập các tham số trong đó kích thước quần thể POP=1000 được chọn để có thể duy trì mức độ đa dạng di truyền mong muốn cho các quần thể ban đầu và các quần thể tiếp theo. Xác suất lai chéo được chọn là $P_c=0,8$ phù hợp với nhiều bài toán di truyền đã được áp dụng. Xác suất đột biến tương ứng với khoảng 1 gen đột biến trên mỗi NST đã được xem xét. Giá trị xác suất đột biến là $P_m=0,02$. Số lượng thế hệ được chọn là $G=200$. Thời đoạn tính toán $T=10$ ngày (240 giờ) từ 1-10/6/2021. Thuật toán GA tính toán giá trị hàm mục tiêu thông qua giá trị fitness ở từng thế hệ. Giá trị fitness luôn được cải thiện qua các thế hệ. Để đánh giá được tính hội tụ của thuật toán, nghiên cứu xây dựng đường cong giá trị fitness và các thế hệ như Hình 3. Kết quả cho thấy các đường cong fitness tiệm cận trực hoành (giá trị 0) cho thấy thuật toán thực hiện tốt hàm mục tiêu cực tiểu hóa đã đề ra. Có thể quan sát từ biểu đồ cho thấy thuật toán liên tục

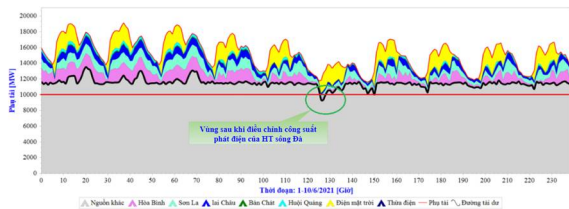
cải thiện giải pháp qua từng thế hệ mặc dù tốc độ cải thiện chậm trong phần sau của quá trình chạy và dần đạt đến giá trị cực tiểu.

5.2. Kết quả phân phối công suất thủy điện

Sự gia tăng tỷ trọng nguồn điện mặt trời trong hệ thống điện làm cho phụ tải ròng, tức phần phụ tải do các nguồn điện truyền thống đảm nhận, trở nên biến động mạnh hơn theo thời gian. Trong khi đó, các nhà máy nhiệt điện than có đặc tính vận hành với tốc độ thay đổi công suất chậm, khó thích ứng với các biến động nhanh của phụ tải. Do vậy, nguồn điện than thường được duy trì vận hành ở mức công suất nền (base load) nhằm đảm bảo tính ổn định cho hệ thống điện. Với công suất lắp đặt nguồn nhiệt điện hiện tại tính đến hết năm 2021 là hơn 12000 MW ở miền Bắc thì giả sử vùng vận hành của nguồn nhiệt điện than là đường đồ nằm ngang khoảng 10000 MW và 2000 MW dự phòng. Để thấy rõ hàm mục tiêu cắt đỉnh phân phối lại công suất nguồn thủy điện từ bậc thang thủy điện sông Đà (BTSD) thì trong mô hình tính toán thực hiện cho hai trường hợp: Trường hợp 1 (TH1)-Hình 4 thì BTSD không tham gia phân phối phụ tải, và trường hợp 2 (TH2)-Hình 5 thì BTSD tham gia phân phối phụ tải. Kết quả cho thấy trong TH1, do sự phát điện mang tính tự nhiên của hệ thống thủy điện, phụ tải ròng có biên độ dao động lớn khoảng 30-40%, xuất hiện nhiều thời điểm xâm nhập sâu vào vùng vận hành của nhiệt điện. Trong khi đó, ở TH2, khi áp dụng phương pháp đề xuất, biên độ dao động phụ tải ròng giảm đáng kể xuống còn 5-10%. Bên cạnh đó, yêu cầu điều chỉnh công suất của các nhà máy nhiệt điện được đánh giá thông qua tổng biến thiên công suất phụ tải ròng theo thời gian cho thấy rằng ở TH1 các nhà máy nhiệt điện phải thực hiện nhiều chu kỳ tăng/giảm công suất với biên độ lớn để bù đắp sự dao động của phụ tải ròng. Ngược lại, trong TH2, tổng mức điều chỉnh công suất của nhiệt điện giảm nhiều do đường biến động đã được giảm thiểu đáng kể cho phép các nhà máy nhiệt điện chủ yếu vận hành ổn định ở chế độ nền. Với cách điều chỉnh này, kết hợp với việc phân phối hợp lý nguồn nước từ hệ thống hồ chứa rõ ràng làm cho các nhà máy điện than vận hành an toàn và ổn định cho lưới điện. Do vậy trong công tác vận hành HTĐ hiện nay để đảm bảo cân bằng công suất và ổn định trên lưới điện các nhà máy thủy điện cần tham gia vận hành để phân phối giảm sự biến động của phụ tải ròng.



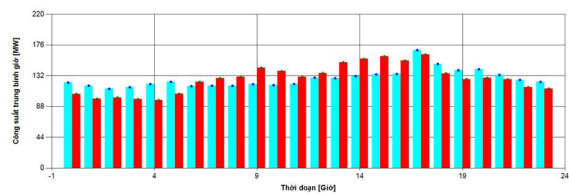
Hình 4. Biểu đồ phân phối công suất các nguồn phát điện trong TH1



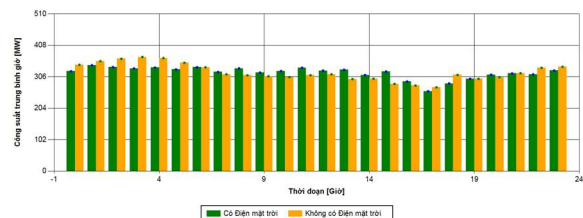
Hình 5. Biểu đồ phân phối công suất các nguồn phát điện trong TH2

Khi hệ thống thủy điện bậc thang sông Đà tham gia điều phối công suất trên biểu đồ phụ tải, các nhà máy cần vận hành linh hoạt theo diễn biến phụ tải và sự thay đổi công suất của nguồn điện mặt trời theo từng giờ trong ngày. Về nguyên tắc, trong các khoảng thời gian điện mặt trời phát mạnh, hệ thống thủy điện cần giảm công suất phát để ưu tiên hấp thụ tối đa nguồn năng lượng tái tạo. Ngược lại, vào các giờ cao điểm hoặc khi công suất điện mặt trời suy giảm, các nhà máy thủy điện sẽ tăng cường phát điện nhằm đáp ứng nhu cầu phụ tải. Trong khuôn khổ mô hình nghiên cứu, công suất phát trung bình theo giờ của từng nhà máy trong hệ thống bậc thang đã được xác định cho cả hai trường hợp: có xét đến sự tham gia của điện mặt trời và không có điện mặt trời. Các kết quả này cho phép đánh giá rõ vai trò điều tiết của hệ thống thủy điện trong việc làm phẳng phụ tải ròng trên hệ thống điện miền Bắc. Dựa trên các Hình 6–10, có thể nhận thấy rõ sự khác biệt trong quy luật vận hành giữa các nhà máy thủy điện thuộc hệ thống bậc thang sông Đà khi có sự tham gia của nguồn điện mặt trời. Đối với các nhà máy có công suất lớn và dung tích hồ chứa đáng kể như Lai Châu, Sơn La và Hòa Bình, biểu đồ công suất theo giờ thể hiện xu hướng điều tiết rất rõ rệt: công suất phát giảm vào các giờ giữa trưa (khoảng 10h00–14h00), khi nguồn ĐMT đạt giá trị cao, và tăng mạnh vào các giờ cao điểm buổi tối (18h00–22h00), khi công suất ĐMT giảm về gần 0 và nhu cầu phụ tải tăng. Điều này cho thấy các hồ lớn đã thực hiện tốt chức năng dịch chuyển công suất theo thời gian, tích nước trong giai đoạn dư thừa năng lượng và phát điện vào các thời điểm thiếu hụt, qua đó đóng vai trò như một dạng “nguồn tích năng tự nhiên” của hệ thống. Ngược lại, đối với các nhà máy có công suất nhỏ hơn như Bản Chát và Huội Quàng, đồ thị công suất không thể hiện rõ sự thay đổi theo chu kỳ ngày đêm, mà chủ yếu dao động theo xu hướng tương đối ổn định. Nguyên nhân là do dung tích hồ hạn chế, khả năng điều tiết thấp, nên các nhà máy này chủ yếu phát điện theo lưu lượng nước đến, ít có khả năng tham gia điều chỉnh phụ tải theo thời gian. Điều đó cho thấy sự phối hợp giữa các nhà máy trong bậc thang đã tạo ra cơ chế bù trừ hiệu quả giữa thủy điện và nguồn ĐMT, trong đó công suất thủy điện có xu

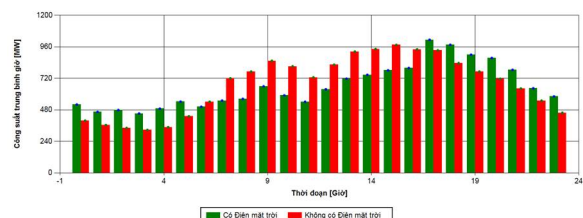
hướng biến thiên ngược pha với công suất ĐMT. Cơ chế này góp phần làm phẳng đường phụ tải ròng, giảm độ dốc biến thiên công suất trong các thời điểm chuyển tiếp (đặc biệt là buổi chiều tối), đồng thời giảm đáng kể yêu cầu điều chỉnh công suất của các nhà máy nhiệt điện. Qua đó, không chỉ nâng cao độ ổn định vận hành của hệ thống điện mà còn cải thiện hiệu quả kinh tế thông qua việc ưu tiên phát điện vào các khung giờ có giá trị cao.



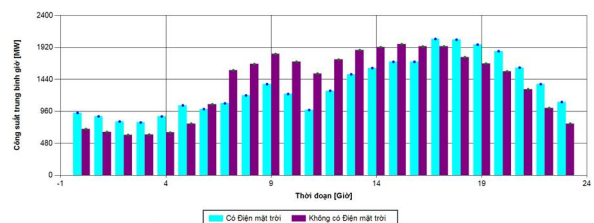
Hình 6. Biểu đồ công suất phát điện trung bình theo giờ của thủy điện Bản Chát



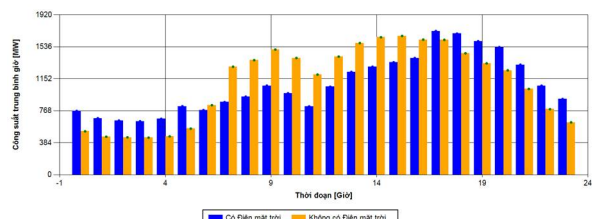
Hình 7. Biểu đồ công suất phát điện trung bình theo giờ của thủy điện Huội Quàng



Hình 8. Biểu đồ công suất phát điện trung bình theo giờ của thủy điện Lai Châu



Hình 9. Biểu đồ công suất phát điện trung bình theo giờ của thủy điện Sơn La



Hình 10. Biểu đồ công suất phát điện trung bình theo giờ của thủy điện Hòa Bình

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đề xuất một phương pháp phân phối công suất cho hệ thống bậc thang thủy điện nhằm giảm độ lệch phụ tải ròng trên hệ thống điện có tích hợp nguồn năng lượng tái tạo, đặc biệt là điện mặt trời. Bài toán được xây dựng dưới dạng tối ưu hóa phi tuyến với mục tiêu cực tiểu hóa độ lệch bình phương trung bình của phụ tải ròng, đồng thời thỏa mãn các ràng buộc về cân bằng nước, dung tích hồ chứa, công suất phát và giới hạn truyền tải. Thuật toán di truyền (GA) được áp dụng để giải bài toán và cho thấy khả năng hội tụ tốt, đảm bảo tìm được nghiệm tối ưu hoặc cận tối ưu.

Kết quả tính toán cho hệ thống bậc thang thủy điện sông Đà trong giai đoạn từ 1–10/6/2021 cho thấy khi các nhà máy thủy điện tham gia phân phối phụ tải theo

hàm mục tiêu đề xuất, đường phụ tải ròng được san bằng đáng kể, giảm độ dao động giữa đỉnh và đáy phụ tải. Điều này giúp hạn chế sự điều chỉnh công suất lớn từ các nhà máy nhiệt điện, góp phần nâng cao tính ổn định và an toàn vận hành hệ thống điện miền Bắc trong điều kiện tỷ lệ thâm nhập điện mặt trời cao.

Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy vai trò quan trọng của các hồ chứa lớn trong hệ thống bậc thang, như Sơn La, Hòa Bình và Lai Châu, trong việc thực hiện điều tiết công suất theo thời gian, qua đó đóng vai trò tương tự một hệ thống tích trữ năng lượng quy mô lớn. Sự phối hợp hợp lý giữa các hồ chứa trong bậc thang không chỉ giúp nâng cao hiệu quả khai thác nguồn nước mà còn tạo ra khả năng linh hoạt cao trong vận hành hệ thống điện có tỷ trọng năng lượng tái tạo ngày càng tăng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

- Hồ Sỹ Mão, *Nghiên cứu mô hình vận hành phát điện tối ưu bậc thang hồ chứa thủy điện trong hệ thống điện-Áp dụng cho lưu vực sông Đà*, Luận án tiến sĩ, ĐHTL, Hà Nội, 2025.
- Kaixuan Lei, Jianxia Chang, Xuebin Wang, Aijun Guo, Yimin Wang, and Chengqing Ren, *Peak shaving and short-term economic operation of hydro-wind-PV hybrid system considering the uncertainty of wind and PV power*, Renewable Energy, vol. 215, 2023.
- Lingan Zhou, Chuntian Cheng, Shengli Liao, and Jian Wang, *Multiobjective Scheduling Method for Short-Term Peak Shaving Operation of Cascade Hydro Plants*, Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 146, no. 9, 2020.
- Mengke Lin, Jianjian Shen, Chuntian Cheng, Quan Lu, and Yuqian Wang, *Long-term multi-objective optimal scheduling for large cascaded hydro-wind-photovoltaic complementary systems considering short-term peak-shaving demands*, Energy Conversion and Management, vol. 301, 2024.
- NREL, *Overgeneration from solar energy in California: A field guide to the duck chart*, National Renewable Energy Laboratory, 2015.
- Peilin Wang, Wenlin Yuan, Chengguo Su, Yang Wu, Lu Lu, Denghua Yan, and Zening Wu, *Short-term optimal scheduling of cascade hydropower plants shaving peak load for multiple power grids*, Renewable Energy, vol. 184, pp. 68-79, 2022.
- Xiaoyu Jin, Benxi Liu, Shengli Liao, Chuntian Cheng, Gang Li, and Lingjun Liu, *Impacts of different wind and solar power penetrations on cascade hydroplants operation*, Renewable Energy, vol. 182, pp. 227-244, 2022.
- Zhong-kai Feng, Qing-qing Huang, Wen-jing Niu, Hua-ying Su, Shu-shan Li, Hui-jun Wu, and Jia-yang Wang, *Peak operation optimization of cascade hydropower reservoirs and solar power plants considering output forecasting uncertainty*, Applied Energy, vol. 358, 2024.

Abstract:

POWER ALLOCATION METHOD FOR CASCADE HYDROPOWER IN POWER SYSTEMS INTEGRATED WITH RENEWABLE ENERGY- APPLICATION TO THE DA RIVER CASCADE HYDROPOWER SYSTEM

Renewable energy sources are increasingly accounting for a larger share of the national power system; however, their rapid variability and complete dependence on weather conditions pose significant challenges for grid integration. Flexible energy storage resources are therefore required to effectively coordinate with renewable generation. Cascade hydropower systems with large storage reservoirs, which can regulate water and generate electricity flexibly, have become an important solution for supporting power systems with high renewable penetration. This study proposes a genetic algorithm-based method for optimizing the operation of cascade hydropower systems through power allocation along the load curve of a renewable-integrated power system. The cascade hydropower system on the Da river is selected as a case study to evaluate the proposed approach for the Northern Vietnam power system integrated with solar power generation.

Keywords: Renewable energy, cascade hydropower, power system.

Ngày nhận bài: 11/02/2026

Ngày chấp nhận đăng: 28/5/2026