

TỐI ƯU HÓA ĐA MỤC TIÊU TRONG ĐIỀU ĐỘ HỆ THỐNG ĐIỆN KHI KHẢO SÁT THỦY ĐIỆN BẬC THANG

OPTIMIZATION OF MULTI-TARGET OBJECTIVES IN POWER SYSTEM DISPATCH BASE ON CASCADED HYDROPOWER

Trần Hoàng Hiệp, Lê Xuân Sanh

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 03/05/2019, Ngày chấp nhận đăng: 30/07/2019, Phản biện: TS. Trần Quang Khánh

Tóm tắt:

Điều độ công suất phát trong hệ thống điện được điều chỉnh theo nguồn nhiệt điện và thủy điện là một hàm đa mục tiêu dựa trên lợi ích tổng thể, khi xét đến các tham số như chi phí tiêu hao nhiên liệu, lượng khí thải ô nhiễm, cực tiểu lượng nước tràn... Bài báo đề xuất mô hình điều độ đa mục tiêu, sử dụng phương pháp tối ưu hóa hàm số phạt hỗn hợp, để chuyển thành bài toán tối ưu hóa không ràng buộc, đồng thời sử dụng ma trận Hessian cải tiến phương pháp cần tối ưu, khắc phục vấn đề giảm bớt hệ số thay thế. Thông qua việc tính toán một hệ thống điện gồm bốn thủy điện bậc thang (3 cấp) và ba nhà máy nhiệt điện, các kết quả tối ưu hóa được xác định để kiểm chứng độ tin cậy và hiệu quả tiết kiệm của thuật toán này.

Từ khóa:

Điều độ phát điện tiết kiệm, thủy điện bậc thang, phương pháp nội điểm, phương pháp ngoại điểm, lý thuyết hàm phạt hỗn hợp.

Abstract:

The power generation dispatch in the power system regulated according to thermal and hydropower sources, is a multi-purpose function based on overall benefits, taking into account parameters such as fuel consumption costs and pollution emissions, minimum amount of overflow, etc. The paper provides an unbounded optimization problem which is modified from the method of optimizing mixed penalties based on combined multi-objective moderation model using Hessian matrix, to improve method and the selection reduction coefficients is solved. An electrical system consisting of four cascaded hydropower plants (3 levels) and three thermal power plants were simulated, the optimization results are determined to test the reliability and cost-effectiveness of this algorithm.

Keywords:

Energy-saving generation scheduling, cascaded hydropower stations, interior point method, exterior point method, mixed penalty function method.

1. GIỚI THIỆU

Vấn đề tối ưu liên hợp điều độ phát giữa hệ thống thủy - nhiệt điện xuất hiện đi kèm với cực diện của sự đồng thời cung

cấp điện cho xã hội của hệ thống thủy và nhiệt điện. Học giả Pháp Ricard là một trong những học giả đầu tiên trên thế giới quan tâm đến vận hành kinh tế của hệ

thông thủy - nhiệt điện [1]. Trên cơ sở nghiên cứu về vấn đề này, lần đầu tiên vào năm 1940, ông đề xuất mô hình toán học chặt chẽ của vấn đề tối ưu liên hợp điều độ trong vận hành kinh tế hệ thống thủy điện và nhiệt điện, trở thành một mô hình khoa học đầu tiên về kinh tế hệ thống thủy - nhiệt điện trên thế giới. Kể từ đó, vấn đề tối ưu liên hợp điều độ giữa hệ thống điện thủy - nhiệt điện đã bắt đầu thu hút sự chú ý của thế giới, các phương trình tối ưu liên hợp cho thủy - nhiệt dựa trên toán học cổ điển đã được nghiên cứu rộng rãi. Cho đến nay, cùng với sự phát triển nhanh chóng của lý thuyết toán học hiện đại và sự xuất hiện của nhiều mô hình tối ưu hóa mới mà vấn đề này trở thành chủ đề nghiên cứu nóng của các học giả trong và ngoài nước.

Tối ưu điều độ hệ thống thủy - nhiệt khi xét đến thủy điện bậc thang là một vấn đề tối ưu đa mục tiêu phức tạp, nhiều hạng số, phi lồi, phi tuyến, nhiều thời đoạn và thời gian trễ. Đối với lĩnh vực tối ưu hồ chứa, bên cạnh lý thuyết hệ thống và kỹ thuật máy tính không ngừng phát triển, các mô hình mới và phương pháp tính toán mới cũng không ngừng xuất hiện, phương pháp thường dùng gồm hai loại lớn. Một là phương pháp tối ưu truyền thống, bao gồm phương pháp quy hoạch tuyến tính, quy hoạch động, phương pháp phỏng đoán, phương pháp đẳng suất gia tăng, phương pháp nhân tử Lagrange, [2]... Phương pháp truyền thống đối với hàm số mục tiêu và nghiệm xuất phát có yêu cầu chặt chẽ, do đó trong xử lý bài toán tối ưu điều độ tiết kiệm hệ thống thủy - nhiệt điện dễ gặp phải nghiệm cục bộ. Hai là phương pháp hiện đại, bao

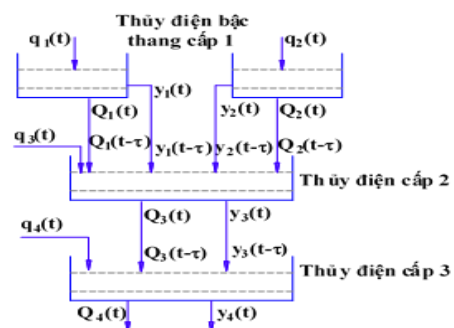
gồm: phương pháp quy hoạch ngẫu nhiên, phương pháp nội điểm, phương pháp di truyền, phương pháp mô phỏng luyện kim, phương pháp mạng thần kinh nhân tạo, phương pháp quy hoạch mờ...

Thủy điện bậc thang trong tối ưu điều độ tiết kiệm hệ thống thủy nhiệt thuộc về vấn đề tối ưu tổ hợp nhiều giai đoạn, phi tuyến, ràng buộc chặt chẽ. Ràng buộc này phức tạp, tồn tại đẳng thức và bất đẳng thức điều kiện ràng buộc. Vì vậy, bài báo giới thiệu phương pháp hỗn hợp hàm phạt, kết hợp các ưu điểm của phương pháp nội điểm và ngoại điểm, dùng để giải bài toán tối ưu điều độ hệ thống thủy - nhiệt khi xét đến thủy điện bậc thang.

2. ĐIỀU ĐỘ PHÁT ĐIỆN TIẾT KIỆM HỆ THỐNG THỦY- NHIỆT ĐIỆN

2.1. Đặc tính ngẫu hợp thủy lực của thủy điện bậc thang

Công suất phát mỗi cấp nhà máy thủy điện không chỉ phụ thuộc yếu tố bản thân dung tích hồ chứa, đặc tính máy phát, lượng nước tự nhiên đến mà còn có quan hệ mật thiết với lượng nước tràn và lưu lượng nước phát điện của thủy điện cấp trên. Cũng có thể nói, giữa các thủy điện bậc thang tồn tại đặc tính thủy lực ngẫu hợp về không gian và thời gian (hình 1).



Hình 1. Liên hệ thủy lực thủy điện bậc thang

Trong đó: $q_i(t)$ là nước tự nhiên đến hồ chứa; $Q_i(t)$ là lưu lượng nước phát điện (m^3/s); $y_i(t)$ là lượng nước tràn; τ là thời gian dòng chảy từ thủy điện cấp trên xuống cấp dưới, tức là thời gian trễ dòng chảy.

2.2. Tối ưu điều độ tiết kiệm thủy điện bậc thang

Giữa lưu vực các thủy điện bậc thang không chỉ tồn tại quan hệ về thủy lực mà còn có quan hệ về điện lực, đồng thời các thủy điện bậc thang còn phải đảm nhận và phối hợp với các phương diện khác về sử dụng nước như: thủy lợi, tưới tiêu, phòng chống lũ lụt, sản xuất nước sinh hoạt... Trong tối ưu điều độ, các quan hệ này được thể hiện bằng các điều kiện ràng buộc như: cân bằng lượng nước, yêu cầu công suất phát, giới hạn mức tích nước, hạn chế lưu lượng nước phát điện, ràng buộc dốc (ràng buộc tốc độ tăng, giảm công suất phát tổ máy nhiệt điện trong nội chu kỳ điều độ), lượng khí thải ô nhiễm... [3].

2.2.1. Ràng buộc cân bằng lượng nước

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + (q_{i,t} - Q_{i,t} - y_{i,t}) + \sum_{k=1}^{R_{uk}} (Q_{k,t-\tau_{ki}} + y_{k,t-\tau_{ki}}) \quad (1)$$

Trong đó: $q_{i,t}$, $y_{i,t}$ lần lượt là lượng nước tự nhiên đến và nước tràn của thủy điện i tại thời đoạn điều độ t ; τ_{ki} là thời gian trễ dòng chảy giữa thủy điện k và i ; R_{uk} là tập hợp các thủy điện thượng lưu có liên hệ nước trực tiếp với thủy điện i .

2.2.2. Ràng buộc lượng tích nước hồ chứa và lưu lượng nước phát điện

$$\underline{V}_i \leq V_{i,t} \leq \bar{V}_i \quad (2)$$

$$\underline{Q}_i \leq Q_{i,t} \leq \bar{Q}_i \quad (3)$$

Trong đó: \underline{V}_i , \bar{V}_i là dung tích cực tiểu và cực đại hồ chứa thủy điện i ; \underline{Q}_i , \bar{Q}_i là lưu lượng nước phát điện cực tiểu và cực đại tổ máy thủy điện i .

2.2.3. Ràng buộc công suất phát

$$\underline{P}_i \leq P_{i,t} \leq \bar{P}_i \quad (4)$$

Trong đó: \underline{P}_i , \bar{P}_i là công suất phát cực tiểu và cực đại của tổ máy i .

Công suất phát tổ máy thủy điện i phụ thuộc vào dung tích hồ chứa và lưu lượng nước phát điện, được tính theo công thức:

$$P_{i,t} = c_{1i}V_{i,t}^2 + c_{2i}Q_{i,t}^2 + c_{3i}V_{i,t}Q_{i,t} + c_{4i}V_{i,t} + c_{5i}Q_{i,t} + c_{6i} \quad (5)$$

Trong đó: c_{1i} , c_{2i} , c_{3i} , c_{4i} , c_{5i} , c_{6i} là các hệ số đặc trưng cho sự chuyển hóa nước - điện.

Điều độ tối ưu giữa các thủy điện bậc thang thông thường lựa chọn tổng lượng phát điện cực đại, lượng tích nước hồ chứa cực đại, lượng nước tiêu hao cực tiểu, lượng nước tràn cực tiểu làm mục tiêu tối ưu. Trong tối ưu tiết kiệm và bảo vệ môi trường, lựa chọn lượng nước tràn cực tiểu làm mục tiêu tối ưu, được biểu thị như sau:

$$\min f = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^4 (V_{i,t-1} + q_{i,t} + Q_{i-1,t-\tau} + y_{i-1,t-\tau} - Q_i - V_{i,t}) \quad (6)$$

2.3. Khảo sát thủy điện bậc thang tối ưu điều độ tiết kiệm hệ thống thủy - nhiệt điện

Thông thường, chi phí sản xuất và vận

hành của nhiệt điện bao gồm chi phí nhiên liệu, chi phí vận hành, khấu hao thiết bị, chi phí trả lương... Trong đó, chi phí nhiên liệu là ảnh hưởng nhất đến việc sản xuất điện năng. Do đó hàm số mục tiêu thông thường được chọn là cực tiểu chi phí nhiên liệu của hệ thống điện khảo sát. Đặc tính tiêu hao nhiên liệu tổ máy nhiệt điện được tính bởi công thức sau:

$$f_1(P_{j,t}) = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^3 (a_j + b_j P_{j,t} + c_j P_{j,t}^2) * u_{j,t} \quad (7)$$

Trong đó:

T là chu kì điều độ; $P_{j,t}$ là công suất phát tổ máy nhiệt điện; a_j, b_j, c_j là các hệ số đặc tính tiêu hao nhiên liệu tổ máy phát nhiệt điện; $u_{j,t}$ là biến số chỉ trạng thái của tổ máy phát i tại thời đoạn t ; $u_{j,t} = 1$ hoặc $u_{j,t} = 0$ tương ứng khi tổ máy đang vận hành hoặc dừng máy.

Trong quá trình vận hành, các nhà máy nhiệt điện sinh ra chất thải ô nhiễm, chủ yếu bao gồm: khí SO_2, CO_2 , các loại khí NO_x và bụi bẩn. Trong khuôn khổ bài báo chỉ khảo sát lượng khí ô nhiễm phát thải SO_2, CO_2 và NO_x . Lượng khí phát thải nhiệt điện được biểu thị như sau:

$$f_2(P_{j,t}) = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^3 (\alpha_j + \beta_j P_{j,t} + \gamma_j P_{j,t}^2) \quad (8)$$

Trong đó: $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$ là các hệ số đặc trưng cho hàm phát thải khí ô nhiễm của nhiệt điện.

Các tổ máy nhiệt điện phải thỏa mãn các điều kiện ràng buộc riêng như: giới hạn công suất phát, ràng buộc dốc. Ngoài ra còn phải thỏa mãn các ràng buộc hệ thống khi liên hợp điều độ với các thủy điện

(cân bằng công suất, dự phòng công suất phát hệ thống) [4].

2.3.1. Ràng buộc công suất phát

$$u_{j,t} \underline{P}_j \leq P_{j,t} \leq u_{j,t} \bar{P}_j \quad (9)$$

Trong đó: $\underline{P}_j, \bar{P}_j$ là công suất phát cực tiểu và cực đại của tổ máy j .

Nếu $u_{j,t} = 0$ thì, ta có: $0 \leq P_{j,t} \leq 0$, lấy công suất phát tổ máy là 0, tức $P_{j,t} = 0$.

Nếu $u_{j,t} = 1$ thì, ta có: $\underline{P}_j \leq P_{j,t} \leq \bar{P}_j$.

2.3.2. Ràng buộc dốc

$$P_j^{down} \leq |u_{j,t} P_{j,t} - u_{j,t-1} P_{j,t-1}| \leq P_j^{up} \quad (10)$$

Trong đó: P_j^{up}, P_j^{down} là hạn chế tốc độ tăng và giảm công suất phát tổ máy nhiệt điện trong một thời đoạn điều độ.

2.3.3. Ràng buộc cân bằng công suất hệ thống

Trong mọi thời đoạn điều độ, tổng công suất phát của các thủy điện phải cân bằng công suất yêu cầu phụ tải, tức là:

$$\sum_{i=1}^4 P_{i,t} + \sum_{j=1}^3 P_{j,t} - P_t^D = 0 \quad (11)$$

Trong đó: P_t^D là công suất phụ tải yêu cầu.

2.3.4. Ràng buộc dự phòng hệ thống

$$\sum_{i=1}^4 \bar{P}_i + \sum_{j=1}^3 \bar{P}_j \geq P_t^D + R_t \quad (12)$$

Trong đó: R_t là công suất dự phòng hệ thống yêu cầu tại thời đoạn điều độ t .

Quy nạp lại, khảo sát thủy điện bậc thang trong mô hình tối ưu điều độ tiết kiệm hệ thống thủy - nhiệt điện, hàm mục tiêu là:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f_1(x) = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^3 (a_j + b_j P_{j,t} + c_j P_{j,t}^2) \\ \min f_2(x) = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^3 (\alpha_j + \beta_j P_{j,t} + \gamma_j P_{j,t}^2) \\ \min f_3(x) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^4 (V_{i,t-1} + q_{i,t} + Q_{i-1,t-\tau} + y_{i-1,t-\tau} - Q_{i,t} - V_{i,t}) \end{array} \right. \quad (13)$$

2.4. Chuyển đổi quy mô chiến lược điều độ tiết kiệm hệ thống thủy - nhiệt điện

Căn cứ vào 3 hàm số mục tiêu của công thức (13), ta được hàm số mục tiêu độ thỏa mãn, trong đó x là vector quyết sách, $X_p[f_n(x)]$ là hàm số mục tiêu độ thỏa mãn; f_n^- và f_n^+ ($n = 1,2,3$) phân biệt là giá trị cực tiểu hàm mục tiêu, giá trị lớn nhất mà biến quyết sách có thể nhận được.

$$\left\{ \begin{array}{l} X_p[f_1(x)] = [f_1^- - f_1(x)]/[f_1^- - f_1^+] \\ X_p[f_2(x)] = [f_2^- - f_2(x)]/[f_2^- - f_2^+] \\ X_p[f_3(x)] = [f_3^- - f_3(x)]/[f_3^- - f_3^+] \end{array} \right. \quad (14)$$

Từ công thức trên, kích thước hàm mục tiêu được chuyển hóa thành giá trị nằm giữa khoảng (0,1) của giá trị độ thỏa mãn, nếu $X_p[f_n(x)]$ càng tiệm cận với 1 thì càng thỏa mãn yêu cầu của quyết sách. Hàm số phụ sau khi chuyển hóa là $X_p[f_n(x)]$ có thể cấu thành hàm số mục tiêu thống nhất như sau:

$$f_p(x) = \sum_{n=1}^3 \omega_n X_p[f_n(x)] \quad (15)$$

Trong công thức (15), ω_n ($n=1,2,3$), thỏa mãn: $\sum_{n=1}^3 \omega_n = 1$. ω_n tùy thuộc vào mức độ

quan trọng của hàm mục tiêu phụ mà khác nhau. Dựa vào phương pháp xử lý hàm số

đa mục tiêu và đa quy tắc tối ưu ở trên, có thể thành lập mô hình toán học điều độ tiết kiệm hệ thống thủy - nhiệt điện nhiều ràng buộc, bao hàm thủy điện bậc thang.

3. PHƯƠNG PHÁP TỐI ƯU DỰA VÀO NỘI - NGOẠI ĐIỂM HÀM SỐ PHẠT [5,6]

3.1. Nguyên lý cơ bản của phương pháp hàm phạt hỗn hợp

Phương pháp hàm phạt hỗn hợp kết hợp giữa phương pháp nội điểm và phương pháp ngoại điểm, giải đồng thời các đẳng thức và bất đẳng thức ràng buộc tối ưu, phù hợp giải bài toán tối ưu đa mục tiêu và đa ràng buộc của bài viết này, nguyên lý như sau:

Giả thiết hàm số mục tiêu là: $\min_{X \in R^n} f(X)$

Điều kiện ràng buộc:

$$\left\{ \begin{array}{l} g_u(X^*) \leq 0 (u=1,2,\dots,m) \\ h_v(X^*) = 0 (v=1,2,\dots,p < n) \end{array} \right. \quad (16)$$

Căn cứ vào ý tưởng cơ bản của phương pháp hỗn hợp, hàm số mục tiêu mới của hàm phạt do 2 bộ phận cấu thành, một bộ phận tương ứng với đẳng thức ràng buộc và bộ phận còn lại tương ứng với bất đẳng thức ràng buộc. Hàm phạt hỗn hợp thông thường được biểu đạt như sau:

$$\varphi(X, r^{(k)}, M^{(k)}) = f(X) + r^{(k)} \sum_{u=1}^m \frac{1}{g_u(X)} + M^{(k)} \left\{ \sum_{u \in I_2} [g_u(X)]^2 + \sum_{v=1}^p [h_v(X)]^2 \right\} \quad (17)$$

Trong đó:

$r^{(k)} \sum_{u=1}^m \frac{1}{g_u(X)}$ là hạng số trở ngại;

$$r^{(k)} \sum_{u=1}^m \frac{1}{g_u(\mathbf{X})} + M^{(k)} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{u \in I_2} [g_u(\mathbf{X})]^2 \\ + \sum_{v=1}^p [h_v(\mathbf{X})]^2 \end{array} \right\} \text{ là hạng}$$

số phạt, yếu tố phạt có thể lựa chọn dựa theo phương pháp nội điểm, dựa theo kinh nghiệm, thường chọn $M^{(k)} = 1/\sqrt{r^{(k)}}$. Lấy hạng số phạt dùng thống nhất $r^{(k)}$ biểu thị, khi đó hàm số phạt hỗn hợp là:

$$\varphi(\mathbf{X}, r^{(k)}) = f(\mathbf{X}) - r^{(k)} \sum_{u \in I_1} \frac{1}{g_u(\mathbf{X})} + \frac{1}{r^{(k)}} \left\{ \sum_{u \in I_2} [g_u(\mathbf{X})]^2 + \sum_{v=1}^p [h_v(\mathbf{X})]^2 \right\} \quad (18)$$

$$r^{(0)} > r^{(1)} > \dots > r^{(k)} > r^{(k+1)} > \dots > 0$$

$$\text{mà } \lim_{k \rightarrow \infty} r^{(k)} = 0$$

$$I_1 = \{i | g_u(\mathbf{X}^{(k)}) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m\}$$

$$I_2 = \{i | g_u(\mathbf{X}^{(k)}) > 0, i = 1, 2, \dots, m\}$$

Phương pháp hỗn hợp và phương pháp nội/ngoại điểm như nhau, chúng đều thuộc phương pháp cực tiểu hóa không ràng buộc. Khi sử dụng hàm số phạt hỗn hợp ở trên, giải quyết nó mang đặc điểm của phương pháp nội điểm. Khi đó, nghiệm xuất phát $X^{(0)}$ phải là nội điểm, mà $r^{(0)}$ lựa chọn dựa theo phương pháp nội điểm, quá trình lặp cũng tương tự như phương pháp nội điểm.

3.2. Quá trình tối ưu hóa dựa trên phương pháp hàm phạt hỗn hợp

Bước 1: Chọn yếu tố phạt bắt đầu $r^{(1)} > 0$, $c > 2$, độ chính xác cho phép $\varepsilon > 0$;

Bước 2: Chọn điểm bắt đầu $X^{(0)}$, thỏa mãn $h_v(X^{(0)}) \neq 0, g_u(X^{(0)}) < 0$;

Bước 3: Gọi $k = 1$, lấy $X^{(k-1)}$ là điểm bắt

đầu, giải quyết vấn đề tối ưu không ràng buộc $\min_{X \in R^n} f(X)$, giả sử nghiệm là $X^{(k)} = X^*(r^{(k)})$;

Bước 4: Sử dụng điểm cực tiểu gần đúng vừa biết để tiến hành ngoại suy, định nghĩa dưới đây miêu tả ước lượng điểm cực tiểu bậc 1 và bậc 2:

$$\hat{X} = X^{(k)} + (X^{(k)} - X^{(k-1)}) / (\sqrt{c} - 1)$$

$$\hat{X} = [X^{(k-2)} - (c + \sqrt{c})X^{(k-1)} + \sqrt{c}X^{(k)}] / [(c-1)(\sqrt{c}-1)]$$

Nếu $g_u(\hat{X}) < 0$ thì chọn mới $X^{(k)} = \hat{X}$, nếu không thì loại bỏ \hat{X} , tiếp tục quá trình.

Bước 5: Kiểm tra tính hội tụ, nếu:

$$B = \left\{ \begin{array}{l} -r^{(k)} \sum_{u \in I_1} \frac{1}{g_u(\mathbf{X})} + \frac{1}{r^{(k)}} \sum_{u \in I_2} [g_u(\mathbf{X})]^2 \\ + \frac{1}{r^{(k)}} \sum_{v=1}^p [h_v(\mathbf{X})]^2 \end{array} \right\} \leq \varepsilon$$

thì xuất kết quả $X^* = X^{(k)}$, quá trình kết thúc; nếu không chọn $r^{(k+1)} = r^{(k)}/c$, thay $k = k+1$, tiếp tục chuyển bước 3.

4. DỰA VÀO PHƯƠNG PHÁP HÀM PHẠT HỖN HỢP CHUYÊN HÓA THÀNH TỐI ƯU KHÔNG RÀNG BUỘC

Nhân tố phạt ban đầu $r^{(0)}$ lựa chọn quá lớn, sẽ làm gia tăng số lần thay thế lặp lại; quá bé sẽ làm cho hàm số mục tiêu mới có hình thái xấu, thậm chí dẫn đến khó hội tụ. Vì thế, bài báo đề xuất một cải tiến phương pháp hàm số phạt, tức là sử dụng hàm số mục tiêu và điều kiện ràng buộc thành lập ma trận Hessian, đồng thời dựa vào ma trận Hessian để cấu tạo hàm số nhân tử Lagrange, lấy vấn đề khắc phục giá trị nhân tố phạt lựa chọn ban đầu

không hợp lý, đồng thời kết hợp phương pháp ngoại điểm hàm số phạt để khôi phục nghiệm lựa chọn bắt đầu phải nằm trong hạn chế phạm vi khả thi. Sau đó, lặp lại hàm số mục tiêu cấu tạo bao hàm ma trận Hessian, lấy nó chuyển hóa thành hình thức hàm số mục tiêu của hàm số phạt hỗn hợp.

Điều kiện ràng buộc căn cứ vào hình thức chuyển hóa $g_u(X^*) \leq 0$ ($u = 1, 2, \dots, m$) và $h_v(X^*) = 0$ ($v = 1, 2, \dots, p < n$).

• Thuộc về điều kiện ràng buộc $g_u(X^*) > 0$ là: $V_{i,t} - \underline{V}_i > 0$; $Q_{i,t} - \underline{Q}_i > 0$; $P_{i,t} - \underline{P}_i > 0$;

$$P_{j,t} - \underline{P}_j > 0; u_{j,t-1} P_{j,t} - u_{j,t} P_{j,t-1} + P_j^{down} > 0$$

• Thuộc về điều kiện ràng buộc $h_v(X^*) = 0$ là:

$$\begin{cases} V_{i,t} - V_{i,t-1} - (q_{i,t} - Q_{i,t} - y_{i,t}) = 0 \\ V_{i,t} - V_{i,t-1} - (q_{i,t} - Q_{i,t} - y_{i,t}) + \sum_{k=1}^{R_{ik}} (Q_{k,t-\tau_{ki}} + y_{k,t-\tau_{ki}}) = 0 \\ i = 2, 3, 4; t = 1, 2, \dots, T \end{cases}$$

$$u_{j,t} = 0 \text{ hoặc } u_{j,t-1} = 0; \sum_{i=1}^4 P_{i,t} + \sum_{j=1}^3 P_{j,t} - P_t^D = 0$$

• Thuộc về điều kiện ràng buộc $g_u(X^*) \leq 0$ là: $V_{i,t} - \underline{V}_i \leq 0$; $Q_{i,t} - \underline{Q}_i \leq 0$; $P_{i,t} - \underline{P}_i \leq 0$;

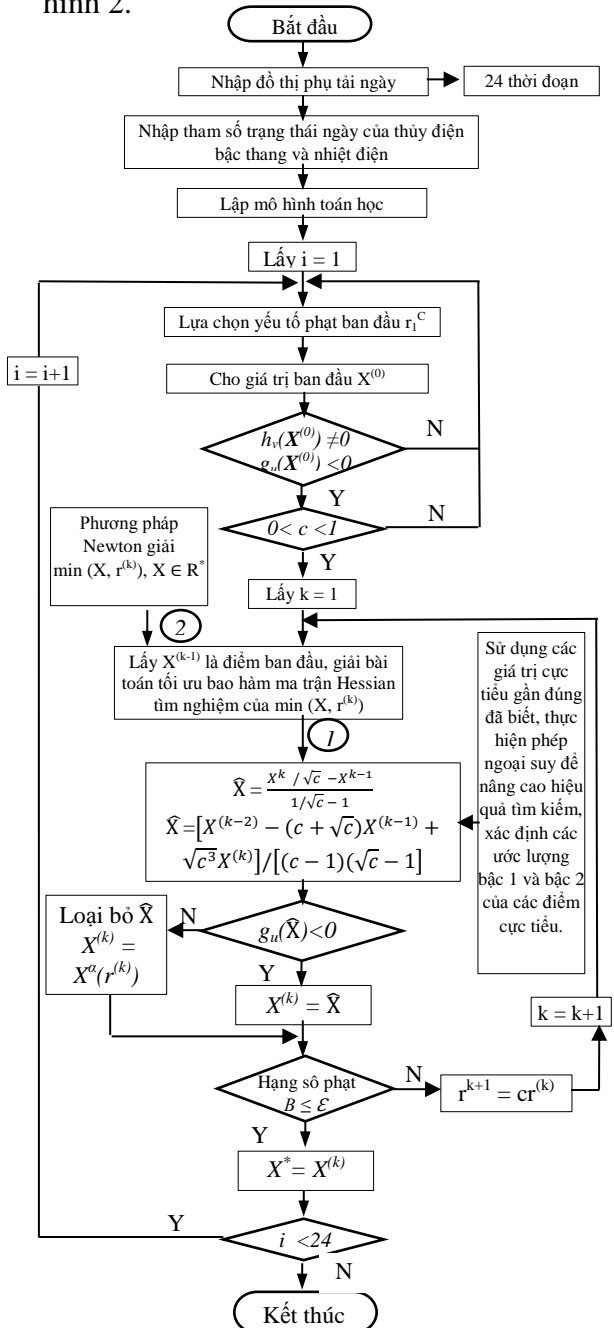
$$P_{j,t} - \underline{P}_j \leq 0; u_{j,t} P_{j,t} - u_{j,t-1} P_{j,t-1} - P_j^{up} \leq 0$$

Khi đó, hàm số phạt của phương pháp hỗn hợp được biểu thị như công thức (18), thành lập hàm số nhân tử Lagrange của ma trận Hessian, ta được hàm số mục tiêu mới (19):

$$H[\varphi(X, r^{(k)})] = H[f(X)] - \lambda_1 H \left[r^{(k)} \sum_{u \in I_1} \frac{1}{g_u(X)} \right] + \lambda_2 H \left\{ \frac{1}{r^{(k)}} \left[\sum_{u \in I_2} [g_u(X)]^2 + \sum_{v=1}^p [h_v(X)]^2 \right] \right\} \quad (19)$$

Trong đó: λ_1 và λ_2 là các nhân tử Lagrange.

Dựa theo phương pháp hàm phạt hỗn hợp cải tiến ở trên (mục 4), lưu đồ thuật giải của mô hình tối ưu điều độ đa mục tiêu của hệ thống thủy - nhiệt điện khi khảo sát thủy điện bậc thang được miêu tả như hình 2.



Hình 2. Lưu đồ thuật giải của phương pháp hàm phạt hỗn hợp cải tiến

5. TÍNH TOÁN VÀ PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

Lựa chọn hệ thống gồm 4 nhà máy thủy điện bậc thang và 3 nhà máy nhiệt điện (các số liệu tham khảo tài liệu [3]). Số liệu nhà máy thủy điện bảng 1÷4; số liệu đặc tính tiêu hao nhiên liệu và phát thải khí ô nhiễm cho trong bảng 5÷6.

Bảng 1. Nước tự nhiên đến hồ chứa (10⁴m³)

t (h)	Nhà máy thủy điện				t (h)	Nhà máy thủy điện			
	1	2	3	4		1	2	3	4
1	15	12	12	13	13	11	8,5	9	0
2	19	18	18	12	14	12	11	4,4	0
3	8,5	9,4	4	6,6	15	7	6	4	1,1
4	7	9	11	1,2	16	10	8,8	2	0
5	8,6	8	3	0	17	9,7	7	5,1	1,6
6	7,7	7	12	1,7	18	18,9	16	12	0
7	8,2	17	7	0	19	7,6	7	6	0
8	19	18	14	0	20	8,2	6,4	4	0
9	11	8	8,4	2,1	21	7,9	9	2,1	0
10	14	7	6	1,1	22	6	4	2	0
11	13	9	8,1	0	23	19	8,6	5,4	4,3
12	11	8	6,9	3,1	24	10,8	8	2	0

Bảng 2. Giới hạn thông số thủy điện bậc thang

N ^o	V ^{min} 10 ⁴ m ³	V ^{max} 10 ⁴ m ³	V ⁽⁰⁾ 10 ⁴ m ³	V ^(T) 10 ⁴ m ³	Q ^{max} 10 ⁴ m ³	Q ^{min} 10 ⁴ m ³	P ^{min} MW	P ^{max} MW
1	80	150	120	120	5	15	0	500
2	60	160	90	70	6	20	0	500
3	100	240	170	170	10	30	0	500
4	70	300	120	180	6	30	0	500

Bảng 3. Hệ số đặc tính chuyển hóa điện - nước

N ^o	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
1	-0,004	-0,42	0,03	0,9	10	-50
2	-0,004	-0,3	0,015	1,14	9,5	-70
3	-0,003	-0,3	0,025	1,05	10,5	-80
4	-0,003	-0,31	0,027	1,44	14	-90

Bảng 4. Thời gian trễ dòng chảy các thủy điện

N ^o	1	2	3	4
t(h)	2	3	4	0

Bảng 5. Thông số giới hạn công suất và các hệ số hàm chi phí nhiệt điện

N ^o	a(\$/h)	b(\$/MWh)	c(\$/MW ² h)	P ^{min}	P ^{max}
1	100	2,45	0,0012	20	175
2	120	2,32	0,001	40	300
3	150	2,1	0,0015	50	500

Bảng 6. Thông số phụ tải yêu cầu hệ thống

t(h)	1	2	3	4	5	6	7	8
Phụ tải (MW)	750	780	700	650	670	800	950	1100
t(h)	9	10	11	12	13	14	15	16
Phụ tải (MW)	1090	1080	1100	1150	1110	1030	1010	1060
t(h)	17	18	19	20	21	22	23	24
Phụ tải (MW)	1050	1120	1070	1050	910	860	850	1150

Bài báo sử dụng phần mềm tối ưu GAMS\DIICOPT (General Algebraic Modeling System\Discrete and Continuous OPTimizer) để giải quyết bài toán liên hợp điều độ thủy - nhiệt điện với mô hình toán học và số liệu ở trên để tính toán. GAMS là một hệ thống mô hình toán học cao cấp [7], lần đầu tiên được ngân hàng thế giới do Brooke, Kendrickm và Meeraus nghiên cứu và phát triển năm 1992, có thể dùng để giải quyết các bài toán thuộc về vấn đề: quy hoạch tuyến tính (LP), quy hoạch phi tuyến (NLP), quy hoạch hỗn hợp số nguyên (MIP), quy hoạch hỗn hợp số nguyên phi tuyến (MINLP)... Giao diện nền tảng GAMS thân thiện, linh hoạt, chỉ cần người dùng có kỹ năng xây dựng mô hình toán học tốt, chuẩn xác theo quy phạm, có thể nhanh chóng và dễ dàng tạo và sửa đổi các mô hình trong nền tảng giao diện, và cũng có thể chọn bất kỳ công cụ giải nào để có thể thực hiện nhiệm vụ giải quyết bài toán một cách dễ dàng. GAMS cho phép người dùng tập trung nhiều hơn vào

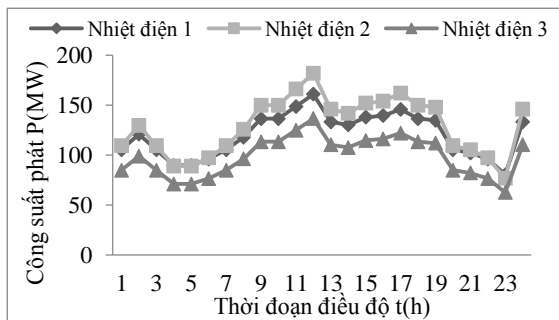
quá trình mô hình hóa toán học, điều này có tác dụng lớn đến việc nâng cao hiệu quả tính toán của người dùng. Nhìn chung, so với các công cụ mô hình hóa khác, chẳng hạn như LINGO, UNDO và AMPL, quá trình tính toán GAMS đòi hỏi ít thời gian hơn và có kết quả tính toán tốt, được đánh giá cao, kết quả tính toán như bảng 7÷8, và hình 3÷5.

Bảng 7. Kết quả tính toán hàm số mục tiêu

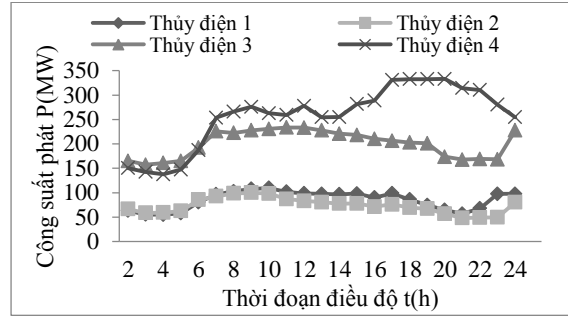
Chi phí nhiên liệu Nhiệt điện (USD)	Lượng khí thải (kg)	Nước tràn ($10^4 m^3$)
29502,34	3002,419	0,155

Bảng 8. Lưu lượng nước phát điện các thủy điện bậc thang ($10^4 m^3$)

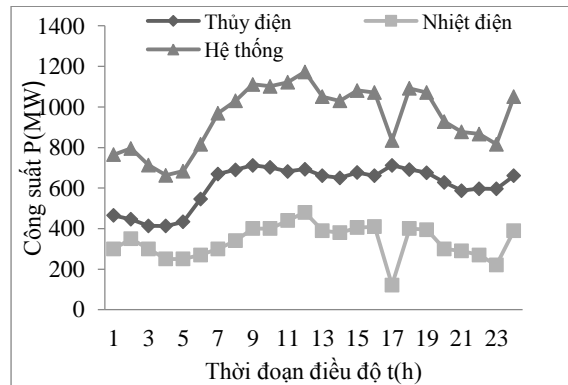
t(h)	TĐ1	TĐ2	TĐ3	TĐ4	t(h)	TĐ1	TĐ2	TĐ3	TĐ4
1	6,8	8,7	14,3	7,5	13	11	11	29,2	16,2
2	5,9	7,5	13	6,7	14	11	11	29,8	16,5
3	5,1	6,1	12,1	6,1	15	11	11	28,4	20,6
4	5	6	12	6	16	9,5	10	29,1	17,9
5	5,3	6,4	12,4	6,2	17	11	11	31,5	28,3
6	8	11	15,5	8,9	18	8,8	9,5	18,5	28,5
7	10,8	12	28,3	15,9	19	7,2	9,5	17,4	28,3
8	12	13	29,8	18,8	20	6,1	7,4	13,1	29,2
9	13,7	14	25,6	25,7	21	5,3	6,3	12,1	21,6
10	14,9	15	26,2	24,3	22	6,6	6,3	12,2	20,9
11	11,9	12	29	19,9	23	11	6,1	12,1	16,4
12	11,1	11	29,3	20,6	24	11	11	29,2	16,2



Hình 3. Công suất phát các Nhiệt điện (P/MW)



Hình 4. Công suất phát các Thủy điện (P/MW)



Hình 5. Công suất phát các thủy điện, nhiệt điện và công suất hệ thống yêu cầu

Đối với các nhà máy thủy điện bậc thang cấp 2 và cấp 3 phát công suất tương đối ổn định là do khả năng điều tiết nước tốt từ ảnh hưởng liên hợp điều độ với các thủy điện thượng lưu, hoàn toàn phù hợp với thực tế điều độ hệ thống điện. Hình 5 cho ta thấy thủy điện đóng góp công suất phát lớn hơn nhiệt điện để tận dụng tối đa việc sử dụng tài nguyên năng lượng tái tạo, giảm lượng than đốt phát điện từ đó nâng cao tính hiệu quả kinh tế phát điện, ngoài ra nó còn thể hiện tính phủ định trong điều độ một cách rõ ràng.

6. KẾT LUẬN

Khảo sát thủy điện bậc thang trong điều độ tối ưu hệ thống thủy - nhiệt điện là một

vấn đề tối ưu phức tạp, nhiều điều kiện ràng buộc, nhiều hạng số, phi lồi, phi tuyến, nhiều thời đoạn. Bài báo đã xây dựng mô hình tối ưu điều độ kinh tế và tiết kiệm với đa mục tiêu tối ưu: cực tiểu lượng nước tràn thủy điện, cực tiểu chi phí tiêu hao nhiên liệu và lượng khí phát

thải ô nhiễm. Thông qua việc mô phỏng một hệ thống điện thủy - nhiệt điện bao gồm bốn thủy điện bậc thang và ba nhà máy nhiệt điện, các kết quả tối ưu hóa đã nghiệm chứng tính khả thi của thuật toán và mục tiêu tối ưu được minh chứng rõ ràng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Wu Jiekang, Tang Litao, Huang Huan, et al. Multi-objective economic scheduling for hydrothermal power systems based on genetic algorithm and data envelopment analysis. Power System Technology, 2011.
- [2] Thang Trung Nguyen, Dieu Ngoc Vo. Solving Short-Term Cascaded Hydrothermal Scheduling Problem Using Modified Cuckoo Search Algorithm. International Journal of Grid and Distributed Computing, vol. 9, No. 1 (2016): 67-78.
- [3] Basu M. An interactive fuzzy satisfying method based on evolutionary programming technique for multi-objective short-term hydrothermal scheduling. Electric Power Systems Research, 2004, 69(2-3): 277-285.
- [4] Christoforos E, Anastasios B.G, John V.P.B. A genetic algorithm solution approach to the hydrothermal coordination problem. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 1356-136.
- [5] Long Jun, Mo Qunfang, Zeng Jian. A stochastic programming based short-term optimization scheduling strategy considering energy conservation for power system containing wind farms. Power System Technology, 2011, 35(9): 133-138.
- [6] Franco P E C, Carvalho M.F., Soares S.A. network flow model for short term hydro dominated hydrothermal scheduling problems. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 1016-1022.
- [7] Richard E. Rosenthal. GAMS - A User's Guide. GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA, 9.2014.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Trần Hoàng Hiệp tốt nghiệp Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2003, nhận bằng Thạc sĩ năm 2005 chuyên ngành hệ thống điện. Tác giả hiện công tác tại Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực và là nghiên cứu sinh tại Viện Nghiên cứu tối ưu hóa trong hệ thống điện và tự động hóa - Quảng Tây, Trung Quốc.

Lĩnh vực nghiên cứu: tối ưu hóa trong hệ thống điện, thị trường điện, kỹ thuật điện cao áp, vật liệu điện.



Tác giả Lê Xuân Sanh tốt nghiệp Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2003; nhận bằng Thạc sĩ năm 2007 chuyên ngành hệ thống điện; bằng Tiến sĩ năm 2012 tại Đại học Khoa học và Công nghệ Hoa Trung, Trung Quốc, chuyên ngành hệ thống điện và tự động hóa. Tác giả hiện đang công tác tại Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: lưới điện thông minh, lưới điện phân phối, tự động hóa hệ thống điện, thị trường điện.

