

ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP QUY HOẠCH TUYẾN TÍNH ĐỂ GIẢI BÀI TOÁN VẬN HÀNH TỐI ƯU CÁC NHÀ MÁY TRONG HỆ THỐNG THỦY ĐIỆN BẠC THANG

APPLICATION OF LINEAR PROGRAMMING METHOD TO SOLVING THE SHORT-TERM
OPTIMAL DISPATCH PROBLEM FOR HYDRO POWER PLANTS IN A CASCADE

Trần Tấn Vinh

*Trường Cao đẳng Công nghệ Thông tin,
Đại học Đà Nẵng*

Email: ttvinh@cit.udn.vn

Nguyễn Văn Diệp

Công ty Cổ phần Thủy điện A Vương

TÓM TẮT

Bài toán phân bố tối ưu công suất vận hành các nhà máy trong hệ thống thủy điện bậc thang là bài toán có hàm mục tiêu và các phương trình ràng buộc thuộc dạng phi tuyến. Bài báo trình bày việc áp dụng phương pháp quy hoạch tuyến tính để giải bài toán phân bố tối ưu công suất phát của các nhà máy trong hệ thống thủy điện bậc thang - với mục tiêu tối ưu là cực đại hóa giá trị của lượng nước chứa trong hồ vào cuối chu kỳ khảo sát - bằng cách tuyến tính hóa từng đoạn hàm mục tiêu cũng như các phương trình ràng buộc trong chu kỳ khảo sát. Để minh họa, trong bài báo đã sử dụng công cụ quy hoạch tuyến tính (hàm linprog) trong gói Optimization Toolbox của Matlab để tính toán phương thức vận hành tối ưu của hệ thống thủy điện bậc thang A Vương – Thu Bồn khi chỉ xét điều tiết ngắn hạn.

Từ khóa: Phương pháp quy hoạch tuyến tính; tuyến tính hóa; hệ thống thủy điện bậc thang; vận hành tối ưu; phân bố công suất tối ưu

ABSTRACT

The optimal power dispatch of plants in a cascade of hydro-power plants is a problem consisting of nonlinear objective function and constraints. This paper proposes an application of linear programming to solving a short-term optimal dispatch problem for hydro power plants in a cascade using the method of linearizing nonlinear objective function and constraints in a considered period. In this paper, the optimal object is the maximization of value of water storage in the reservoir at the end of the considered period. For illustration, in this paper, the function "linprog" (in Optimization Toolbox of Matlab) is used to solve the short-term optimal operation problem of A Vương - Thu Bồn Cascade of hydro power plants.

Key words: Linear programming; linearizing; cascade of hydro power plant; optimal operation; optimal power dispatch

1. Đặt vấn đề

Hệ thống thủy điện bậc thang gồm các nhà máy vừa nối tiếp vừa song song với nhau, có nhiệm vụ cung cấp điện cho phụ tải có giá trị cho trước. Vấn đề đặt ra là phải tìm phương án phát điện của các nhà máy trong hệ thống bậc thang sao cho tối ưu hàm mục tiêu, mà trong bài báo này mục tiêu được xét là cực đại hóa giá trị tính bằng tiền của lượng nước tích trữ được trong các hồ chứa vào cuối chu kỳ khảo sát.

Vì các hàm mục tiêu và các bất phương trình ràng buộc là phi tuyến, nên trong bài báo này sẽ áp dụng phương pháp tuyến tính hóa hàm

mục tiêu cũng như các bất phương trình ràng buộc, để có thể áp dụng phương pháp quy hoạch tuyến tính vào việc giải bài toán phân bố tối ưu công suất cho các nhà máy trong hệ thống thủy điện bậc thang.

2. Mô hình hệ thống thủy điện bậc thang

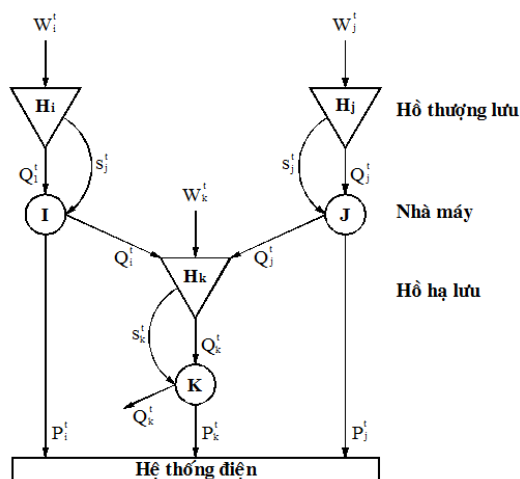
2.1. Mô hình hệ thống thủy lực [1, 3]

Mô hình hệ thống thủy lực của hệ thống thủy điện bậc thang được trình bày ở Hình 1; gồm các hồ chứa (nút) có liên hệ với nhau qua các dòng chảy qua nhà máy (nhánh).

Các hồ chứa nước ký hiệu H_k ($k = 1 \div K$, với K là số hồ chứa);

W_k^t là lưu lượng nước tự nhiên về các hồ chứa k tại thời điểm khảo sát t;

Lưu lượng nước ra khỏi các hồ chứa thượng lưu về hồ hạ lưu hoặc có thể chảy qua nhà máy k để phát điện tại thời điểm khảo sát t gọi là lưu lượng nước phát điện, ký hiệu Q_k^t ; hoặc xả qua tràn của hồ k tại thời điểm t, ký hiệu s_k^t .



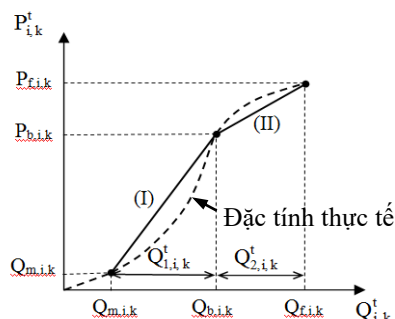
Hình 1. Mô hình hệ thống thủy điện bậc thang

2.2. Mô hình tuyến tính hóa của tổ máy [1, 3]

Công suất phát của tổ máy thứ i (thuộc nhà máy k) tại thời điểm t được tính theo biểu thức:

$$P_{i,k}^t = 9,81 \cdot 10^{-6} \eta_{i,k}^t Q_{i,k}^t H_{i,k}^t \quad [\text{MW}] \quad (1)$$

Trong đó: $Q_{i,k}^t$ là lưu lượng nước chảy qua tua bin (m^3/s), $H_{i,k}^t$ là cột nước hữu ích (m) và $\eta_{i,k}^t$ là hiệu suất của tổ máy thứ i trong nhà máy thứ k tại thời điểm t.



Hình 2. Tuyến tính hóa đặc tính phát của tổ máy

Trong thực tế, đặc tính vận hành của tổ máy thủy lực là một hàm phi tuyến và không lồi

ở vùng công suất thấp, như đường nét đứt trên Hình 2. Để tính toán theo phương pháp quy hoạch tuyến tính, đặc tính này có thể được tuyến tính hóa thành 02 đoạn thẳng (I) và (II) với 03 điểm chia: điểm có lưu lượng qua turbine nhỏ nhất ($Q_{m,i,k}$, $P_{m,i,k}$), điểm có hiệu suất cực đại ($Q_{b,i,k}$, $P_{b,i,k}$) và điểm có độ mở cánh hướng cực đại ($Q_{f,i,k}$, $P_{f,i,k}$) như trên Hình 2.

Khi đó, lưu lượng nước qua turbine và công suất phát của tổ máy thứ i thuộc nhà máy k sẽ là:

$$Q_{i,k}^t = Q_{m,i,k} + Q_{1,i,k}^t + Q_{2,i,k}^t \quad (2)$$

$$P_{i,k}^t = P_{m,i,k} + \gamma_1 Q_{1,i,k}^t + \gamma_2 Q_{2,i,k}^t \quad (3)$$

Trong đó: γ_1 và γ_2 là độ dốc của các đoạn thẳng (I) và (II); $Q_{1,i,k}^t$, $Q_{2,i,k}^t$ lần lượt là lưu lượng tương ứng với đoạn (I) và (II) của tổ máy thứ i thuộc nhà máy k tại thời điểm t.

3. Mô hình bài toán tối ưu

Bài toán tối ưu được đặt ra là cần tìm công suất phát của các tổ máy i ($i \in I$) trong các nhà máy k ($k \in K$), ký hiệu là $P_{i,k}^t$, sao cho đạt cực đại hàm mục tiêu và thỏa mãn các ràng buộc về điện và thủy lực.

3.1. Hàm mục tiêu

Mục tiêu tối ưu được đặt ra trong bài báo này là cực đại hóa giá trị tính bằng tiền của lượng nước tích trữ trong các hồ chứa của hệ thống bậc thang vào cuối một chu kỳ khảo sát T [3, 4]:

$$\sum_{k=1}^K \lambda_k v_k^T \rightarrow \max \quad (4)$$

Trong đó: λ_k là giá trị nước của hồ chứa k trong thời gian khảo sát, $\lambda_k = e_k^t 10^6 / k_{Q,k}^t$ với e_k^t là giá tiền điện thương phẩm của nhà máy k tại thời điểm t [$\text{đ}/\text{kWh}$] và $k_{Q,k}^t$ là suất tiêu hao nước của nhà máy k để sản xuất 1 kWh điện năng [m^3/kWh]. v_k^T là dung tích nước của hồ chứa k vào cuối khoảng thời gian khảo sát T.

3.2. Các điều kiện ràng buộc [2,3]

3.2.1. Cân bằng công suất phát và phụ tải

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I P_{i,k}^t = \sum_{k=1}^K P_k^t = P_D^t \quad (5)$$

Trong đó: P_k^t, P_D^t lần lượt là công suất phát của nhà máy k và phụ tải của cụm nhà máy trong hệ thống bậc thang.

3.2.2. *Giới hạn công suất phát của tổ máy và nhà máy*

$$\underline{P}_{i,k} \leq P_{i,k}^t \leq \bar{P}_{i,k}; \underline{P}_k \leq P_k^t \leq \bar{P}_k \quad (6)$$

Trong đó: $\underline{P}_{i,k}$ và $\bar{P}_{i,k}$ là công suất phát cực tiểu và cực đại cho phép của tổ máy thứ i thuộc nhà máy k; $\underline{P}_k$ và $\bar{P}_k$ là giới hạn công suất phát cực tiểu và cực đại của nhà máy k.

3.2.3. *Yêu cầu dự trữ quay cho hệ thống điện*

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \bar{P}_{i,k} - \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I P_{i,k}^t = \sum_{k=1}^K \bar{P}_k - \sum_{k=1}^K P_k^t \geq P_R^t \quad (7)$$

với P_R^t là công suất dự trữ quay yêu cầu.

3.2.4. *Cân bằng nước tại nút bất kỳ*

Tại thời điểm t ở một nút k bất kỳ, tổng lưu lượng nước tự nhiên về hồ cân bằng với lưu lượng nước chạy máy, lưu lượng nước xả tràn và lưu lượng nước có được do sự thay đổi dung tích hồ chứa:

$$\left(\sum_{i=1}^I Q_i^t + s_k^t \right) + (v_k^t - v_k^{t-1}) \frac{K_r}{\Delta t} = W_k^t \quad (8)$$

Trong đó: W_k^t và v_k^t là lưu lượng nước tự nhiên về hồ và dung tích của hồ chứa k tại thời điểm t, (m^3/s); K_r là hệ số quy đổi từ dung tích sang lưu lượng, bằng $10^6/3600$; Δt là bước tính (s).

3.2.5. *Giới hạn lưu lượng nước qua tổ máy*

$$\underline{Q}_{i,k} \leq Q_{i,k}^t \leq \bar{Q}_{i,k} \quad (9)$$

Trong đó: $\underline{Q}_{i,k}, \bar{Q}_{i,k}$ là giới hạn lưu lượng tối thiểu và tối đa của đường ống áp lực dẫn từ hồ k vào tổ máy i của nhà máy k.

3.2.6. *Giới hạn dung tích hồ chứa*

Dung tích hữu ích của hồ chứa phải nằm trong giới hạn cực tiểu $\underline{V}_k$ và cực đại $\bar{V}_k$:

$$\underline{V}_k \leq v_k^t \leq \bar{V}_k \quad (10)$$

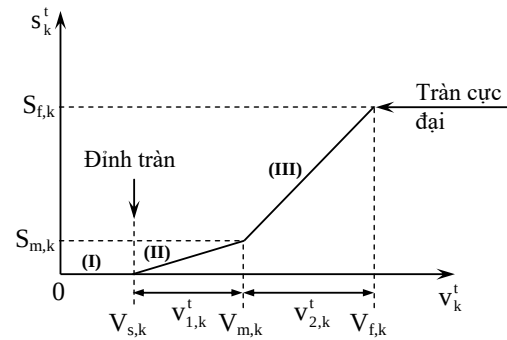
3.2.7. *Giới hạn thay đổi dung tích hồ chứa*

$$-\bar{\Delta v}_k \Delta t \leq v_k^t - v_k^{t-1} \leq \bar{\Delta v}_k \Delta t \quad (11)$$

Trong đó $\bar{\Delta v}_k$ là tốc độ tích trữ/ xả cực đại của hồ chứa thứ k.

3.2.8. *Ràng buộc xả tràn hồ chứa*

Trong tính toán, đặc tính tràn của hồ chứa được tuyến tính hóa từng thành 03 đoạn thẳng như ở Hình 3. Đoạn (I) ứng với mực nước thượng lưu thấp hơn mực nước xả tràn, đoạn (II) ứng với mực nước điểm giữa tràn và đoạn (III) ứng với mực nước tràn cực đại.



Hình 3. Đặc tính xả tràn hồ chứa

Từ Hình 3, hai biến mới được đưa vào để xác định ràng buộc xả tràn của hồ thượng lưu k theo biểu thức:

$$v_k^t = V_{s,k} + v_{1,k}^t + v_{2,k}^t \quad (12)$$

$$\text{với: } 0 \leq v_{1,k}^t \leq V_{m,k} - V_{s,k} \quad (12-a)$$

$$0 \leq v_{2,k}^t \leq V_{f,k} - V_{m,k} \quad (12-b)$$

trong đó:

$v_{1,k}^t, v_{2,k}^t$ lần lượt là dung tích ứng với đoạn (II) và đoạn (III) của đặc tính xả tràn hồ chứa k.

$V_{s,k}, V_{m,k}$ và $V_{f,k}$ lần lượt là dung tích nước ứng với mức nước tại đỉnh tràn, điểm giữa và điểm tràn cực đại của hồ chứa k. Lưu lượng xả tràn tương ứng với các mức nước này là 0, $S_{m,k}$ và $S_{f,k}$ được thể hiện trên Hình 3.

Lưu lượng nước xả tràn được biểu diễn như sau:

$$s_k^t = \sigma_1 v_{1,k}^t + \sigma_2 v_{2,k}^t \quad (13)$$

với σ_1 và σ_2 là độ dốc của các đoạn thẳng (II) và (III) của đường đặc tính xả tràn.

3.3. Bài toán quy hoạch tuyến tính

Bằng phương pháp tuyến tính hóa các đặc tính như đã trình bày trong mục 3.2 có thể thành lập được bài toán tối ưu vận hành hệ thống thủy điện bậc thang về dạng bài toán quy hoạch tuyến tính, với mô hình tổng quát như sau:

Mục tiêu: $\text{Maximize } \mathbf{Z} = \mathbf{C}^T \cdot \mathbf{X}; \quad (14)$

Các ràng buộc:

Dạng phương trình: $\mathbf{A}_{eq}\mathbf{X} = \mathbf{B}_{eq}, \quad (15-a)$

Dạng bất phương trình: $\mathbf{AX} \leq \mathbf{B}, \quad (15-b)$

Miền giới hạn của các biến: $\mathbf{L} \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{U} \quad (15-c)$

Trong đó: $\mathbf{C}$, $\mathbf{X}$, $\mathbf{B}_{eq}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{L}$, $\mathbf{U}$ là các vector; $\mathbf{A}_{eq}$, $\mathbf{A}$ là các ma trận.

Trong bài báo này, sử dụng công cụ phương pháp quy hoạch tuyến tính (hàm linprog) trong Toolbox của Matlab để giải bài toán tối ưu nói trên. Cụ thể trình tự như sau:

Bước 1: Nhập dữ liệu đầu vào gồm số lượng nhà máy trong hệ thống bậc thang (K), thời gian khảo sát T, chu kỳ khảo sát Δt , các số liệu về hồ chứa, lưu lượng nước về hồ, biểu đồ phụ tải, các đặc tính phát của các nhà máy... Tuyến tính hóa từng đoạn các đặc tính.

Bước 2: Nghiệm số $\mathbf{X}$ của bài toán gồm $P_{1,k}^t, v_{1,k}^t, v_{2,k}^t, v_k^t, q_{1,k}^t, q_{2,k}^t, q_k^t$. Kích thước của $\mathbf{X}$ là $8KT \times 1$.

Thành lập vector $\mathbf{C}$ trong biểu thức (14) dựa theo hàm mục tiêu (4); kích thước của $\mathbf{C}$ là $8KT \times 1$.

Thành lập các ma trận $\mathbf{A}_{eq}$, $\mathbf{B}_{eq}$ dựa vào các ràng buộc đẳng thức (2), (3), (5), (8), (12) và (13). Kích thước của $\mathbf{A}_{eq}$ là $(5K+1)T \times 8KT$ và của $\mathbf{B}_{eq}$ là $(5K+1)T \times 1$.

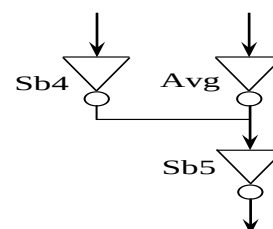
Thành lập các ma trận $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ dựa vào các ràng buộc dạng bất đẳng thức (7), (11). Kích thước của $\mathbf{A}$ là $(2K+1)T \times 8KT$ và của $\mathbf{B}$ là $(2K+1)T \times 1$

Miền giới hạn của các biến số dựa theo các ràng buộc (6), (9), (10), (12a) và (12b). Kích thước của $\mathbf{L}$ và $\mathbf{U}$ là $(8KT \times 1)$

Bước 3: Giải bài toán tối ưu bằng cách sử dụng hàm số linprog trong toolbox của Matlab.

4. Áp dụng giải bài toán thực tế

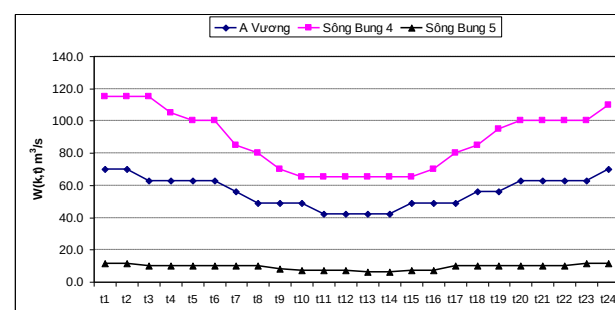
Xét hệ thống thủy điện bậc thang trên sông A Vương - Thu Bồn với 3 nhà máy là A Vương ($2 \times 105\text{MW}$), Sông Bung 4 ($2 \times 78\text{MW}$) và Sông Bung 5 ($2 \times 30\text{MW}$), gồm có 3 hồ chứa như ở Hình 4. Hồ chứa nhà máy A Vương và Sông Bung 4 có chu kỳ điều tiết năm, hồ chứa nhà máy Sông Bung 5 điều tiết ngày. Thời gian khảo sát $T = 24\text{h}$, bước thời gian khảo sát $\Delta t = 1\text{h}$ [4].



Hình 4. Thủy điện bậc thang A Vương - Thu Bồn

4.1. Các số liệu đầu vào của bài toán

4.1.1. Lưu lượng nước tự nhiên về các hồ chứa



Hình 5. Lưu lượng nước tự nhiên về các hồ

Lưu lượng nước tự nhiên về các hồ chứa được dự báo như Hình 5 [4].

4.1.2. Các thông số của hồ chứa

Các thông số ban đầu của hồ chứa giả thiết được cho như bảng sau [4]:

Bảng 1. Thông số ban đầu của các hồ chứa trong hệ thống bậc thang thủy điện

Nhà máy	$k_{Q,k}^t$ [m ³]	H_{f0k} [m]	h_{fTk} [m]	$\underline{V}_k$ [10 ⁶ m ³]	$\bar{V}_k$ [10 ⁶ m ³]	Δv_k [m ³ /s]
A Vương	1,54	362,0	361,0	77,078	343,522	2,5
Sông Bung 4	4,46	210,0	209,0	172,595	493,337	6,5
Sông Bung 5	16,16	61,0	61,0	16,984	20,518	2,0

Bảng 2. Đặc tính xả tràn tuyến tính hóa của các hồ chứa

Hồ chứa	$V_s(k)$ [10 ⁶ m ³]	$S_s(k)$ [m ³ /s]	$V_m(k)$ [10 ⁶ m ³]	$S_m(k)$ [m ³ /s]	$V_f(k)$ [10 ⁶ m ³]	$S_f(k)$ [m ³ /s]	$S_{max}(k)$ [m ³ /s]
A Vương	77,078	0,00	343,522	0,00	354,550	600,0	7120,00
Sông Bung 4	172,595	0,00	493,337	0,00	528,817	900,0	10750,00
Sông Bung 5	16,984	0,00	20,518	0,00	26,717	1500,0	17299,80

4.1.3. Biểu đồ phụ tải

Biểu đồ huy động công suất của hệ thống thủy điện bậc thang trong khoảng 24 giờ và yêu cầu dự phòng quay cho hệ thống như Hình 6 [4].

4.2. Thành lập bài toán

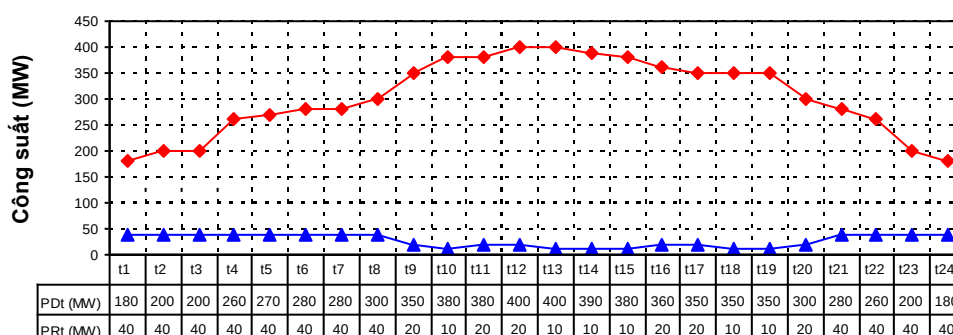
Thời gian khảo sát là $T = 24h$ và khoảng thời gian mỗi bước tính là 1h. Cần phải xác định các nghiệm công suất phát P , lưu lượng nước phát điện Q , lưu lượng nước xả tràn s và dung tích còn lại của hồ chứa v của các nhà máy tại từng thời điểm sao cho đạt cực đại hàm mục tiêu (4).

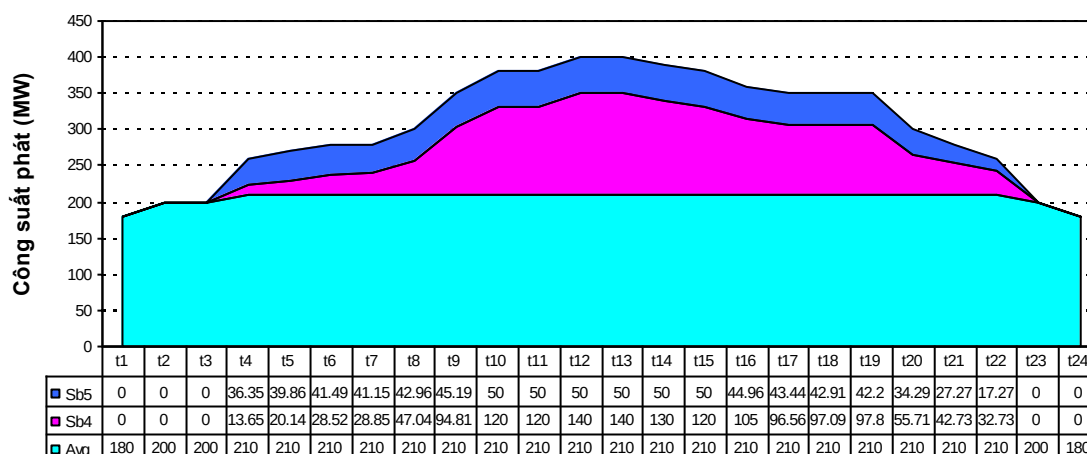
Như đã trình bày ở mục 3.3, ta thành lập

được bài toán tối ưu hóa với 576 biến trạng thái gồm 72 bộ biến số ($P, v_1, v_2, v, Q_1, Q_2, Q, s$) cho từng nhà máy vào mỗi giờ trong một ngày đêm; 384 phương trình ràng buộc, 168 bất phương trình ràng buộc, và 1.152 bất phương trình mô tả phạm vi các biến số.

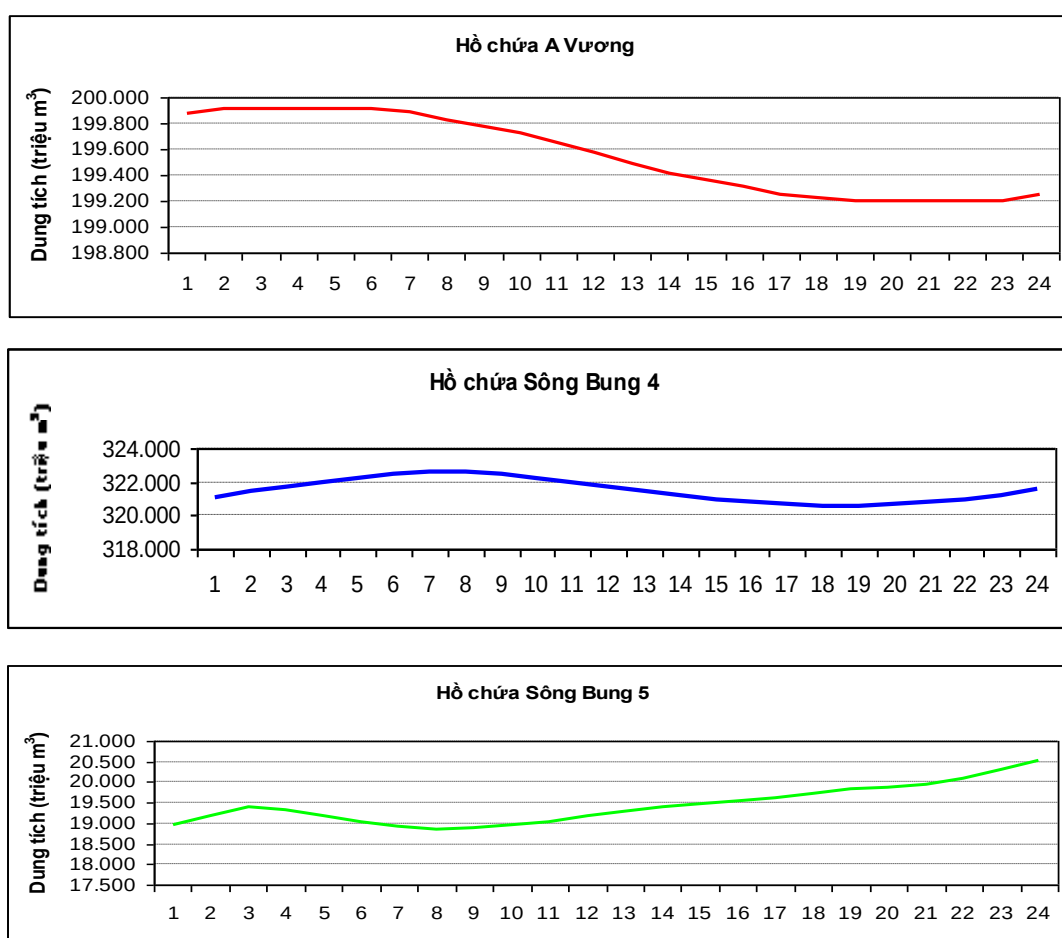
4.3. Kết quả tính toán

Bằng chương trình Matlab có sử dụng hàm linprog đã giải được bài toán tối ưu. Kết quả công suất phát tối ưu và dung tích các hồ chứa của cụm nhà máy trong hệ thống thủy điện bậc thang A Vương trong một chu kỳ khảo sát 24h được trình bày lần lượt trên Hình 7 và Hình 8.

**Hình 6.** Biểu đồ huy động công suất cho phụ tải (PDt) và dự trữ yêu cầu (PRt) của HT thủy điện bậc thang



Hình 7. Công suất phát tối ưu của các nhà máy trong hệ thống bậc thang



Hình 8. Dung tích các hồ chứa

4.4. Nhận xét

Nhà máy A Vương đảm nhận việc phát công suất nền cho cụm hệ thống thủy điện bậc thang, nên nhà máy thường vận hành ở chế độ hiệu suất cực đại (công suất phát tốt nhất) hay ở chế độ có độ mở cánh hướng cực đại (công suất

phát lớn nhất). Nhà máy Sông Bung 4 phát công suất theo nhu cầu của phụ tải: khi công suất yêu cầu của phụ tải nhỏ hồ chứa tích nước, khi nhu cầu phụ tải tăng lên nhà tăng công suất phát để đáp ứng nhu cầu của phụ tải. Do hồ chứa nhà máy Sông Bung 5 có dung tích nhỏ và chỉ điều tiết ngày, nên nhà máy phát công suất

theo lượng nước về và tích lũy đầy hồ vào cuối chu kỳ khảo sát.

5. Kết luận

Vận hành tối ưu các nhà máy trong hệ thống thủy điện bậc thang là bài toán cần thiết nhằm giảm được chi phí vận hành, tạo điều kiện cho các nhà máy hoạt động hiệu quả trong thị trường phát điện cạnh tranh. Trong thực tế, do các ràng buộc của bài toán là những phương trình và bất phương trình phi tuyến nên việc giải

bài toán tối ưu gặp nhiều khó khăn. Bằng cách tuyến tính hóa từng đoạn các đặc tính vận hành sẽ cho phép áp dụng phương pháp quy hoạch tuyến tính để giải bài toán phân bố tối ưu công suất vận hành cho các nhà máy trong một hệ thống thủy điện bậc thang. Qua ví dụ minh họa cho thấy rằng, tuy số lượng phương trình và bất phương trình ràng buộc lớn, nhưng nhờ công cụ Matlab ta có thể giải bài toán tối ưu điều tiết ngày một cách nhanh chóng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg (1996), *Power generation, operation, and control*, John Wiley & Sons, Inc.
- [2] C. Lyra, L. Roberto, and M. Ferreira (Nov 1995), "A multiobjective approach to the short-term scheduling of a hydroelectric power system", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 4, pp. 1750-1755.
- [3] Gary W. Chang and James G. Waight (July 1999), "A mixed integer linear programming based hydro unit commitment", *IEEE PES Summer Meeting*, pp. 924-928.
- [4] Nguyễn Văn Diệp, Vận hành tối ưu cụm hệ thống thủy điện bậc thang thủy điện trên sông A Vương, Thu Bồn, *Luận văn thạc sĩ*, ĐHQĐN, 2007.

(BBT nhận bài: 10/12/2013, phản biện xong: 30/12/2013)