XÂY DỰNG THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN QUÁ TRÌNH CẤP NƯỚC CHO TUỐC BIN THỦY ĐIỆN

Đặng Tiến Trung (1), Phạm Tuấn Thành (2), Hồ Quang Quý (3)
[1] *Trường Đại học Điện lực*
[2] *Học viện Kỹ thuật quân sự*
[3] *Trường Đại học Công nghiệp thực phẩm TP. Hồ Chí Minh*
Ngày nhận bài 25/10/2017, ngày nhận đăng 10/12/2017

Tóm tắt: Bài báo trình bày việc tổng hợp lệnh điều khiển van cấp nước cho tuốc bin nhà máy thủy điện vừa và nhỏ nhằm ổn định tần số điện áp phát trong điều kiện tải thay đổi trên cơ sở áp dụng lý thuyết điều khiển tối ưu.

1. MỞ ĐẦU

Một mô hình toán mô tả quan hệ giữa góc quay cánh lái hướng của van cấp nước có thế năng và động năng cho tuốc bin của tổ hợp tuốc bin - máy phát điện trong nhà máy thủy điện vừa và nhỏ đã được chúng tôi xây dựng dựa trên nguyên lý điều khiển ổn định [1], [2]. Tuy nhiên, trong công trình này, thuật toán hình thành giá trị lệnh U nhằm ổn định tần số điện áp phát ở giá trị chuẩn 50 Hz chưa được phân tích cụ thể. Hiện nay, để điều khiển van cấp nước, các nhà máy thủy điện thường áp dụng luật PID tín hiệu sai lệch giữa tần số quay hiện có của tuốc bin với tần số chuẩn ω_0. Như bài báo [2] đã phân tích, các tham số mô hình mô tả động học quay tuốc bin thủy điện vừa và nhỏ không có bể điều áp thường thay đổi, phụ thuộc vào cao trình của hồ chứa nước hoặc tốc độ dòng chảy, do đó, thường xuyên phải chỉnh định tham số theo luật điều khiển PID, gây khó khăn trong khai thác vận hành nhà máy. Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày giải pháp tạo lệnh điều khiển góc mở cánh lái hướng điều chỉnh dòng nước cấp vào tuốc bin nhằm duy trì tần số điện áp phát ra của máy phát điện ở giá trị danh định 50 Hz nhờ áp dụng lý thuyết điều khiển tối ưu.

2. XÂY DỰNG LUẬT ĐIỀU KHIỂN VAN CẤP NƯỚC CHO TUỐC BIN THỦY ĐIỆN

Mô hình mô tả quan hệ giữa tín hiệu điều khiển quay cánh lái hướng và tần số quay của tuốc bin được đưa ra như sau [2]:

$$T\frac{d\omega}{dt}+\omega = K\alpha + z_1 \qquad (1)$$

$$T_\alpha \frac{d^2\alpha}{dt^2}+\frac{d\alpha}{dt} = K_u U + z_2 \qquad (2)$$

trong đó: các tham số T, T_α, K, K_u phụ thuộc vào áp lực và tốc độ chảy của cột nước; tham số z_1 phụ thuộc vào áp lực, dòng chảy và tải tiêu thụ được phân bổ cho máy phát điện; tham số z_2 phụ thuộc vào áp lực cột nước; ω là tần số quay của tuốc bin; α là góc mở của cánh lái hướng; U là tín hiệu điều khiển cánh lái hướng dòng nước. Đây là các

Email: hoquangquy@gmail.com (H. Q. Quý)

tham số bất định. Thuật toán nhận dạng xác định các tham số bất định này đã được trình bày trong bài báo [2].

Chúng ta biết rằng thông tin sai lệch giữa tần số điện áp phát ra và tần số chuẩn $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi 50 = 100\pi$ (rad/s) là thông tin cơ bản để hình thành tín hiệu điều khiển. Do đó, ta có thể đặt biến mô tả thông tin sai lệch như sau:

$$x_1 = \omega - \omega_0 \tag{3}$$

hay

$$\omega = x_1 + \omega_0 . \tag{4}$$

Sau khi thay (4) vào (1) ta nhận được phương trình

$$T\frac{dx_1}{dt} + x_1 + \omega_0 = K\alpha + z_1 . \tag{5}$$

Ta tiếp tục đặt biến mô tả góc lái hướng, tốc độ quay cánh lái hướng tương ứng như sau:

$$x_2 = \alpha , \tag{6}$$

$$x_3 = \dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt} . \tag{7}$$

Với cách đặt biến trong (6), (7), phương trình (2) có dạng

$$T_\alpha \dot{x}_3 + x_3 = K_u U + z_2 . \tag{8}$$

Từ ba phương trinh vi phân tuyến tính (5), (7), (8), ta có hệ động học tuyến tính

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{T}x_1 + \frac{K}{T}x_2 + \frac{z_1 - \omega_0}{T} , \tag{9}$$

$$\dot{x}_2 = x_3 , \tag{10}$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{x_3}{T_\alpha} + \frac{K_u}{T_\alpha}U + \frac{z_2}{T_\alpha} . \tag{11}$$

Sau khi đặt véc tơ trạng thái

$$X = (x_1 x_2 x_3)^T \tag{12}$$

và sử dụng ba phương trình (9), (10), (11), ta nhận được phương trình động học trạng thái

$$\dot{X} = AX + BU + CV , \tag{13}$$

trong đó

$$A = \begin{bmatrix} a_{11}a_{12}a_{13} \\ a_{21}a_{22}a_{13} \\ a_{31}a_{32}a_{33} \end{bmatrix}; \; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix}; \; C = \begin{bmatrix} c_{11}c_{12} \\ c_{21}c_{22} \\ c_{31}c_{32} \end{bmatrix}, \tag{14}$$

với các phần tử ma trận

$$a_{11} = -\frac{1}{T}; \; a_{12} = \frac{K}{T}; \; a_{13} = 0 \tag{15}$$

$$a_{21} = 0; \; a_{22} = 0; \; a_{23} = 1 \tag{16}$$

$$a_{31} = 0; \; a_{32} = 0; \; a_{33} = -\frac{1}{T_\alpha} \tag{17}$$

$$b = \frac{K_u}{T_\alpha} \tag{18}$$

$$c_{11} = \frac{1}{T};\ c_{12} = 0; c_{21} = 0;\ c_{22} = 0;\ c_{32} = 0;\ c_{33} = \frac{1}{T_\alpha} \tag{19}$$

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix};\ v_1 = z_1 - \omega_0;\ v_2 = z_2. \tag{20}$$

Nhiệm vụ điều khiển máy phát điện ở các nhà máy thủy điện bao gồm: 1) điều khiển kích từ rotor máy phát để biên độ điện áp phát ra ổn định ở giá trị danh định; 2) điều khiển cánh lái hướng dòng nước cấp cho tuốc bin quay rotor đảm bảo tần số điện áp phát ra ổn định ở giá trị danh định trong dải thay đổi của tải z_1 do hệ thống điện lưới yêu cầu. Việc điều khiển phần kích từ đã được nghiên cứu và công bố [1], không được xem xét trong bài báo này. Đối với tất cả các máy phát điện thủy lực hiện có ở nước ta hiện nay, thuật toán điều khiển cánh lái hướng thường áp dụng thuật toán hình thành lệnh điều khiển PID [1] tín hiệu sai lệch x_1. Tuy nhiên, thuật toán này sẽ có thời gian quá độ khác nhau khi tải z_1 thay đổi. Ngoài ra, bộ hệ số cho thiết bị điều khiển PID chỉ hợp lý khi các tham số của các ma trận *A, B, C* trong mô hình (13) không thay đổi. Trong quá trình hoạt động, do tải tiêu thụ điện năng thay đổi nên tần số quay của máy phát điện sẽ thay đổi, chệch khỏi tần số chuẩn ($\omega_0 = 100\pi$). Do đó, nếu tải giảm thì $\omega \geq \omega_0$; nếu tải tăng thì $\omega \leq \omega_0$. Nhiệm vụ điều khiển phải thay đổi góc mở cánh lái hướng dòng nước để tần số quay về giá trị chuẩn ω_0, tức là đưa giá trị x_1 tiến về giá trị không ($x_1 \to 0$).

Từ sự phân tích nói trên, ta có thể thiết lập bài toán điều khiển tối ưu như sau: tìm quy luật thay đổi giá trị tham số U tác động vào hệ động học (13) sao cho phiếm hàm

$$J = \frac{1}{2}\int_0^{T_f} (qx_1^2 + rU^2)dt \to \min. \tag{21}$$

Phiếm hàm tối ưu (21) thể hiện mong muốn đưa sai lệnh tần số điện áp phát ra nhanh chóng về giá trị không và năng lượng điều khiển quá trình đạt giá trị nhỏ nhất. Khi đó, phiếm hàm (21) có thể được viết dưới dạng chuẩn

$$J = \frac{1}{2}\int_0^{T_f} (X^T QX + U^T RU)dt \to \min \tag{22}$$

trong đó T_f là thời gian kết thúc quá trình điều khiển (đôi khi nếu T_f đủ lớn có thể coi $T_f = \infty$) và:

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11}q_{12} \\ q_{21}q_{22} \end{bmatrix};\ q_{11} = q;\ q_{12} = q_{21} = q_{22} = 0;\ R = [r]. \tag{23}$$

Chúng ta áp dụng lý thuyết điều khiển tối ưu [3, 4] để giải bài toán nêu trên nhằm xác định quy luật thay đổi của giá trị U. Trước tiên, ta thiết lập hàm Hamilton

$$H = \frac{1}{2}\langle X, QX\rangle + \frac{1}{2}\langle U, RU\rangle + \langle AX, P\rangle + \langle BU, P\rangle + \langle CZ, P\rangle . \qquad (24)$$

Ở đây, ký hiệu $\langle , \rangle$ là tích vô hướng của hai véc-tơ [5]. Véc-tơ $P(t)$ được xác định theo

$$\dot{P}(t) = \frac{dp}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial X} = -QX(t) - A^T P(t) \qquad (25)$$

với điều kiện biên

$$P(T_f) = 0 . \qquad (26)$$

Quỹ đạo tối ưu thỏa mãn đẳng thức

$$\frac{\partial H}{\partial U(t)} = 0 . \qquad (27)$$

Từ (24) và (27) ta có

$$\frac{\partial H}{\partial U} = RU(t) + B^t P(t) = 0 . \qquad (28)$$

Từ đó

$$U(t) = -R^{-1} B^T P(t) . \qquad (29)$$

Có thể đặt véc tơ $P(t)$ dưới dạng

$$P(t) = K_x(t) X(t) + K_1(t) . \qquad (30)$$

Để đảm bảo điều kiện biên (26) phải có hai điều kiện

$$K_x(T_f) = 0 , \qquad (31)$$

$$K_1(T_f) = 0. \qquad (32)$$

Để xác định ma trận $K_x(t)$ và véc tơ $K_1(t)$ ta cần phải xây dựng các phương trình. Từ (30), ta có

$$\dot{P}(t) = \dot{K}_x(t) X(t) + K_x \dot{X}(t) + \dot{K}_1(t) . \qquad (33)$$

Từ (25) và (33) ta có phương trình

$$\dot{K}_x(t) X(t) + K_x \dot{X}(t) + \dot{K}_1(t) = -QX(t) - A^T P(t) . \qquad (34)$$

Thay $\dot{X}(t)$ trong vế trái của (34) bằng vế phải của biểu thức (13), ta nhận được

$$\dot{K}_x(t) X(t) + K_x(AX + BU + CV) + \dot{K}_1(t) = -QX(t) - A^T P(t) \qquad (35)$$

hay

$$\dot{K}_x(t) X(t) + K_x(AX + BU + CV) + \dot{K}_1(t) + QX(t) + A^T P(t) = 0 . \qquad (36)$$

Thay véc tơ $U(t)$ theo (29) vào (36) ta có

$$\dot{K}_x(t) X(t) + K_x(AX - BR^{-1} B^T P(t) + CV) + \dot{K}_1(t) + QX(t) + A^T P(t) = 0 . \qquad (37)$$

Thay véc-tơ $P(t)$ trong biểu thức (37) bằng vế phải của biểu thức (30), ta có phương trình

$$\begin{aligned} &\dot{K}_x(t) X(t) + K_x[AX - BR^{-1} B^T (K_x(t) X(t) + K_1(t)) + CV] \\ &+ \dot{K}_1(t) + QX(t) + A^T (K_x(t) X(t) + K_1(t)) = 0 \end{aligned} . \qquad (38)$$

Nhóm các số hạng có chứa $X(t)$ trong vế phải phương trình (38) với nhau, ta nhận được phương trình

$$\begin{aligned}&[\dot{K}_x(t)+K_x(t)A+A^TK_x(t)-K_x(t)BR^{-1}B^TK_x(t)+Q]X(t)\\&+[\dot{K}_1(t)-(K_xBR^{-1}B^TK_x-A^T)K_1+K_xCV]=0\end{aligned}. \quad (39)$$

Để phương trình (39) đúng với mọi giá trị $X(t)$, ta dễ dàng nhận thấy $K_x(t)$ và $K_1(t)$ phải thỏa mãn hai phương trình

$$\dot{K}_x(t)+K_x(t)A+A^TK_x(t)-K_x(t)BR^{-1}B^TK_x(t)+Q=0, \quad (40)$$

$$\dot{K}_1(t)-(K_xBR^{-1}B^TK_x-A^T)K_1+K_xCV=0. \quad (41)$$

Kết hợp phương trình (40) với điều kiện biên (31); kết hợp phương trình (41) với điều kiện biên (32), ta nhận được hai hệ phương trình vi phân để xác định ma trận $K_x(t)$ và véc-tơ $K_1(t)$:

$$\dot{K}_x(t)=-K_x(t)A-A^TK_x(t)+K_x(t)BR^{-1}B^TK_x(t)-Q\,;\,K_x(T_f)=0, \quad (42)$$

$$\dot{K}_1(t)=(K_x(t)BR^{-1}B^TK_x(t)-A^T)K_1-K_x(t)CV\,;\,K_1(T_f)=0. \quad (43)$$

Từ (42) ta thấy: để xác định $K_x(t)$ cần biết các ma trận A, B, R, Q. Đây chính là phương trình Ricatri. Vì điều kiện biên của phương trình vi phân (43) ở phía phải nên để xác định $K_1(t)$ ở thời điểm hiện tại t cần phải có thông tin về V trong khoảng thời gian tương lai $(t,T_f]$. Vì hệ phương trình vi phân (43) là hệ tuyến tính với điều kiện biên ở bên phải nên nghiệm sẽ là [5]

$$K_1(t)=\int_t^{T_f}e^{\tilde{A}\tau}CV(\tau)d\tau \quad (44)$$

trong đó $\tilde{A}$ là ma trận

$$\tilde{A}=-(K_xBR^{-1}B^TK_x-A^T). \quad (45)$$

Theo [4], trong trường hợp thời gian tích phân T_f dài và véc-tơ $V(t)$ không thay đổi thì nghiệm phương trình (42) và (43) có thể được xác định trên cơ sở giải hệ phương trình đại số

$$-K_xA-A^TK_x+K_xBR^{-1}B^TK_x-Q=0, \quad (46)$$

$$-(K_xBR^{-1}B^TK_x-A^T)K_1+K_xCV=0. \quad (47)$$

Đã có nhiều thuật toán để giải hệ phương trình phi tuyến bậc hai Ricatri (46) [4]. Sau khi xác định được ma trận hệ số K_x thì nghiệm của hệ phương trình đại số tuyến tính (47) là

$$K_1=\tilde{A}^{-1}K_xCV \quad (48)$$

trong đó

$$\tilde{A}=-(K_xBR^{-1}B^TK_x-A^T). \quad (49)$$

Để xác định K_x theo (46) và K_1 theo (48) cần có thông tin đầy đủ về các ma trận

A, B, C của hệ động học (13); ma trận các hàm phạt Q, R trong tiêu chuẩn tối ưu (22); thông tin về nhiễu và tải *V*. Các thông tin để xác định A, B, C, V đã được trình bày trong [2]; còn hệ số phạt q trong ma trận Q, hệ số phạt r trong ma trận R sẽ được xác định từ quá trình khai thác sử dụng nhà máy thủy điện vừa và nhỏ, được xác định bằng thực nghiệm tại hiện trường theo trạng thái hoạt động của nhà máy.

Sau khi xác định được K_x, K_1 và từ các biểu thức (29) và (30), sẽ có lệnh điều khiển tối ưu mở cánh lái hướng cấp nước cho tuốc bin quay máy phát điện như sau:

$$U(t) = -R^{-1}B^T P(t) = -R^{-1}B^T K_x X - R^{-1}B^T K_1 . \qquad (50)$$

Biểu thức (50) cho thấy: để tổng hợp được lệnh điều khiển tối ưu, cần xác định K_x bằng cách giải phương trình (46), véc tơ K_1 bằng (48). Để xác định véc-tơ trạng thái X trong phương trình (13) cần đo độ sai lệch giữa tần số điện áp máy phát và tần số điện áp lưới chuẩn, góc mở cánh lái hướng và tốc độ mở của nó. Như vậy, để xác định được các tham số trên, các thiết bị đo phải được gắn vào tổ hợp tuốc bin - máy phát tại các vị trí cần đo tương ứng. Trong trường hợp không đo được trực tiếp mà phải quan sát thì cần phải có thuật toán cùng phần mềm quan sát các tham số đó.

KẾT LUẬN

Thuật toán điều khiển tối ưu cho quá trình cấp nước cho tuốc bin máy phát điện đã được xây dựng dựa trên cơ sở lý thuyết điều khiển tối ưu của hệ động học tuyến tính. Kết quả này có thể áp dụng cho trường hợp xác định các tham số biến đổi trong quá trình hoạt động. Thuật toán được trình bày trong bài báo là cơ sở để thiết lập phần mềm khi thiết kế chế tạo hệ thống điều khiển cho tổ hợp tuốc bin - máy phát điện. Bằng phương pháp này, điện áp, tần số của nguồn điện phát ra sẽ được khống chế với độ ổn định cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Lã Văn Út, *Phân tích và điều khiển ổn định hệ thống điện*, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2011.

[2] Đặng Tiến Trung, Phạm Tuấn Thành, *Xây dựng mô hình mô tả quá trình điều khiển cho các máy phát điện của nhà máy thủy điện vừa và nhỏ*, Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự, Số 50, 8/2017.

[3] Nguyễn Doãn Phước, *Lý thuyết điều khiển tuyến tính*, NXB Khoa học Kỹ thuật, Hà Nội, 2009.

[4] Michael Athans; Peter L. Falb, *Optimal Control*, New York, 2006.

[5] Granino A. Korn, Theresa M. Korn, *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review,* Amazon Customeron, 2017.

SUMMARY

A CONTROL LOGARITHM TO OPEN GUIDE VANE SUPPLYING WATER TO TURBINE OF MEDIUM AND SMALL HYDROELECTRIC FACTORIES

In this paper, the laws to control the guide vane supplying water to turbine of medium and small hydrolelectric factories are synthesized by optimal control theory. By that, the frequency of generated voltage will be stabilized under condition of carry changing.