

XÂY DỰNG THUẬT TOÁN MỞ CÁNH LÁI HƯỚNG CẤP NƯỚC VÀO TURBIN NHÀ MÁY THỦY ĐIỆN VỪA VÀ NHỎ

A CONTROL ALGORITHM TO OPEN RUDDER SUPPLYING WATER TO TURBINE OF SMALL AND MEDIUM HYDRO POWER PLANTS

Đặng Tiến Trung

Trường Đại học Điện lực

Tóm tắt:

Bài báo trình bày việc áp dụng lý thuyết điều khiển tối ưu để tổng hợp lệnh điều khiển cánh lái hướng cấp nước cho turbin ở nhà máy thủy điện vừa và nhỏ nhằm ổn định tần số điện áp phát trong điều kiện tải thay đổi.

Từ khóa:

Điều khiển tối ưu, cánh lái hướng, tần số chuẩn.

Abstract:

In this paper, the laws to control the rudder supplying water to turbine of small and medium hydro power plants are synthesized by optimal control theory. By that, the frequency of generated voltage will be stabilized under changing load.

Key words:

Optimal control, rudder, standard frequency.

1. MỞ ĐẦU

Trong bài báo [2] đã trình bày mô hình toán mô tả quan hệ giữa góc quay cánh lái hướng cấp nguồn năng lượng thế năng và động năng của cột nước cho turbin của tổ hợp “turbin + máy phát điện” trong nhà máy thủy điện vừa và nhỏ. Tuy nhiên chưa trình bày thuật toán hình thành giá trị lệnh U nhằm ổn định tần số điện áp phát ở giá trị chuẩn 50 Hz. Trong bài báo này nhóm tác giả sẽ trình bày giải pháp áp

dụng lý thuyết điều khiển tối ưu để tạo lệnh điều khiển góc mở cánh lái hướng điều chỉnh dòng nước cấp vào turbin nhằm duy trì tần số điện áp phát ra của máy phát điện ở giá trị danh định 50 Hz trong điều kiện phụ tải thay đổi và cao trình cột nước thay đổi.

2. XÂY DỰNG THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN CÁNH LÁI HƯỚNG DÒNG NƯỚC VÀO TURBIN THỦY ĐIỆN

Trong bài báo [2] đã cho thấy mô hình mô tả quan hệ giữa tín hiệu điều khiển quay cánh lái hướng và tần số quay của turbin

Ngày nhận bài: 12/11/2017, ngày chấp nhận đăng: 18/12/2017, phản biện: TS. Mai Hoàng Công Minh.

như sau:

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

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

trong đó: α là góc mở cánh lái hướng; ω là tần số quay của turbin. Các tham số T , T_α , K , K_u phụ thuộc vào áp lực và tốc độ chảy của cột nước, tham số z_2 phụ thuộc vào áp lực cột nước, tham số z_1 ngoài sự phụ thuộc vào áp lực và dòng chảy còn phụ thuộc vào tải tiêu thụ được phân bổ cho máy phát điện. Trong bài báo đó cũng đã trình bày thuật toán nhận dạng xác định các tham số bất định này.

Vì thông tin sai lệch giữa tần số điện áp phát ra và tần số chuẩn $\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi 50 = 100\pi$ (radian/giây) là thông tin cơ bản để hình thành tín hiệu điều khiển, nên đặt:

$$x_1 = \omega - \omega_0 \quad (3)$$

Vậy:

$$\omega = x_1 + \omega_0 \quad (4)$$

Thay (4) vào (1) nhận được phương trình:

$$T \frac{dx_1}{dt} + x_1 + \omega_0 = K\alpha + z_1 \quad (5)$$

Đặt:

$$x_2 = \alpha \quad (6)$$

$$x_3 = \dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt} = \dot{x}_2 = \frac{dx_2}{dt} \quad (7)$$

Với cách đặt biến (6), (7) thì phương trình (2) sẽ có dạng sau:

$$T_\alpha \dot{x}_3 + x_2 = K_u U + z_2 \quad (8)$$

Từ ba phương trình vi phân tuyến tính (5), (7), (8) có hệ động học tuyến tính sau:

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{T}x_1 + \frac{K}{T}x_2 + \frac{z_1 - \omega_0}{T} \quad (9)$$

$$\dot{x}_2 = x_3 \quad (10)$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{x_2}{T_\alpha} + \frac{K_u}{T_\alpha}U + \frac{z_2}{T_\alpha} \quad (11)$$

Đặt vector trạng thái:

$$X = (x_1, x_2, x_3)^T \quad (12)$$

Từ ba phương trình (9), (10), (11) có phương trình động học trạng thái sau:

$$\dot{X} = AX + BU + CV \quad (13)$$

Trong đó:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \\ c_{31} & c_{32} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Ở đây:

$$a_{11} = -\frac{1}{T}; a_{12} = \frac{K}{T}; a_{13} = 0; \quad (15) \quad a_{21} = 0;$$

$$a_{22} = 0; a_{23} = 1 \quad (16)$$

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

$$b = \frac{K_u}{T_\alpha} \quad (18)$$

$$c_{11} = \frac{1}{T}; c_{12} = 0; c_{21} = 0; c_{22} = 0; c_{32} = 0;$$

$$c_{33} = \frac{1}{T_\alpha} \quad (19)$$

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}; v_1 = z_1 - \omega_0; v_2 = z_2 \quad (20)$$

Nhiệm vụ điều khiển máy phát điện ở các nhà máy thủy điện gồm hai nhiệm vụ chính là điều khiển kích từ rotor máy phát để biên độ điện áp phát ra ổn định ở giá trị danh định và điều khiển cánh lái hướng dòng nước cấp cho turbin quay rotor đảm bảo tần số điện áp phát ra ổn định ở giá trị danh định trong giải thay đổi của tải z_1 do hệ thống điện lưới yêu cầu. Việc điều khiển phân kích từ đã nhiều công trình công bố, 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 ($\omega_0 = 100\pi$), nếu tải giảm thì $\omega \geq \omega_0$, còn 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 ($x_1 \rightarrow 0$).

Từ các diễn giải nêu trên 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:

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

Phiếm hàm tối ưu (21) thể hiện mong muốn đưa sai lệch tần số điện áp phát ra nhanh chóng về giá trị không và năng lượng điều khiển quá trình đạt giá trị nhỏ nhất.

Phiếm hàm (21) có thể được viết dưới dạng chuẩn sau:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{T_f} (XQX^T + URU^T) dt \rightarrow \min \quad (22)$$

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: $Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{bmatrix}$; $q_{11} = q$;

$$q_{12} = q_{21} = q_{22} = 0; R = [r] \quad (23)$$

Áp dụng lý thuyết điều khiển tối ưu [3, 4] tiến hành giải bài toán nêu trên để xác định luật thay đổi giá trị U . Trước tiên thiết lập hàm Haminton sau:

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

ở đây ký hiệu \langle, \rangle là tích vô hướng hai vectơ [5]. Vectơ $P(t)$ được xác định theo:

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

Với điều kiện biên:

$$P(T_f) = 0 \quad (26)$$

Ổ quỹ đạo tối ưu thỏa mãn đẳng thức sau:

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

Từ (24) và (27) có:

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

Vậy suy ra:

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

Có thể đặt vector $P(t)$ dưới dạng sau:

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

Để đảm bảo điều kiện biên (26) thì có hai điều kiện sau:

$$K_x(T_f) = 0 \quad (31)$$

$$K_1(T_f) = 0 \quad (32)$$

Khi này cần phải xây dựng các phương trình để xác định ma trận $K_x(t)$ và vector $K_1(t)$. Từ (30) có:

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

Từ (25) và (33) có phương trình sau:

$$\begin{aligned} \dot{K}_x(t)X(t) + K_x \dot{X}(t) + \dot{K}_1(t) \\ = -QX(t) - A^T P(t) \end{aligned} \quad (34)$$

Thay $\dot{X}(t)$ trong vế trái phương trình (34) bằng vế phải biểu thức (13) nhận được:

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

Hoặc:

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

Thay vector $U(t)$ theo (29) vào (36) nhận được:

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

Thay vector $P(t)$ trong biểu thức (37) bằng vế phải của biểu thức (30) sẽ có phương trình sau:

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

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

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

Để phương trình (39) đúng với mọi giá trị $X(t)$ (không phụ thuộc vào $X(t)$) thì dễ dàng nhận thấy, $K_x(t)$ và $K_1(t)$ phải thỏa mãn hai phương trình sau:

$$\dot{K}_x(t) + K_x(t)A + A^T K_x(t) \quad (40)$$

$$-K_x(t)BR^{-1}B^T K_x(t) + Q = 0$$

$$\dot{K}_1(t) - (K_x BR^{-1}B^T K_x - A^T)K_1 + K_x CV = 0 \quad (41)$$

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

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

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

Từ (42) cho thấy để xác định $K_x(t)$ cần biết rõ các ma trận A, B, R, Q . Đây chính là phương trình Riccati. Vì điều kiện biên của phương trình vi phân (43) ở phía phải, nên nhận thấy 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 của phương trình sẽ là [4]:

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

trong đó ma trận \tilde{A} là ma trận:

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

Theo [4] trong trường hợp thời gian tích phân T_f dài và vector $V(t)$ không thay đổi ($V(t) = \text{const}$) thì nghiệm phương trình (42) và (43) có thể được xác định trên cơ sở giải hệ phương trình đại số sau:

$$-K_x A - A^T K_x + K_x BR^{-1}B^TK_x - Q = 0 \quad (46)$$

$$-(K_x BR^{-1}B^TK_x - A^T)K_1 + K_x CV = 0 \quad (47)$$

Để giải hệ phương trình phi tuyến bậc hai Riccati (46) đã có nhiều thuật toán được trình bày tại nhiều tài liệu khác nhau, thí dụ như trong tài liệu [4]. Sau khi xác định được ma trận hệ số K_x thì việc xác định nghiệm hệ phương trình đại số tuyến tính dạng (47) sẽ là:

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

Để giải được hệ phương trình (46) xác định K_x và để xác định 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) và 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, thường do các chuyên viên chuyên ngành đưa ra. Bản thân hai hệ số phạt này cũng được thay đổi trong quá trình khai thác nhà máy theo yêu cầu về kinh tế, kỹ thuật.

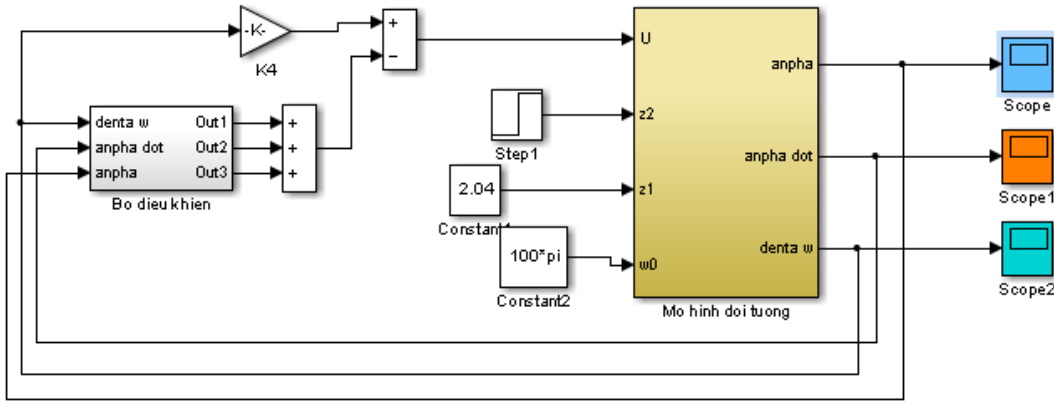
Sau khi xác định được K_x, K_1 và từ các biểu thức (29) và (30) sẽ có lệnh điều khiển tối ưu mở cánh lái hướng cấp nước có thể năng và động năng cho turbin quay máy phát điện như sau:

$$\begin{aligned} U(t) &= -R^{-1}B^TP(t) \\ &= -R^{-1}B^TK_x X - R^{-1}B^TK_1 \end{aligned} \quad (49)$$

Từ biểu thức (49) cho thấy để tổng hợp được lệnh điều khiển tối ưu ngoài việc xác định ma trận K_x qua việc giải phương trình đại số (46), xác định vector K_1 theo biểu (48) cần phải xác định vector trạng thái X của hệ động học tuyến tính (13), tức là phải đo hoặc quan sát: 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 khi thiết kế chế tạo tổ hợp turbin + máy phát cần phải bố trí và cài đặt các cơ cấu đo tương ứng để đo hoặc quan sát được các thông tin về trạng thái X của hệ động học. 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. $K=10; K_u=2;$

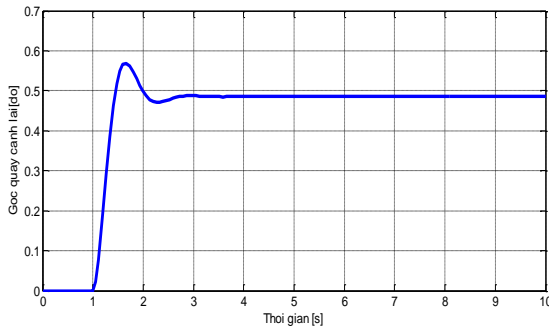
Tham số mô phỏng: $T=0.02; T_a=0.1;$ Mô hình mô phỏng:



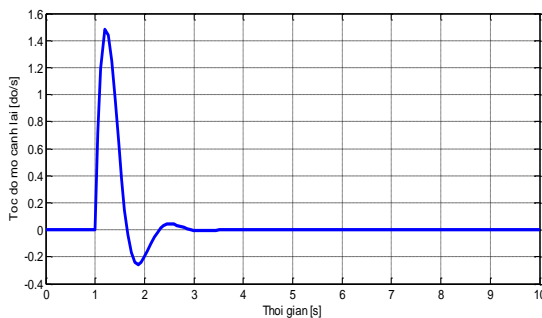
Hình 1. Mô hình mô phỏng thuật toán mở cánh lái

Kết quả mô phỏng:

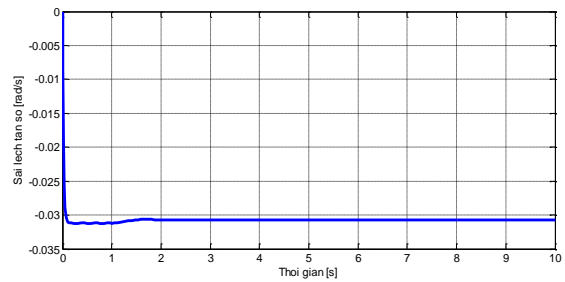
Góc mở cánh lái khi z_1 là hàm step, z_2 là hằng số.



Hình 2. Góc mở cánh lái khi z_1 là hàm step, z_2 là hằng số



Hình 3. Tốc độ mở cánh lái khi z_1 là hàm step, z_2 là hằng số



Hình 4 Sai lệch về tần số khi z_1 là hàm step, z_2 là hằng số

3. KẾT LUẬN

Từ việc nhận dạng các tham số mô hình động học và ước lượng tải tiêu thụ cho phép thiết lập bài toán điều khiển tối ưu quá trình quay cánh lái hướng dòng nước có thể năng và động năng cấp vào turbin của tổ hợp turbin máy phát trong nhà máy thủy điện vừa và nhỏ. Áp dụng lý thuyết điều khiển tối ưu đã xây dựng thuật toán xác định ma trận hệ số theo trạng thái hệ động học và vectơ liên quan đến tải tiêu thụ trong cấu trúc lệnh điều khiển. Từ cấu trúc của lệnh điều khiển đã xác định yêu cầu về phần cứng cũng như phần mềm khi

thiết kế chế tạo tổ hợp turbin + máy phát điện. 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 turbin + máy phát điện. Áp dụng thuật toán này quá trình hiệu chỉnh công suất phát theo tải yêu cầu sẽ được thực hiện có chất lượng hơn.

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 và Kỹ thuật, Hà Nội, 2009.
- [4] Michael Athans, Peter L. Falb. "Optimal control an introduction to the theory and its applications". McGraw-Hill Book Company. New York/St. Louis/San Francisco/Toronto/London/Sydney. 1968.
- [5] Granino A. Korn, PH. D, Theresa M. Korn, M.S. "Mathematical handbook for scientists and engineers definitions, theorems and formulas for reference and review". McGraw-Hill Book Company. New York/St. Louis/San. Francisco/Toronto/London/Sydney. 1968

Giới thiệu tác giả:



Tác giả **Đặng Tiến Trung** tốt nghiệp kỹ sư điện - tự động hoá tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2004, nhận bằng thạc sỹ ngành tự động hóa của Học viện Kỹ thuật quân sự năm 2008. Tác giả đang là nghiên cứu sinh tại Học viện Kỹ thuật quân sự và là giảng viên Khoa Kỹ thuật điện - Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: Ứng dụng các giải pháp điều khiển hiện đại trong hệ thống điện.