

ỔN ĐỊNH TỐC ĐỘ TURBINE BẰNG THUẬT ĐIỀU KHIỂN BỀN VỮNG H_{∞}

STABILISING SPEED FOR HYDRO TURBINES BY TECHNICAL ROBUST H_{∞} CONTROLLERS

Nguyễn Văn Dũng¹, Trương Thị Bích Thanh², Bùi Văn Trình³

¹Công ty Thủy điện Buôn Kuốp; nguyenvandung.atd5@gmail.com

²Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; tbbichthanh@gmail.com

³Sinh viên Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

Tóm tắt - Ổn định tốc độ turbine thủy điện là nhiệm vụ quan trọng của hệ thống điều tốc nhà máy thủy điện. Thực tế, hầu hết các hệ thống điều tốc của thủy điện đều dùng bộ điều khiển PID. Tuy nhiên, với nhà máy thủy điện có hồ điều tiết ngày, như hồ chứa thủy điện Srêpôk 3 mực nước hồ thay đổi trong ngày sẽ làm ảnh hưởng thời gian đáp ứng, độ quá điều chỉnh tốc độ trong quá trình khởi động. Điều này gây khó khăn cho việc chỉnh định PID, do thông số K_P , K_I , K_D của bộ điều khiển PID cài giá trị cố định trong quá trình khởi động. Do vậy, giải pháp điều khiển bền vững để thích nghi với sự biến thiên cột nước là cần thiết trong điều tốc turbine thủy lực. Nội dung bài báo gồm 3 phần: xây dựng mô hình hệ thống điều tốc của nhà máy thủy điện; xác định tham số bộ điều khiển PID theo phương pháp Ziegler – Nichols cho turbine thủy điện; thiết kế bộ điều khiển bền vững H_{∞} và đánh giá kết quả mô phỏng với bộ điều khiển PID.

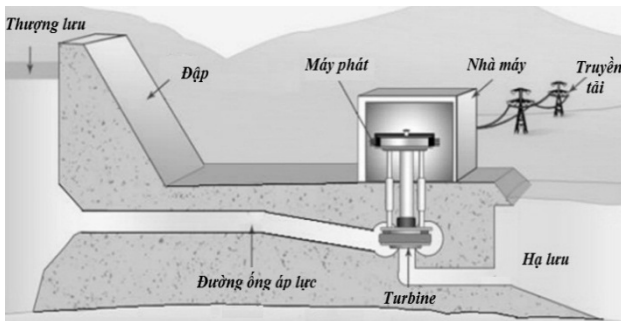
Từ khóa - turbine thủy điện; thủy điện; hệ thống điều tốc; điều khiển bền vững H_{∞} ; bộ điều khiển PID; điều khiển tốc độ cho turbine thủy điện.

Abstract - Stabilising speed for hydro turbines is an important task of a governor system. Nowadays, PID controllers have been used commonly in hydro power governor systems. However, with hydro power plants having daily regulation lake such as Serepok 3, the change of water level during the day will have an impact on time response and also on overshoot of adjusting speed in the starting process. Due to this impact, the regulation of PID controller is quite difficult, because values of parameters K_P , K_I , K_D have been fixed in the starting process. Therefore, robust controller solutions are necessary for hydro power governor systems. This paper includes 3 issues: Modelling governor systems of hydro power plants; Determining PID controller parameters for hydro turbines by Ziegler – Nichols method; Designing Robust H_{∞} controller for hydro turbine governor systems and evaluating simulation results compared with PID controller.

Key words - hydro turbine; hydro power; governor system; robust H_{∞} controller; PID controller; speed control for hydro turbine.

1. Đặt vấn đề

Hệ thống điều tốc trong nhà máy thủy điện có vai trò quan trọng trong việc ổn định tốc độ tổ máy ở các chế độ: chế độ khởi động; chế độ cố định công suất; chế độ cố định độ mở; chế độ điều tần. Ở bất kỳ chế độ nào, tốc độ tổ máy luôn phải duy trì ở giá trị định mức. Tuy nhiên, với phạm vi bài báo này tác giả chỉ nghiên cứu hệ thống điều tốc tham gia quá trình khởi động tổ máy khi mực nước hồ thay đổi với nhà máy thủy điện Srêpôk 3.



Hình 1. Sơ đồ mô hình nhà máy với đường ống áp lực đơn không đàn hồi

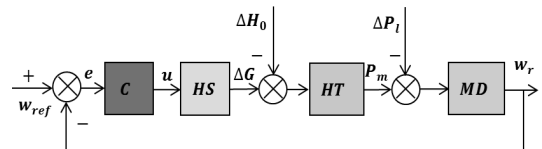
Hệ thống điều tốc của nhà máy thủy điện Srêpôk 3 đang dùng bộ điều khiển PID, ở mỗi chế độ khác nhau thì các bộ tham số K_P , K_I , K_D là khác nhau [2]. Bài báo này chỉ nghiên cứu quá trình khởi động của tổ máy thủy điện Srêpôk 3 có hồ điều tiết ngày với dải cột nước từ 51÷66,6 (m) [2], do mực nước hồ thay đổi trong ngày là lớn, trong khi giá trị cột nước được cài đặt ở quá trình khởi động được cố định là $H = 56$ (m) [2]. Chính vì điều này khi mực nước hồ thay

đổi sẽ làm cho đáp ứng tốc độ của tổ máy bị ảnh hưởng về thời gian xác lập cũng như độ quá điều chỉnh trong quá trình khởi động tổ máy.

Mô hình nhà máy thủy điện Srêpôk 3 đang xét đến trong bài báo là nhà máy thủy điện có đường ống áp lực đơn không đàn hồi, bỏ qua sức cản thủy lực thì công suất ngõ ra của turbine tỷ lệ với lưu lượng và cột nước như Hình 1.

2. Xây dựng mô hình các phần tử trong sơ đồ

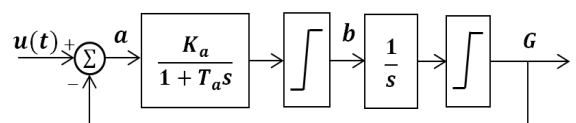
Với sơ đồ như ở Hình 2 có sơ đồ khối của hệ thống điều tốc turbine thủy điện gồm: bộ điều khiển (C); hệ thống thủy lực (HS); turbine thủy lực (HT); tải máy phát (MD); ΔH_0 nhiều cột nước; ΔP_I nhiều tải.



Hình 2. Sơ đồ khối hệ thống điều tốc turbine

Trong sơ đồ Hình 2, tốc độ ra (w_r) phản hồi về và so sánh với tốc độ đặt (w_{ref}) để đưa tín hiệu sai lệch (e) vào bộ điều khiển (C). Đây là vòng điều khiển kín.

2.1. Hệ thống thủy lực (HS)



Hình 3. Sơ đồ hàm truyền khâu thủy lực

$$G_{HS}(s) = \frac{K_a}{T_a s^2 + s + K_a + 1} \quad (1)$$

Khâu thủy lực nhận tín hiệu điều khiển từ bộ điều khiển để thay đổi độ mở (G), và có hàm truyền đạt như biểu thức (1). Trong đó: K_a là hệ số thủy lực, T_a hằng số thời gian của servo. Theo [4] chọn $K_a=3,33$ (s), $T_a=0,07$ (s).

2.2. Turbine thủy lực (HT)

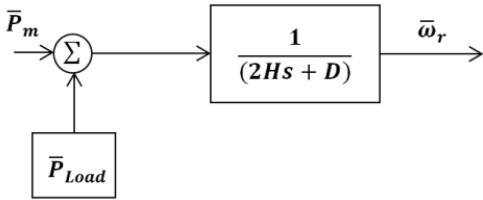
Theo [3], [6] mô hình turbine thủy lực được biểu diễn thông qua hàm truyền đạt sau:

$$G_{HT}(s) = \frac{\Delta \bar{P}_m}{\Delta G} = \frac{1 - T_w s}{1 + 0,5 T_w s} \quad (2)$$

Trong đó: T_w là hằng số thời gian của nước đi từ đầu đường ống đến cuối đường ống áp lực. Theo [2] tính được $T_w=4,1425$ (s).

2.3. Tải máy phát (MD)

Mô hình tải máy phát được biểu diễn như Hình 4 (theo [3], [6]).



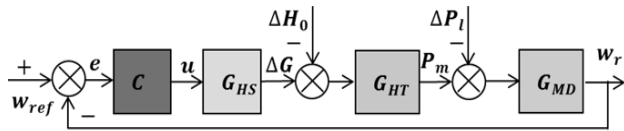
Hình 4. Sơ đồ hàm truyền khâu tải máy phát

Hàm truyền đạt của mô hình tải máy phát được biểu diễn như sau:

$$G_{MD}(s) = \frac{\bar{w}_r}{\bar{P}_{mec} - \bar{P}_{load}} = \frac{1}{(2Hs + D)} \quad (3)$$

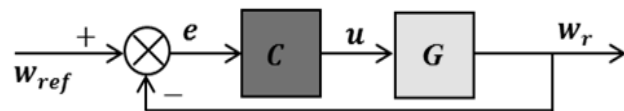
Trong đó: H là hằng số quán tính; D là hệ số cản. Chọn $D=1,5$ và theo [2] $H=4,8791$ (kW/s/kVA).

Từ việc xây dựng mô hình đối tượng điều khiển tiến hành tổng hợp mô hình, thông qua các biểu thức (1), (2), (3) ta có sơ đồ khối Hình 5.



Hình 5. Sơ đồ khối tổng hợp mô hình

Sơ đồ khối Hình 5 được rút gọn lại như sau:



Hình 6. Sơ đồ khối rút gọn của mô hình

Với hàm truyền $G(s)$ là hàm truyền tổng hợp được tính từ các biểu thức (1), (2), (3). Khi đó ta có $G(s)$ là:

$$G(s) = G_{HS}(s) \cdot G_{HT}(s) \cdot G_{MD}(s) \quad (4)$$

Từ các thông số tính được. Ta có hàm truyền tổng hợp của mô hình đối tượng:

$$G(s) = \frac{-9,76s + 2,356}{s^4 + 14,92s^3 + 71,07s^2 + 40,46s + 4,594} \quad (5)$$

3. Xác định thông số bộ điều khiển PID theo phương pháp Ziegler-Nichols

Với mô hình hệ thống điều tốc như Hình 6, xét với cột nước (H) thay đổi từ 51÷66,6 (m) [2], giá trị cột nước được cài đặt ở quá trình khởi động là 56 (m) [2]. Giá trị tham số đang cài đặt tại nhà máy Srêpôk 3 như Bảng 1.

Bảng 1. Giá trị tham số PID và cột nước hiện tại được cài tại nhà máy Srêpôk 3 [2]

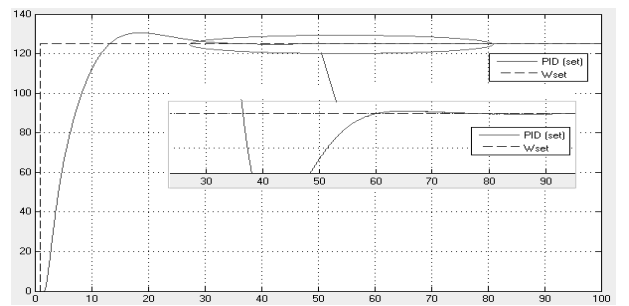
STT	Tên biến	Giá trị	Đơn vị
1	PID_Nld_Kp	2,75	NA
2	PID_Nld_Ki	0,25	1/s
3	PID_Nld_KD	0,15	s
4	RP_HeadSet	56	m

Các giá trị trên được dùng cho mô hình thực được cân chỉnh tại hiện trường. Trong phạm vi bài báo, chỉ xây dựng mô hình đối tượng tuyến tính gần đúng, nên không dùng bộ tham số PID trên, mà cần phải xác định tham số bộ điều khiển PID với mô hình đối tượng đang xây dựng bằng phương pháp Ziegler-Nichols.

Từ hàm truyền đối tượng như biểu thức (5), với phương pháp Ziegler-Nichols ta được kết quả như sau: Hệ số tới hạn: $K_{th} \approx 3,85$; Hệ số tỷ lệ: $K_P \approx 2,31$; Hệ số tích phân: $K_I \approx 0,329$; Hệ số vi phân: $K_D \approx 4,056$.

Từ đó hàm truyền của bộ điều khiển PID:

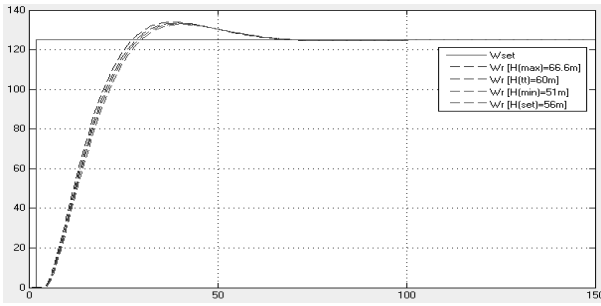
$$G_{PID}(s) = 2,31 \left(1 + \frac{1}{7,025s} + 1,756s \right) \quad (6)$$



Hình 7. Đáp ứng tốc độ khi khởi động với PID (Ziegler-Nichols)

Với đáp ứng tốc độ như Hình 7, ta thấy độ quá điều chỉnh khá lớn ($\approx 10\%$) và thời gian xác lập chậm ($> 60s$) ứng với giá trị $H=56$ (m). Bên cạnh phương pháp xác định tham số bộ điều khiển PID bằng phương pháp Ziegler-Nichols ta còn có thể dùng chức năng Tuning của phần mềm Matlab-Simulink để xác định tham số bộ điều khiển PID kết quả ta có như sau: Hệ số tỷ lệ: $K_P \approx 0,44$; Hệ số tích phân: $K_I \approx 0,117$; Hệ số vi phân: $K_D \approx 0$.

Kết quả mô phỏng được thể hiện ở Hình 8.



Hình 8. Đáp ứng tốc độ khi khởi động với bộ PID (đùng tuning)

Từ kết quả ở Hình 8 đường đáp ứng được cải thiện về thời gian xác lập và biên độ dao động. Tuy nhiên độ quá điều chỉnh ($\approx 10\%$) và thời gian xác lập ($\approx 70s$) không được cải thiện nhiều.

Kết quả bộ điều khiển PID vẫn còn những hạn chế trên. Do đó trong phần tiếp theo, tác giả sẽ trình bày giải pháp bộ điều khiển bền vững H_∞ .

4. Thiết kế bộ điều khiển bền vững H_∞

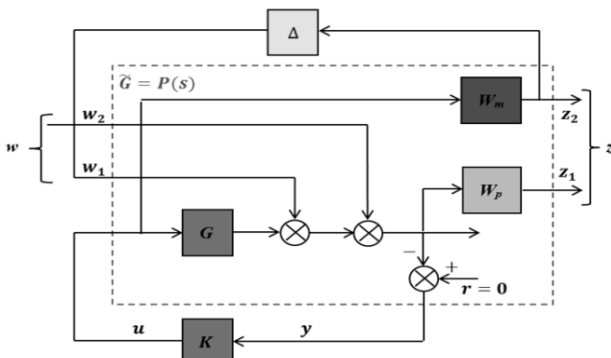
Để tiến hành thiết kế bộ điều khiển bền vững H_∞ ta đề ra tiêu chí của bộ điều khiển mới như sau: Sai số xác lập $\varepsilon \leq 1\%$; Thời gian xác lập ≤ 60 (s); Độ quá điều chỉnh $< 10\%$.

4.1. Xây dựng và tổng hợp mô hình đối tượng

Theo [1] bộ điều khiển bền vững H_∞ được thiết kế sao cho đảm bảo tính ổn định và chất lượng điều khiển khi các thành phần không chắc chắn nằm trong một tập hợp cho trước. Trong đó có các thành phần không chắc chắn như sai số mô hình hóa, nhiễu loạn,...

Vẫn theo [1] tất cả các mô hình dùng trong thiết kế hệ thống điều khiển đều chứa đựng trong đó các yếu tố không chắc chắn không cấu trúc để bảo đảm đặc tính động học, không mô hình hóa, đặc biệt là ở miền tần số cao.

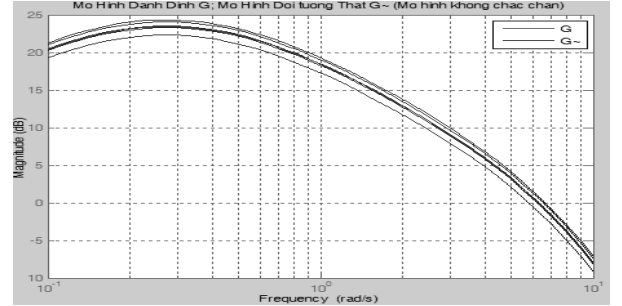
Từ đó: Đối tượng đang xét để thiết kế bộ điều khiển bền vững H_∞ chịu sự ảnh hưởng của cột nước H_0 . Tuy nhiên mô hình cột nước H_0 không xây dựng được. Do đó, chọn mô hình đối tượng để xây dựng bộ điều khiển là mô hình không chắc chắn không cấu trúc. Ảnh hưởng của cột nước tác động đầu vào của turbine làm cho hiệu suất của turbine bị thay đổi khi H_0 thay đổi. Ta chọn mô hình không chắc chắn không cấu trúc với nhiễu tác động là nhiễu cộng như Hình 9 (theo [1]).



Hình 9. Sơ đồ mô hình không chắc chắn không cấu trúc nhiễu cộng

Trong đó: G là mô hình danh định; $\tilde{G} = P(s)$ là mô hình không chắc chắn; Δ là thành phần không chắc chắn không cấu trúc thay đổi bất kỳ thỏa mãn $\|\Delta\|_\infty \leq 1$; W_m là hàm truyền ổn định; W_p là hàm trọng số chất lượng; w, w_1, w_2 : tín hiệu vào; u, z_1, z_2 : tín hiệu ra; K là bộ điều khiển bền vững H_∞ .

Từ việc xây dựng mô hình trên, ta có biểu đồ Bode của mô hình danh định và mô hình không chắc chắn khi thành phần nhiễu là cột nước H_0 bị thay đổi như Hình 10.



Hình 10. Biểu đồ Bode của “Mô hình danh định” và “Mô hình không chắc chắn” khi tham số H_0 thay đổi

4.2. Xác định hàm trọng số $W_p(s)$ và $W_m(s)$

Việc xây dựng hàm trọng số $W_p(s)$ và $W_m(s)$ có nhiều cách để xây dựng, tùy thuộc vào mô hình của đối tượng và trong một số trường hợp thực tế cần kết hợp với kinh nghiệm để chọn mô hình phù hợp. Thông thường $W_p(s)$ và $W_m(s)$ có dạng sau [5]:

$$W_p(s) = \frac{\frac{s}{M_p} + w_b}{s + w_p A} \quad (7)$$

$$W_m(s) = \frac{s + \frac{w_b}{M_m}}{As + w_b} \quad (8)$$

Với: $W_p(s)$ là hàm trọng số chất lượng; $W_m(s)$ là hàm trọng số ổn định; M_p, M_m là biên độ hàm độ nhạy và bù nhạy; w_b là dải băng thông; A là sai lệch tĩnh nhỏ nhất (thông thường $A \neq 0$, thường chọn $A = 10^{-4}$ [7]). Theo [1] tần số cắt biên của hệ hở xấp xỉ bằng thông của hệ kín, chọn $w_b \approx 0,06$ (rad/s). Biên độ hàm độ nhạy và bù nhạy cần thỏa mãn $M_p \leq 2$ và $M_m \leq 1,5$ (theo [5], [7]), ta chọn $M_p = M_m = 1,5$.

Thay các giá trị trên vào các biểu thức (7), (8), khi đó ta có hàm truyền của $W_p(s)$ và $W_m(s)$ như sau:

$$W_p(s) \approx \frac{0,66667(s + 0,09)}{s + 0,01487} \quad (9)$$

$$W_m(s) \approx \frac{10000(s + 0,04)}{s + 600} \quad (10)$$

4.3. Xác định tham số gamma (γ)

Tham số γ được xem là một giá trị mục tiêu của vòng lặp, và giá trị γ được chọn nếu thỏa mãn được điều kiện ổn định bền vững $\| |W_p S| + |W_m T| \|_\infty < 1$.

Để tìm γ ta sử dụng cấu trúc lệnh $[K, CL, GAM] = \text{hinfsyn}(P)$ trong Matlab-Simulink, với (P)

là hàm chuyển đổi của các hàm (G , W_p , W_m). Kết quả tìm được là:

$$\gamma=0,9906 \quad (11)$$

4.4. Xác định bộ điều khiển

Sau quá trình tìm γ thỏa mãn thì dựa vào cấu trúc lệnh “hinsyn” sẽ tìm ra hàm truyền bộ điều khiển dựa vào giá trị γ ở trên. Nếu gọi K_{inf} là hàm truyền của bộ điều khiển, khi đó hàm truyền bộ điều khiển bền vững H_∞ tìm được như sau:

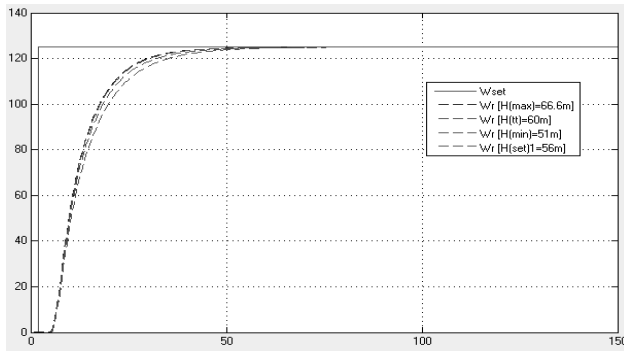
$$K_{inf} = \frac{0,02073s^5 + 12,75s^4 + 187,1s^3 + 884,9s^2}{s^6 + 26,17s^5 + 243,6s^4 + 912,1s^3 + 814,7s^2 + 503,4s + 57,15} \quad (12)$$

$$+514s + 0,003084$$

5. Kết quả mô phỏng

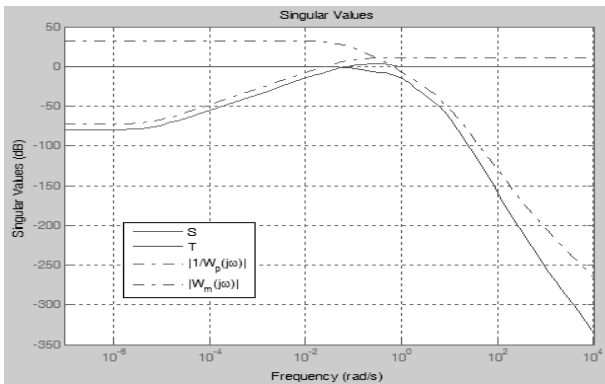
Để kiểm tra kết quả mô phỏng, ta cần kiểm tra lại các điều kiện trong việc thiết kế bộ điều khiển bền vững H_∞ [1].

Đáp ứng tốc độ ngõ ra ở quá trình khởi động khi có với bộ điều khiển bền vững H_∞ (Hình 11). Với đáp ứng này, độ quá điều chỉnh là 0%, thời gian xác lập là ≈ 60 (s), sai số xác lập $\varepsilon \approx 0\%$.



Hình 11. Đáp ứng tốc độ khi khởi động

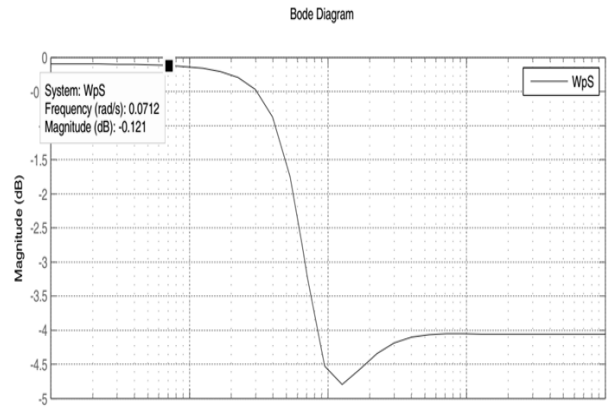
Biểu đồ Bode của hàm độ nhạy (S) và hàm bù nhạy (T) như Hình 12.



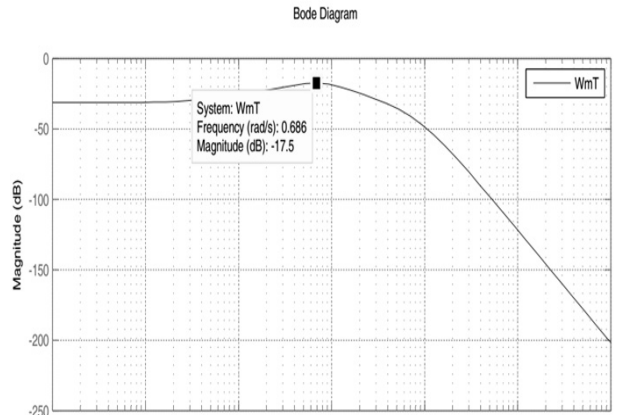
Hình 12. Biểu đồ hàm độ nhạy (S) bù nhạy (T)

Dựa vào kết quả của đáp ứng ngõ ra Hình 11 và biểu đồ Bode của hàm độ nhạy, hàm bù nhạy Hình 12 ta nhận xét:

- Đáp ứng ngõ ra thỏa mãn các tiêu chí kỹ thuật đề ra.
- Hàm độ nhạy và hàm bù nhạy thỏa mãn điều kiện $\|W_p S\|_\infty < 1$ (xem Hình 13) và $\|W_m T\|_\infty < 1$ (xem Hình 14).

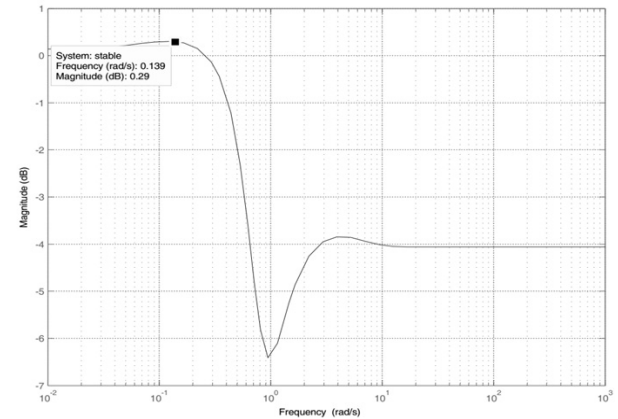


Hình 13. Hàm độ nhạy (S) thỏa điều kiện chất lượng danh định



Hình 14. Hàm bù nhạy (T) thỏa điều kiện ổn định danh định

Kiểm tra tính ổn định của hệ khi có bộ điều khiển bền vững H_∞ mới ta dựa vào biểu đồ Bode.



Hình 15. Biểu đồ đánh giá chất lượng bền vững bộ điều khiển H_∞

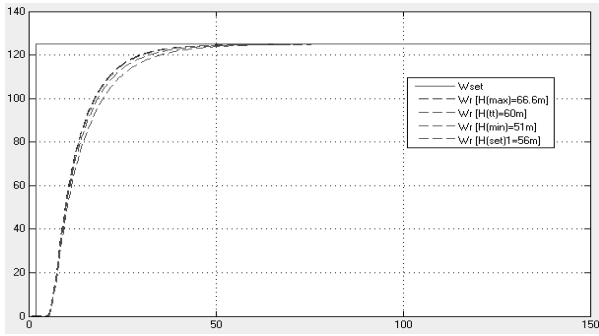
Từ biểu đồ Bode Hình 15 ta có:

$$\|W_p S\|_\infty + \|W_m T\|_\infty = 0,139 < 1 \quad (13)$$

Vậy bộ điều khiển bền vững H_∞ thiết kế mới có hàm truyền là K_{inf} tìm được cho hệ thống vòng kín thỏa mãn điều kiện chất lượng bền vững.

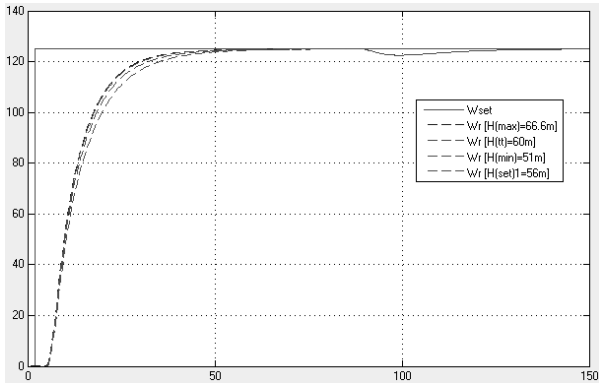
Từ kết quả bộ điều khiển bền vững H_∞ mới tìm được ta so sánh kết quả với bộ điều khiển PID dùng công cụ Tuning của Matlab-Simulink. Với thời gian mô phỏng 150 (s), giá trị tốc độ đặt 125 (vòng/phút). Kết quả mỗi trường hợp như sau:

- Trường hợp khởi động:



Hình 16. Đáp ứng tốc độ ở khi khởi động

- Trường hợp khi có nhiễu: Với trường hợp này ta xét sau khi khởi động cho tổ máy đóng tải tại 90 (s) với giá trị đóng tải là 5 (MW).



Hình 17. Đáp ứng tốc độ khi có nhiễu tải

Với tiêu chí đề ra của bộ điều khiển bền vững H_∞ có hàm truyền là K_{inf} ta thấy bộ điều khiển bền vững H_∞ mới thỏa mãn và có chất lượng điều khiển tốt hơn bộ điều khiển PID ở quá trình khởi động. So với bộ điều khiển PID thì độ quá điều chỉnh gần như không có, thời gian xác lập là ≈ 60

(s). Với trường hợp có nhiễu tải thì tốc độ sau khi bị giảm tốc vẫn trở về giá trị đặt.

6. Kết luận

Bài báo này trình bày phương pháp điều khiển mới cho hệ thống điều tốc turbine thủy điện trong việc ổn định tốc độ bằng phương pháp điều khiển bền vững H_∞ khi tham số cột nước nằm trong giới hạn $51 \div 66,6$ (m).

Kết quả mô phỏng trên Matlab đã chứng minh được khi tham số cột nước thay đổi từ $51 \div 66,6$ (m) thì bộ điều khiển bền vững H_∞ có chất lượng điều khiển tốt hơn bộ điều khiển PID. Tuy nhiên, nội dung bài báo chỉ dừng lại xét ở quá trình khởi động tổ máy khi có ảnh hưởng của cột nước. Vì vậy, để tìm hiểu và thiết kế đầy đủ, trong tương lai tác giả sẽ nghiên cứu thêm ở các chế độ làm việc của hệ thống điều tốc như chế độ cố định công suất, chế độ cố định độ mở, chế độ điều tần để có được bộ điều khiển bền vững H_∞ đầy đủ hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Huỳnh Thái Hoàng, *Lý thuyết Điều khiển nâng cao*, Trường Đại học Bách khoa Thành phố Hồ Chí Minh.
- [2] Dự án thủy điện Srépók 3\Gói thiết bị cơ điện\5071 Hệ thống điều tốc.
- [3] German Ardul Munoz-Hernandez, Sa'ad Petrou Mansoor, Dewi Leuan Jones, (2013), *Modelling and Controlling Hydropower Plants*, Springer-Verlag London.
- [4] Matlab Simulink R2012a, Demo "Emergency Diesel-Generator and Asynchronous Motor".
- [5] Matlab Simulink R2012a, "Using MIXSYN for H-Infinity Loop Shaping".
- [6] Prabha Kundur, (1993) *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York.
- [7] J. Marcus Blaazer, (2010) "Advanced process control for power plants improving overall performance through control of internal process variables", Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering (3mE) Delft University of Technology.

(BBT nhận bài: 14/10/2016, hoàn tất thủ tục phản biện: 13/12/2016)