

ĐIỀU KHIỂN BACKSTEPPING THÍCH NGHI DỰA TRÊN MẠNG NƠ-RON CHO ỔN ĐỊNH TẦN SỐ NHÀ MÁY THỦY ĐIỆN NHỎ

FREQUENCY STABILITY FOR SMALL HYDROPOWER PLANT BASED ON BACKSTEPPING CONTROLLER

Đặng Tiến Trung^{1,*}DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2026.038>

TÓM TẮT

Ổn định tần số là một trong những yêu cầu quan trọng đối với các nhà máy thủy điện nhỏ nhằm đảm bảo chất lượng điện năng và vận hành an toàn hệ thống. Do đặc tính phi tuyến và chịu ảnh hưởng của nhiều nhiễu tải, các phương pháp điều khiển truyền thống thường gặp khó khăn trong việc duy trì hiệu suất ổn định. Trong bài báo này, một bộ điều khiển Backstepping kết hợp bộ ước lượng nơ-ron được đề xuất để điều khiển cơ cấu cánh lái hướng, nhằm ổn định tần số máy phát của nhà máy thủy điện nhỏ. Trên cơ sở mô hình toán học của hệ turbine - máy phát và cơ cấu chấp hành, bộ điều khiển được thiết kế theo phương pháp Lyapunov nhằm đảm bảo tính ổn định của hệ thống. Bộ ước lượng nơ-ron được sử dụng để xấp xỉ và bù các nhiễu tải và bất định mô hình. Kết quả mô phỏng trên Matlab/Simulink cho thấy bộ điều khiển đề xuất giúp hệ thống đạt được đáp ứng nhanh, ổn định tần số tốt và duy trì chất lượng điện năng ngay cả khi có nhiễu tác động. Các kết quả thu được chứng minh tính hiệu quả và khả năng ứng dụng của phương pháp đề xuất đối với các nhà máy thủy điện nhỏ.

Từ khóa: Điều khiển Backstepping, ổn định tần số, mạng nơ-ron, nhà máy thủy điện nhỏ.

ABSTRACT

Frequency stability is one of the critical requirements for small hydropower plants to ensure power quality and safe system operation. Due to nonlinear characteristics and the presence of load disturbances, conventional control methods often face difficulties in maintaining stable performance. In this paper, a Backstepping controller combined with a neural network estimator is proposed to control the guide vane mechanism for stabilizing the generator frequency of a small hydropower plant. Based on the mathematical model of the turbine-generator system and the actuator dynamics, the controller is designed using the Lyapunov approach to guarantee system stability. The neural network estimator is employed to approximate and compensate for load disturbances and model uncertainties. Simulation results obtained in Matlab/Simulink demonstrate that the proposed control scheme provides fast dynamic response, effective frequency stabilization, and maintains power quality even in the presence of disturbances. The results confirm the effectiveness and applicability of the proposed approach for small hydropower plants.

Keywords: Backstepping control, frequency stability, neural network, small hydropower plant.

¹Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện Lực

*Email: dangtientrung@gmail.com

Ngày nhận bài: 05/01/2026

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 02/3/2026

Ngày chấp nhận đăng: 30/3/2026

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các nhà máy thủy điện nhỏ ngày càng được khai thác rộng rãi nhằm tận dụng nguồn năng lượng tái tạo phân tán và đáp ứng nhu cầu điện năng tại các khu vực xa trung tâm. Tuy nhiên, do quy mô nhỏ và thường vận hành trong điều kiện lưới yếu hoặc chế độ cô lập, bài toán ổn định tần số của các nhà máy thủy điện nhỏ vẫn là một thách

thức lớn đối với hệ thống điện. Sự thay đổi tải, dao động thủy lực và các bất định mô hình có thể gây ra sai lệch tần số, ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng điện năng và độ tin cậy vận hành hệ thống.

Trong các nghiên cứu trước đây, nhiều phương pháp điều khiển tuyến tính đã được đề xuất cho bài toán điều chỉnh tần số thủy điện. Doolla và Bhatti [1] đã nghiên cứu

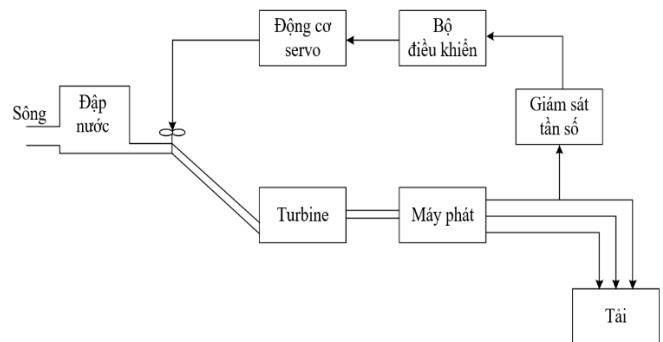
điều khiển tần số cho nhà máy thủy điện nhỏ vận hành cô lập, trong đó tập trung vào việc giảm công suất xả tải. Tuy nhiên, phương pháp này chủ yếu dựa trên mô hình tuyến tính và có hiệu quả hạn chế khi hệ thống chịu nhiễu lớn hoặc tham số thay đổi. Tương tự, Eker [2] đề xuất bộ điều khiển bền vững cho tuabin thủy điện dựa trên cấu trúc điều khiển cascade đa biến, song vẫn gặp khó khăn trong việc xử lý các phi tuyến mạnh và bất định mô hình đặc trưng của hệ thống thủy điện nhỏ. Để khắc phục các hạn chế của phương pháp tuyến tính, các kỹ thuật điều khiển phi tuyến đã thu hút sự quan tâm trong những năm gần đây. Trong đó, phương pháp Backstepping nổi bật nhờ khả năng thiết kế bộ điều khiển có cơ sở Lyapunov rõ ràng, đảm bảo tính ổn định cho các hệ thống phi tuyến bậc cao. Gần đây, việc kết hợp Backstepping với mạng nơ-ron nhằm xấp xỉ và bù các nhiễu không xác định đã cho thấy hiệu quả trong nhiều hệ thống năng lượng. Nath và cộng sự [3] đã áp dụng điều khiển Backstepping kết hợp mạng nơ-ron cho hệ thống năng lượng sóng, đạt được khả năng bám tốt và chống nhiễu hiệu quả. Zhu và cộng sự [4] tiếp tục mở rộng hướng nghiên cứu này bằng cách kết hợp Backstepping với học tăng cường và mạng nơ-ron cho các hệ phi tuyến có trễ, chứng minh tính ưu việt về khả năng thích nghi và ổn định. Bên cạnh đó, các nghiên cứu gần đây về ổn định tần số trong microgrid và hệ thống năng lượng phân tán cho thấy việc tích hợp các kỹ thuật điều khiển tiên tiến là cần thiết để nâng cao độ bền vững của hệ thống. Nghiên cứu [5] đề xuất chiến lược điều khiển tần số cho microgrid vận hành cô lập dựa trên quán tính ảo và bộ điều khiển FOPID, cho thấy hiệu quả cải thiện đáp ứng tần số nhưng vẫn phụ thuộc nhiều vào quá trình hiệu chỉnh tham số.

Từ tổng quan trên có thể thấy rằng, mặc dù đã có nhiều nghiên cứu liên quan đến điều khiển tần số cho thủy điện nhỏ và các hệ thống năng lượng tương tự, việc ứng dụng điều khiển Backstepping kết hợp mạng nơ-ron trực tiếp cho cơ cấu cánh lái hướng của nhà máy thủy điện nhỏ vẫn còn hạn chế. Do đó, bài báo này đề xuất một bộ điều khiển Backstepping kết hợp bộ ước lượng nơ-ron nhằm ổn định tần số máy phát thông qua điều khiển cánh lái hướng. Bộ điều khiển được thiết kế dựa trên phân tích Lyapunov nhằm đảm bảo tính ổn định của hệ thống trong điều kiện tồn tại nhiễu tải và bất định mô hình. Hiệu quả của phương pháp đề xuất được kiểm chứng thông qua các kết quả mô phỏng.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Trong nhà máy thủy điện nhỏ, hệ thống ổn định tần số bao gồm các thành phần chính: tuabin thủy lực, máy phát điện và cơ cấu điều khiển cánh lái hướng. Trong đó,

cánh lái hướng đóng vai trò điều chỉnh lưu lượng nước vào tuabin, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến mômen cơ và tốc độ quay của turbine, quyết định tần số phát điện của máy phát. Do đó, việc xây dựng mô hình toán học của hệ thống tập trung vào mối quan hệ giữa góc mở cánh lái hướng và tốc độ quay của turbine.



Hình 1. Sơ đồ mạch vòng điều khiển vị trí cánh lái hướng

Cánh lái hướng là một cơ cấu cơ điện - thủy lực có khối lượng và mômen quán tính lớn, chịu tác động của mômen điều khiển từ xi lanh thủy lực và mômen thủy lực do áp lực cột nước gây ra. Phương trình động lực học của cơ cấu cánh lái hướng được mô tả như sau:

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + K\theta = M_u - M_h \tag{1}$$

Trong đó:

θ là góc mở cánh lái hướng (rad);

J là mômen quán tính quy đổi của cụm cánh lái hướng;

B là hệ số ma sát nhớt;

M_u là mômen điều khiển do xi lanh thủy lực tạo ra;

M_h là mômen thủy lực do áp lực nước tác động lên cánh lái hướng.

Mômen điều khiển M_u được giả thiết tỷ lệ thuận với tín hiệu điều khiển u :

$$M_u = K_u u \tag{2}$$

Thay (2) vào (1) và gom các thành phần nhiễu vào một hạng tử duy nhất, ta thu được:

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + K\theta = K_u u + d_\theta \tag{3}$$

Trong đó, d_θ là nhiễu tổng hợp, bao gồm mômen thủy lực và các bất định tham số.

Trong thực tế, vòng điều khiển vị trí cánh lái hướng thường có đáp ứng nhanh so với động học của turbine. Do đó, hệ thống cánh lái hướng có thể được xấp xỉ bằng một khâu quán tính bậc nhất:

$$T\dot{\theta} + \theta = u \tag{4}$$

Trong đó, T là hằng số thời gian của cơ cấu chấp hành.

Từ hàm truyền (4) cho phương trình sau:

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{T}\theta + \frac{1}{T}u \tag{5}$$

Động lực học quay của turbine - máy phát được mô tả bởi phương trình cân bằng mômen:

$$J_t \dot{\omega} = T_m - T_e - D\omega \tag{6}$$

Trong đó:

ω là tốc độ quay của turbine;

J_t là mômen quán tính quy đổi của tổ máy;

T_m là mômen cơ do nước tác động lên turbine;

T_e là mômen điện từ của máy phát;

D là hệ số ma sát và tổn hao cơ.

Trong vùng làm việc gần điểm danh định, mômen cơ T_m phụ thuộc chủ yếu vào góc mở cánh lái hướng và có thể xấp xỉ tuyến tính:

$$T_m = K_t \theta \tag{7}$$

Trong khi đó, mômen điện từ và các biến động tải được gộp vào thành phần nhiễu tổng hợp $d(t)$. Khi đó, phương trình (6) có thể viết lại:

$$\dot{\omega} = \alpha\theta + d(t) \tag{8}$$

Với $\alpha = \frac{K_t}{J_t}$ là hằng số dương, $d(t)$ là nhiễu tải không

xác định, bao gồm biến động công suất tải, dao động thủy lực và sai lệch mô hình.

Kết hợp mô hình cánh lái hướng và mô hình turbine - máy phát, mô hình tổng thể của hệ thống ổn định tần số được mô tả bởi hệ phương trình phi tuyến sau:

$$\begin{cases} \dot{\omega} = \alpha\theta + d(t) \\ \dot{\theta} = -\frac{1}{T}\theta + \frac{1}{T}u \end{cases} \tag{9}$$

3. ĐIỀU KHIỂN BACKSTEPPING KẾT HỢP BỘ ƯỚC LƯỢNG NƠ-RON

Trong mục này, bộ điều khiển Backstepping được thiết kế cho hệ thống điều khiển cánh lái hướng nhằm ổn định tần số quay turbine của nhà máy thủy điện nhỏ. Đồng thời, một bộ ước lượng nơ-ron được tích hợp để xấp xỉ và bù nhiễu tải không xác định, qua đó nâng cao khả năng chống nhiễu và độ bền vững của hệ thống.

Sai số giữa tốc độ góc thực của turbine ω và tốc độ chuẩn ω^* là e ta có:

$$e = \omega - \omega^* \tag{10}$$

Xây dựng hàm Lyapunov cho sai lệch bám như sau:

$$V_1 = \frac{1}{2}e^2 \tag{11}$$

Tiến hành phép toán lấy đạo hàm đối với hàm Lyapunov V_1 :

$$\dot{V}_1 = e\dot{e} = e(\dot{\omega} - \dot{\omega}^*) \tag{12}$$

Vì ω^* là hằng số nên $\dot{\omega}^* = 0$, vì vậy:

$$\dot{V}_1 = e\dot{e} = e\dot{\omega} \tag{13}$$

Thay (9) vào (13) nhận được:

$$\dot{V}_1 = e(\alpha\theta + d(t)) \tag{14}$$

* Thiết kế điều khiển ảo:

Không thay đổi giá trị \dot{V}_1 khi thêm và bớt vào biểu thức (14) giá trị $\alpha\theta_d$ có:

$$\dot{V}_1 = e\alpha(\theta - \theta_d) + e(\alpha\theta_d + d(t)) \tag{15}$$

Chọn biến điều khiển ảo θ_d sao cho:

$$\alpha\theta_d = -k_1 \hat{d}(t) \tag{16}$$

Với $k_1 > 0$ là hằng số thiết kế và $\hat{d}(t)$ là giá trị ước lượng của nhiễu tải.

Khi đó:

$$\dot{V}_1 = -k_1 e^2 + \alpha e z + e \tilde{d} \tag{17}$$

Trong đó: $z = \theta - \theta_d$ là sai lệch điều khiển ảo; $\tilde{d} = d(t) - \hat{d}(t)$ là sai số ước lượng nhiễu.

* Thiết kế bộ ước lượng nơ-ron cho nhiễu tải

Do nhiễu tải $d(t)$ có tính phi tuyến và không xác định, một mạng nơ-ron được sử dụng để xấp xỉ nhiễu theo dạng:

$$d(t) = W^{*T} \Phi(x) + \varepsilon \tag{18}$$

Trong đó:

W^* là vector trọng số lý tưởng; $\Phi(x)$ là vector hàm kích hoạt; ε là sai số xấp xỉ bị chặn.

Giá trị ước lượng nhiễu được xác định bởi:

$$\hat{d}(t) = \hat{W}^T \Phi(x) \tag{19}$$

Sai số trọng số:

$$\tilde{W} = W^* - \hat{W} \tag{20}$$

Xây dựng hàm Lyapunov mở rộng cho toàn hệ:

$$V_2 = \frac{1}{2}e^2 + \frac{1}{2}z^2 + \frac{1}{2}\tilde{W}^T \Gamma^{-1} \tilde{W} \tag{21}$$

Trong đó, Γ là ma trận học dương xác định.

Lấy đạo hàm theo thời gian:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z\dot{z} + \tilde{W}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{W}} \quad (22)$$

* Thiết kế luật điều khiển thực:

Từ định nghĩa $z = \theta - \theta_d$:

$$\dot{z} = \dot{\theta} - \dot{\theta}_d \quad (23)$$

Thay (9) vào (23) có:

$$\dot{z} = -\frac{1}{T}\theta + \frac{1}{T}u - \dot{\theta}_d \quad (24)$$

Chọn luật điều khiển:

$$u = T \left(-k_2 z + \dot{\theta}_d + \frac{1}{T}\theta \right) \quad (25)$$

Với $k_2 > 0$.

* Luật cập nhật trọng số mạng nơ-ron:

$$\dot{\tilde{W}} = \Gamma \Phi(x)e \quad (26)$$

Khi đó:

$$\tilde{W}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{W}} = -\tilde{W}^T \Phi(x)e \quad (27)$$

* Chứng minh tính ổn định

Chứng minh $\dot{V}_2 < 0$

Thay các biểu thức trên vào \dot{V}_2 , thu được:

$$\dot{V}_2 \leq -k_1 e^2 - k_2 z^2 + \varepsilon \quad (28)$$

Do k_1, k_2 là các hằng số dương, nên hệ thống đảm bảo ổn định tiệm cận theo tiêu chuẩn Lyapunov và các sai số e, z bị chặn trong một miền nhỏ phụ thuộc vào sai số xấp xỉ của mạng nơ-ron.

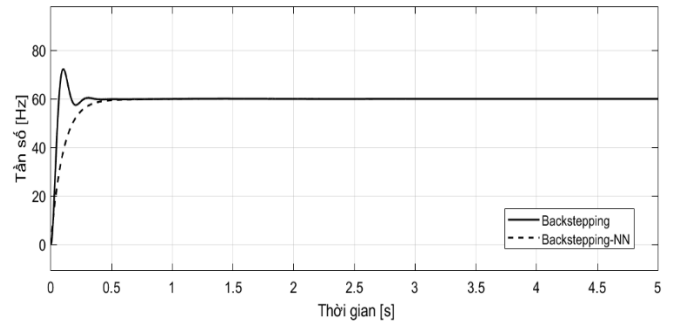
Như vậy, bộ điều khiển Backstepping kết hợp bộ ước lượng nơ-ron được thiết kế đảm bảo ổn định tần số quay turbine ngay cả khi tồn tại nhiễu tải và bất định mô hình.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

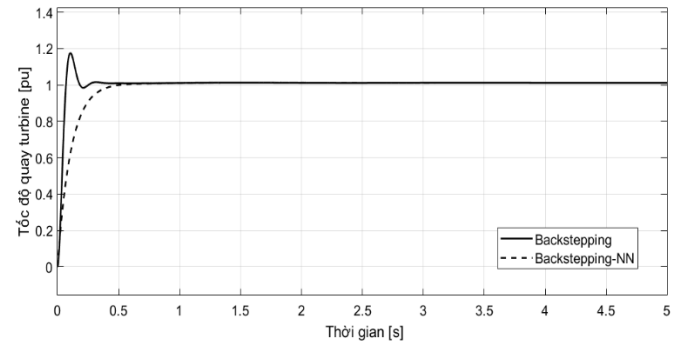
Trong phần trên, bài báo đã xây dựng bộ điều khiển Backstepping cho hệ điều khiển cánh lái hướng của máy phát thủy điện. Mô hình mô phỏng được thực hiện trên Matlab/Simulink. Tham số mô phỏng của cánh lái hướng: Mômen quán tính $J = 5.10^{-3} \text{kgm}^2$, hệ số ma sát nhớt $B = 0,02 \text{Nms/rad}$. Tham số máy phát thủy điện: Tốc độ quay danh định $\omega_0 = 1 \text{pu}$, công suất điện danh định $P_e = 1 \text{pu}$. Hệ số ổn định Lyapunov của bộ điều khiển $k_1 = 12; k_2 = 18$, hằng số thời gian của cơ cấu chấp hành $T = 0,2 \text{s}$. Tham số mạng nơ-ron: Số nút lớp ẩn $N = 7$, ma trận học $\Gamma = 25 I_{N \times N}$, trọng số khởi tạo $\hat{W}(0) = 0$, giới hạn bão hòa ước lượng nhiễu $\hat{d}(t) \in [-0,8, 0,8](\text{pu})$.

Trường hợp 1: Ổn định tần số trong điều kiện không có nhiễu.

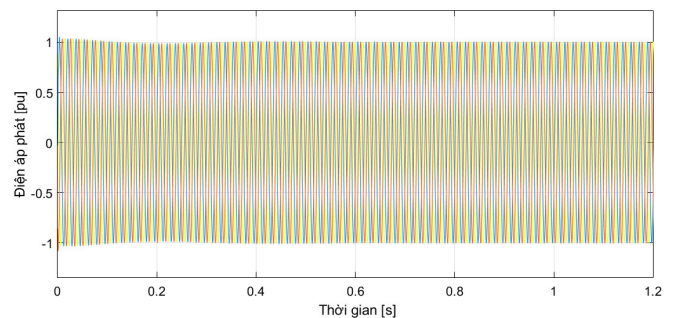
Trong trường hợp này, hệ thống được khảo sát trong điều kiện vận hành bình thường, không xét đến nhiễu tải và bất định mô hình. Mục tiêu điều khiển là đưa tốc độ quay turbine đạt tới giá trị danh định tương ứng với tần số đặt 60Hz.



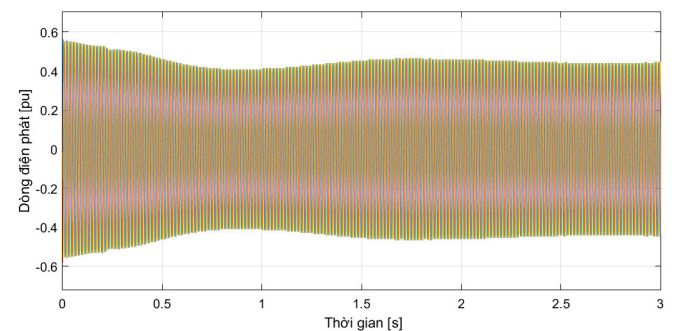
Hình 2. Đáp ứng tần số



Hình 3. Tốc độ quay của Turbine



Hình 4. Điện áp phát



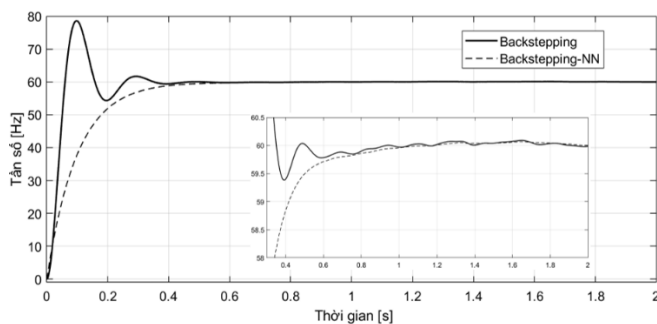
Hình 5. Dòng điện phát

Tại thời điểm bắt đầu mô phỏng, tốc độ turbine được giả thiết lệch khỏi giá trị danh định. Bộ điều khiển Backstepping tác động thông qua điều chỉnh góc mở cánh lái hướng để thay đổi lưu lượng nước vào turbine, từ đó điều chỉnh mômen cơ và tốc độ quay của tổ máy.

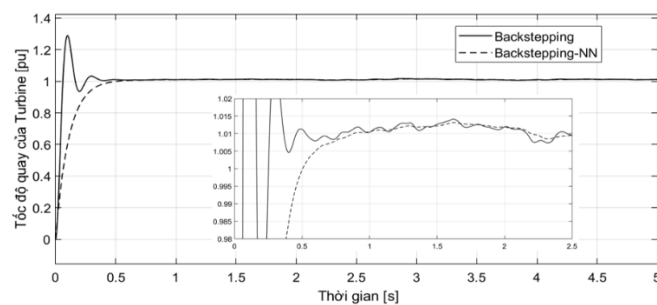
Các kết quả mô phỏng được thể hiện trên các hình từ hình 2 ÷ 5 cho thấy: Tần số phát nhanh chóng hội tụ về giá trị 60Hz với thời gian quá độ ngắn; Đáp ứng không xuất hiện dao động đáng kể và không có hiện tượng quá điều chỉnh; Tốc độ quay turbine đạt trạng thái xác lập ổn định; Điện áp và dòng điện phát được duy trì ổn định sau giai đoạn quá độ. Kết quả này cho thấy bộ điều khiển Backstepping đảm bảo tốt yêu cầu ổn định tần số và chất lượng điện năng trong điều kiện vận hành lý tưởng.

Trường hợp 2: Ổn định tần số khi có nhiễu tác động.

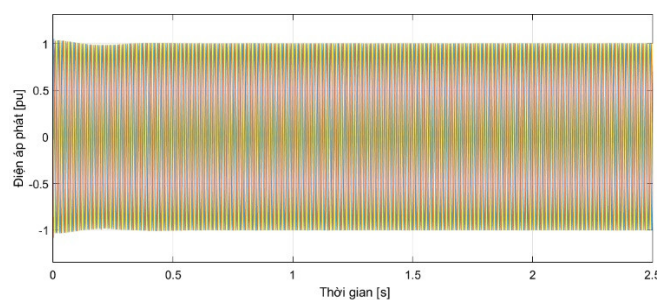
Trong trường hợp thứ hai, hệ thống được khảo sát trong điều kiện có nhiễu tải và bất định mô hình, nhằm đánh giá khả năng chống nhiễu và độ bền vững của bộ điều khiển.



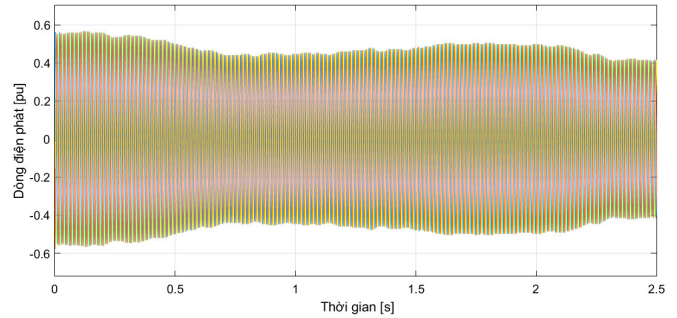
Hình 6. Đáp ứng tần số phát khi có nhiễu tác động



Hình 7. Tốc độ quay của Turbine khi có nhiễu



Hình 8. Điện áp phát khi có nhiễu



Hình 9. Dòng điện phát khi có nhiễu

Khi nhiễu xuất hiện, tần số và tốc độ quay turbine có xu hướng sai lệch khỏi giá trị danh định. Tuy nhiên, nhờ bộ điều khiển Backstepping kết hợp bộ ước lượng nơ-ron, hệ thống nhanh chóng bù nhiễu thông qua điều chỉnh góc mở cánh lái hướng.

Nhận xét:

Các kết quả mô phỏng được thực hiện nhằm đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển Backstepping kết hợp bộ ước lượng nơ-ron đối với bài toán ổn định tần số của nhà máy thủy điện nhỏ. Trong trường hợp không có nhiễu, hệ thống điều khiển cho đáp ứng tốt. Tốc độ quay của turbine nhanh chóng đạt tới giá trị danh định tương ứng với tần số 60Hz. Đáp ứng tần số có dạng trơn, không xuất hiện hiện tượng dao động hoặc quá điều chỉnh đáng kể, thời gian quá độ ngắn. Điều này cho thấy bộ điều khiển Backstepping được thiết kế phù hợp với đặc tính động học của hệ thống. Các đại lượng điện của máy phát như điện áp và dòng điện sau quá độ được duy trì ổn định, đáp ứng yêu cầu về chất lượng điện năng trong điều kiện vận hành bình thường. Trong trường hợp có nhiễu tác động, bao gồm nhiễu tải và các bất định mô hình, hệ thống vẫn duy trì được khả năng ổn định. Khi nhiễu xuất hiện, tần số và tốc độ turbine có sai lệch trong thời gian ngắn, sau đó nhanh chóng trở về giá trị xác lập. Biên độ dao động nhỏ và thời gian phục hồi ngắn cho thấy khả năng chống nhiễu và tính bền vững của bộ điều khiển. Bộ ước lượng nơ-ron đóng vai trò quan trọng trong việc xấp xỉ và bù nhiễu không xác định, góp phần nâng cao chất lượng điều khiển.

Từ các kết quả mô phỏng có thể kết luận rằng bộ điều khiển đề xuất đáp ứng tốt các chỉ tiêu chất lượng động học và đảm bảo ổn định tần số cho hệ thống thủy điện nhỏ trong các điều kiện làm việc khác nhau.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày việc xây dựng mô hình toán học của hệ thống ổn định tần số cho nhà máy thủy điện nhỏ, trong đó tập trung vào động học của cơ cấu cánh lái hướng và hệ turbine - máy phát. Trên cơ sở mô hình phi

tuyến của hệ thống, bộ điều khiển Backstepping kết hợp với bộ ước lượng nơ-ron đã được thiết kế nhằm nâng cao khả năng ổn định và chống nhiễu. Tính ổn định của hệ thống điều khiển được chứng minh thông qua phương pháp Lyapunov. Các kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển đề xuất đảm bảo ổn định tần số phát, đáp ứng nhanh, hạn chế dao động và duy trì chất lượng điện năng ngay cả khi có nhiễu tải và bất định mô hình.

Kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp điều khiển Backstepping kết hợp nơ-ron là một hướng tiếp cận phù hợp và có tiềm năng ứng dụng trong thiết kế hệ thống điều khiển cánh lái hướng cho các nhà máy thủy điện nhỏ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Doolla S, Bhatti TS, "Load frequency control of an isolated small-hydro power plant with reduced dump load," *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(4): 1912-1919, 2006.
- [2]. İlyas Eker, "Robust governor design for hydro turbines using a multivariable-cascade control approach," *Arabian Journal for Science and Engineering*, 28, 2B, 195-209, 2003.
- [3]. Priyanka Nath, et al., "Neural network backstepping control of OWC wave energy system," *Scientific Reports*, 15, 1, 2025. doi:10.1038/s41598-025-87725-x.
- [4]. Boyan Zhu, et al., "Neural network-based adaptive reinforcement learning for optimized backstepping tracking control of nonlinear systems with input delay," *Applied Intelligence*, 55, 129, 2025.
- [5]. Suman G.K., Yadav S., Guerrero J.M., "Frequency Regulation Strategy in Islanded Microgrid With High Renewable Penetration Supported by Virtual Inertia," *Smart Grids and Sustainable Energy*, 9, 33, 2024.

AUTHOR INFORMATION

Dang Tien Trung

Faculty of Electrical Engineering, Electric Power University, Vietnam