

ỔN ĐỊNH TẦN SỐ CHO NHÀ MÁY THỦY ĐIỆN NHỎ DỰA TRÊN BỘ ĐIỀU KHIỂN BACKSTEPPING

FREQUENCY STABILITY FOR SMALL HYDROPOWER PLANT BASED ON BACKSTEPPING CONTROLLER

Đặng Tiến Trung¹, Lâm Văn Đức^{2,*},
Ngô Thị Ngọc Anh¹, Lê Thị Phú¹

DOI: <http://doi.org/10.57001/huieh5804.2025.116>

TÓM TẮT

Một trong những vấn đề chính của các nhà máy thủy điện nhỏ là hệ thống điều khiển tần số. Trong bài báo này, một hệ thống điều khiển dựa trên bộ điều khiển Backstepping được đề xuất để điều khiển cánh lái hướng giúp ổn định tần số của máy phát. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống điều khiển có khả năng kiểm soát tần số phát ngay cả khi có sự tác động của nhiễu lên hệ thống.

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

ABSTRACT

One of the major problems of small hydropower plants is the frequency control system. In this paper, a control system based on Backstepping controller is proposed to control the rudder to stabilize the frequency of the generator. Simulation results show that the control system is capable of controlling the generating frequency even when there is an impact of disturbances on the system.

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

¹Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực

²Phòng Đào tạo, Trường Cao đẳng Dầu khí

*Email: lamduc140894@gmail.com

Ngày nhận bài: 17/02/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/3/2025

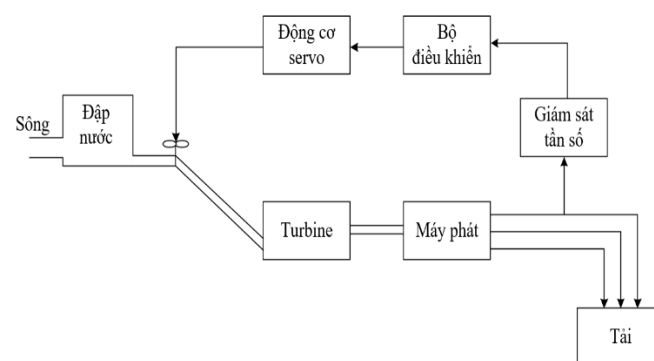
Ngày chấp nhận đăng: 28/5/2025

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong các nhà máy thủy điện, việc duy trì tần số máy phát ổn định đóng vai trò quan trọng trong đảm bảo chất lượng điện năng và ổn định hệ thống điện [1]. Một trong những yếu tố ảnh hưởng đáng kể đến tần số là hệ thống cánh lái hướng, có nhiệm vụ điều chỉnh dòng chảy nước vào tuabin. Việc điều khiển chính xác cánh lái hướng giúp

duy trì sự ổn định của tốc độ quay tuabin và do đó ổn định tần số máy phát [2]. Tuy nhiên, hệ thống cánh lái hướng có tính phi tuyến cao và chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố nhiễu loạn như thay đổi tải, dao động thủy lực và đặc tính động lực học phức tạp của dòng chảy. Các phương pháp điều khiển truyền thống như PID có thể không đảm bảo được hiệu suất tối ưu trong điều kiện làm việc thay đổi [3]. Do đó, cần có một phương pháp điều khiển tiên tiến hơn để cải thiện khả năng thích nghi và ổn định của hệ thống [4, 5]. Phương pháp điều khiển Backstepping là một trong những kỹ thuật hiện đại, dựa trên nguyên lý Lyapunov để thiết kế bộ điều khiển theo từng bước, đảm bảo tính ổn định toàn cục của hệ thống. Phương pháp này đặc biệt phù hợp cho các hệ thống phi tuyến và có thể áp dụng hiệu quả trong điều khiển cánh lái hướng nhằm ổn định tần số máy phát thủy điện. Bài báo này trình bày việc xây dựng bộ điều khiển Backstepping cho hệ thống cánh lái hướng, bao gồm mô hình hóa hệ thống, thiết kế bộ điều khiển và đánh giá hiệu suất thông qua mô phỏng. Kết quả nghiên cứu nhằm cung cấp một giải pháp hiệu quả để cải thiện độ ổn định tần số trong các nhà máy thủy điện, góp phần nâng cao chất lượng vận hành hệ thống điện.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG



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

Cánh lái hướng là một cơ cấu quay, có kích thước và khối lượng lớn, chịu áp lực của cột nước, phương trình mô tả góc quay cánh lái hướng được viết như sau:

$$J_c \frac{d^2\alpha}{dt^2} + K_a \frac{d\alpha}{dt} = M_u - M_A \quad (1)$$

Trong đó:

J_c - Momen quán tính của cả cụm cánh lái hướng;

K_a - Hệ số cản tỷ lệ với tốc độ quay cánh lái hướng;

M_A - Momen thủy tĩnh;

M_u - Momen do xilanh thủy lực tạo ra để quay cánh lái hướng (momen điều khiển), momen này có thể coi là tỉ lệ thuận với tín hiệu điều khiển u , tức là:

$$M_u = K_u u \quad (2)$$

Thay (2) vào (1) và chia hai vế phương trình (1) cho K_a nhận được:

$$T_a \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{d\alpha}{dt} = K_u U + z_2 \quad (3)$$

$$\text{Với } T_a = \frac{J_c}{K_a}, K_u = \frac{K_x}{K_a}, z_2 = -\frac{M_A}{K_a}$$

Các tham số T_a, K_u có thể coi là hằng số, phụ thuộc vào kích thước và khối lượng cơ cấu cánh lái hướng (không phụ thuộc vào năng lượng cột nước), còn nhiễu tải z_2 phụ thuộc vào áp lực cột nước và là tham số cần xác định bằng phương pháp nhận dạng.

Vòng điều khiển vị trí cánh lái hướng được rút gọn và xấp xỉ về khâu quán tính bậc nhất với hàm truyền có dạng như sau:

$$G_{vt}(s) = \frac{\alpha(s)}{u(s)} = \frac{K_a}{T_a s + 1} \quad (4)$$

Từ hàm truyền (4) cho phương trình sau:

$$T_a \frac{d\alpha}{dt} + \alpha = K_a u \quad (5)$$

3. XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN BACKSTEPPING

Gọi sai số giữa tần số quay thực của turbine ω và tần số chuẩn ω_0 là δ_1 ta có:

$$\delta_1 = \omega - \omega_0 \quad (6)$$

Xây dựng hàm Lyapunov cho sai lệch bám tần số chuẩn như sau:

$$V_1 = \frac{1}{2} \delta_1^2 \quad (7)$$

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

$$\dot{V}_1 = \delta_1 \dot{\delta}_1 = \delta_1 (\dot{\omega} - \dot{\omega}_0) \quad (8)$$

Vì ω_0 là hằng số nên $\dot{\omega}_0 = 0$, vì vậy:

$$\dot{V}_1 = \delta_1 \dot{\delta}_1 = \delta_1 \dot{\omega} \quad (9)$$

Từ phương trình (1) có:

$$\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt} = \left[\frac{1}{T} (K_a + z_1 - \omega) \right] \quad (10)$$

Thay (10) vào (9) nhận được:

$$\dot{V}_1 = \delta_1 \dot{\delta}_1 = \delta_1 \dot{\omega} = \delta_1 \left[\frac{1}{T} (K_a + z_1 - \omega) \right] \quad (11)$$

Không thay đổi giá trị $\dot{V}_1$ khi thêm và bớt vào biểu thức (11) giá trị $c_1 \delta_1$ (trong đó c_1 là hằng số dương được chọn):

$$\dot{V}_1 = \delta_1 \dot{\delta}_1 = \delta_1 \dot{\omega} = \delta_1 \left[-c_1 \delta_1 + c_1 \delta_1 + \frac{1}{T} (K_a + z_1 - \omega) \right] \quad (12)$$

Triển khai (12) nhận được:

$$\dot{V}_1 = \delta_1 \dot{\delta}_1 = \delta_1 \dot{\omega} = -c_1 \delta_1^2 + \delta_1 \left[c_1 \delta_1 + \frac{1}{T} (K_a + z_1 - \omega) \right] \quad (13)$$

Đặt điều khiển ảo là β , sai lệch giữa điều khiển ảo và góc mở cánh lái hướng sẽ là δ_2 :

$$\delta_2 = \alpha - \beta \quad (14)$$

Từ (14) sẽ có:

$$\alpha = \delta_2 + \beta \quad (15)$$

Thay (15) vào (13) nhận được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \delta_1 \dot{\delta}_1 = \delta_1 \dot{\omega} = -c_1 \delta_1^2 + \delta_1 \left[c_1 \delta_1 + \frac{1}{T} (K(\delta_2 + \beta) + z_1 - \omega) \right] \\ &= -c_1 \delta_1^2 + \frac{K}{T} \delta_1 \delta_2 + \delta_1 \left[c_1 \delta_1 + \frac{1}{T} (K\beta + z_1 - \omega) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

Nếu điều khiển ảo β được xác định sao cho tổng:

$$c_1 \delta_1 + \frac{1}{T} (K\beta + z_1 - \omega) = 0 \quad (17)$$

Tức là:

$$\beta = \frac{1}{K} [\omega - z_1 - c_1 \delta_1 T] \quad (18)$$

Khi này:

$$\dot{V}_1 = -c_1 \delta_1^2 + \frac{K}{T} \delta_1 \delta_2 \quad (19)$$

Xây dựng hàm Lyapunov cho tổng sai lệch bám tần số chuẩn và sai lệch giữa điều khiển ảo và góc mở cánh lái hướng:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \delta_2^2 \quad (20)$$

Tiến hành phép lấy đạo hàm theo biến thời gian đối với hàm V_2 :

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + \delta_2 \dot{\delta}_2 \quad (21)$$

Từ (14) có:

$$\dot{\delta}_2 = \dot{\alpha} - \dot{\beta} \quad (22)$$

Từ phương trình (5) có thể xác định $\dot{\alpha}$ như sau:

$$\dot{\alpha} = \frac{da}{dt} = \frac{K_a}{T_a} u - \frac{1}{T_a} \alpha \quad (23)$$

Thay phương trình (23) vào (22) nhận được:

$$\dot{\delta}_2 = \frac{K_a}{T_a} u - \frac{1}{T_a} \alpha - \dot{\beta} \quad (24)$$

Thay $\dot{\delta}_2$ ở phương trình (21) bằng vế phải (24) có:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + \delta_2 \left(\frac{K_a}{T_a} u - \frac{1}{T_a} \alpha - \dot{\beta} \right) \quad (25)$$

Không thay đổi giá trị $\dot{V}_2$ khi thêm và bớt vào biểu thức (25) giá trị $c_2 \delta_2$ (trong đó c_2 là hằng số dương được chọn):

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + \delta_2 \left(-c_2 \delta_2 + c_2 \delta_2 + \frac{K_a}{T_a} u - \frac{1}{T_a} \alpha - \dot{\beta} \right) \\ &= \dot{V}_1 - \delta_2 c_2 \delta_2 + \delta_2 \left(c_2 \delta_2 + \frac{K_a}{T_a} u - \frac{1}{T_a} \alpha - \dot{\beta} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

Chọn luật điều khiển u sao cho tổng:

$$\left(c_2 \delta_2 + \frac{K_a}{T_a} u - \frac{1}{T_a} \alpha - \dot{\beta} \right) = 0 \quad (27)$$

Tức là:

$$u = \frac{1}{K_a} (\alpha + T_a \dot{\beta} - T_a c_2 \delta_2) \quad (28)$$

Khi này $\dot{V}_2$ sẽ là:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 - c_2 \delta_2^2 \quad (29)$$

Thay $\dot{V}_1$ ở vế phải phương trình (29) bằng vế phải (19) nhận được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -c_1 \delta_1^2 + \frac{K}{T} \delta_1 \delta_2 - c_2 \delta_2^2 \\ &= -\left(c_1 \delta_1^2 - \frac{K}{T} \delta_1 \delta_2 + c_2 \delta_2^2 \right) \end{aligned} \quad (30)$$

Chứng minh $\dot{V}_2 < 0$

Vì hai tham số K và T là hai số dương, nên thương số $\frac{K}{T}$ cũng sẽ luôn luôn dương, khi đó có thể chọn hai số c_1 và c_2 là hai số dương như sau:

$$c_1 = \frac{K}{2T} + \Delta c_1, \quad c_2 = \frac{K}{2T} + \Delta c_2 \quad (31)$$

Trong đó, $\Delta c_1, \Delta c_2$ là hai số dương tùy chọn. Thay c_1 và c_2 ở (31) vào (30) có:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -\left(\left(\frac{K}{2T} + \Delta c_1 \right) \delta_1^2 - \frac{K}{T} \delta_1 \delta_2 + \left(\frac{K}{2T} + \Delta c_2 \right) \delta_2^2 \right) \\ &= -\left(\frac{K}{2T} \delta_1^2 - \frac{K}{T} \delta_1 \delta_2 + \frac{K}{2T} \delta_2^2 \right) - (\Delta c_1 \delta_1^2 + \Delta c_2 \delta_2^2) \\ &= -\left(\left(\sqrt{\frac{K}{2T}} \delta_1 \right)^2 - 2 \left(\sqrt{\frac{K}{2T}} \delta_1 \right) \left(\sqrt{\frac{K}{2T}} \delta_2 \right) + \left(\sqrt{\frac{K}{2T}} \delta_2 \right)^2 \right) \\ &\quad - (\Delta c_1 \delta_1^2 + \Delta c_2 \delta_2^2) \\ &= -\left(\sqrt{\frac{K}{2T}} \delta_1 - \sqrt{\frac{K}{2T}} \delta_2 \right)^2 - (\Delta c_1 \delta_1^2 + \Delta c_2 \delta_2^2) \end{aligned} \quad (32)$$

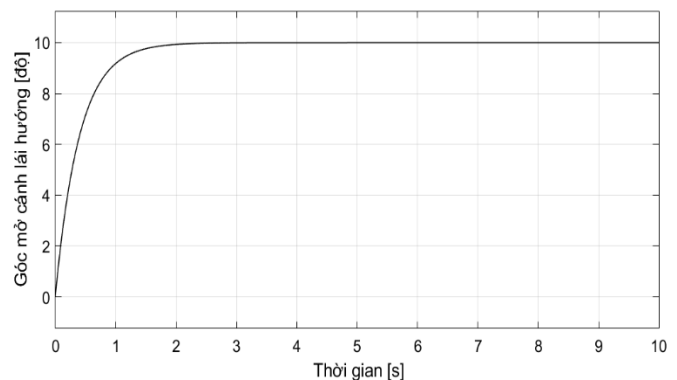
Vì Δc_1 và Δc_2 là các số dương tùy chọn, nên dễ dàng nhận thấy nếu chọn c_1 và c_2 theo biểu thức (31) thì hàm $\dot{V}_2$ luôn luôn âm. Theo lý thuyết ổn định Lyapunov, các sai số δ_1 và δ_2 sẽ tiệm cận về giá trị 0. Tức là tần số quay turbine sẽ tiệm cận ổn định về giá trị chuẩn ω_0 .

Như vậy với luật điều khiển u của cơ cấu tạo lệnh ổn định tần số quay turbine được thiết lập theo biểu thức (28) thì hệ thống đảm bảo tần số quay turbine ω ổn định xung quanh giá trị chuẩn ω_0 .

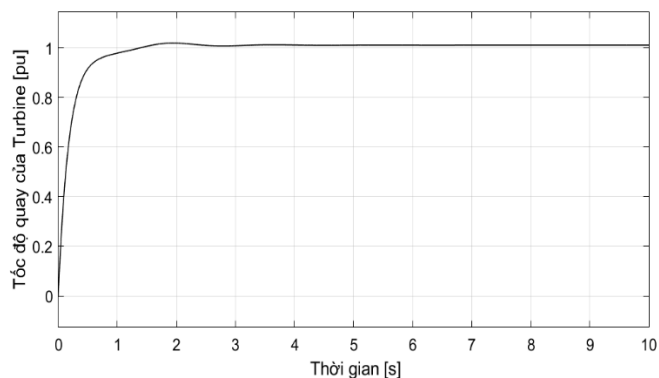
4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

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 $B = 0,02 \text{Nm/s/rad}$, độ cứng hệ thống $K = 0,5 \text{Nm/rad}$. 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 $c_1 = 3, c_2 = 4$.

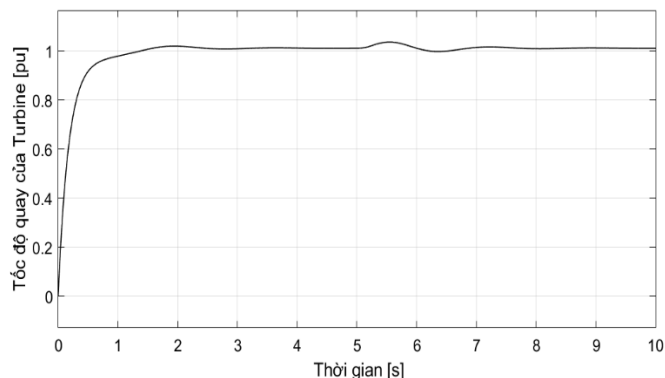
Trường hợp 1: Để góc mở cánh lái hướng là 10 độ, ổn định tần số máy phát là 60Hz. Kết quả như thể hiện trên hình 2 ÷ 5.



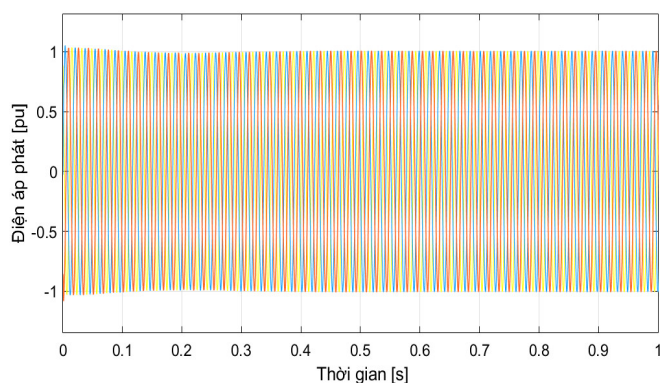
Hình 2. Đáp ứng góc mở cánh lái hướng



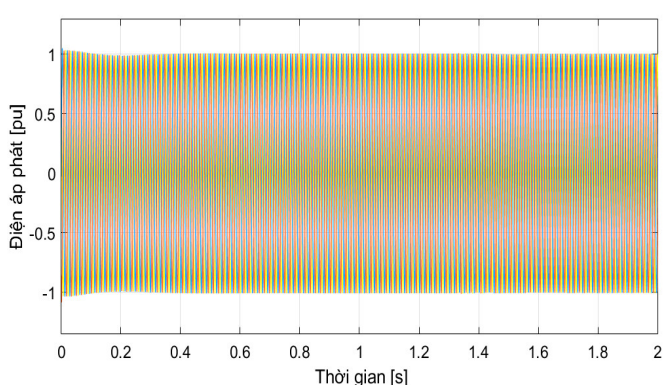
Hình 3. Tốc độ quay của Turbine



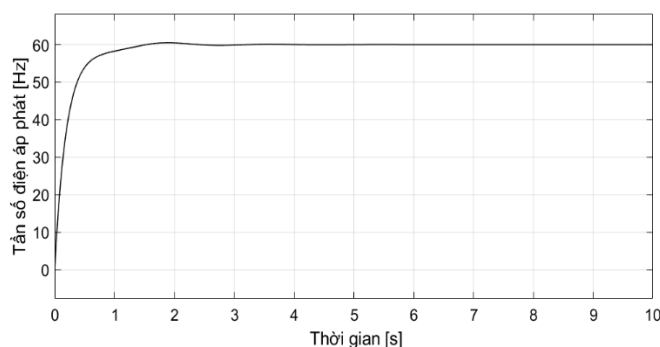
Hình 7. Tốc độ quay của Turbine khi có nhiễu



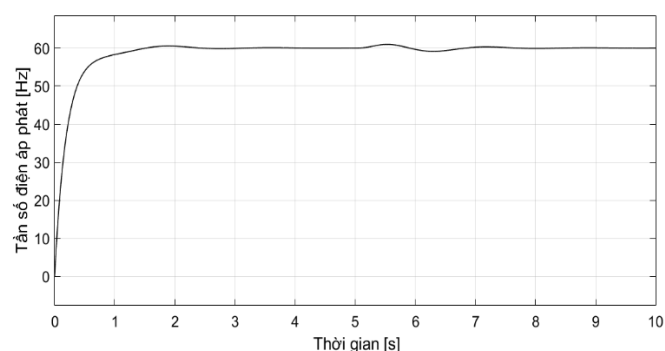
Hình 4. Điện áp phát



Hình 8. Điện áp phát khi có nhiễu

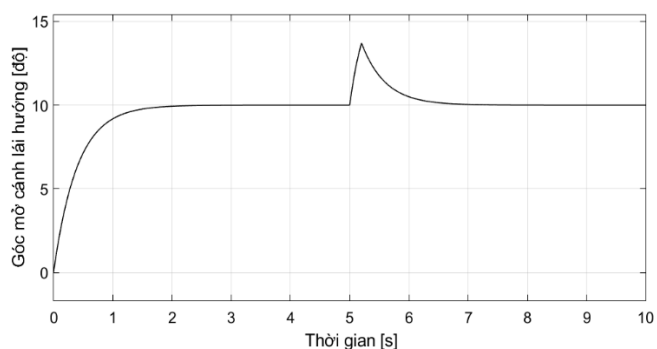


Hình 5. Tần số điện áp phát



Hình 9. Tần số điện áp phát khi có nhiễu

Trường hợp 2: Góc mở cánh lái hướng là 10 độ, tại thời điểm giây thứ 5 có nhiễu tác động làm góc mở cánh lái tăng đột ngột. Kết quả như thể hiện trên hình 6 ÷ 9.



Hình 6. Đáp ứng của góc mở cánh lái hướng khi có nhiễu tác động

Nhận xét:

Các kết quả mô phỏng cho thấy, bộ điều khiển Backstepping đã cho kết quả tốt, việc điều khiển cánh lái hướng ổn định, không có độ quá chỉnh, thời gian quá độ ngắn, máy phát giữ được ổn định tần số đầu ra. Khi có nhiễu tác động hệ thống nhanh chóng ổn định, đảm bảo điện áp phát.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả tổng hợp mô hình máy phát thủy điện nhỏ và tổng hợp bộ điều khiển Backstepping cho hệ truyền động cánh lái hướng, chứng minh tính ổn định của hệ theo tiêu chuẩn Lyapunov. Kết quả thu được cho thấy bộ điều khiển đảm bảo được yêu

cầu chất lượng của máy phát, có thể ứng dụng trong việc thiết kế bộ điều khiển cho cánh lái hướng của các nhà máy thủy điện cỡ nhỏ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Doolla S., Bhatti T. S., "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," *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 28, 2B, 195-209, 2003.
- [3]. Lie Jasa, Ardyono Priyadi, Mauridhi Hery Purnomo, "PID Control For Micro-Hydro Power Plants Based on neural network," in *Proceedings of the IASTED Conference Modelling, Identification, and Control*, Phuket, Thailand, 2012. DOI: 10.2316/P.2012.769-039.
- [4]. Chen Jian, Liang Gui-shu, Dong Qing, "Design of Additional Mix Robust Governor Control for Hydraulic Turbine Generator," in *2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, Nanjing, China, 2008.
- [5]. C. Xu, D. Qian, "Governor design for a hydropower plant with an upstream surge tank by GA-based fuzzy reduced-order sliding mode," *Energies*, 8, 12, 134-143, 2015.

AUTHORS INFORMATION

Dang Tien Trung¹, Lam Van Duc², Ngo Thi Ngoc Anh¹, Le Thi Phu¹

¹Faculty of Electrical Engineering, Electric Power University, Vietnam

²Department of Academic Affairs, Petrovietnam College, Vietnam