

MỘT THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH NGHI TỐC ĐỘ MÁY PHÁT THỦY ĐIỆN

AN ADAPTIVE SLIDING MODE TO CONTROL GOVERNOR OF HYDROPOWER

Nguyễn Hoàng Mai¹, Nguyễn Đức Huệ², Trần Văn Dũng³

¹Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; nhmai@dut.udn.vn

²Công ty Thủy điện Buôn Kuốp; hue.ndatd5@gmail.com

³Trường Cao đẳng nghề Đắk Lắk; tranvandungcdn@gmail.com

Tóm tắt - Điều khiển tốc độ trong nhà máy thủy điện (NMTĐ) là vấn đề rất quan trọng, đặc biệt đối với các NMTĐ lớn đảm nhận nhiệm vụ điều tần cho hệ thống điện. Hầu như hệ thống điều tốc của các NMTĐ đều sử dụng bộ điều khiển PID nên ít có khả năng thích nghi với nhiễu cũng như sự thay đổi tham số mô hình. Bài báo nêu lên một thuật toán điều khiển liên tục bền vững để tự động điều khiển tần số tổ máy cấp nguồn cho phụ tải độc lập, sử dụng số liệu của NMTĐ Srêpôk 3, xét riêng một tổ máy có công suất 110MW. Kết quả nghiên cứu được mô phỏng kiểm chứng cho thấy khả năng thích nghi với nhiễu và sự thay đổi tham số mô hình trong quá trình vận hành của bộ điều khiển SMAC tốt hơn bộ điều khiển PID kinh điển.

Từ khóa - điều chỉnh tần số; điều chỉnh công suất; nhà máy thủy điện; điều khiển bền vững; điều khiển thích nghi; bộ điều tốc.

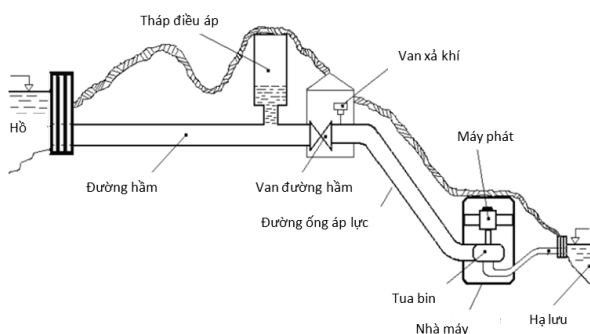
Abstract - Speed control is an important matter in a hydropower plant. Big hydropower plants perform frequency control of power system. Most of the governors of hydropower plants have used PID controllers. So they are less robust with parameter changes in operation and noise. In this paper, we present a new method control to make a robust speed control of the hydropower in small grids using parameters of Srepok 3 hydropower plant, considering one unit with capacity of 110MW. The simulated research results show that the SMAC controller adapts to noise and parameter change in the operation better than PID controller.

Key words - frequency control; active power control; hydropower plant; robust control; adaptive control; governor.

1. Đặt vấn đề

Một hệ thống điều tốc (Governor) tổng quát được nghiên cứu từ hồ chứa đến cửa xả sau tua bin. Các thành phần của hệ thống như Hình 1.

Nguyên lý hoạt động của NMTĐ không phức tạp, tuy nhiên khi điều khiển tốc độ của máy phát thủy điện (MPTĐ) nối lưới và vận hành song song, các thông số làm việc của hệ thống thay đổi thường xuyên, khi đó sẽ làm ảnh hưởng đến thông số của NMTĐ. Trong đó có việc ổn định tốc độ tổ máy... nên đòi hỏi bộ điều khiển tốc độ phải đáp ứng được tính bền vững để giữ cho MPTĐ không bị vượt ra ngoài vùng làm việc.



Hình 1. Mô hình cấu trúc NMTĐ

Hai vấn đề quan trọng trong NMTĐ là điều tốc AFR và điều áp AVR. Ở đây ta chỉ xét hệ thống điều tốc. NMTĐ có công suất vừa như NMTĐ Srêpôk 3 tham gia điều tần cấp 2 khi tần số lưới nằm ngoài giới hạn $50 \pm 0.5\text{Hz}$, nghĩa là cấp tiếp theo để bổ sung công suất tác dụng lên lưới ngay sau các nhà máy lớn như NMTĐ Hòa Bình, Italy, Trị An thực hiện chức năng điều tần cấp 1.

2. Kết quả nghiên cứu và khảo sát

2.1. Phương trình mô tả các phần tử trong NMTĐ

Để thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi ổn định tốc độ, ta nghiên cứu xây phương trình mô tả các thành phần trong hệ thống lần lượt theo thứ tự.

- Phương trình dòng chảy [2]:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 \cdot \cosh(T_e \cdot s) + 1/z_n \cdot \bar{H}_2 \cdot \sinh(T_e \cdot s) \quad (1)$$

- Phương trình cột nước [2]:

$$\bar{H}_2 = \bar{H}_1 \cdot \text{sech}(T_e \cdot s) - z_n \cdot \bar{U}_2 \cdot \tanh(T_e \cdot s) - k_f \cdot \bar{U}_2 \cdot |\bar{U}_2| \quad (2)$$

Ở đây: $\bar{H}_1 = k_f \cdot \bar{U}_2 \cdot |\bar{U}_2|$ là tổn thất do ma sát giữa dòng chảy và vách ống, k_f : hệ số tổn thất cột nước.

- Tháp điều áp có mô hình [2]:

$$\bar{H}_r = \frac{1}{C_s} \int \bar{U}_s dt - f_0 \cdot \bar{U}_s \cdot |\bar{U}_s| \quad (3)$$

- Mô hình cánh van hướng:

$$\frac{G(s)}{u_c(s)} = \frac{1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (4)$$

Đối với NMTĐ, đặc tính quan hệ điều khiển góc mở cánh hướng tua bin tổ máy có dạng chung như Hình 2.

- Mô hình động cơ servo, có dạng khâu quán tính bậc 1 nối tiếp với đầu ra tích phân kết hợp các khâu hạn chế để xác định vị trí:

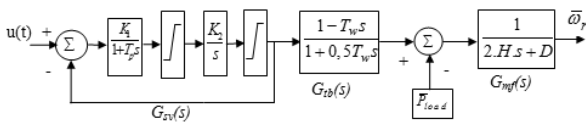
$$W_s = \frac{K_s}{(T_v s + 1)} \text{sat}(u, d) \frac{1}{s} \text{sat}(u, d) \quad (5)$$

$$G(s) = \frac{K_s(1-T_w s)}{T_p T_w H s^4 + [(0,5T_w D + 2H)T_p + T_w H]s^3 + (0,5T_w D + K_s T_w H + DT_q)s^2 + [D + (0,5T_w D + 2H)K_s]s + K_s D} \quad (14)$$

Bảng 1. Thông số nhà máy Srépók 3

STT	Thiết bị	Đơn vị	Thông số
1	Công suất định mức máy phát	MW	110
	Công suất biểu kiến	MVA	129,5
	Điện áp định mức	kV	13,8
	Tần số định mức	Hz	50
	Tốc độ định mức	Rpm	125
	Hiệu ứng bánh đà MF (GD ²)	Ton-m ²	28000
	Công suất cơ của tua bin	MW	112,25
2	Cột nước lớn nhất (H _{max})	m	66,6
	Cột nước nhỏ nhất (H _{min})	m	51
	Cột nước trung bình (H _{tb})	m	62
	Cột nước tính toán (H _{tt} ≈ H ₀)	m	60
	Lưu lượng định mức (m ³ /s)	(m ³ /s)	206,4
	Chiều dài đường hầm	m	593,8
	Đường kính hầm	m	8
	Vận tốc truyền sóng	m/s	4,11
3	Hằng số thời gian khởi động của nước: T _w	s	4,14
	Hằng số quán tính H	s	4,6
	Hằng số van tỉ lệ K ₁		3,33
	Hằng số van phân phối chính K ₂		1
	Hằng số thời gian van tỉ lệ		0,07
	Hệ số giảm chấn	s	1

Theo [5], tách riêng phần điều tốc, ta được mô hình bộ điều tốc có tải như Hình 4.

**Hình 4.** Tổng hợp mô hình hệ thống cơ thủy lực, tua bin lý tưởng và mô hình tải máy phát

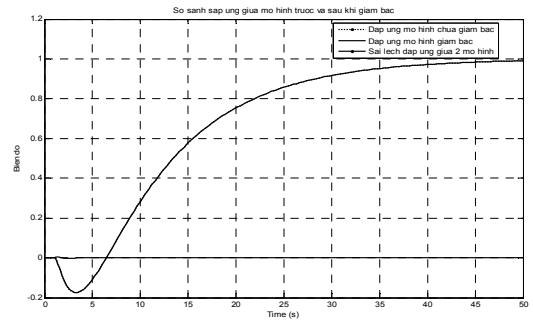
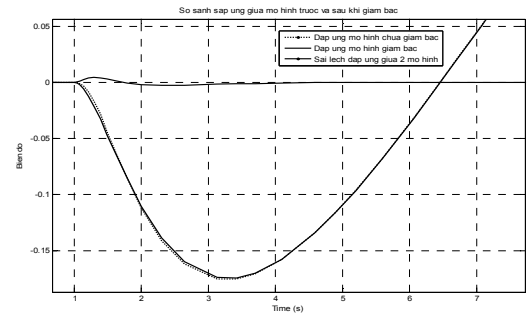
Thay số liệu trong Bảng 1 ta có mô hình tuyến tính hóa đầy đủ:

$$G(s) = \frac{u_r}{u_s} = \frac{-13,97s + 3,33}{1,333s^4 + 19,83s^3 + 74,76s^2 + 38,53s + 3,33} \quad (15a)$$

Tuy nhiên với giả thiết loại bỏ các thành phần bậc cao khi thiết kế vì cấu trúc quán tính lớn của phần cơ khi đóng vai trò như một bộ lọc bậc cao, ta chỉ giữ lại thành phần gần đúng đến bậc 2 như các mô hình cơ học quán tính, kết quả mô hình có dạng:

$$G(s) = \frac{\omega_r}{u_s} = \frac{-13,79s + 3,33}{74,76s^2 + 38,53s + 3,33} \quad (15b)$$

Kết quả mô phỏng ở Hình 5a, Hình 5b cho thấy việc loại bỏ các thành phần bậc cao thì đáp ứng đầu ra của đối tượng không thay đổi nhiều.

**Hình 5a.** Mô phỏng đáp ứng đối tượng 15a và 15b với tín hiệu vào là hàm 1(t)**Hình 5b.** Phóng to vùng quá độ đáp ứng đối tượng phương trình 15a và 15b với tín hiệu vào là hàm 1(t)

• Thiết kế bộ điều khiển PID

Hàm truyền đạt của bộ điều khiển PID liên tục của đối tượng có hàm truyền đạt nói trên có dạng:

$$G_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (16)$$

Thay bộ điều khiển PID bằng bộ điều khiển tỷ lệ, với hệ số tỷ lệ K_{th} . Trong đó K_{th} là giá trị mà tại đó hệ thống ở biên giới ổn định, nghĩa là đáp ứng quá độ có dạng dao động điều hòa.

Thay hàm truyền đạt của đối tượng đề bài ra, ta có sơ đồ mô phỏng.

Ta tiến hành thay đổi giá trị K_{th} rồi tăng dần và quan sát ở đáp ứng ngõ ra cho đến khi đạt dao động điều hòa.

Với $K_{th}=2,79$ thì đáp ứng quá độ có dạng dao động điều hòa. Chu kỳ T_{th} của $G(s)$ là 16s. Với T_{th} đã có, ta tính các thông số của bộ điều khiển PID theo biểu thức sau:

$$K_p = 0,6.K_{th} = 1,674$$

$$T_i = 0,5.T_{th} = 8$$

$$T_d = 0,125.T_{th} = 2$$

Từ các thông số K_p , T_i , T_d ta xác định được các hệ số tích phân K_i và vi phân K_d như sau:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = 0,2092$$

$$K_d = K_p.T_d = 3,348$$

Từ đó ta có hàm truyền của bộ điều khiển PID:

$$G_{PID}(s) = 1,674 \left(1 + \frac{1}{8s} + 2s \right) \quad (17)$$

Các kết quả đáp ứng của bộ điều khiển PID được thể hiện trên mô phỏng như tiếp theo.

• *Thiết kế bộ điều khiển trượt biến đổi*

Ta sử dụng bộ điều khiển trượt biến đổi SMAC để điều khiển cho hệ này, với mặt trượt:

$$S_0 = \dot{e} + \lambda e = 0 \text{ và hàm trượt } S = \dot{e} + \lambda e$$

Điều kiện trượt:

$$\dot{S} \cdot S < 0 \quad (18)$$

$$(\ddot{e} + \lambda \dot{e})S = -\alpha, \alpha > 0 \quad (19)$$

$$(\ddot{e} + \lambda \dot{e})|S| \operatorname{sgn}(S) = -\alpha \quad (20)$$

$$(\ddot{e} + \lambda \dot{e}) = \frac{-\alpha}{|S|} \operatorname{sgn}(S) \Rightarrow \ddot{e} = -\frac{\alpha}{|S|} \operatorname{sgn}(S) - \lambda \dot{e} \quad (21)$$

Do vậy, từ (15) nếu ta chọn tín hiệu điều khiển:

$$u = 22,472.K \operatorname{sgn}(S) + y_0 - e - (11,582 - 22,472.\lambda).\dot{e} + 4,16\ddot{u} \quad (22)$$

Thì hệ sẽ ổn định, đủ điều kiện hút và bám mặt trượt.

Chứng minh:

Chọn hàm Lyapunov dạng:

$$V = 22,472\left(\frac{1}{2}\lambda e^2 + \frac{1}{2}\lambda \dot{e}^2\right) \quad (23)$$

$$\dot{V} = 22,472(e\lambda \dot{e} + \dot{e}\dot{e}) = 22,472\dot{e}(\dot{e} + \lambda e) \quad (24)$$

$$\dot{V} = \dot{e}(22,472\dot{e} + 22,472\lambda e) \quad (25)$$

Thay $\alpha > 0$ ta được:

$$\dot{V} = (y_0 - e - 11,582\dot{e} + 4,16\ddot{u} - u + 22,472\lambda e)\dot{e} \quad (26)$$

$$(\ddot{e} + \lambda \dot{e}) = -\frac{\alpha}{|S|} \operatorname{sgn}(S) \quad (27)$$

$$\ddot{e} = -\lambda \dot{e} - \frac{\alpha}{|S|} \operatorname{sgn}(S) \quad (29)$$

Chọn $\alpha = S^2, \lambda > 0$

$$\dot{V} = -22,472\dot{e}(\lambda \dot{e} + \frac{S^2}{|S|} \operatorname{sgn}(S) - \lambda e) \quad (30)$$

$$\dot{V} = -22,472\dot{e}(\lambda \dot{e} + S - \lambda e) = -22,472\dot{e}(\lambda \dot{e} + \dot{e} + \lambda e - \lambda e) \quad (31)$$

$$\dot{V} = -22,472\dot{e}^2(\lambda + 1) < 0, \text{ hệ ổn định tiệm cận.}$$

Xây dựng luật biến đổi mặt trượt sai lệch e:

Theo [1], nếu mặt trượt có dạng là một siêu diện trượt, thì dao động quanh mặt trượt khi bám sẽ biến thiên trong lớp biên bị hạn chế bởi vùng ổn định (nếu thỏa mãn ổn định tiệm cận). Do vậy nếu thiết kế mặt trượt dạng siêu diện sao cho độ dốc của mặt trượt bám theo mặt siêu diện thì sẽ giảm được biên độ rung. Từ đó, ta chọn hàm mặt trượt $\lambda(t) = \beta|e(t)| > 0$, mặt trượt có dạng phi tuyến, sai lệch giảm thì độ dốc mặt trượt giảm theo, vì vậy biên độ rung giảm.

Cuối cùng, ta có điện áp điều khiển động cơ servo để đóng mở van điều khiển cánh hướng tua bin thích nghi theo mặt trượt có dạng như sau:

$$u = 22,472K \operatorname{sgn}(S) + y_0 - e - (11,582 - 22,472\beta|e(t)|)\dot{e} + 4,16\ddot{u} \quad (32)$$

Thực tế hệ điện cơ luôn có tín hiệu cơ liên tục từng khoảng, do quán tính cơ lớn hơn nhiều lần quán tính bộ điều khiển nên trong điều khiển bằng máy tính, việc tính toán vi phân của u được thực hiện tại thời điểm t_n được nội suy theo thời điểm lấy mẫu t_{n-1}, t_{n-2} lưu trong bộ nhớ. Với

T là chu kỳ lấy mẫu được chọn tùy ý đủ nhỏ so với quán tính của cơ hệ. Do hệ đang xét là hệ tuyến tính liên tục nên vi phân của hệ cũng liên tục. Theo (32) ta có:

$$u - 4,16\ddot{u} = u_n - 4,16\left(\frac{u_n - u_{n-1}}{T}\right) = \left(1 - \frac{4,16}{T}\right)u_n - \frac{4,16}{T}u_{n-1}$$

Thay vào (32), ta có thuật toán để tính toán u_n trên máy tính như sau [4]:

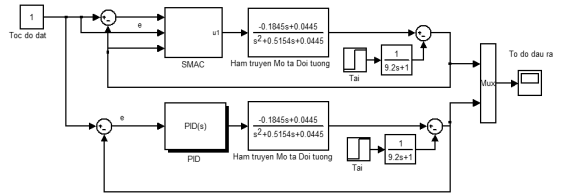
$$u_n = \left(\frac{T}{T - 4,16}\right) \left(Q(S, y, e) + \frac{4,16}{T}u_{n-1} \right)$$

Với $Q(S, y, e)$ là hàm số hóa của vế phải (32) trừ đi vi phân của u.

Luật điều khiển này vẫn đảm bảo $\lambda > 0$ nên không mâu thuẫn với chứng minh ở phần trên. Vì vậy hệ vẫn ổn định tiệm cận.

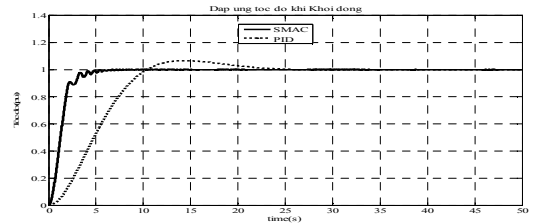
2.3. Kết quả mô phỏng

Từ mô hình đã xác định, ta tiến hành mô phỏng quá trình điều tốc bằng phần mềm Matlab Simulink, mô hình được so sánh với bộ điều khiển PID để thấy được ưu điểm của bộ điều khiển trượt thích nghi. Mô hình mô phỏng như Hình 6. Trong mô hình này, ta chỉ sử dụng tín hiệu phản hồi là tốc độ tua bin (hay rotor), phần phản hồi công suất được đưa vào tải qui đổi ra công suất cơ ngay sau tua bin. Dựa theo các giả thiết đã nêu, mô hình tuyến tính hóa còn lại bậc 2, phần công suất được đưa ra sau máy phát và được coi là nhiễu sai lệch tốc độ.



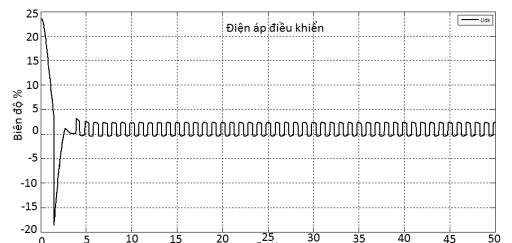
Hình 6. Sơ đồ mô phỏng

Sau khi thực hiện mô phỏng với trường hợp khởi động, ta có kết quả mô phỏng như Hình 7.



Hình 7. Đáp ứng tốc độ khi khởi động với bộ điều khiển SMAC và PID với $T_w = 4,14$

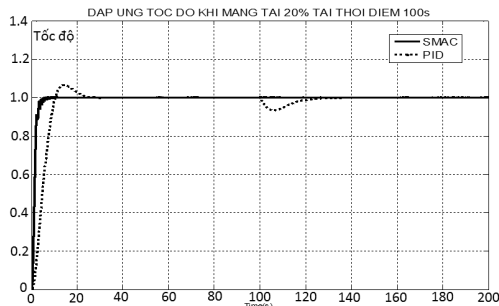
Với kết quả ở Hình 7, ta thấy thời gian quá độ và độ quá điều chỉnh của bộ điều khiển SMAC nhỏ hơn so với bộ điều khiển PID.



Hình 8. Tín hiệu điều khiển

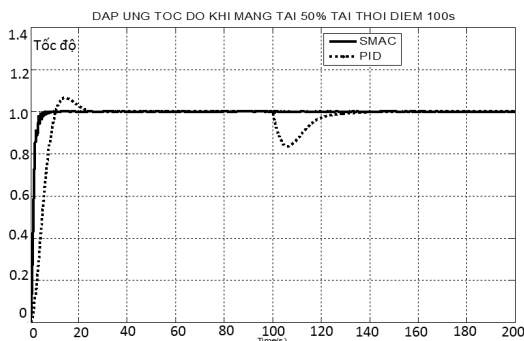
Đưa thêm nhiều phụ tải vào máy phát ứng với các tải khác nhau ta được kết quả mô phỏng như Hình 9, 10.

Trong Hình 9, khi cho mang tải 20% tại thời điểm 100 giây sau khi khởi động, bộ điều khiển PID bị sụt tốc, trong khi bộ điều khiển SMAC vẫn giữ được sự bền vững.



Hình 9. Đáp ứng tốc độ khi mang tải 20%

Kết quả của mang tải 50% như Hình 10, ta thấy bộ điều khiển SMAC vẫn không có gì thay đổi.



Hình 10. Kết quả cho mang tải 50%

Ta thấy rằng bộ điều khiển SMAC đã thể hiện được tính bền vững rất tốt so với bộ điều khiển PID kinh điển.

Kết quả định lượng thể hiện qua tiêu chuẩn tích phân ISE và ITSE cho các quá trình với kết quả thu được như sau:

- Tín hiệu khởi động điều khiển như Hình 8
- + PID: sai số xác lập 0,0005pu, thời gian xác lập 30s, độ quá điều chỉnh 0,066pu.
- + SMAC: sai số xác lập 0,0001pu, thời gian xác lập 10s, độ quá điều chỉnh 0,0012pu.

Khi tần số lưới thay đổi, tương ứng chế độ điều khiển công suất, ta có các kết quả mô phỏng như Hình 11.

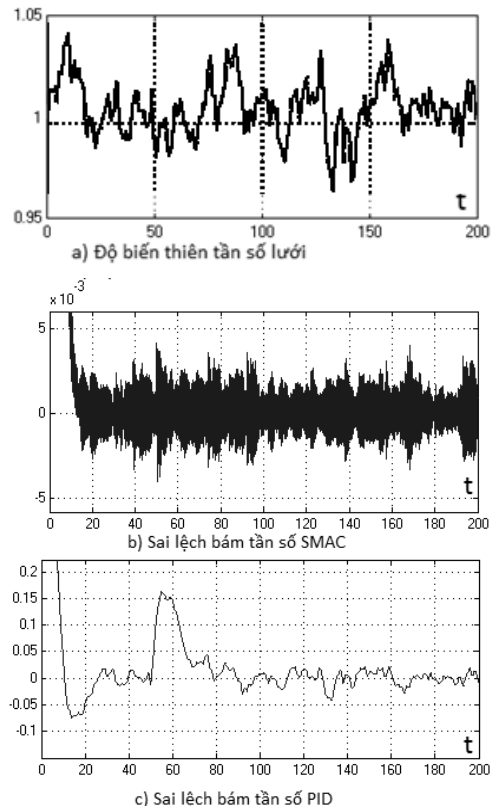
- Mang tải 20% tải như Hình 9
- + PID: thời gian xác lập 38s, độ sụt tốc 0,074pu.
- + SMAC: thời gian xác lập dao động rất nhỏ, độ quá điều chỉnh 0,0002pu.
- Mang tải 50% tải như Hình 10:
- + PID: thời gian xác lập 44s, độ sụt tốc 0,16pu.
- + SMAC: thời gian xác lập 13s, độ quá điều chỉnh 0,0013pu.

3. Thảo luận

Từ các hình kết quả mô phỏng trên cho thấy bộ điều khiển SMAC cho chất lượng điều khiển tốt hơn và thích nghi tốt với sự thay đổi của tham số mô hình.

Khi hoạt động ở chế độ điều khiển công suất:

Kết quả mô phỏng hệ thống làm việc ở chế độ điều khiển công suất liên tục do tần số lưới thay đổi. Ta có các đặc tính mô phỏng như Hình 11.



Hình 11. Kết quả mô phỏng khi tần số lưới thay đổi

Trong đó, Hình 11.a thể hiện độ dao động tần số lưới trong phạm vi 5%, với trục hoành là trục thời gian. Các kết quả cho thấy đối với bộ điều khiển SMAC, ta có kết quả như Hình 10.b với sai lệch tần số trong trường hợp này là 0,25%, trong khi đó bộ điều khiển PID có sai số lên đến 5%. Điều đó cho thấy, nếu hệ thống có tần số thay đổi, tương ứng với lượng công suất tác dụng cần phát thay đổi liên tục, thì hệ điều khiển SMAC cho đáp ứng rất tốt, gần như luôn thỏa mãn cân bằng công suất, ngược lại bộ điều khiển PID bám theo độ thay đổi công suất của lưới để bù kém hơn nhiều so với SMAC. Cụ thể độ chênh lệch lên đến 20 lần. Trong Hình 11.b, độ rung của tín hiệu ra được loại trừ bởi quán tính lớn của rotor, do vậy thực tế rotor hoạt động theo giá trị trung bình và không xuất hiện dao động cao tần đó.

Từ các kết quả trên, kết luận bộ điều khiển SMAC có chất lượng điều khiển tốt hơn nhiều so với PID. Tuy nhiên thực tế hiện nay, các bộ điều khiển dùng trong NMTĐ Srêpôk3 vẫn đang dùng PID, nên chất lượng điều khiển và sai lệch bám lớn.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày chi tiết một thuật toán điều khiển bền vững biến đổi và đã thiết kế được mô hình mô phỏng để kiểm chứng thông qua việc so sánh với bộ PID theo phương pháp Nicol-Zigler. Trên cơ sở này, việc tiến hành mô phỏng với hệ cực tiểu pha đã cho kết quả SMAC tốt hơn hẳn bộ điều khiển PID kinh điển. Dựa vào lý thuyết đã tính toán, kết quả nghiên cứu sẽ cố gắng đưa vào bộ điều

hiện thực tế của NMTĐ Srêpôk3 dưới hình thức một bộ điều khiển dự phòng.

Trên thực tế, người ta không sử dụng bộ điều khiển trong suốt quá trình khởi động tổ máy, mà bộ điều khiển chỉ tham gia vào quá trình điều chỉnh khi tổ máy đã xác lập tốc độ. Vì vậy khi hoạt động ta chỉ quan tâm đến dao động tần số khi đóng, cắt tải của máy phát.

Trong thời gian đến, các tác giả tiếp tục nghiên cứu hệ SMAC cho điều tốc máy phát chạy ở chế độ nối với hệ thống lớn và chạy hai máy song song.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyễn Hoàng Mai, 2008, “Một thuật toán điều khiển trượt thích

nghi cho hệ điện cơ”, *Kỷ yếu Hội nghị Cơ điện tử toàn quốc lần thứ 2*, TP. HCM 2008.

- [2] Kundur, P (1994), “*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill, New York.
- [3] H. D. Chiang, H. K. Clark, C. Concordia, D.C.Lee, J.C.Hsu, S.Ihara, W.W.Price, C.A.King, C.J.Lin, Y.Mansour, K.Srinivasan, C.W.Taylor, W.Vaahedi (1993), “*Load Representation for Dynamic Performance Analysis*”, IEEE Transaction on Power System, Vol.8,pp.472-481.
- [4] Nguyễn Hoàng Mai, Nguyễn Công Hiền, 2005, “Điều khiển trượt trong hệ điện cơ”, *Tạp chí KH&CN 6 Trường Đại học Kỹ thuật*, số 51/2015, trang 28-32.
- [5] Lindar Shafer, Mircea Eremia, 2013, *Handbook of electrical power systems dynamics*, IEEE press, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. All rights reserved. Published simultaneously in Canada.

(BBT nhận bài: 22/9/2016, phản biện xong: 01/11/2016)