

**ĐIỀU KHIỂN TỐI ƯU HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG ĐIỀU CHỈNH ĐIỆN ÁP (AVR)
CHO MÁY PHÁT TRÊN TÀU THỦY
BẰNG PHƯƠNG PHÁP DỰ BÁO MÔ HÌNH
OPTIMAL CONTROL OF AN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR)
SYSTEM FOR SHIPBOARD GENERATORS
USING MODEL PREDICTIVE CONTROL
ĐỖ KHẮC TIỆP*, NGUYỄN VĂN TIẾN**

Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

**Email liên hệ: dokhactiep@vimaru.edu.vn*

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.954>

Tóm tắt

Hệ thống tự động điều chỉnh điện áp (AVR) đóng vai trò sống còn trong việc đảm bảo sự ổn định và chất lượng điện năng của máy phát điện, đặc biệt là trong môi trường hoạt động khắc nghiệt và tải thay đổi liên tục trên tàu thủy. Các bộ điều khiển PID truyền thống, mặc dù phổ biến, thường gặp khó khăn trong việc đáp ứng tối ưu trước các thay đổi tải đột ngột và không thể xử lý hiệu quả các ràng buộc vật lý của hệ thống. Bài báo này đề xuất ứng dụng phương pháp Điều khiển Dự báo Mô hình để điều khiển tối ưu hệ thống AVR cho máy phát trên tàu thủy. Bằng cách sử dụng một mô hình toán học của hệ thống để dự báo hành vi trong tương lai và giải một bài toán tối ưu hóa ở mỗi bước thời gian, bộ điều khiển MPC có khả năng cải thiện đáng kể đáp ứng động, giảm thiểu độ quá điều chỉnh và thời gian xác lập, đồng thời tuân thủ các giới hạn vận hành của máy phát. Kết quả mô phỏng cho thấy MPC vượt trội hơn hẳn so với bộ điều khiển PID kinh điển về mọi mặt hiệu năng.

Từ khóa: AVR, bộ điều khiển PID, điều khiển mô hình dự báo, Matlab/Simulink.

Abstract

The Automatic Voltage Regulator (AVR) system plays a vital role in ensuring the stability and power quality of generators, especially in harsh operating environments with continuously changing loads on ships. Traditional Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers, despite their popularity, often struggle to provide an optimal response to sudden load changes and cannot effectively handle the physical constraints of the system. This paper proposes the application of the Model Predictive

Control (MPC) method to optimally control the AVR system for shipboard generators. By using a mathematical model of the system to predict future behavior and solving an optimization problem at each time step, the MPC controller can significantly improve the dynamic response, minimize overshoot and settling time, while simultaneously adhering to the operational limits of the generator. Simulation results demonstrate that MPC is significantly superior to the classic PID controller in all performance aspects.

Keywords: AVR, PID controller, Model Predictive control, Matlab/Simulink.

1. Giới thiệu

Hệ thống tự động điều chỉnh điện áp (AVR) đóng vai trò sống còn trong việc đảm bảo sự ổn định và chất lượng điện năng của máy phát điện. Tầm quan trọng này càng được nhấn mạnh trong môi trường hoạt động đặc thù trên tàu thủy, nơi các hệ thống điện hoạt động độc lập, thường xuyên đối mặt với điều kiện khắc nghiệt và sự thay đổi tải đột ngột, quy mô lớn [3]. Việc duy trì một điện áp ổn định trong mọi chế độ vận hành là yêu cầu bắt buộc để đảm bảo an toàn cho các thiết bị điện tử hàng hải nhạy cảm và hoạt động chung của toàn bộ con tàu.

Trong nhiều thập kỷ, bộ điều khiển PID đã là lựa chọn phổ biến cho các hệ thống AVR nhờ sự đơn giản và dễ triển khai. Tuy nhiên, trong môi trường hàng hải, nơi tải có thể thay đổi từ vài kilowatt đến hàng trăm kilowatt chỉ trong vài giây, bộ điều khiển PID truyền thống thường bộc lộ nhiều hạn chế. Các nghiên cứu đã tập trung vào việc cải thiện hiệu năng của PID bằng cách sử dụng các thuật toán thông minh để tối ưu hóa tham số, chẳng hạn như tối ưu hóa bầy đàn [1], Giải thuật di truyền [2], hay các thuật toán lai [3]. Mặc dù các phương pháp này cải thiện được đáp ứng quá độ,

chúng vẫn mang bản chất là một cơ chế điều khiển phản ứng, tức là chỉ hành động sau khi sai số đã xảy ra.

Để khắc phục những nhược điểm này, nhiều chiến lược điều khiển tiên tiến đã được đề xuất. Các bộ điều khiển thông minh như Logic mờ [4, 5] và mạng Nơ-ron nhân tạo [6] đã được áp dụng để tăng cường khả năng thích ứng của hệ thống. Các phương pháp điều khiển bền vững như điều khiển trượt [7] cũng được nghiên cứu nhờ khả năng chống lại nhiễu và sự bất định của mô hình. Ngoài ra, các biến thể tiên tiến hơn của PID như bộ điều khiển PID bậc phân số (FOPID) [8] cũng cho thấy những kết quả hứa hẹn. Mặc dù vậy, các phương pháp này thường gặp khó khăn trong việc xử lý một cách tường minh và có hệ thống các ràng buộc vật lý của hệ thống, chẳng hạn như giới hạn điện áp đầu ra hay giới hạn của cơ cấu chấp hành.

Bài báo này đề xuất một giải pháp vượt trội hơn bằng cách ứng dụng phương pháp Điều khiển Dự báo Mô hình để điều khiển tối ưu hệ thống AVR cho máy phát trên tàu thủy. Mặc dù MPC đã được nghiên cứu cho các hệ thống AVR trong lưới điện trên bờ [9, 10], việc áp dụng nó cho môi trường đặc thù trên tàu thủy với các ràng buộc khắt khe vẫn là một hướng đi đầy tiềm năng. Khác biệt cơ bản của MPC so với các công trình đã nêu [1-8] nằm ở nguyên lý hoạt động: nó sử dụng một mô hình toán học để dự báo hành vi của hệ thống trong tương lai và giải một bài toán tối ưu hóa ở mỗi bước thời gian để tìm ra chuỗi hành động điều khiển tốt nhất [11].

Chính nhờ cơ chế dự báo và tối ưu hóa này, bộ điều khiển MPC được đề xuất có nhiều ưu điểm vượt trội hơn hẳn so với các công trình trước đây. Thứ nhất, nó có khả năng xử lý các ràng buộc vật lý của hệ thống một cách trực tiếp và có hệ thống. Thứ hai, bản chất "dự báo" cho phép nó hành động phủ đầu các nhiễu loạn thay vì chỉ phản ứng một cách bị động. Thứ ba, việc giải bài toán tối ưu tại mỗi thời điểm đảm bảo rằng tín hiệu điều khiển đưa ra luôn là tối ưu nhất cho trạng thái hiện tại. Bài báo này sẽ trình bày chi tiết về quá trình thiết kế, chứng minh tính ổn định và kiểm chứng hiệu năng của bộ điều khiển MPC thông qua các kịch bản mô phỏng thực tế, qua đó chứng minh tính ưu việt của nó so với bộ điều khiển PID kinh điển.

2. Mô hình toán hệ thống

Để thuận tiện cho việc phân tích và thiết kế, hệ thống AVR phức tạp được tuyến tính hóa và chia thành các khối chức năng chính. Các khối này bao gồm bộ khuếch đại, bộ kích từ, máy phát. Động học của mỗi thành phần này sau đó được mô hình hóa bằng một hàm truyền bậc nhất trong miền tần số Laplace để biểu

diễn mối quan hệ đầu vào-đầu ra của nó. Phương pháp này cho phép kết nối các hàm truyền riêng lẻ thành một sơ đồ khối tổng thể, giúp đơn giản hóa đáng kể việc khảo sát tính ổn định và thiết kế bộ điều khiển cho toàn hệ thống.

* Phương trình toán của bộ khuếch đại:

$$G_A(s) = \frac{\Delta V_R(s)}{\Delta V_e(s)} = \frac{K_A}{1 + sT_a} \quad (1)$$

Trong đó: $\Delta V_R(s)$ là điện áp đầu ra của bộ khuếch đại; $\Delta V_e(s)$ là điện áp sai lệch; K_A là hằng số khuếch đại; T_a là hằng số thời gian.

* Phương trình toán của mạch kích từ:

$$G_E(s) = \frac{\Delta V_f(s)}{\Delta V_R(s)} = \frac{K_E}{1 + sT_E} \quad (2)$$

Trong đó: $\Delta V_R(s)$ là điện áp đầu vào của mạch kích từ; $\Delta V_f(s)$ là điện áp đầu ra của mạch kích từ; K_E là hằng số khuếch đại; T_E là hằng số thời gian.

* Phương trình toán của máy phát:

$$G_G(s) = \frac{K_G}{1 + sT_G} \quad (3)$$

Với: K_G là tỷ lệ giữa sự thay đổi của điện áp đầu ra và sự thay đổi của điện áp kích từ (ở đầu vào) khi hệ thống đã đạt đến trạng thái ổn định; T_G là hằng số thời gian đại diện cho quán tính điện từ của cuộn dây trường trong máy phát.

Hàm truyền vòng hở của toàn bộ hệ thống được tính bằng công thức (4).

$$G_{plant}(s) = \frac{K_A \cdot K_E \cdot K_G}{(1 + sT_A) \cdot (1 + sT_E) \cdot (1 + sT_G)} \quad (4)$$

Tiến hành xây dựng mô hình của hệ thống với máy phát điện có thông số như Bảng 1.

Bảng 1. Thông số của máy phát NISHISHIBA

Tham số	Giá trị	Đơn vị
Công suất tác dụng định mức	610	kW
Công suất biểu kiến định mức	762.5	kVA
Điện áp định mức	380	V
Dòng điện định mức	978	A
Tần số định mức	60	Hz
Hệ số công suất (P.F.)	0.8	
Tốc độ động cơ định mức	900	rpm

Sử dụng các thông số của máy phát trong Bảng 1 và các thông số của nhà sản xuất cung cấp áp dụng

vào công thức (4) ta thu được hàm truyền liên tục của hệ thống như công thức (5).

$$G_{plant}(s) = \frac{250}{s^3 + 13.5s^2 + 37.5s + 25} \quad (5)$$

Để thuận tiện cho việc thiết kế bộ điều khiển MPC ta tiến hành chuyển đổi mô hình của đối tượng từ dạng hàm truyền sang mô hình không gian trạng thái liên tục (phương trình (6)) và sau đó rời rạc hóa với thời gian lấy mẫu $T_s=0.05s$.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A.x(t) + B.u(t) \\ y(t) = C.x(t) + D.u(t) \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó: $x(t)$ là vector các biến trạng thái (các giá trị điện áp, dòng điện bên trong hệ thống); $u(t)$ là tín hiệu điều khiển đầu vào (từ bộ điều khiển); $y(t)$ là tín hiệu đầu ra (sự thay đổi điện áp của máy phát AVR); A, B, C, D là các ma trận đặc trưng cho hệ thống.

Sử dụng công cụ tính toán của Matlab ta tính được thông số của các ma trận đặc trưng:

$$A = \begin{bmatrix} 0.4787 & -1.3673 & -0.8948 \\ 0.0358 & 0.9619 & -0.0251 \\ 0.0010 & 0.0493 & 0.9996 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0358 \\ 0.0010 \\ 0.00001766 \end{bmatrix}; \quad C = [0 \quad 0 \quad 250]; \quad D = [0]$$

3. Thiết kế bộ điều khiển MPC

3.1. Thiết kế bộ điều khiển MPC

Phương pháp Điều khiển Dự báo Mô hình (MPC) là một chiến lược điều khiển tiên tiến dựa trên việc sử dụng mô hình toán học của hệ thống để dự đoán hành vi trong tương lai. Tại mỗi thời điểm lấy mẫu, bộ điều khiển MPC thực hiện giải một bài toán tối ưu hóa trong một khoảng thời gian hữu hạn trong tương lai (gọi là chân trời dự báo) để tìm ra chuỗi tín hiệu điều khiển tối ưu. Sau đó, chỉ có giá trị đầu tiên của chuỗi điều khiển được áp dụng cho hệ thống, và toàn bộ quá trình được lặp lại ở bước thời gian tiếp theo. Nguyên lý này, được gọi là "nguyên lý chân trời trượt", giúp bộ điều khiển có khả năng thích ứng và chống lại các nhiễu loạn không lường trước.

Quá trình thiết kế bộ điều khiển MPC cho hệ thống AVR bao gồm các bước chính sau:

* Mô hình dự báo

Bộ điều khiển MPC sử dụng mô hình không gian trạng thái đã được rời rạc hóa ở phần 2 (với thời gian

lấy mẫu $T_s=0.05s$) để dự đoán các trạng thái và đầu ra của hệ thống trong tương lai. Mô hình này có dạng như phương trình (7).

$$\begin{cases} x(k+1) = A_d.x(k) + B_d.u(k) \\ y(k) = C_d.x(k) \end{cases} \quad (7)$$

* Hàm mục tiêu

Mục tiêu của bộ điều khiển là đưa điện áp đầu ra $y(t)$ của máy phát bám theo một giá trị đặt $r(t)$ một cách nhanh chóng và chính xác, đồng thời hạn chế sự thay đổi đột ngột của tín hiệu điều khiển $u(t)$. Điều này được thể hiện qua một hàm mục tiêu J , và bài toán tối ưu sẽ tìm cách tối thiểu hóa hàm này.

Hàm mục tiêu được định nghĩa dưới dạng tổng bình phương có trọng số của sai lệch bám và sự thay đổi của tín hiệu điều khiển và có dạng như phương trình (8).

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} (\hat{y}(k+i|k) - r(k+i))^T \cdot Q (\hat{y}(k+i|k) - r(k+i)) + \sum_{i=1}^{N_c-1} \Delta u(k+i|k)^T R \Delta u(k+i|k) + V_f(x(k+N_p|k)) \quad (8)$$

Trong đó: N_p - Chân trời dự báo, là số bước trong tương lai mà bộ điều khiển dự đoán đầu ra của hệ thống; N_c - Chân trời điều khiển, là số bước mà chuỗi tín hiệu điều khiển tối ưu được tính toán ($N_c \leq N_p$). Sau N_c bước, tín hiệu điều khiển được giả định là không đổi.

$\hat{y}(k+i|k)$: Giá trị đầu ra dự đoán tại thời điểm tương lai $k+i$, được tính toán ở thời điểm hiện tại k .

$r(k+i)$: Giá trị đặt mong muốn tại thời điểm tương lai $k+i$.

$\Delta u(k+i|k)$: Sự thay đổi của tín hiệu điều khiển tại thời điểm tương lai $k+i$.

Q, R: Là các ma trận trọng số dương, xác định tầm quan trọng tương đối giữa việc giảm sai lệch bám và việc hạn chế năng lượng điều khiển.

$V_f(x(k+N_p|k))$ là hàm chi phí cuối, đóng vai trò sống còn trong việc đảm bảo tính ổn định của hệ thống kín. Hàm này được định nghĩa là một hàm Lyapunov, $V_f(x) = x^T P x$, với ma trận P là nghiệm của phương trình Lyapunov rời rạc.

* Các ràng buộc

Giới hạn biên độ tín hiệu điều khiển (điện áp cấp cho mạch kích từ): $u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max}$.

Giới hạn tốc độ thay đổi của điện áp điều khiển:

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u(k) \leq \Delta u_{\max}$$

Giới hạn biên độ điện áp đầu ra: $y_{\min} \leq y(k) \leq y_{\max}$.

*** Bài toán tối ưu**

Tại mỗi bước thời gian k, bộ điều khiển MPC giải quyết bài toán tối ưu hóa sau: Tìm chuỗi điều khiển tối ưu $\Delta U = [\Delta u(k^*k), \dots, \Delta u(k + N_c - 1^*k)]$ để tối thiểu hóa hàm mục tiêu J.

Sau khi tìm được chuỗi ΔU tối ưu, chỉ có thành phần đầu tiên là $\Delta u(k/k)$ được sử dụng để tính tín hiệu điều khiển thực tế áp dụng cho hệ thống: $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k/k)$. Toàn bộ quá trình tính toán sẽ được lặp lại ở bước tiếp theo $k+1$ với thông tin trạng thái mới của hệ thống.

Dựa trên các phân tích trên, các tham số cho bộ điều khiển MPC được lựa chọn và sẽ được sử dụng trong phần mô phỏng tiếp theo.

3.2. Chứng minh tính ổn định

Tính ổn định trong MPC đảm bảo rằng khi hệ thống được điều khiển, các biến trạng thái (như điện áp, dòng điện) sẽ hội tụ về giá trị mong muốn mà không dao động hoặc phân kỳ. Việc chứng minh điều này thường phức tạp hơn so với các bộ điều khiển tuyến tính cổ điển. Các phương pháp phổ biến nhất dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov.

*** Điều kiện ổn định cho MPC**

Để đảm bảo tính ổn định, bộ điều khiển MPC cho hệ thống AVR được thiết kế với các điều kiện sau:

- Tập ràng buộc cuối

$$x(k + N_p) \in X_f$$

Trong đó X_f là tập các trạng thái cuối được thiết kế sao cho: X_f là tập bất biến dương dưới tác động của điều khiển $u = Kx$.

- Vai trò của hàm chi phí cuối (Vf)

Như đã định nghĩa trong phương trình (8), hàm chi phí cuối:

$$V_f(x(k + N_p | k)) = x(k + N_p | k)^T P x(k + N_p | k)$$

+ Về bản chất, hàm chi phí cuối chính là một hàm Lyapunov cho hệ thống. Ma trận trọng số P không được lựa chọn tùy ý mà được tìm ra bằng cách giải phương trình Lyapunov rời rạc, gắn liền với việc thiết kế một bộ điều khiển hồi tiếp trạng thái ổn định cục bộ $u = Kx$ (thường là LQR).

+ Việc tối thiểu hóa hàm mục tiêu J (có bao gồm cả thành phần chi phí cuối) buộc bộ điều khiển phải tìm ra một quỹ đạo điều khiển sao cho trạng thái ở cuối chân trời dự báo $x(k + N_p)$ có "năng lượng Lyapunov" càng nhỏ càng tốt. Bằng cách "trùng phạt" các trạng thái cuối có năng lượng Lyapunov lớn, hàm

chi phí cuối buộc bộ điều khiển phải có một "tầm nhìn xa", đảm bảo rằng hệ thống sẽ luôn đi theo một quỹ đạo hội tụ về điểm đặt mong muốn.

- Điều kiện ma trận trọng số

Các ma trận trọng số Q, R, P được chọn là nghiệm của phương trình Lyapunov:

$$(A + BK)^T P (A + BK) - P = -Q - K^T R K$$

Chọn hàm Lyapunov:

$$V(x(k)) = J^*(x(k))$$

*** Chứng minh tính xác định dương**

Do $Q > 0$ và $R > 0$ (xác định dương), nên:

$$J^*(x(k)) \geq x(k)^T Q x(k) > 0 \text{ với mọi } x(k) \neq 0$$

$$\text{thì } \Delta V(x(k)) \leq 0 \text{ và } J^*(0) = 0$$

*** Chứng minh $\Delta V(x(k)) \leq 0$**

Gọi $u^*(k)$ là chuỗi điều khiển tối ưu tại thời điểm k. Tại thời điểm $k+1$, xét chuỗi điều khiển:

$$\tilde{u}(k+1) = [u^*(k+1), u^*(k+2), \dots, u^*(k+N_p-1), Kx(k+N_p)]$$

Do tính chất của tập ràng buộc, chuỗi điều khiển này khả thi. Khi đó:

$$J(x(k+1), \tilde{u}(k+1)) = J^*(x(k+1)) - [y(k) - r(k)]^T Q [y(k) - r(k)] - \Delta u(k)^T R \Delta u(k) + \Delta J_{terminal}$$

Trong đó: $\Delta J_{terminal}$ được dùng để đo lường sự tăng hay giảm năng lượng Lyapunov của hệ thống ở bước chuyển tiếp cuối cùng trong chân trời dự báo. Và được định nghĩa:

$$\Delta J_{terminal} = V(x(k + N_p + 1)) - V(x(k + N_p))$$

Với một bộ điều khiển MPC được thiết kế để thỏa mãn đầy đủ các điều kiện đảm bảo tính ổn định theo lý thuyết [11]. Để đảm bảo $\Delta J_{terminal} \leq 0$, do đó:

$$J^*(x(k+1)) \leq J(x(k+1), \tilde{u}(k+1))$$

$$\leq J^*(x(k)) - [y(k) - r(k)]^T Q [y(k) - r(k)] - \Delta u(k)^T R \Delta u(k)$$

Suy ra:

$$\Delta V(x(k)) = J^*(x(k+1)) - J^*(x(k))$$

$$\leq -[y(k) - r(k)]^T Q [y(k) - r(k)] - \Delta u(k)^T R \Delta u(k) \leq 0$$

*** Kết luận:** Theo lý thuyết ổn định Lyapunov, hệ thống kín ổn định tại điểm làm việc

4. Kết quả mô phỏng

4.1. Thông số mô phỏng

Để tiến hành mô phỏng và đánh giá hiệu năng, các tham số của bộ điều khiển MPC cần được xác định trước như Bảng 2.

Với 2 tham số: N_p (Chân trời dự báo) và N_c (Chân trời điều khiển) là các tham số cốt lõi quyết định hành

Bảng 2. Các tham số của bộ điều khiển MPC

Tham số	Giá trị
Chân trời dự báo (N_p)	28 bước
Chân trời điều khiển (N_c)	3 bước
Ma trận trọng số (Q)	85
Ma trận trọng số (R)	0.15
Biên độ điều khiển ($u(k)$)	$0 \leq u(k) \leq 5$ pu
Biên độ điện áp đầu ra ($y(k)$)	$0.94V \leq y(k) \leq 1.06V$

vi của bộ điều khiển MPC. Nhóm tác giả lựa chọn:

$N_p=28$ (Chân trời dự báo): Đây là khoảng thời gian mà bộ điều khiển "nhìn về phía trước" để dự đoán hành vi của hệ thống. Việc chọn $N_p=28$ (tương đương 1,4 giây với $T_s=0,05s$) cho phép bộ điều khiển có tầm nhìn đủ xa để lường trước các đáp ứng của hệ thống và đưa ra hành động tối ưu, tránh được các hành vi "thiên cận" có thể gây ra dao động.

$N_c=3$ (Chân trời điều khiển): Đây là số bước điều khiển trong tương lai mà bộ điều khiển sẽ tính toán chi tiết. Việc chọn $N_c < N_p$ là một kỹ thuật phổ biến để giảm đáng kể khối lượng tính toán. Thay vì phải tìm 28 giá trị điều khiển, thuật toán chỉ cần tìm 3 giá trị, sau đó giả định tín hiệu điều khiển không đổi. Điều này giúp cân bằng giữa chất lượng điều khiển và khả năng đáp ứng tính toán trong thời gian thực.

Với ma trận hồi tiếp LQR (K):

$$K = [0.2773 \quad 0.4708 \quad 0.6319]$$

Ma trận:

$$P = \begin{bmatrix} 5.5696 & 9.4956 & 12.9444 \\ 9.4956 & 16.3816 & 23.3619 \\ 12.9444 & 23.3619 & 42.0505 \end{bmatrix}$$

Giá trị của $\alpha = 0,0034$

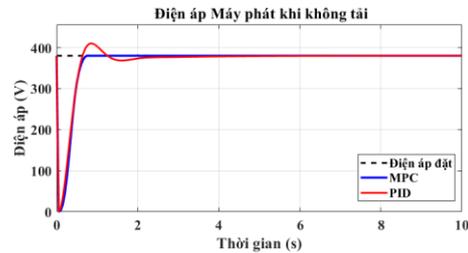
4.2. Kết quả mô phỏng

Để kiểm chứng hiệu quả và tính ưu việt của bộ điều khiển MPC đã thiết kế, các mô phỏng so sánh với bộ điều khiển PID kinh điển được tiến hành trong ba kịch bản vận hành chính: Không tải, khi có nhiễu tải nhỏ, và khi có nhiễu tải lớn. Các kết quả về đáp ứng điện áp, sai số điều khiển, và hoạt động dự báo của MPC được trình bày và phân tích chi tiết qua các hình vẽ dưới đây.

* Trường hợp khi không tải

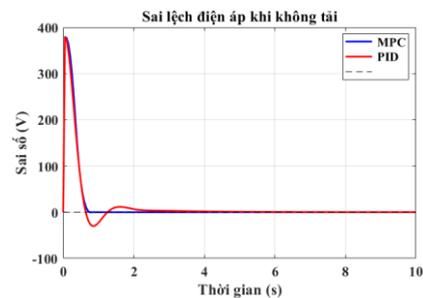
Hình 1 cho thấy đáp ứng điện áp của hệ thống khi không tải, nơi cả hai bộ điều khiển đều đưa điện áp bám theo giá trị đặt. Tuy nhiên, bộ điều khiển MPC (đường màu xanh) thể hiện chất lượng vượt trội với thời gian

xác lập nhanh (khoảng 1,5 giây) và gần như không có quá điều chỉnh. Ngược lại, bộ điều khiển PID (đường màu đỏ) gây ra một độ quá điều chỉnh đáng kể và cần nhiều thời gian hơn để hoàn toàn ổn định.



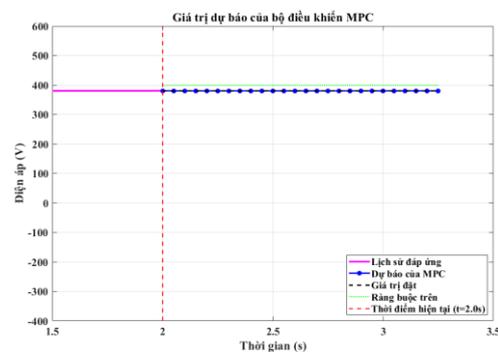
Hình 1. Điện áp của máy phát khi không tải

Hình 2 cho thấy bộ điều khiển MPC thể hiện hiệu năng vượt trội, nhanh chóng ổn định sai số trong khoảng 1,3 giây với quá điều chỉnh không đáng kể chỉ -8V. Ngược lại, bộ điều khiển PID bộc lộ sự kém ổn định khi gây ra dao động mạnh với quá điều chỉnh lên tới -30V, dẫn đến thời gian xác lập kéo dài hơn gấp đôi, vào khoảng 2,8 giây, qua đó khẳng định MPC là lựa chọn tối ưu hơn hẳn.



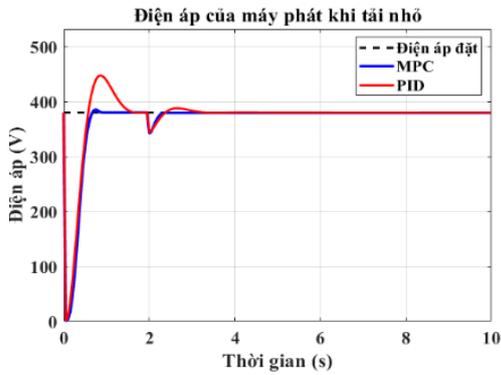
Hình 2. Sai lệch điện áp của máy phát khi không tải

Hình 3 cho thấy tại $t=2s$ khi hệ thống đã ổn định, bộ điều khiển MPC dự báo rằng điện áp sẽ tiếp tục bám đúng giá trị đặt. Điều này chứng tỏ MPC xác định không cần hành động điều khiển thêm, khẳng định khả năng duy trì ổn định một cách thông minh và hiệu quả.



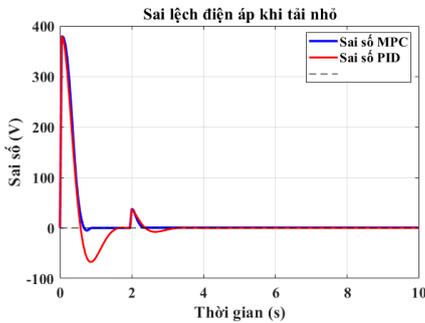
Hình 3. Giá trị dự báo của MPC cho điện áp của máy phát khi không tải

Hình 4 cho thấy phản ứng của hệ thống trước một nhiễu loạn tải nhỏ tại thời điểm $t=2s$. Từ hình vẽ ta thấy bộ điều khiển MPC đã thể hiện khả năng vượt trội khi phục hồi điện áp chỉ trong 0,8 giây. Ngược lại, bộ điều khiển PID cần gần 2 giây để ổn định và gây ra dao động, cho thấy hiệu quả xử lý nhiễu kém hơn rõ rệt.



Hình 4. Điện áp của máy phát khi tải nhỏ

Hình 5 mô tả sai lệch điện áp của máy phát khi tải nhỏ, từ hình vẽ ta nhận thấy khi tải của máy phát được đưa vào tại $t=2s$, cả hai bộ điều khiển đều có đỉnh sai số ban đầu là +40V. Tuy nhiên, trong khi MPC khử nhiễu một cách mượt mà, bộ điều khiển PID lại gây ra dao động với quá chỉnh là -15V, thể hiện sự kém ổn định và chậm chạp hơn.

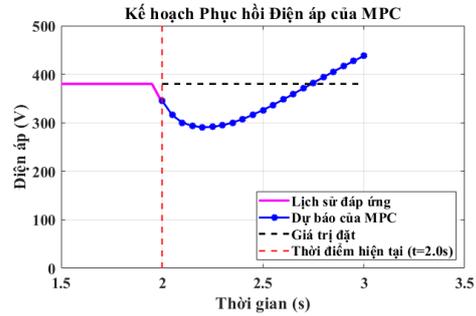


Hình 5. Sai lệch điện áp của máy phát khi tải nhỏ

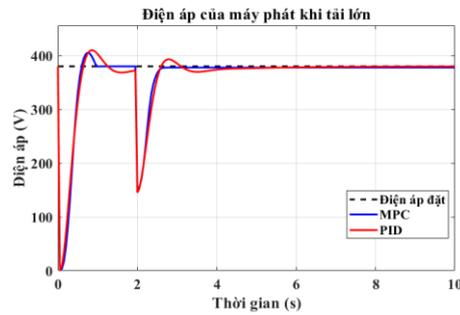
Ngay khi phát hiện nhiễu loạn (tải nhỏ được đưa vào) tại $t=2s$, Hình 6 cho thấy bộ điều khiển MPC đã lập tức dự báo một quỹ đạo phục hồi điện áp tối ưu (đường màu xanh). Kế hoạch chủ động này chính là minh chứng cho tính "dự báo" của bộ điều khiển, cho phép nó xử lý nhiễu một cách thông minh và hiệu quả vượt trội.

Trong kịch bản thử nghiệm khắc nghiệt nhất với nhiễu loạn tải lớn tại $t=2s$ như Hình 7, bộ điều khiển PID đã thể hiện sự yếu kém rõ rệt khi để xảy ra một đợt sụt áp nghiêm trọng xuống tới 150V. Ngược lại, bộ điều khiển MPC đã chứng tỏ khả năng xử lý vượt trội khi duy trì điện áp gần như không đổi và ổn định

hệ thống một cách nhanh chóng, khẳng định tính ưu việt và mạnh mẽ trong điều kiện vận hành khó khăn.

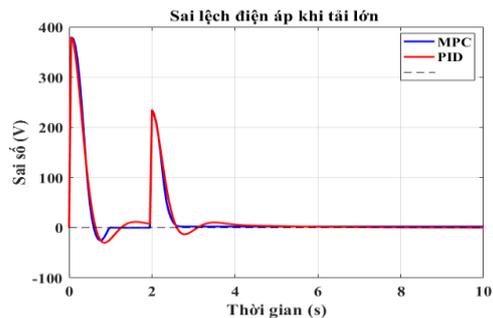


Hình 6. Giá trị dự báo của MPC cho điện áp của máy phát khi tải nhỏ



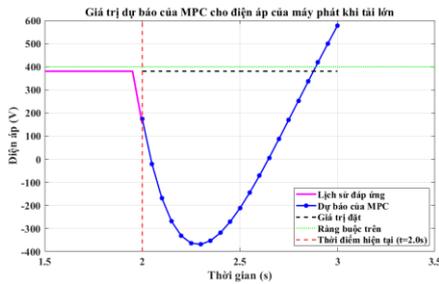
Hình 7. Điện áp của máy phát khi tải lớn

Biểu đồ sai lệch điện áp tại Hình 8 cho thấy rõ sự mất ổn định của bộ điều khiển PID khi đối mặt với tải lớn, với đỉnh sai số vọt lên tới +230V tại thời điểm $t=2s$. Trong cùng điều kiện khắc nghiệt đó, bộ điều khiển MPC gần như triệt tiêu hoàn toàn sai số, khẳng định khả năng duy trì ổn định và độ tin cậy vượt trội hơn hẳn.



Hình 8. Sai lệch điện áp của máy phát khi tải lớn

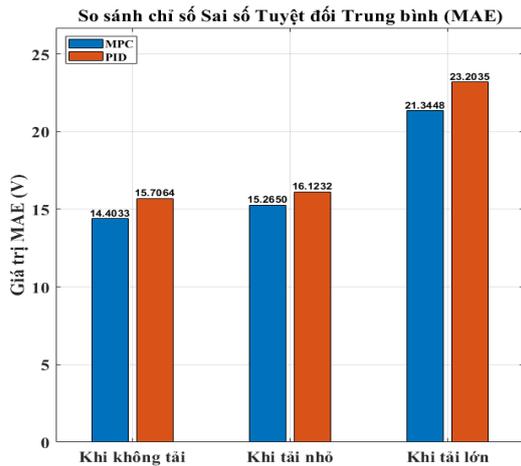
Hình 9 thể hiện kế hoạch xử lý khủng hoảng của MPC tại thời điểm $t=2s$; nó dự báo trước một đợt sụt áp sâu là không thể tránh khỏi và ngay lập tức tính toán một quỹ đạo phục hồi tối ưu (đường màu xanh). Kế hoạch chủ động này cho phép MPC kiểm soát được quá trình sụt áp và phục hồi một cách hiệu quả, trái ngược hoàn toàn với sự sụp đổ gần như không kiểm soát của bộ điều khiển PID trong cùng điều kiện.



Hình 9. Giá trị dự báo của MPC cho điện áp của máy phát khí tải lớn

4.3. So sánh hiệu năng định lượng

Để đánh giá hiệu năng của hai bộ điều khiển một cách khách quan và định lượng, các chỉ số sai số được sử dụng, bao gồm Sai số tuyệt đối trung bình (MAE). MAE tính toán trung bình của các sai lệch tuyệt đối giữa giá trị đặt và giá trị thực tế, cho thấy mức độ sai lệch trung bình trong toàn bộ quá trình mô phỏng. Hình 10 thể hiện biểu đồ so sánh chỉ số sai số tuyệt đối của điện áp máy phát với các trường hợp mô phỏng.



Hình 10. Biểu đồ so sánh chỉ số sai số tuyệt đối của điện áp máy phát với các trường hợp mô phỏng

Biểu đồ Hình 10 trình bày so sánh định lượng chỉ số sai số tuyệt đối trung bình (MAE) giữa hai bộ điều khiển MPC và PID qua ba kịch bản tải khác nhau. Rõ ràng trong mọi trường hợp, từ không tải (14,40 so với 15,71), tải nhỏ (15,27 so với 16,12), đến tải lớn (21,34 so với 23,20), giá trị MAE của bộ điều khiển MPC luôn thấp hơn đáng kể so với PID. Điều này chứng tỏ bộ điều khiển MPC duy trì được sai số trung bình thấp hơn, giúp hệ thống bám theo giá trị đặt một cách chính xác và ổn định hơn. Kết quả này khẳng định mạnh mẽ sự vượt trội của phương pháp MPC về cả độ chính xác lẫn khả năng thích ứng với sự thay đổi của tải so với bộ điều khiển PID kinh điển.

5. Kết luận

Bài báo này đã trình bày chi tiết việc thiết kế, chứng minh tính ổn định và kiểm chứng hiệu năng của bộ điều khiển Dự báo Mô hình (MPC) cho hệ thống tự động điều chỉnh điện áp (AVR) trên máy phát tàu thủy. Dựa trên mô hình không gian trạng thái của hệ thống, bộ điều khiển MPC đã được xây dựng với khả năng dự báo hành vi tương lai và tối ưu hóa tín hiệu điều khiển tại mỗi bước thời gian, đồng thời xử lý hiệu quả các ràng buộc vật lý của hệ thống.

Kết quả mô phỏng so sánh giữa bộ điều khiển MPC và bộ điều khiển PID kinh điển trong ba kịch bản vận hành - không tải, tải nhỏ và tải lớn - đã cho thấy sự vượt trội toàn diện của phương pháp MPC. Trong mọi trường hợp, MPC không chỉ cho đáp ứng nhanh hơn với thời gian xác lập ngắn và độ quá điều chỉnh gần như bằng không, mà còn thể hiện khả năng khử nhiễu ưu việt, đặc biệt là trong trường hợp có nhiễu loạn tải lớn. Phân tích định lượng thông qua chỉ số Sai số Tuyệt đối Trung bình (MAE) cũng khẳng định rằng MPC duy trì được sai số thấp hơn một cách nhất quán, chứng tỏ độ chính xác và khả năng thích ứng cao hơn.

Với những ưu điểm đã được chứng minh, bộ điều khiển MPC là một giải pháp đầy hứa hẹn, có khả năng thay thế hiệu quả các bộ điều khiển truyền thống, góp phần nâng cao đáng kể độ tin cậy, ổn định và chất lượng điện năng cho các hệ thống máy phát trên tàu thủy.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Z. L. Gaing (2004), *A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.19, No.2, pp.384-391.
- [2] A. M. Abdelkhalek, M. A. Attia, A. Mohamed, and N. Badra (2022), *Optimize AVR system performance by using enhanced genetic algorithm*, in Proc. 23rd Int. Middle East Power Syst. Conf. (MEPCON), pp.122-127.
- [3] S. G. Jayasinghe, L. Meegahapola, N. Fernando, Z. Jin, and J. M. Guerrero (2017), *Review of Ship Microgrids: System Architectures, Storage Technologies and Power Quality Aspects*, Inventions, Vol.2, No.1, p. 4.
- [4] T. Gupta and D. K. Sambariya (2017), *Optimal design of fuzzy logic controller for automatic voltage regulator*, in Proc. Int. Conf. Inf. Commun. Instrum. Control (ICICIC), pp.1-6.

- [5] M. Micev, M. Calasan, and D. Oliva (2020), *Fractional Order PID Controller Design for an AVR System Using Chaotic Yellow Saddle Goatfish Algorithm*, Mathematics, Vol.8, No.7, p. 1182.
- [6] A. K. Bhullar, R. Kaur, and S. Sondhi (2022), *Modified neural network algorithm based robust design of AVR system using the Kharitonov theorem*, International Journal of Intelligent Systems, Vol.37, No.2, pp.1339-1370.
- [7] M. Furat and G. G. Cücü (2022), *Design, Implementation, and Optimization of Sliding Mode Controller for Automatic Voltage Regulator System*, IEEE Access, Vol.10, pp.55650-55674.
- [8] X. Li, Y. Wang, N. Li, M. Han, Y. Tang, and F. Liu (2017), *Optimal fractional order PID controller design for automatic voltage regulator system based on reference model using particle swarm optimization*, International Journal of Machine Learning and Cybernetics, Vol.8, No.5, pp.1595-1605.
- [9] M. Elsis, M.-Q. Tran, H. M. Hasanien, R. A. Turkey, F. Albalawi, and S. S. M. Ghoneim (2021), *Robust Model Predictive Control Paradigm for Automatic Voltage Regulators against Uncertainty Based on Optimization Algorithms*, Mathematics, Vol.9, No.22, p. 2885.
- [10] J. Hu, Y. Shan, J. M. Guerrero, A. Ioinovici, K. W. Chan, and J. Rodriguez (2021), *Model predictive control of microgrids—An overview*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.136, p. 110422.
- [11] J. B. Rawlings, D. Q. Mayne, and M. M. Diehl (2017), *Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design, 2nd ed.* Madison, WI: Nob Hill Publishing.

Ngày nhận bài:	30/09/2025
Ngày nhận bản sửa lần 1:	10/10/2025
Ngày nhận bản sửa lần 2:	17/11/2025
Ngày duyệt đăng:	05/01/2026