

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG ĐIỀU KHIỂN HỆ DIESEL - MÁY PHÁT ĐIỆN ĐỒNG BỘ CẤP CHO TẢI CÓ CÔNG SUẤT LỚN SỬ DỤNG MẠNG NƠ-RON NHÂN TẠO

A SIMULATION STUDY OF CONTROL FOR A SYNCHRONOUS DIESEL GENERATOR SYSTEM SUPPLYING A LARGE POWER LOAD USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Đào Quang Khanh*, Đặng Đình Phúc, Nguyễn Huy Quang

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

*Email liên hệ: khanhdq@vimar.edu.vn

TÓM TẮT

Trong bài báo này, trình bày cơ sở lý thuyết điều khiển hệ thống Diesel – máy phát điện đồng bộ, là một hệ thống cung cấp năng lượng phổ biến trên các tàu biển. Trên cơ sở đó tiến hành xây dựng mô phỏng hệ thống điều khiển điện áp và tần số cho máy phát điện đồng bộ bằng công cụ Matlab & Simulink. Kết quả mô phỏng chỉ ra bộ điều khiển áp dụng mạng Nơ-ron đáp ứng được yêu cầu của hệ thống, tự động điều chỉnh ổn định điện áp và tần số máy phát điện đồng bộ khi tải có công suất lớn thay đổi. Việc ứng dụng mạng Nơ-ron trong kỹ thuật điều khiển có tính lọc nhiễu tự nhiên và khả năng điều khiển tốt hơn các bộ điều khiển thông thường trong các hệ phi tuyến. Ngoài ra, nội dung của bài báo cũng là cơ sở để các sinh viên, học viên nghiên cứu sâu về mạng Nơ-ron trong kỹ thuật nhận dạng và điều khiển.

Từ khóa: Máy phát điện đồng bộ; Nhận dạng bằng mạng Nơ-ron; Mạng Nơ-ron trong điều khiển.

ABSTRACT

This paper, presents the theoretical basis for controlling a diesel-synchronous generator system, a common power supply system on ships. Based on this, a simulation of the voltage and frequency control system for the synchronous generator is built using Matlab and Simulink. The simulation results show that the neural network controller meets the system requirements, automatically stabilizing the voltage and frequency of the synchronous generator when the load power changes significantly. The application of neural networks in control engineering offers natural noise filtering and better nonlinear control capabilities than conventional control. Furthermore, the content of this paper provides a foundation for students and trainees to further research neural networks in identification and and control techniques.

Keywords: Synchronous generator; Neural network identification; Neural networks in control.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việc nghiên cứu hệ thống Diesel – máy phát điện đồng bộ đã được nhiều nghiên cứu đề cập tới [5], [7], [6], [8]. Kết quả của những nghiên cứu đó là trên cơ sở từ các hệ thống Diesel – máy phát điện đồng bộ đưa ra những cải thiện bộ điều khiển PI điện áp và tần số bằng những bộ điều khiển Fuzzy, PI-Fuzzy, Neural network. Tuy nhiên, các nghiên cứu đó cũng chưa làm rõ được nhược điểm của bộ PI là chỉ điều khiển cho đối tượng tuyến tính, các mô phỏng có kết quả chưa rõ ràng. Bộ điều khiển áp dụng mạng Nơ-ron đáp ứng được yêu cầu của hệ thống, tự động điều chỉnh ổn định điện áp và tần số máy phát điện đồng bộ khi tải có công suất lớn thay đổi là một bước quan trọng ứng dụng mạng Nơ-ron và học máy trong điều khiển hệ thống máy phát điện. Vì vậy, nhóm tác giả đề xuất nội dung: Nghiên cứu mô phỏng điều khiển hệ diesel máy phát đồng bộ cấp cho tải có công suất lớn sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo.

2. NỘI DUNG

2.1. Mô hình toán của máy phát điện đồng bộ

Khối mô hình máy phát đồng bộ sử dụng mô hình tham số đơn giản cho máy phát đồng bộ. Sử dụng khối này để mô hình hóa máy phát đồng bộ có cuộn dây từ kích từ và mạch điện tương đương cho các cuộn dây stato và rôto (Hình 1a). Sơ đồ hình 1b cho thấy cấu trúc của máy phát điện đồng bộ với một cặp cực đơn trên rotor [1].

- Điện áp trên cuộn dây kích từ biểu thị như sau:

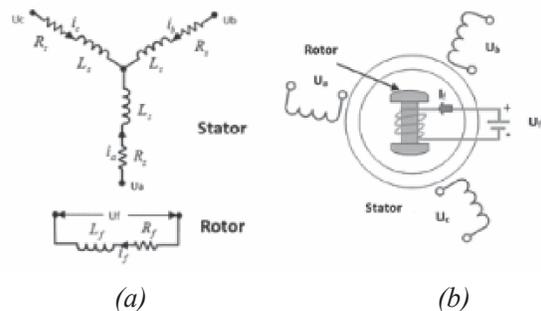
$$u_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \tag{1}$$

Trong đó: u_f là điện áp trên cuộn dây kích từ; R_f là điện trở của cuộn dây kích từ; i_f là dòng điện chạy trong cuộn dây kích từ; $\frac{d\psi_f}{dt}$ là độ biến thiên từ thông trong cuộn dây kích từ [1].

- Phương trình điện áp máy phát điện đồng bộ:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\psi_a}{dt} \\ \frac{d\psi_b}{dt} \\ \frac{d\psi_c}{dt} \end{bmatrix} \tag{2}$$

Trong đó: u_a, u_b, u_c là điện áp pha trên các cuộn dây stato; R_s là điện trở tương đương của mỗi cuộn dây stato; i_a, i_b, i_c là dòng điện chạy trong các cuộn dây stato; $\frac{d\psi_a}{dt}, \frac{d\psi_b}{dt}, \frac{d\psi_c}{dt}$ là độ biến thiên của từ thông trong mỗi cuộn dây stato [1].



Hình 1. a – Sơ đồ tương đương máy phát điện đồng bộ, b – Cấu trúc của máy phát điện đồng bộ

- Cuộn dây kích từ và ba cuộn dây stato hình sao góp phân tạo nên từ thông liên kết mỗi cuộn dây, tổng từ thông được xác định bởi [1]:

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{amf} \\ L_{bmf} \\ L_{cmf} \end{bmatrix} i_f \tag{3}$$

Trong đó: ψ_a, ψ_b, ψ_c là tổng từ thông từng cuộn dây stato; L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} là độ tự cảm của các cuộn dây stato; $L_{ab}, L_{ac}, L_{ba}, L_{bc}, L_{ca}, L_{cb}$ là độ tự cảm hỗ tương của các cuộn dây stato; $L_{amf}, L_{bmf}, L_{cmf}$ là độ tự cảm hỗ tương của cuộn dây kích từ.

Độ tự cảm của cuộn dây stato là hàm của góc rôto và được xác định bởi các phương trình sau:

$$\begin{cases} \theta_e = N\theta_r + \text{rotor offset} \\ L_{aa} = L_s + L_m \cos(2\theta_e) \\ L_{bb} = L_s + L_m \cos(2(\theta_e - 2\pi/3)) \\ L_{cc} = L_s + L_m \cos(2(\theta_e + 2\pi/3)) \\ L_{ab} = L_{ba} = -M_s - L_m \cos(2(\theta_e + \pi/6)) \\ L_{bc} = L_{cb} = -M_s - L_m \cos(2(\theta_e + \pi/6 - 2\pi/3)) \\ L_{ca} = L_{ac} = -M_s - L_m \cos(2(\theta_e + \pi/6 + 2\pi/3)) \end{cases} \quad (4)$$

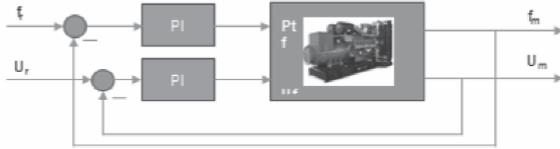
Trong đó: N là số cặp cực của rôto; θ_r là góc quay rôto, θ_e là góc điện của rôto, rotor offset giá trị này bằng θ nếu bạn xác định góc điện của rôto so với trục d, hoặc bằng $-\pi/2$ nếu bạn xác định góc điện của rôto so với trục q; L_s là độ tự cảm của stato trên mỗi pha, giá trị này là độ tự cảm trung bình của mỗi cuộn dây stato; L_m là độ dao động của điện cảm stato, giá trị này là sự dao động của độ tự cảm và độ tương hỗ khi góc rotor thay đổi; M_s là độ tự cảm hỗ tương của stato, giá trị này là độ tự cảm hỗ tương trung bình giữa các cuộn dây stato [1].

Từ thông liên kết cuộn dây, a-a' là cực đại khi $\theta_e = 0^\circ$ và bằng không khi $\theta_e = 90^\circ$. Do đó:

$$L_{mf} = \begin{bmatrix} L_{amf} \\ L_{bmf} \\ L_{cmf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{mf} \cos \theta_e \\ L_{mf} \cos(\theta_e - 2\pi/3) \\ L_{mf} \cos(\theta_e + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\Psi_f = L_f i_f + L_{mf}^T \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

Trong đó: L_{mf} là độ tự cảm tương hỗ; Ψ_f là từ thông móc vòng cuộn dây kích từ; L_f là độ tự cảm của cuộn dây kích từ; L_{mf}^T là phép chuyển vị của vector L_{mf} .

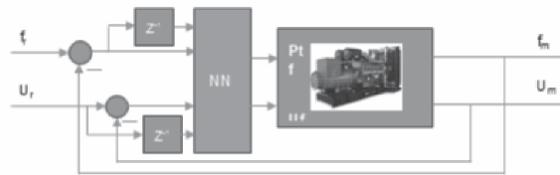


Hình 2. Điều khiển điện áp và tần số của hệ thống Diesel - máy phát điện bằng bộ điều khiển PI

Trên cơ sở mô hình toán của hệ Diesel - máy phát điện, nhóm nghiên cứu đã xây dựng cấu trúc của hệ điều khiển Diesel - máy phát điện bằng các bộ điều khiển PI để ổn định tần số và điện áp máy phát và được thể hiện trong Hình 2.

2.2. Phương pháp huấn luyện mạng Nơ-ron học bộ điều khiển PI

Trong nghiên cứu này, một mạng nơ-ron nhân tạo được huấn luyện để học theo bộ điều khiển PI. Bộ điều khiển nơ-ron nhân tạo sẽ được thiết lập, tức là cũng lấy tín hiệu vào và ra từ bộ điều khiển PI để huấn luyện mạng. Bộ điều khiển nơ-ron để điều khiển cho hệ Diesel - máy phát điện được thể hiện trong Hình 3.



Hình 3. Điều khiển điện áp và tần số hệ thống Diesel - máy phát điện bằng bộ điều khiển nơ-ron

Huấn luyện mạng là quá trình thay đổi các trọng số kết nối và các ngưỡng của Nơ-ron dựa trên các mẫu dữ liệu học, sao cho thỏa mãn một số điều kiện nhất định. Có ba phương pháp

học: Học có giám sát, học không giám sát, học tăng cường.

Giải thuật lan truyền ngược cập nhật các trọng số theo nguyên tắc [2]:

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \eta g(k) \quad (7)$$

Trong đó: $w_{ij}(k)$ là trọng số của kết nối từ nơ-ron j đến nơ-ron i , ở thời điểm hiện tại, η là tốc độ học $0 < \eta \leq 1$; $g(k)$ là gradient hiện tại.

Để cập nhật các trọng số cho mỗi một chu kỳ huấn luyện, giải thuật truyền ngược gồm:

- Lan truyền thuận: Áp dụng vector dữ liệu vào trong tập dữ liệu học cho ANN và tính toán các ngõ ra của nó.

+ Tính ngõ ra lớp ẩn tại thời điểm k :

$$n_i^l(k) = \sum_j w_{ij}^l(k) p_j(k) \quad (8)$$

$$a_i^l(k) = f^l(n_i^l(k)) \quad (9)$$

Với f_l là hàm kích hoạt của các nơ-ron trên lớp ẩn.

+ Tính ngõ ra ANN tại thời điểm k :

$$n_i^2(k) = \sum_j w_{ij}^2(k) a_j^l(k) \quad (10)$$

$$a_i^2(k) = f^2(n_i^2(k)) \quad (11)$$

Với f^2 là hàm truyền của các nơ-ron trên lớp ra.

- Lan truyền ngược: Xác định sai khác giữa ngõ ra thực tế của ANN và giá trị ngõ ra mong muốn trong tập dữ liệu học. Sau đó, truyền ngược sai khác này từ ngõ ra về ngõ vào của ANN và tính toán các giá trị mới của các trọng số, dựa trên giá trị sai biệt này [2].

+ Tính tổng bình phương của sai khác:

$$E(k) = \frac{1}{2} \sum_i [t_i(k) - a_i^2(k)]^2 \quad (12)$$

+ Cập nhật trọng số:

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) - \eta \frac{\partial E(k)}{\partial w_{ij}} \quad (13)$$

+ Tính local gradient các nơ-ron ngõ ra:

$$\Delta_i^2(k) = [t_i(k) - a_i^2(k)] f^2{}' [n_i^2(k)] \quad (14)$$

+ Tính local gradient các nơ-ron ẩn:

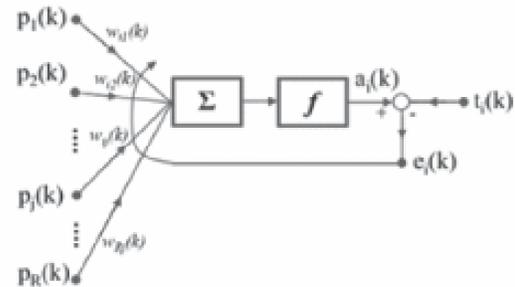
$$\delta_i^l(k) = f^l{}' [n_i^l(k)] \sum_j \Delta_j^2(k) w_{ji}^2 \quad (15)$$

+ Cập nhật trọng số lớp ra:

$$w_{ij}^2(k+1) = w_{ij}^2(k) + \eta \Delta_i^2(k) a_j^l(k) \quad (16)$$

+ Cập nhật trọng số lớp ẩn:

$$w_{ij}^l(k+1) = w_{ij}^l(k) + \eta \delta_i^l(k) p_j(k) \quad (17)$$



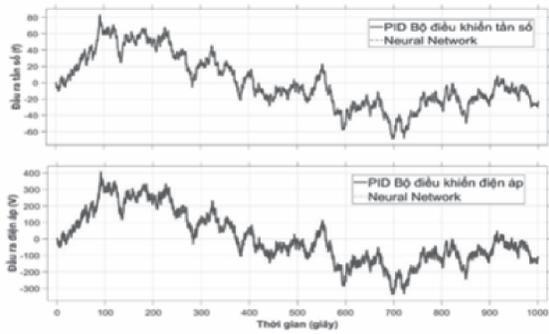
Hình 4. Cấu trúc huấn luyện mạng nơ-ron

Mô hình mạng nơ-ron sau khi huấn luyện được kiểm tra chất lượng bằng cách tính MSE (sai số bình phương trung bình) MSE là phép đo tốt để xác định độ chính xác của bộ điều khiển. Mạng nơ-ron có khả năng mô hình hóa bộ điều khiển với sai số trung bình bình phương (MSE) nhỏ, khi thay đổi số nơ-ron của lớp ẩn, giá trị MSE thay đổi. Hàm mục tiêu MSE được tính [2]:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - a_i)^2 \quad (18)$$

Trong đó: $t_i = [t_1, t_1 \dots t_N]$ là vector dữ liệu ngõ ra mong muốn; $a_i = [a_1, a_1 \dots a_N]$ là vector dữ liệu thực tế thu được từ mạng NN [2].

Khi thực hiện nhận dạng với số nơ-ron lớp ẩn khác nhau, trường hợp số nơ-ron lớp ẩn là 100 cho kết quả nhận dạng tốt nhất về phương diện sai số và thời gian huấn luyện. Đáp ứng thực của được tần số và điện áp, đáp ứng của mô hình nhận dạng bằng mạng nơ-ron được trình bày trong Hình 6. Kết quả cho thấy mô hình nhận dạng cho kết quả đạt độ chính xác là 97% (Hình 5).



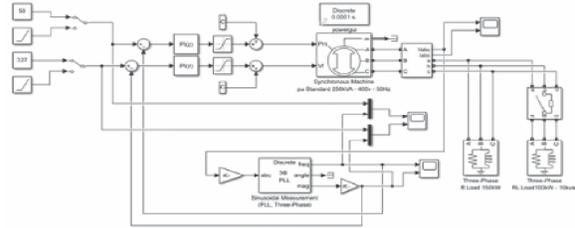
Hình 5. Kết quả huấn luyện mạng Nơ-ron theo bộ PI điều khiển điện áp và bộ PI điều khiển tần số

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

3.1. Điều khiển hệ Diesel - máy phát điện đồng bộ bằng bộ điều khiển PI

Bộ điều khiển PI sẽ tính toán giá trị ngõ ra dựa trên giá trị sai lệch giữa tần số đặt và tần số thực, điện áp đặt và điện áp thực của máy phát để từ đó quyết định giá trị công suất đặt cho máy lai Diesel và điện áp kích từ để điều khiển giữ ổn định tần số và điện áp đầu ra của máy phát điện đồng bộ có công suất 250kVA, điện áp 400V, tốc độ quay 1500 v/p, tần số 50Hz

cấp cho tải có công suất 150KW, 100kW (Hình 6). Việc xác định các thông số bộ điều khiển K_i và K_p được thực hiện bằng phương pháp thực nghiệm Ziegler–Nichols [3].

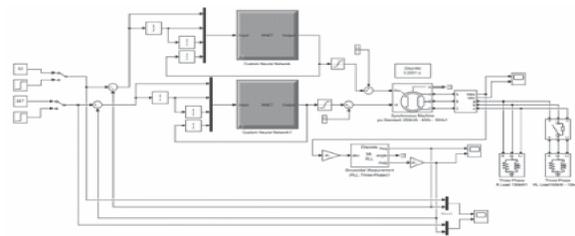


Hình 6. Mô phỏng điều khiển hệ thống máy phát đồng bộ bằng bộ điều khiển PI

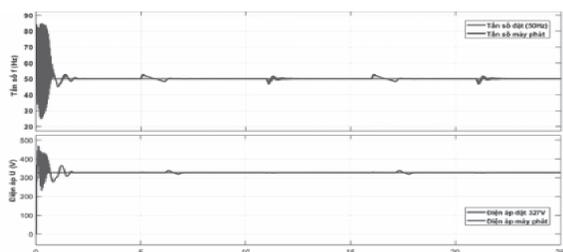
3.2. Điều khiển hệ Diesel - máy phát điện đồng bộ bằng bộ điều khiển Nơ-ron

Mạng Nơ-ron nhiều lớp được sử dụng để nhận dạng bộ điều khiển PI có kết quả rất tốt như thể hiện trong Hình 6. Bộ điều khiển PI dùng để điều khiển giữ ổn định tần số và điện áp khi tải thay đổi quanh $f = 50\text{Hz}$ và $U = 327\text{V}$. Tín hiệu điều khiển ngõ vào của bộ PI được đưa vào ngõ vào của mạng Nơ-ron. Tín hiệu điều khiển ngõ vào của bộ PI được đưa vào ngõ vào của mạng (Hình 7).

Tín hiệu sai số giữa ngõ ra mô hình và ngõ ra mạng Nơ-ron được dùng để hiệu chỉnh trọng số mạng. Kết quả cho thấy việc nhận dạng hệ thống thực nếu cho số nơ-ron trong lớp ẩn càng tăng thì độ chính xác của mô hình càng giảm, sai số càng lớn [3].

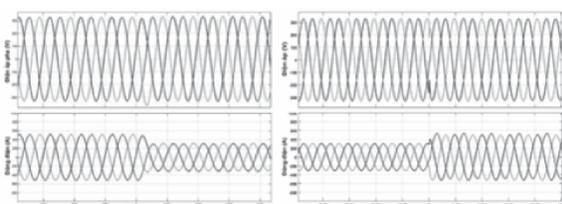


Hình 7. Mô phỏng điều khiển hệ thống máy phát đồng bộ bằng bộ điều khiển Nơ-ron



Hình 8. Kết quả mô phỏng điều khiển tần số, điện áp hệ thống máy phát bằng bộ điều khiển Nơ-ron

Nhận xét: Kết quả cho thấy việc nhận dạng hệ thống thực nếu cho số Nơ-ron trong lớp ẩn càng tăng thì độ chính xác của mô hình càng giảm, sai số càng lớn. Mạng Nơ-ron được huấn luyện để mô phỏng theo bộ điều khiển PI để điều khiển giữ ổn định tần số và điện áp. Sau khi huấn luyện mạng Nơ-ron mô phỏng theo bộ điều khiển PI. Bộ điều khiển Nơ-ron thay thế bộ PI để điều khiển giữ cho ổn định tần số và điện áp như Hình 8. Tại các thời điểm ngắt tải 5s, 16s, tần số máy phát tăng lên $f = 53\text{Hz}$ sau đó ổn định ở giá trị định mức là $f = 50\text{Hz}$, điện áp máy phát tăng lên $U = 335\text{V}$ sau đó ổn định trở lại giá trị định mức $U = 327\text{V}$. Tại các thời điểm đóng tải 11s và 21s, tần số máy phát giảm xuống $f = 47\text{Hz}$ sau đó ổn định trở lại giá trị định mức $f = 50\text{Hz}$, điện áp máy phát không giảm nhiều $U = 326\text{V}$ sau đó về giá trị định mức $U = 327\text{V}$. Như vậy, bộ điều khiển Nơ-ron cho điện áp và tần số máy phát điện đồng bộ đã hoạt động tương tự bộ điều khiển PI trong mô phỏng hình 6.



Hình 9. a - Điện áp và dòng điện máy phát khi ngắt tải, b - Điện áp và dòng điện máy phát khi đóng tải

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã mô phỏng thành công điều khiển ổn định tần số và điện áp hệ thống Diesel – Máy phát điện đồng bộ cấp cho tải công suất lớn. Kết quả mô phỏng đã thể hiện tính ưu việt của phương pháp điều khiển bằng mạng Nơ-ron học bộ điều khiển PI để giữ điện áp và tần số máy phát đồng bộ khi tải thay đổi, được trình bày rõ ràng trong các đồ thị đặc tính điện áp và tần số Hình 8, Hình 9. Bài báo cũng đã trình bày phương pháp huấn luyện mạng Nơ-ron và thực hiện việc huấn luyện mạng học theo bộ điều khiển PI của bộ điều khiển ổn định điện áp và tần số máy phát, kết quả huấn luyện đạt 97% và được thể hiện rõ ràng trong Hình 5. Việc nghiên cứu áp dụng điều khiển thông minh cho hệ thống Diesel – Máy phát điện đồng bộ cấp cho tải công suất lớn là hướng nghiên cứu mới và quan trọng trong hệ thống cung cấp năng lượng nhằm nâng cao chất lượng điều khiển cho hệ thống. Nội dung nghiên cứu trong bài báo là cơ sở để tham khảo cho các sinh viên, học viên trong lĩnh vực kỹ thuật điều khiển và tự động hóa.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT25-26.64. ❖

Ngày nhận bài: 10/12/2025

Ngày phản biện: 22/12/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Trần Anh Dũng, Nguyễn Thanh Vân, Đào Minh Quân, “Mô hình hóa thiết bị điện”. NXB. Hàng hải, 2015.
- [2]. Huỳnh Thái Hoàng, “Hệ thống điều khiển thông minh”. NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, 2015.

- [3]. Nguyễn Phương Hà, “*Lý thuyết điều khiển hiện đại*”. NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, 2016.
- [4]. Hoàng Đức Tuấn, “*Tính toán tải cho trạm phát điện tàu thủy dựa trên các thông số chính của tàu*”. Tạp chí KH-CN Hàng hải, 2012.
- [5]. Abdulrahim Humod, Abdullah S. Abdulsada, “*Neural Network-based Robust Automatic Voltage Regulator (AVR) of Synchronous Generator*”. Journal University of Technology – Iraq, 2021.
- [6]. Miljenko Brezovec, Igor Kuzle, Matej Krpan, “*Detailed mathematical and simulation model of a synchronous generator*”. Journal of Energy, vol. 64, 2020.
- [7]. B. Vahidi, M.R. Bank Tavakoli, “*Simulation of Synchronous Generator on MATLAB-SIMULINK for Teaching Performance Characteristics to Undergraduate Students*”. Int. J. Engng Ed. Vol. 25, No. 2 – TEMPUS Publications – 2021.
- [8]. M. Dehghani, S.K.Y. Nikraves, “*Nonlinear state space model identification of synchronous generators*”. Elsevier - Electric Power Systems Research 78 (2018).
- [9]. Thor I. Fossen, “*Marine Control Systems*”. Norwegian University of Science and Technology Trondheim, Norway, 1995.
- [10]. Jinkun Liu, “*Intelligent Control Design and MATLAB Simulation*”. Springer ISBN 978-981-10-5262-0 – 2018.
- [11]. Patricia Melin, Oscar Castillo, Janusz Kacprzyk, “*Design of Intelligent Systems Based on Fuzzy Logic, Neural Networks and Nature-Inspired Optimization*”. Springer ISSN 1860-949X – 2015.
- [12]. René Wamkeue, Innocent Kamwa, “*Analytical Response of Synchronous Generators during Load Rejection and Field Short-circuit Tests*”. Taylor & Francis Group - Electric Power Components and Systems, 2017.