

INTELLIGENT CONTROL OF INDUCTION MOTOR USING RECURRENT FUZZY NEURAL NETWORKS

Dao Huynh Dang Khoa^{1,2}, Su Hong Thanh^{1,2}, Nguyen Chi Ngon^{1*}

¹Can Tho University, ²VNPT Can Tho

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 17/12/2021 Revised: 19/4/2022 Published: 21/4/2022	Induction motors play an important and indispensable role in electro-mechanical transmission in the industry. However, current common controllers with fixed parameters have proved less flexible to adapt to harsh industrial conditions. This study proposes a solution using recurrent fuzzy neural networks (RFNNs) to overcome that limitation. Accordingly, a PID controller is combined with a supervisory controller using the RFNN to adjust system responses. Simulation results show that, with the same parameters, when the PID controller runs independently, it has given a high overshoot response. However, when combined with the RFNN – based supervisory controller, the overshoot of system response is eliminated. The experimental results show that by the online training algorithm, the RFNN-based system identifier and the RFNN-based supervisory controller have monitored and rapidly adapted to the changes of the system such as noise affecting or load changing, thereby, they can adjust the control signal is more suitable, overcoming the limitation of fixed parameters of the traditional PID controller.
KEYWORDS Induction motor Online training PID control Recurrent fuzzy neural network Supervisory control	

ĐIỀU KHIỂN THÔNG MINH ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ 3 PHA DỰA TRÊN MẠNG NƠ-RON MỜ HỒI QUY

Đào Huỳnh Đăng Khoa^{1,2}, Sử Hồng Thanh^{1,2}, Nguyễn Chí Ngôn^{1*}

¹Trường Đại học Cần Thơ, ²VNPT Cần Thơ

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 17/12/2021 Ngày hoàn thiện: 19/4/2022 Ngày đăng: 21/4/2022	Động cơ không đồng bộ 3 pha có vai trò quan trọng, không thể thiếu trong truyền động điện công nghiệp. Tuy nhiên, các bộ điều khiển thông dụng hiện nay với tham số cố định đã tỏ ra kém linh hoạt để thích ứng với điều kiện công nghiệp khắc nghiệt. Nghiên cứu này đề xuất giải pháp dùng mạng nơ-ron mờ hồi quy để khắc phục hạn chế trên. Theo đó, bộ điều khiển PID kinh điển được kết hợp với bộ điều khiển giám sát dùng mạng nơ-ron mờ hồi quy để chỉnh định đáp ứng của hệ thống. Kết quả mô phỏng cho thấy, với cùng bộ tham số, khi bộ điều khiển PID chạy độc lập nó cho đáp ứng có độ vọt lố cao. Tuy nhiên, khi kết hợp với bộ điều khiển giám sát dùng mạng nơ-ron mờ hồi quy thì đáp ứng của đối tượng không xuất hiện vọt lố nữa. Kết quả kiểm nghiệm cho thấy nhờ giải thuật huấn luyện trực tuyến mà bộ nhận dạng mô hình đối tượng và bộ điều khiển dùng mạng nơ-ron mờ hồi quy đã giám sát và thích ứng kịp thời với sự thay đổi của đối tượng như tác động của nhiễu và sự thay đổi đột ngột của tải, từ đó, chúng góp phần điều chỉnh tín hiệu điều khiển phù hợp hơn, khắc phục được hạn chế về việc cố định tham số của bộ điều khiển PID truyền thống.
TỪ KHÓA Huấn luyện online Điều khiển giám sát Điều khiển PID Động cơ không đồng bộ Mạng nơ-ron mờ hồi quy	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5358>

* Corresponding author. Email: ncngon@ctu.edu.vn

1. Giới thiệu

Hầu hết các dây chuyền sản xuất công nghiệp ngày nay đều sử dụng hệ truyền động điện, trong đó, động cơ điện là nguồn động năng chủ đạo [1]. Động cơ điện đã được phát triển đa dạng như động cơ một chiều, động cơ xoay chiều, động cơ vạn năng, động cơ không đồng bộ (KĐB) 3 pha... Thống kê năm 2011 cho thấy có hơn 16 tỷ động cơ điện đang hoạt động trên thế giới với tốc độ tăng trưởng khoảng 50% trong 5 năm qua [1], [2]. Tuy nhiên, do thiết kế đơn giản, chi phí bảo trì thấp và vận hành dễ, động cơ KĐB chiếm hơn 80% nguồn chuyển đổi cơ - điện [1].

Việc kiểm soát tốc độ động cơ KĐB 3 pha là chủ đề được nhiều nhà khoa học và các hãng thiết bị quan tâm [3], [4]. Tuy nhiên, do bản chất động cơ KĐB 3 pha là phi tuyến và bị tác động bởi các yếu tố khác như sự thay đổi của tải, sự tác động của môi trường công nghiệp... mà các kiểu điều khiển truyền thống không đáp ứng thật sự tốt [5]. Ngoài ra, tham số của động cơ điện bị thay đổi trong quá trình vận hành sẽ ảnh hưởng đến chất lượng điều khiển, đặc biệt đối với các giải pháp thiết kế đòi hỏi phải biết trước mô hình toán của đối tượng [5], [6]. Việc không xác định chính xác mô hình toán của động cơ sẽ dẫn đến bộ điều khiển chỉ được chỉnh định gần đúng, làm cho nguy cơ vọt lố tốc độ (quá tốc) lên đến 30% [5]. Điều này ảnh hưởng đến hệ truyền động và tuổi thọ của động cơ [7]. Vì vậy, hiện có hai hướng nghiên cứu đã và đang được triển khai. Hướng thứ nhất cố gắng mô hình hóa động cơ KĐB 3 pha càng chính xác càng tốt [4], [8]-[10] để hỗ trợ cho khâu hiệu chỉnh bộ điều khiển, nhất là điều khiển PID (Proportional-Integral-Derivative controller) vốn dễ áp dụng [5], [6]. Theo đó, các hãng thiết bị đã quan tâm đầu tư và thương mại các bộ điều khiển theo chuẩn công nghiệp [4], [11] hay tích hợp vào các PLC (programmable logic controller) chuyên dụng [12]. Điểm hạn chế cơ bản của kỹ thuật điều khiển PID là thiếu linh hoạt khi đối tượng điều khiển bị tác động bởi các yếu tố bên ngoài, do không có cơ chế tự điều chỉnh lại tham số của nó khi đang vận hành. Hướng thứ hai không đặt nặng vấn đề độ chính xác của mô hình toán, mà phát triển các giải thuật điều khiển dựa trên tín hiệu vào - ra của đối tượng, như dùng mạng nơ-ron nhân tạo [13], [14] hay điều khiển mờ [10], [15]. Tuy nhiên, các nghiên cứu này vẫn tồn tại một số hạn chế nhất định. Thật vậy, việc thu thập dữ liệu để huấn luyện off-line bộ điều khiển dùng mạng nơ-ron nhân tạo [13] sẽ cho đáp ứng kém tin cậy theo thời gian, khi tham số của đối tượng thay đổi. Trong [14], bộ điều khiển dùng mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm đã được sử dụng, nhưng nghiên cứu này phải cần thêm giải thuật di truyền để tối ưu bộ điều khiển, làm phức tạp hóa và chậm giải thuật. Trong nghiên cứu [10], [15], bộ điều khiển mờ phụ thuộc nhiều vào kinh nghiệm và thử sai của người thiết kế. Ngoài ra, bộ điều khiển mờ khó có thể vận hành tốt khi tín hiệu biến thiên ngoài miền xác định được mờ hóa, có khả năng xảy ra khi đối tượng thay đổi.

Rõ ràng, cho dù sử dụng bộ điều khiển PID truyền thống hay bộ điều khiển mờ hoặc bộ điều khiển dùng mạng nơ-ron nhân tạo với cơ chế huấn luyện off-line, chúng chỉ có thể đáp ứng tốt ở thời điểm triển khai thiết bị. Theo thời gian, do điều kiện công nghiệp khắc nghiệt, các đặc tính kỹ thuật của động cơ sẽ bị thay đổi, khi đó các bộ điều khiển trên đều không có cơ chế tự chỉnh định lại, dẫn đến kết quả điều khiển bị ảnh hưởng.

Những năm gần đây, mạng nơ-ron mờ hồi quy, gọi tắt là mạng RFNN (recurrent fuzzy neural network) chứng tỏ được nhiều ưu thế vì khả năng xấp xỉ hàm phi tuyến [16] và cơ chế huấn luyện trực tuyến của nó. Mạng RFNN đã được ứng dụng thành công trong điều khiển robot Delta [17]-[19] và các hệ phi tuyến khác như hệ cầu cân bằng [16]. Vì vậy, ý tưởng cơ bản của nghiên cứu này là ứng dụng mạng RFNN để kiểm soát động cơ KĐB 3 pha. Trong nghiên cứu này, mô hình toán của động cơ KĐB 3 pha vẫn được dùng để mô phỏng. Tuy nhiên, quá trình thiết kế hệ điều khiển không sử dụng mô hình toán, mà dựa theo tín hiệu vào, ra của đối tượng. Việc huấn luyện các mạng RFNN được thực hiện online mà không cần giai đoạn huấn luyện off-line trước, như các nghiên cứu dùng mạng nơ-ron nhân tạo thông thường [13]. Trong phạm vi bài báo này, thuật toán điều khiển động cơ KĐB 3 pha chỉ mới dừng lại ở mức độ mô phỏng trên MATLAB.

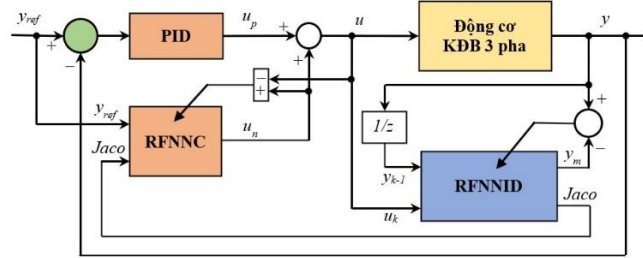
Phần còn lại của bài báo gồm: Phần 2 trình bày về phương pháp thiết kế bộ điều khiển; Phần 3

trình bày kết quả mô phỏng để kiểm nghiệm giải thuật; Cuối cùng, Phần 4 là kết luận và đề nghị.

2. Thiết kế hệ thống điều khiển

2.1. Nguyên lý điều khiển

Sơ đồ nguyên lý của hệ điều khiển được trình bày trên Hình 1. Bộ điều khiển PID được kết hợp với bộ điều khiển dùng mạng nơ-ron mờ hồi qui, gọi là RFNNC, trở thành một kỹ thuật điều khiển giám sát (supervisory control), được xây dựng dựa theo [20]. Mô hình đối tượng được nhận dạng bằng một mạng nơ-ron mờ hồi qui khác, gọi là RFNNID, để xác định độ nhạy của đối tượng hay còn được gọi là thông tin Jacobian, được xây dựng dựa theo [16]-[18].



Hình 1. Nguyên lý điều khiển dùng mạng RFNN cho động cơ KĐB 3 pha

Trong Hình 1, động cơ KĐB 3 pha được kiểm soát bởi bộ điều khiển PID. Tuy nhiên, để tinh chỉnh đáp ứng và nâng cao tính linh hoạt nhằm thích ứng với sự biến thiên của đối tượng, bộ điều khiển RFNNC được tăng cường. Giải thuật cập nhật trọng số của bộ RFNNC được triển khai theo [21] và các cải tiến trong [16]-[19]. Giải thuật này cần thông tin Jacobian, nên bộ nhận dạng RFNNID cũng được xây dựng và huấn luyện trực tuyến để cung cấp kịp thời thông tin về sự biến đổi của đối tượng cho bộ điều khiển.

2.2. Mô hình động cơ không đồng bộ

Mô hình toán của động cơ KĐB 3 pha không dùng cho mục tiêu thiết kế bộ điều khiển, mà được sử dụng trong mô phỏng để kiểm chứng giải thuật điều khiển. Do đó, phần này không phân tích sâu về phương trình mô tả động cơ, vốn đã được xây dựng trên hệ tọa độ dq như sau [22], [23]:

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right)i_{sd} + (\omega_s - \omega_r)i_{sq} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r L_m}\psi_{rd} + \frac{1}{\sigma L_s}u_{sd} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -\omega_s i_{sd} - \left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right)i_{sq} - \frac{1-\sigma}{\sigma L_m}\omega_r \psi_{rd} + \frac{1}{\sigma L_s}u_{sq} \\ \frac{d\psi_{rd}}{dt} = \frac{L_m}{T_r}i_{sd} - \frac{1}{T_r}\psi_{rd} \\ \frac{d\psi_{rq}}{dt} = \frac{L_m}{T_r}i_{sq} - (\omega_s - \omega_r)\psi_{rd} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_r = \psi_{rd} = \frac{L_m}{1+sT_r}i_{sd} \\ T_e = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} p \psi_{rd} i_{sq} = T_L + \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó, u_{sd} , i_{sd} lần lượt là điện áp và dòng điện của stator; ω_s là vận tốc góc của từ thông stator so với rotor; ω_r là vận tốc góc của từ thông rotor so với stator; ψ_r là từ thông rotor; L_m là hồ cảm giữa rotor và stator; L_s , L_r lần lượt là điện cảm stator và rotor; T_s , T_r lần lượt là hằng số

thời gian stator và rotor; σ là hệ số tiêu tán; T_e , T_L là mômen quay và mômen tải. Chi tiết về mô hình động cơ KĐB 3 pha xin xem chi tiết ở [22], [23].

2.3. Bộ điều khiển PID

Bộ điều khiển PID trên Hình 1 được mô tả bởi (3) với K_p , K_i và K_d lần lượt là độ lợi tỉ lệ, tích phân và vi phân của bộ điều khiển [24]. Nhiệm vụ của người thiết kế là chọn bộ giá trị $\{K_p, K_i, K_d\}$ thỏa yêu cầu chất lượng điều khiển. Ở nghiên cứu này, để dễ đánh giá, tham số bộ PID được sử dụng giá trị mặc định của MATLAB.

$$u_p(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

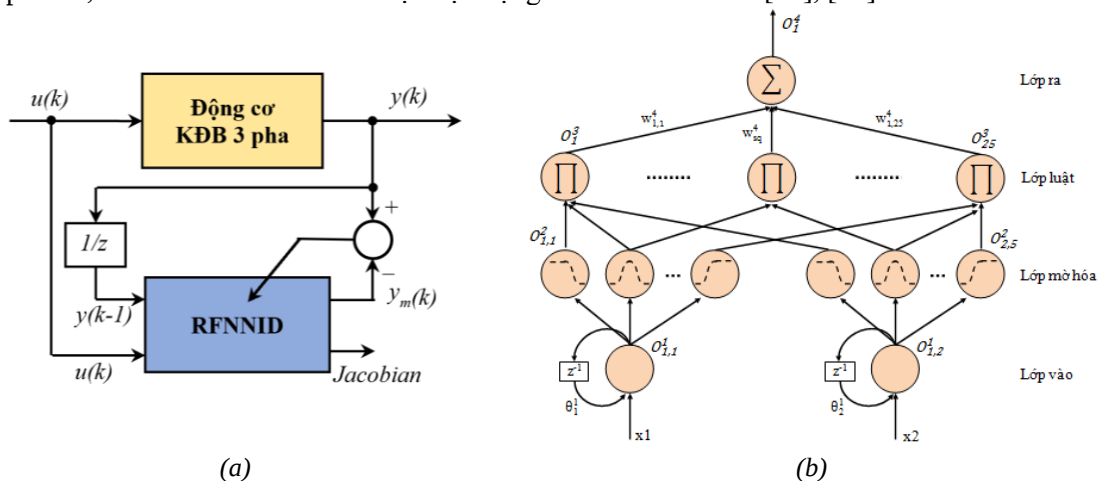
$$e(t) = y_{ref}(t) - y(t)$$

2.4. Nhận dạng mô hình đối tượng dùng RFNN

2.4.1. Cấu trúc bộ nhận dạng RFNNID

Bộ nhận dạng mô hình đối tượng dùng mạng nơ-ron hồi quy nhiều lớp, gọi tắt là bộ nhận dạng RFNNID, được triển khai theo [21]. Sơ đồ nguyên lý và cấu trúc bộ nhận dạng RFNNID được trình bày trên Hình 2. Gọi $u(k)$ và $y(k)$ lần lượt là ngõ vào, ngõ ra của đối tượng và $y_m(k)$ là ngõ ra của mô hình tại thời điểm lấy mẫu thứ k , thì nhiệm vụ của bộ RFNNID là ước lượng $y_m(k)$ gần nhất với $y(k)$, dựa theo tín hiệu $u(k)$ và mẫu quá khứ $y(k-1)$ của ngõ ra đối tượng.

Bộ nhận dạng RFNNID được xây dựng gồm 4 lớp, với lớp vào có 2 nút, lớp mờ hóa có 10 nút, lớp luật mờ gồm 25 nút và lớp ra có 1 nút. Gọi O_i^k tương ứng là ngõ ra của nút thứ i thuộc lớp thứ k , ta có thể mô tả cấu trúc bộ nhận dạng RFNNID như sau [16], [21]:



Hình 2. Bộ nhận dạng RFNNID: a) Nguyên tắc; b) Cấu trúc mạng [16]

Lớp 1 – Lớp vào: Lớp này gồm 2 nút có nhiệm vụ chuyển tải các giá trị ngõ vào đến lớp kế tiếp. Ở đây các kết nối hồi tiếp được thêm vào để tăng khả năng đáp ứng của mạng. Ngõ ra của nút thứ i ở lớp vào được mô tả như (4).

$$O_i^1(k) = x_i^1(k) + \theta_i^1 O_i^1(k-1), i=1,2 \quad (4)$$

với θ_i^1 là trọng số kết nối tại thời điểm hiện tại k . Ngõ vào của bộ nhận dạng RFNNID tương ứng là tín hiệu điều khiển hiện tại và ngõ ra quá khứ của đáp ứng:

$$\begin{bmatrix} x_1^1(k), x_2^1(k) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} u(k), y(k-1) \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

Lớp 2 – Lớp mờ hóa: Lớp này gồm (2x5) nút, mỗi nút thể hiện một hàm liên thuộc dạng Gauss với trị trung bình m_{ij} và độ lệch chuẩn σ_{ij} và được xác định như (6).

$$O_{ij}^2(k) = \exp \left\{ -\frac{(O_i^1(k) - m_{ij})^2}{(\sigma_{ij})^2} \right\}, i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, 5 \quad (6)$$

Ở mỗi nút trên lớp mờ hóa có 2 tham số được tự động điều chỉnh trong quá trình huấn luyện trực tuyến bộ nhận dạng RFNNID, đó là m_{ij} và σ_{ij} .

Lớp 3 – Lớp luật: Lớp này gồm (5x5) nút. Ngõ ra của nút thứ q trong lớp này được xác định:

$$O_q^3(k) = \prod_i O_{iq_i}^2(k), i = 1, 2, \dots, 5; q_i = 1, 2, \dots, 5 \quad (7)$$

Lớp 4 – Lớp ra: Gồm 1 nơ-ron tuyến tính với ngõ ra xác định như sau:

$$O_i^4(k) = \sum_j w_{ij}^4 O_j^3(k), i = 1; j = 1, 2, \dots, 25 \quad (8)$$

Trong đó, w_{ij} là trọng số kết nối từ lớp luật thứ j lên lớp ra i . Ngõ ra của lớp này cũng là ngõ ra của bộ nhận dạng RFNNID:

$$y_m(k) = O_1^4(k) = \hat{f}[x_1(k), x_2(k)] = \hat{f}[u(k), y(k-1)] \quad (9)$$

2.4.2. Giải thuật huấn luyện trực tuyến bộ nhận dạng RFNNID

Mục tiêu của giải thuật huấn luyện trực tuyến bộ nhận dạng RFNNID là điều chỉnh bộ trọng số và các tham số của các hàm liên thuộc trên lớp mờ hóa để cực tiểu hàm chi phí (16):

$$E(k) = \frac{1}{2} [y(k) - y_m(k)]^2 = \frac{1}{2} [y(k) - O_1^4(k)]^2 \quad (10)$$

trong đó $y(k)$ là đáp ứng của đối tượng, $y_m(k)$ ngõ ra của bộ nhận dạng.

Sử dụng thuật toán lan truyền ngược (back propagation) sai số, bộ trọng số kết nối của mạng RFNN sẽ được điều chỉnh theo nguyên tắc sau:

$$W(k) = W(k-1) + \Delta W(k) = W(k-1) + \eta \left(-\frac{\partial E(k)}{\partial W} \right) \quad (11)$$

trong đó, $\eta \in (0, 1)$ là hằng số tốc độ học và W là tham số cần điều chỉnh trong quá trình huấn luyện bộ nhận dạng RFNNID.

Gọi $e(k) = y(k) - y_m(k)$ và $W = [\theta, m, \sigma, w]^T$ là sai số huấn luyện và vector tham số của bộ nhận dạng RFNNID, thì gradient của $E(.)$ trong (11) theo W được xác định như sau [16]-[18], [21]:

$$\frac{\partial E(k)}{\partial W} = -e(k) \frac{\partial y_m(k)}{\partial W} = -e(k) \frac{\partial O_1^4(k)}{\partial W} \quad (12)$$

Với nguyên tắc này, bộ trọng số của từng lớp mạng được cập nhật như sau [16]-[18], [21]:

$$w_{ij}^4(k+1) = w_{ij}^4(k) + \eta^w \left(-\frac{\partial E(k)}{\partial w_{ij}^4} \right) = w_{ij}^4(k) + \eta^w e(k) O_i^3 \quad (13)$$

$$m_{ij}(k+1) = m_{ij}(k) + \eta^m \left(-\frac{\partial E(k)}{\partial m_{ij}} \right) = m_{ij}(k) + \eta^m \sum_k e(k) w_{ik}^4 O_k^3 \frac{2[O_{ij}^1(k) - m_{ij}]}{(\sigma_{ij})^2} \quad (14)$$

$$\sigma_{ij}(k+1) = \sigma_{ij}(k) + \eta^\sigma \left(-\frac{\partial E(k)}{\partial \sigma_{ij}} \right) = \sigma_{ij}(k) + \eta^\sigma \sum_k e(k) w_{ik}^4 O_k^3 \frac{2[O_{ij}^1(k) - m_{ij}]}{(\sigma_{ij})^3} \quad (15)$$

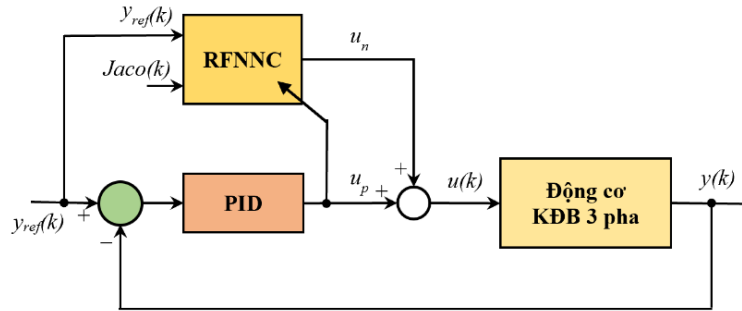
$$\theta_i^1(k+1) = \theta_i^1(k) + \eta^\theta \left(-\frac{\partial E(k)}{\partial \theta_i^1} \right) = \theta_i^1(k) + \eta^\theta \sum_k e(k) w_{ik}^4 O_k^3 \frac{(-2)[O_{ij}^1(k) - m_{ij}^1] O_{ij}^1(k-1)}{(\sigma_{ij})^2} \quad (16)$$

trong đó $\eta_{|s=w,m,\sigma,\theta}^s$ là các hằng số tốc độ học. Ngoài việc ước lượng ngõ ra của đối tượng $y_m(k)$, bộ nhận dạng RFNNID còn phải ước lượng thông tin Jacobian $\partial y(k)/\partial u(k)$ để huấn luyện trực tuyến bộ điều khiển RFNNC. Thông tin này được xác định như (17) [16], [21].

$$Jaco(k) = \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} = \sum_q w_{ij}^4 \left\{ \sum_s \frac{\partial O_q^3}{\partial O_{qs}^2} \frac{(-2)[O_{ij}^1(k) - m_{ij}^1]}{(\sigma_{ij})^2} \right\} \quad (17)$$

2.5. Bộ điều khiển giám sát kết hợp PID-RFNN

Nguyên tắc điều khiển giám sát kết hợp giữa bộ điều khiển PID truyền thống và bộ điều khiển RFNNC được thực hiện dựa theo [20] và được minh họa trên Hình 3. Bộ điều khiển giám sát này được gọi tắt là bộ điều khiển PID-RFNNC.



Hình 3. Nguyên lý điều khiển giám sát PID-RFNNC

Tham số bộ điều khiển PID đối với mô hình động cơ KĐB 3 pha được giữ giá trị tiêu chuẩn của MATLAB đã được hiệu chỉnh sẵn trong [23], để thuận lợi cho việc đánh giá chất lượng giữa kiểu điều khiển PID kinh điển và kiểu điều khiển giám sát PID-RFNNC. Tín hiệu điều khiển giám sát trong sơ đồ Hình 3 được xác định như sau:

$$u(k) = u_n(k) + u_p(k) \quad (18)$$

trong đó, $u_p(k)$ tín hiệu điều khiển PID và là $u_n(k)$ tín hiệu điều khiển giám sát RFNNC.

Tín hiệu điều khiển PID kinh điển $u_p(k)$ dễ dàng xác định theo (9). Nhưng tín hiệu điều khiển giám sát RFNNC phải được xác định thông qua mạng RFNN. Cấu trúc của mạng RFNNC được thực hiện giống như cấu trúc của bộ nhận dạng RFNNID. Tuy nhiên, ngõ vào của bộ RFNNC sử dụng trực tiếp tín hiệu tham khảo $y_{ref}(k)$ và thông tin Jacobian (17) tại thời điểm k do bộ RFNNID cung cấp, dựa theo thiết kế của [21], [25]. Hai ngõ vào của bộ RFNNC không sử dụng (5) mà được thay bằng (19). Ngoài ra, hàm mục tiêu huấn luyện mạng RFNNC được thực hiện theo [20], bằng cách thay (10) bởi (20).

$$\begin{bmatrix} x_1^1(k), x_2^1(k) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} y_{ref}(k), Jaco(k) \end{bmatrix}^T \quad (19)$$

$$E(k) = \frac{1}{2} [u_n(k) - u(k)]^2 \quad (20)$$

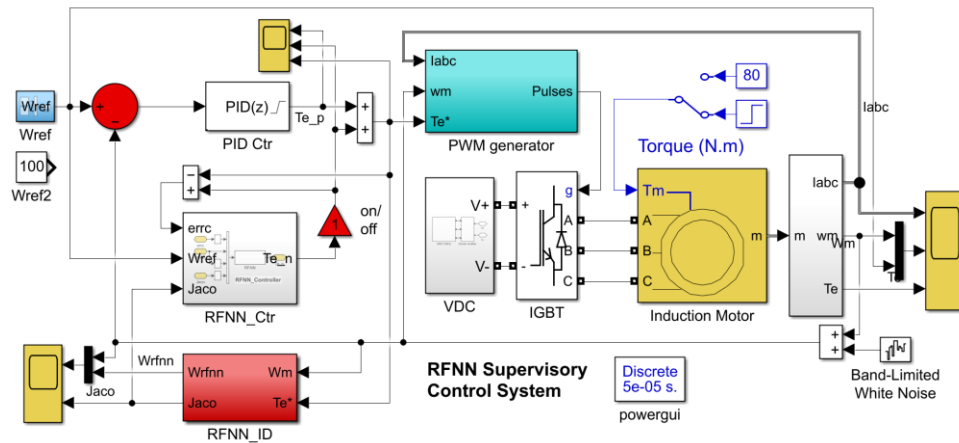
3. Kết quả và thảo luận

Sơ đồ hệ điều khiển động cơ KĐB 3 pha được xây dựng trên MATLAB/Simulink như Hình 4. Động cơ được sử dụng có công suất 50 HP, điện áp 460 VAC, tốc độ tối đa 1780 vòng/phút. Bộ điều khiển PID để kiểm soát tốc độ động cơ được giữ giá trị mặc định của [23], với $K_p = 30$, $K_i = 200$ và $K_d = 0$. Việc khảo sát và đánh giá chất lượng của bộ điều khiển được triển khai gồm các

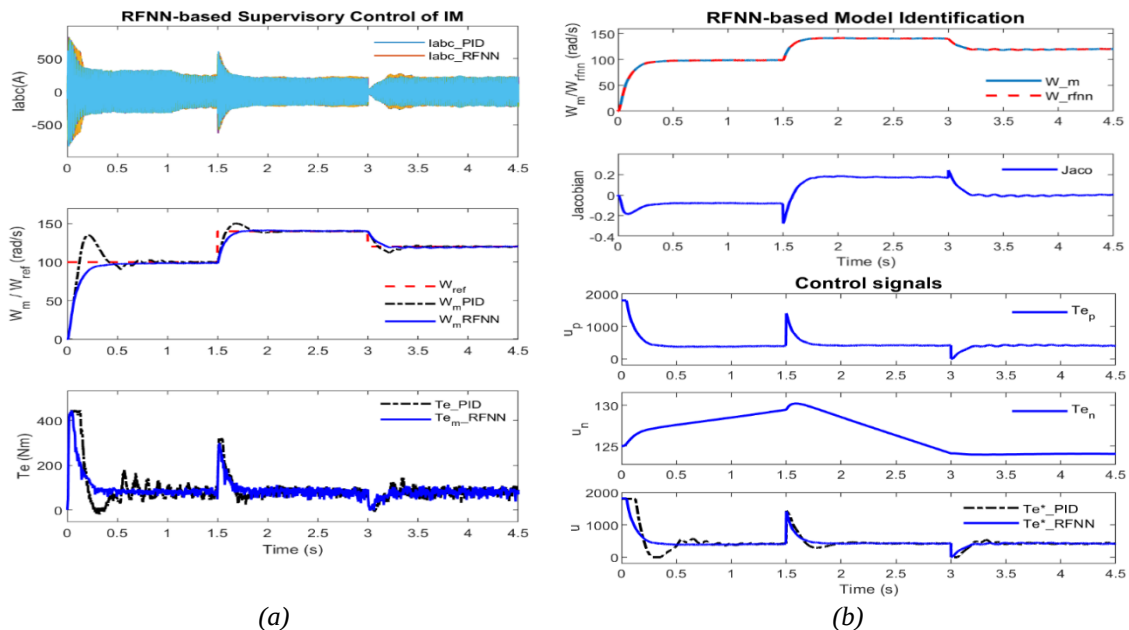
thí nghiệm cơ bản sau: (i) so sánh kết quả điều khiển động cơ KĐB 3 pha bằng bộ PID truyền thống và bộ điều khiển đề xuất PID-RFNNC; kiểm tra bộ điều khiển PID-RFNNC thông qua việc (ii) giả lập nhiễu cảm biến tốc độ và (iii) thay đổi tải trong quá trình vận hành.

3.1. So sánh điều khiển giám sát kết hợp PID-RFNN và PID truyền thống

Mặc định sơ đồ Hình 4 cho phép mô phỏng bộ điều khiển PID-RFNNC. Khi cần cô lập bộ điều khiển RFNNC để chỉ mô phỏng với bộ điều khiển PID, ta chỉ cần nhập giá trị zero cho khối on/off. Kết quả mô phỏng so sánh tác động của bộ điều khiển đề xuất và bộ PID truyền thống được trình bày trên Hình 5. Từ hình 5a ta thấy bộ điều khiển PID của [23] cho độ vọt lớn cao (~30%), nhưng khi kết hợp nó với bộ điều khiển RFNNC thì đáp ứng không còn vọt lớn nữa. Thời gian xác lập khoảng 0,5 giây phù hợp với thực tiễn. Hình 5b cho thấy bộ nhận dạng RFNNID có thể ước lượng tốc độ động cơ rất tốt, sai số không đáng kể. Ngoài ra, Hình 5b cũng cho thấy sự tham gia của các tín hiệu điều khiển thành phần, bao gồm tín hiệu điều khiển của bộ PID và bộ RFNNC. Kết quả so sánh này cho thấy bộ điều khiển RFNNC đã tham gia và khắc phục được hạn chế của bộ PID truyền thống, làm cho chất lượng điều khiển được cải thiện, nhất là độ vọt lớn của đáp ứng.



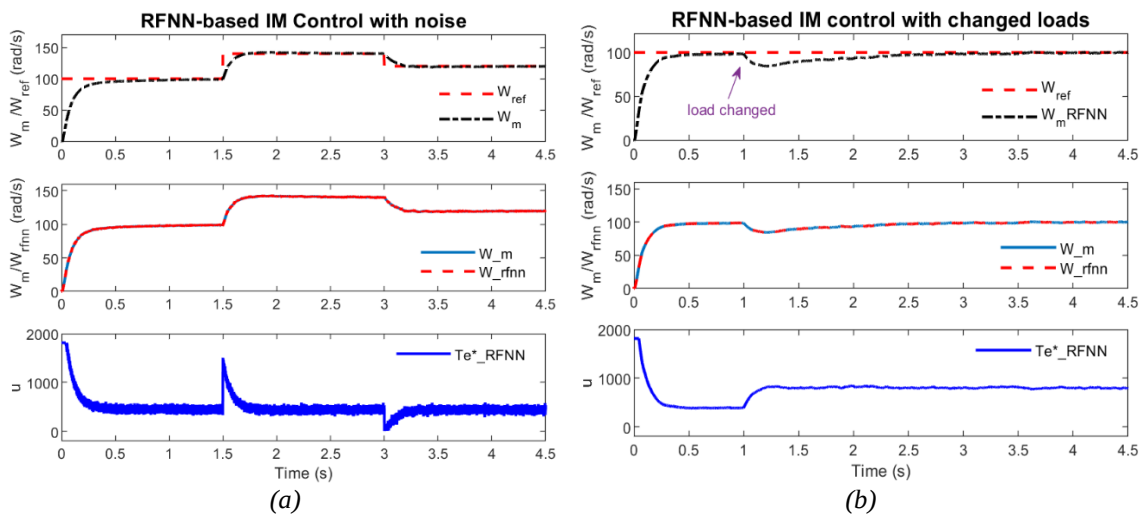
Hình 4. Sơ đồ điều khiển thông minh động cơ KĐB 3 pha



Hình 5. So sánh bộ điều khiển PID-RFNNC và PID truyền thống trên động cơ KĐB 3 pha

3.2. Khảo sát chất lượng bộ điều khiển PID-RFNN

Hình 6 trình bày kết quả mô phỏng đáp ứng của hệ điều khiển dưới tác động của nhiễu và sự biến thiên của tải. Trên Hình 6a, nhiễu trắng công suất 0,001W được thêm vào để giả lập nhiễu cảm biến tốc độ (xem Hình 4). Kết quả mô phỏng này cho thấy dưới tác động của nhiễu, bộ điều khiển PID-RFNNC vẫn giữ được tốc độ động cơ bám theo tốc độ tham khảo, không xuất hiện vọt lố và sai số xác lập không đáng kể. Hình 6b cho phép đánh giá chất lượng điều khiển của bộ PID-RFNNC khi tải của động cơ tăng gấp đôi (mômen tải tăng từ 80 N.m lên 160 N.m tại thời điểm 1 giây). Ngay khi tăng gấp đôi tải, tốc độ động cơ có giảm, nhưng sau khoảng 1,5 giây, tốc độ đáp ứng đã bám được tốc độ tham khảo. Trong cả 2 thí nghiệm Hình 6, bộ nhận dạng RFNNID đều cho kết quả nhận dạng mô hình đối tượng tốt, với sai số không đáng kể.



Hình 6. Đánh giá bộ điều khiển PID-RFNNC với (a) tác động của nhiễu và (b) thay đổi tải

4. Kết luận và đề nghị

Nghiên cứu này đề xuất giải pháp kết hợp giữa bộ điều khiển PID kinh điển và bộ điều khiển giám sát dùng mạng nơ-ron mờ hồi quy, áp dụng cho động cơ không đồng bộ 3 pha. Với cùng bộ tham số, khi bộ điều khiển PID chạy độc lập nó cho đáp ứng vọt lố cao, lên đến 30%. Tuy nhiên, khi kết hợp với bộ điều khiển giám sát dùng mạng nơ-ron mờ hồi quy thì đáp ứng của đối tượng không xuất hiện vọt lố nữa. Điều này cho thấy, nhờ cơ chế tự chỉnh bằng giải thuật huấn luyện online ngay trong quá trình vận hành mà bộ điều khiển dùng mạng nơ-ron mờ hồi quy đã tinh chỉnh được đáp ứng của hệ thống. Giải thuật huấn luyện bộ điều khiển giám sát có dùng thông tin về độ nhạy của đối tượng, gọi là thông tin Jacobian, để cập nhật các tham số của nó. Thông tin Jacobian này được nhận diện bởi một mạng nơ-ron mờ hồi quy thứ hai, cũng được huấn luyện trực tuyến. Như vậy, có thể nói, nhờ các giải thuật huấn luyện trực tuyến mà bộ nhận dạng và bộ điều khiển đã giám sát kịp thời sự thay đổi của đối tượng, từ đó điều chỉnh tín hiệu điều khiển phù hợp hơn, khắc phục được hạn chế về việc cố định tham số của bộ điều khiển PID truyền thống.

Hạn chế cơ bản của nghiên cứu này là chỉ mới dừng lại ở mức độ mô phỏng để kiểm chứng thuật toán điều khiển dùng mạng nơ-ron mờ hồi quy. Thời gian tới, nhóm nghiên cứu dự định sẽ tiếp tục kiểm nghiệm giải thuật điều khiển trên động cơ KĐB 3 pha thực tế. Bộ điều khiển trên MATLAB sẽ truyền tín hiệu điều khiển xuống mạch tạo xung PWM và nhận về giá trị cảm biến tốc độ động cơ để tạo thành vòng điều khiển kín, thông qua mô-đun giao tiếp DSP C2000 của Texas Instrument.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. S. Aspilli, R. Asha, and P. V. Hunagund, "Three phase induction motor drive using IGBTs and constant V/F method," *Inter. J. of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 1, no. 5, pp. 463-469, 2012.
- [2] H. Henao *et al.*, "Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines: A Review of Diagnostic Techniques," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 31-42, 2014, doi: 10.1109/MIE.2013.2287651.
- [3] R. Kanti, "Speed Control of Three-Phase Induction Motor using FPGA," *International Journal for Scientific Research and Development*, vol. 2, pp. 207-209, 2015.
- [4] J. Lepka and P. Stekl, "3-Phase AC Induction Motor Vector Control Using a 56F80x, 56F8100 or 56F8300 Device - Design of Motor Control Application," ed: Freescale Semiconductor, 2005.
- [5] H. Hartono, R. I. Sudjoko, and P. Iswahyudi, "Speed Control of Three Phase Induction Motor Using Universal Bridge and PID Controller," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1381, p. 012053, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1381/1/012053.
- [6] A. Idoko, I. Thuku, S. Musa, and C. Amos, "Design of Tuning Mechanism of PID Controller for Application in three Phase Induction Motor Speed Control," *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, vol. 4, no. 11, pp. 138-147, 2017, doi: 10.22161/ijaers.4.11.21
- [7] K. P. Basu and S. Yusuf, "A Novel Method of Starting a 3-Phase Induction Motor with One Phase Out from the Source of Supply," *The International Journal of Electrical Engineering & Education*, vol. 36, no. 1, pp. 25-30, 1999, doi: 10.7227/IJEEE.36.1.3.
- [8] H. Aziri, F. A. Patakor, M. Sulaiman, and Z. Salleh, "Simulation of three-phase induction motor drives using indirect field oriented control in PSIM environment," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1883, no. 1, p. 020045, 2017, doi: 10.1063/1.5002063.
- [9] V. T. Pham, Q. T. Nguyen, T. L. Nguyen, M. T. Nguyen, and A. T. Nguyen, "Modelling of the three-phase induction motor with changes in motor parameters," *J. of Transportation Science and Technology*, Hanoi University of Industry, no. 48, pp. 21-25, 2018.
- [10] K. Zeb, Z. Ali, K. Saleem, W. Uddin, M. A. Javed, and N. Christofides, "Indirect field-oriented control of induction motor drive based on adaptive fuzzy logic controller," *Electrical Engineering*, vol. 99, no. 3, pp. 803-815, 2017, doi: 10.1007/s00202-016-0447-5.
- [11] G. Lamas, J. E. Syllignakis, and E. Karapidakis, "The Study and Evaluation of the 3phase Induction Motor Controlled by an Inverter to Identify Power Losses and Energy Saving," 2016.
- [12] A. R. Al-Ali, M. M. Negm, and M. Kassas, "A PLC based power factor controller for a 3-phase induction motor," in *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No. 00CH37129)*, 2000, vol. 2, pp. 1065-1072, doi: 10.1109/IAS.2000.881964.
- [13] F. Lftisi, G. H. George, A. Aktaibi, C. B. Butt, and M. A. Rahman, "Artificial neural network based speed controller for induction motors," in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 23-26 Oct. 2016, pp. 2708-2713, doi: 10.1109/IECON.2016.7793117.
- [14] V. L. Pham, C. C. Tran, D. T. Nguyen, H. Đ. Le, and C.-N. Nguyen, "The ability of optimize RBF-PI controller using genetic algorithms to control the three-phase asynchronous motor," *Proc. 4th Vietnam inter. conf. and exhibition on control and automation - VCCA-2017*, paperID: 21, Ho Chi Minh City, 1-2 Dec 2017.
- [15] O. R. Agyare, A. B. Asiedu-Asante, and A. R. Biney, "Fuzzy Logic Based Condition Monitoring of a 3-Phase Induction Motor," in *2019 IEEE AFRICON*, 25-27 Sept. 2019, pp. 1-8, doi: 10.1109/AFRICON46755.2019.9133780.
- [16] C.-N. Nguyen and T. Dang, "Adaptive single neural PID control based on recurrent fuzzy neural network: An application to ball and beam control system," *Can Tho University Journal of Science*, no. 20a-2011, pp. 169-175, 2011.
- [17] M. T. Le, H. T. Luong, T. L. Phan, and C.-N. Nguyen, "Delta Robot Control Using Single Neuron PID Algorithms Based on Recurrent Fuzzy Neural Network Identifiers," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 9, no. 10, pp. 1411-1418, 2020, doi: 10.18178/ijmerr.9.10.1411-1418.

-
- [18] M. T. Le, H. T. Luong, T. T. Pham, and C.-N. Nguyen, "Improvement of PID Controllers by Recurrent Fuzzy Neural Networks for Delta Robot," in *Intelligent Communication, Control and Devices*, Springer Singapore, 2021, pp. 263-275.
- [19] M. T. Le, H. T. Luong, T. T. Pham, C.-T. Pham, and C.-N. Nguyen, "Evaluating the Quality of Intelligent Controllers for 3-DOF Delta Robot Control," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 10, no. 10, pp. 542-552, 2021, doi: 10.18178/ijmerr.10.10.542-552.
- [20] J. Liu, *Radial Basis Function (RBF) Neural Network Control for Mechanical Systems Design, Analysis and Matlab Simulation*. Berlin: Springer Berlin (in English), 2015, p. 365.
- [21] L. Ching-Hung and T. Ching-Cheng, "Identification and control of dynamic systems using recurrent fuzzy neural networks," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 349-366, 2000, doi: 10.1109/91.868943.
- [22] D. D. Nguyen, T. H. Vo, and N. S. Tran, "Electro-mechanical transmission control," Teaching materials of University of Economics - Technology Industrial, 2019.
- [23] H. Blanchette and L.-A. Dessaint, "AC4 – DTC Induction Motor Drive," The Mathworks Inc., 2021.
- [24] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Research Triangle Park, North Carolina: ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society, 1995.
- [25] W. Sun and Y. Wang, "A recurrent fuzzy neural network based adaptive control and its application on robotic tracking control," *Neural Information Processing – Letters and Reviews*, vol. 5, no. 1, pp. 19-26, 2004.