

ĐIỀU KHIỂN LẠI ỔN ĐỊNH TẦN SỐ HỆ THỐNG ĐIỆN CÓ SỰ THAM GIA CỦA NĂNG LƯỢNG TÁI TẠO

HYBRID FREQUENCY STABILITY CONTROL IN INTERCONNECTED POWER SYSTEM
WITH RENEWABLE ENERGY INTEGRATION

Đoàn Diễm Vương^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huiv5804.2025.275>

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đề xuất bộ điều khiển mờ - PSO (Particle Swarm Optimization) - GWO (Grey Wolf Optimization) - PI^λ (Proportional Integral) để điều khiển tần số cho hệ thống điện hai vùng bao gồm tua bin hồi nhiệt và tua bin không hồi nhiệt, có xét đến các yếu tố phi tuyến như dải chết của máy điều tốc (Governor Deadband - GDB), giới hạn công suất phát (Generation Rate Constraint - GRC), cùng sự tham gia của nguồn năng lượng tái tạo (điện gió, mặt trời). Thuật toán lai PSO-GWO được sử dụng để tối ưu hóa tham số bộ điều khiển, kết hợp ưu điểm tìm kiếm không gian của GWO và khai thác cục bộ của PSO. Mô hình hệ thống tích hợp các ràng buộc thực tế nhằm đánh giá hiệu quả ổn định tần số trong điều kiện vận hành phức tạp. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển đề xuất cải thiện đáng kể chất lượng điều khiển so với phương pháp điều khiển mờ PID, PSO PID, GWO PID, FPID, đặc biệt khi có nhiễu loạn từ các nguồn tái tạo.

Từ khóa: Điều khiển mờ, PSO-GWO, PI^λ, hệ hai vùng, tua bin hồi nhiệt, GDB/GRC, năng lượng tái tạo.

ABSTRACT

This study proposes a hybrid Fuzzy - PSO (Particle Swarm Optimization) - GWO (Grey Wolf Optimizer) - PI^λ (Proportional-Integral) controller for frequency regulation in a two-area power system comprising reheat and non-reheat turbines, incorporating nonlinearities such as Governor Deadband (GDB), Generation Rate Constraint (GRC), and the integration of renewable energy sources (wind and solar power). The hybrid PSO-GWO algorithm is employed to optimize the controller parameters, combining GWO's global search capability with PSO's local exploitation. The system model integrates practical constraints to evaluate frequency stability performance under complex operating conditions. Simulation results demonstrate that the proposed controller significantly improves control quality compared to conventional Fuzzy PID, PSO PID, GWO PID, and FPID methods, particularly under disturbances from renewable energy sources.

Keywords: Fuzzy control, PSO-GWO, PI^λ, two-area system, reheat turbine, GDB/GRC, renewable energy

¹Khoa Điều khiển và Tự động hóa, Trường Đại học Điện lực

*Email: vuongdd@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/3/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/5/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/7/2025

1. GIỚI THIỆU

Ổn định tần số trong hệ thống điện đa liên kết đang đối mặt với nhiều thách thức do các yếu tố phi tuyến trong hệ thống và sự tích hợp năng lượng tái tạo. Các thành phần phi tuyến như dải chết bộ điều tốc (GDB), giới hạn công suất phát (GRC), độ trễ thời gian hệ thống cùng với sự biến động các thông số thiết bị trong quá trình vận hành đã làm giảm chất lượng điều khiển hệ thống. Đặc biệt, việc tích hợp ngày càng nhiều nguồn năng lượng tái

tạo như điện gió và mặt trời đã làm giảm quán tính hệ thống, dẫn đến các vấn đề về ổn định điện áp và tần số. Khi xảy ra sự cố ngừng phát đột ngột ở các trang trại gió công suất lớn, hệ thống có thể gặp phải các nhiễu loạn nghiêm trọng, ảnh hưởng xấu đến khả năng điều khiển tần số phụ tải. Ngược lại, khi các nguồn năng lượng tái tạo phát điện vượt quá nhu cầu có thể gây quá tải lưới điện, đe dọa nghiêm trọng đến sự ổn định tổng thể của hệ thống điện. Những thách thức này đòi hỏi phải có các giải

pháp điều khiển tiên tiến để đảm bảo vận hành ổn định hệ thống điện trong bối cảnh mới. Do đó, nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để phát triển các phương pháp điều khiển hiệu quả, nhằm đảm bảo sự cân bằng cung-cầu và duy trì tần số hệ thống trong giới hạn cho phép.

Trong nghiên cứu [1], tác giả đề xuất bộ điều khiển trượt (Sliding Mode Control - SMC) cho hệ thống điện đa kết nối hai vùng có tuabin gió. Mô hình hệ thống được xây dựng theo mô hình không gian trạng thái, và bộ điều khiển được thiết kế cho từng vùng để đảm bảo ổn định tần số. Bộ điều khiển trượt, được phát triển bởi Utkin, nổi tiếng với khả năng chống lại sự thay đổi ngẫu nhiên của hệ thống. Tuy nhiên, khi áp dụng cho hệ thống có năng lượng tái tạo, nó gặp phải những hạn chế nhất định do sự biến động lớn của nguồn gió. Để khắc phục điều này, tác giả đã kết hợp bộ điều khiển trượt với mạng nơ-ron, cho phép điều chỉnh các thông số hệ thống theo thời gian thực dựa trên hàm Lyapunov, nhằm triệt tiêu các yếu tố bất định. Bộ điều khiển dự đoán mô hình thích nghi (Adaptive Model Predictive Control - AMPC) ở trong [2], nhóm tác giả đã nghiên cứu bộ điều khiển dự đoán mô hình thích nghi cho hệ thống có nguồn điện gió. Phương pháp này cho phép dự đoán và bù đắp cho sự thay đổi của nguồn điện gió, từ đó cải thiện độ ổn định tần số. Phương pháp phân tích dữ liệu tần số (Frequency Domain Analysis - FDA) được áp dụng trong [3] cho hệ thống điện lớn, bao gồm các nguồn năng lượng như điện gió, quang điện và hệ thống lưu trữ năng lượng siêu dẫn từ (SMES). Phương pháp này giúp phân tích và xác định các vấn đề về ổn định tần số trong miền tần số.

Trong [4], tác giả nghiên cứu bộ điều khiển quán tính ảo (Virtual Inertia Control - VIA) để ổn định tần số trong hệ thống điện đa kết nối hai vùng có nguồn điện gió và mặt trời. Bộ điều khiển này được thiết kế như một vòng điều khiển bên trong hệ thống để cung cấp quán tính ảo, giúp giảm thiểu sự thay đổi tần số. Ngoài ra còn có các phương pháp để tối ưu hóa tham số bộ điều khiển mờ - PID. Trong [5], tác giả thiết kế bộ điều khiển sử dụng thuật toán lai tiến hóa dị biệt và tối ưu hóa bầy đàn (Differential Evolution and Particle Swarm Optimization - DEPSO) để tối ưu hóa các thông số của bộ điều khiển mờ PID. Nghiên cứu [6] ổn định tần số hệ thống điện sử dụng kết hợp bộ điều khiển sử dụng thuật toán PSO và thuật toán lai mờ nơ-ron thích nghi (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System - ANFIS) để điều chỉnh thông số bộ PID. Ở [7] phương pháp điều khiển PSO dùng để tối ưu cho hệ điều khiển đa tầng theo thứ tự (Fractional Order Control - FOC) nhằm ổn định cho hệ thống tích hợp thêm nguồn điện gió. Thuật toán dựa trên phương pháp tìm kiếm của chim

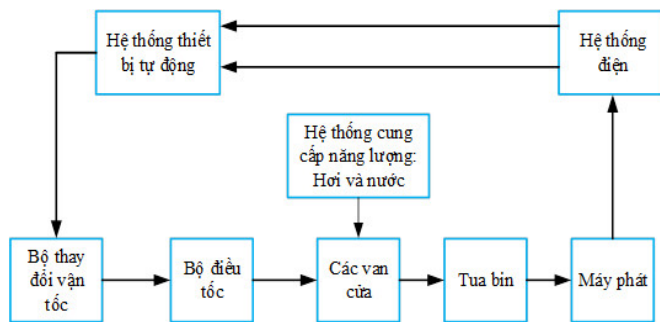
cuckoo được dùng trong [8] thiết kế ổn định tần số hệ thống điện có yếu tố phi tuyến. Trong [9], thuật toán cuckoo được sử dụng cho việc ổn định tần số hệ thống nhiệt điện và điện gió. Một bộ điều khiển PID - mờ mà các thông số được tối ưu hóa bởi giải thuật tìm kiếm chim cuckoo được thiết kế để ổn định tần số trong [10]. Thuật toán tìm kiếm tối ưu hóa vi khuẩn (Bacterial Foraging Optimization Algorithm - BFOA) được dùng để tối ưu hóa các thông số của bộ điều khiển PID để ổn định tần số hai vùng có năng lượng tái tạo trong nghiên cứu [11]. Trong [12], một bộ điều khiển lai BFOA và PSO được dùng để tối ưu hóa tham số điều khiển ổn định tần số hệ thống điện lai. Phương pháp tối ưu hóa Harris Hawks (Harris Hawks Optimizer - HHO) - PID được thiết kế cho hệ thống điện lai trong [13]. Phương pháp tối ưu DE-PSO tối ưu hóa bộ mờ PID được nghiên cứu trong [14]. Bộ mờ PID được tối ưu hóa bởi phương pháp PSO trong [15], theo phương pháp DEGWO trong [16] để ổn định tần số hệ thống điện lai. Kỹ thuật PSO được sử dụng trong [17] ổn định tần số cho hệ thống kết nối hai vùng xét đến năng lượng tái tạo. Nghiên cứu [18], tần số tải hệ thống gồm năng lượng nhiệt, gió, mặt trời được điều khiển bởi thuật toán tối ưu hóa theo đàn bướm (Butterfly Optimization Algorithm - BOA). Ở [19] hệ thống điện gồm nguồn quang điện được điều khiển tần số tải bằng phương pháp lai PSO-GWO. Trong [20], thuật toán MBA điều chỉnh thông số bộ PID cho hệ thống gồm nguồn lưu trữ SMES. Hệ thống điện lai gồm có năng lượng mặt trời, nhiệt điện, điện gió, đi zen được ổn định tần số bằng thuật toán nổ mìn (Mine Blast Algorithm - MBA) điều chỉnh tham số bộ PID [21]. Mạng nơ-ron kết hợp với bộ điều khiển trượt tích phân được sử dụng để ổn định tần số hệ thống điện có nguồn điện gió [22]. Bộ điều khiển dự đoán [23] được dùng để ổn định tần số hệ thống và nhằm cung cấp quán tính quay cho nguồn năng lượng tái tạo.

Nghiên cứu này tập trung thiết kế bộ điều khiển mờ PSO-GWO-PI^λ để ổn định tần số cho hệ thống điện hai vùng và có xem xét đến các yếu tố phi tuyến có sự tham gia của các nguồn năng lượng tái tạo. Đây là các yếu tố ảnh hưởng đến việc ổn định tần số cho hệ thống điện đa vùng. Phương pháp tối ưu được dùng để tối ưu hóa các thông số của bộ điều khiển PI^λ là PSO - GWO nhằm tận dụng tối đa ưu điểm của hai phương pháp. Bộ điều khiển đề xuất được so sánh chất lượng với các bộ điều khiển: Mờ - PID, PSO-PID, GWO-PID, FPID.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG ĐIỆN HAI VÙNG

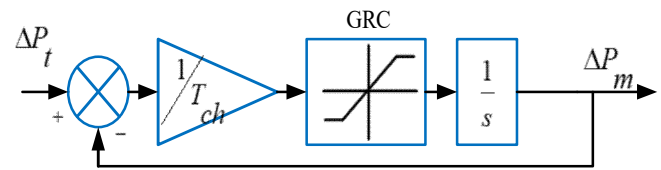
Để đảm bảo ổn định tần số trong hệ thống điện đa kết nối, cần thực hiện mô hình hóa chính xác bằng các phương trình toán học và áp dụng các nguyên lý điều

khuyến phù hợp nhằm duy trì ổn định cả tần số tại từng vùng lẫn công suất truyền tải giữa các vùng. Hình 1 minh họa sơ đồ nguyên lý cơ bản của một nhà máy điện điển hình, bao gồm các thành phần chính: bộ điều tốc, tua bin, máy phát, phụ tải và hệ thống đường dây truyền tải. Bộ điều tốc đóng vai trò then chốt trong việc kiểm soát lưu lượng hơi/nước cấp vào tua bin. Khi có sự thay đổi phụ tải (tăng hoặc giảm), hệ thống sẽ phát hiện sự chênh lệch giữa công suất phát và công suất tiêu thụ, tín hiệu này được truyền đến bộ điều tốc. Dựa trên giá trị sai lệch nhận được, bộ điều tốc sẽ điều chỉnh góc mở của van đầu vào, qua đó kiểm soát chính xác lưu lượng hơi/nước cung cấp cho tua bin. Kết quả của quá trình điều khiển này thể hiện ở khả năng duy trì tốc độ quay đồng bộ của máy phát trong phạm vi cho phép, từ đó đảm bảo tần số lưới điện luôn dao động quanh giá trị danh định mong muốn. Cơ chế này là nền tảng quan trọng cho việc ổn định hệ thống điện đa vùng, đặc biệt khi có sự tham gia của các nguồn năng lượng tái tạo có tính chất biến động cao



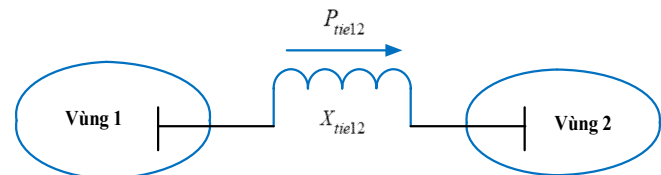
Hình 1. Sơ đồ khối của hệ thống điều khiển công suất [24]

Trong vận hành hệ thống điện thực tế, các yếu tố phi tuyến như GDB và GRC đóng vai trò quan trọng ảnh hưởng đến chất lượng điều khiển. Theo Thông tư số 25/2016/TT-BCT, GDB được định nghĩa là vùng tần số mà khi hệ thống dao động trong phạm vi này (thường 0,06% hay 0,036Hz đối với tua bin nhiệt và 0,02% với tua bin thủy điện theo tiêu chuẩn IEEE), bộ điều tốc sẽ không phản ứng điều chỉnh. Hiện tượng này xuất phát từ các nguyên nhân vật lý như ma sát cơ khí, độ trễ trong liên kết cơ cấu, hay sự chống chéo của các van thủy lực. Song song đó, GRC thể hiện giới hạn tốc độ thay đổi công suất phát do các ràng buộc vật lý của tua bin như giới hạn nhiệt động, khả năng đáp ứng cơ khí và yêu cầu an toàn vận hành. Cả hai yếu tố này đều gây ra tính phi tuyến đặc trưng cho hệ thống, làm phức tạp hóa bài toán điều khiển tần số, đặc biệt khi kết hợp với sự tham gia của các nguồn năng lượng tái tạo có tính biến động cao. Hình 2 minh họa rõ các đặc tính phi tuyến này của GRC trong hệ thống điện đa máy phát.



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc GRC

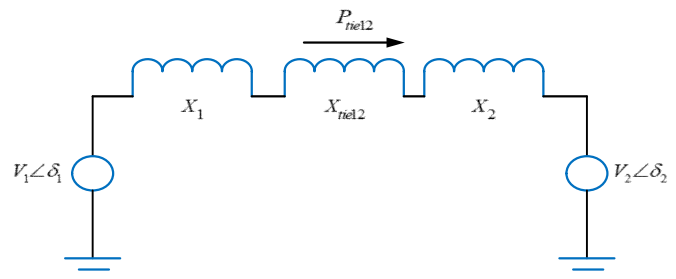
Hệ thống điện được xem xét trong nghiên cứu này là hệ thống điện hai vùng kết nối hai vùng được thể hiện trên hình 3.



Hình 3. Hệ thống điện hai vùng [24]

Hệ thống điện được mô hình hóa bao gồm hai vùng riêng biệt, được kết nối với nhau thông qua một đường dây truyền tải. Đường dây liên kết này có điện kháng là X_{tie} , đóng vai trò quan trọng trong việc truyền tải công suất giữa hai vùng.

Mỗi máy phát điện trong hệ thống được biểu diễn một cách đơn giản hóa bằng một nguồn điện áp đặt sau một điện kháng tương đương. Cách mô hình hóa này giúp đơn giản hóa việc phân tích hệ thống mà vẫn giữ được các đặc tính động học quan trọng. Hình mô tả cách bố trí và kết nối của các thành phần trong hệ thống.



Hình 4. Mô hình tương đương hệ thống điện kết nối hai vùng [24]

Trong điều kiện làm việc bình thường thì lúc này công suất truyền vào đường dây từ khu vực 1 đến khu vực 2 được tính như sau [24]:

$$P_{tie12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} \sin \delta_{12} \quad (1)$$

Trong đó, $X_{12} = X_1 + X_{tie} + X_2$. Thực hiện tuyến tính hóa với sai lệch nhỏ trong đường dây có được ΔP_{12} được tính theo phương trình (2).

$$\Delta P_{tie12} = \left. \frac{dP_{tie12}}{d\delta_{12}} \right|_{\delta_{12}} \Delta \delta_{12} = T_{12} \Delta \delta_{12} \quad (2)$$

T_{12} là độ dốc của đường cong công suất ở góc làm việc thời điểm ban đầu. $\delta_{12_0} = \delta_{1_0} - \delta_{2_0}$ là hệ số công suất đồng bộ. Vì vậy, có được:

$$T_{12} = \left. \frac{dP_{tie12}}{d\delta_{12}} \right|_{\delta_{12_0}} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} \sin \Delta \delta_{12_0} \quad (3)$$

Trong đó, δ_1, δ_2 lần lượt là các góc pha của điện áp cuối V_1, V_2 tương ứng

Sai lệch công suất trao đổi trên đường dây có thể được biểu thị bằng:

$$\Delta P_{tie12} = T_{12} (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2) \quad (4)$$

Trong đó: $T_{12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} \sin \Delta \delta_{12_0}$ (MW/rad) là hệ số đồng bộ công suất.

Tần số thay đổi có liên quan đến độ lệch pha góc được biểu thị như sau:

$$\begin{aligned} \Delta \delta_1 &= 2\pi \int (\Delta f_1) dt \\ \Delta \delta_2 &= 2\pi \int (\Delta f_2) dt \end{aligned} \quad (5)$$

Do đó phương trình trên khi biến đổi Laplace trở thành:

$$\Delta P_{tie12}(s) = \frac{2\pi T_{12}}{s} (\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)) \quad (6)$$

Trong bối cảnh nhu cầu sử dụng điện năng ngày càng gia tăng, các nguồn năng lượng tái tạo như điện mặt trời và điện gió đã và đang được tích hợp mạnh mẽ vào hệ thống điện quốc gia. Việc này mang lại nhiều lợi ích to lớn về mặt môi trường, giảm sự phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch và góp phần đảm bảo an ninh năng lượng. Tuy nhiên, sự thâm nhập ngày càng sâu rộng của các nguồn năng lượng tái tạo này cũng đặt ra không ít thách thức đối với sự ổn định và vận hành an toàn của hệ thống điện đa kết nối. Một trong những nhược điểm đáng chú ý là việc các nguồn năng lượng tái tạo làm tăng tính phi tuyến của hệ thống điện. Các thiết bị điện truyền thống như máy phát điện đồng bộ có đặc tính tuyến tính trong một phạm vi hoạt động nhất định. Tuy nhiên, các hệ thống điện mặt trời và điện gió thường kết nối với lưới điện thông qua các bộ nghịch lưu là các thiết bị điện tử công suất có đặc tính phi tuyến phức tạp. Sự gia tăng số lượng các bộ nghịch lưu này làm cho hành vi tổng thể của hệ thống điện trở nên khó dự đoán và kiểm soát hơn.

Thêm vào đó, các nguồn năng lượng tái tạo có đặc tính động học khác biệt so với các nguồn điện truyền thống. Các nhà máy điện truyền thống, với các máy phát điện

quay lớn, cung cấp một lượng quán tính đáng kể cho hệ thống điện. Quán tính này giống như một "bánh đà" năng lượng, giúp hệ thống chống lại các biến động đột ngột về tần số. Khi có sự mất cân bằng giữa công suất phát và công suất tiêu thụ, quán tính của các máy phát điện sẽ tạm thời cung cấp hoặc hấp thụ năng lượng, làm chậm tốc độ thay đổi tần số. Tuy nhiên, các hệ thống điện mặt trời không có quán tính quay do chúng chuyển đổi trực tiếp năng lượng mặt trời thành điện năng thông qua các tấm pin và bộ nghịch lưu. Các hệ thống điện gió, mặc dù có tua bin quay, nhưng quán tính hiệu dụng mà chúng đóng góp vào lưới điện thường thấp hơn nhiều so với các máy phát điện truyền thống và phụ thuộc vào đặc tính điều khiển của bộ nghịch lưu.

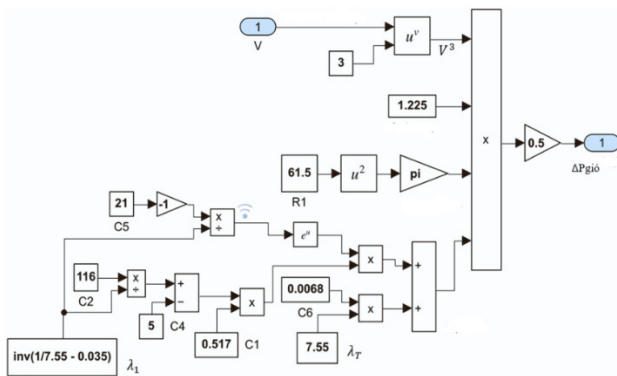
Khi tỷ trọng của điện mặt trời và điện gió trong cơ cấu nguồn điện tăng lên, tổng quán tính của hệ thống điện sẽ giảm xuống. Điều này có nghĩa là hệ thống sẽ trở nên "yếu" hơn trong việc chống lại các sự cố và các biến động về tải. Khi xảy ra sự cố, chẳng hạn như mất một đường dây truyền tải lớn hoặc sự thay đổi đột ngột của phụ tải, tần số hệ thống sẽ thay đổi nhanh hơn và với biên độ lớn hơn. Việc thiếu quán tính cũng làm giảm khả năng của hệ thống trong việc tự điều chỉnh và phục hồi về trạng thái cân bằng sau một nhiễu loạn.

Một yếu tố khác cần xem xét là hệ số cản dao động của lưới điện. Hệ số này thể hiện khả năng của hệ thống trong việc hấp thụ và làm suy giảm các dao động tần số. Các nguồn điện truyền thống thường có các cơ chế điều khiển và đặc tính vật lý giúp tăng cường hệ số cản dao động. Tuy nhiên, đáp ứng động của các nguồn điện gió lại phụ thuộc nhiều vào đặc tính điều khiển của bộ nghịch lưu và đôi khi các bộ nghịch lưu có thể không được điều khiển tối ưu để cung cấp đủ khả năng cản dao động cho lưới điện. Sự thiếu hụt hệ số cản dao động có thể dẫn đến các dao động tần số kéo dài và thậm chí khuếch đại, gây ra nguy cơ mất ổn định hệ thống điện.

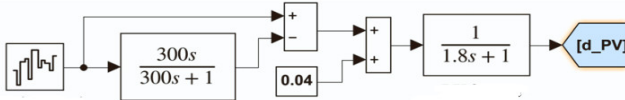
Vì vậy, mặc dù năng lượng tái tạo đóng vai trò quan trọng trong việc xây dựng một hệ thống điện bền vững, việc tích hợp chúng ở tỷ lệ cao mang theo những thách thức không nhỏ về mặt ổn định hệ thống. Sự gia tăng tính phi tuyến, sự suy giảm quán tính và hệ số cản dao động của lưới điện là những yếu tố cần được nghiên cứu và giải quyết một cách cẩn trọng để đảm bảo hệ thống điện vẫn có thể vận hành một cách an toàn, tin cậy và hiệu quả trong tương lai. Các nguồn năng lượng gió và năng lượng mặt trời được mô tả như hình 5 và 6.

Hình 7 là cấu trúc hệ thống điện hai vùng với vùng một là tua bin không hồi nhiệt và vùng hai là tua bin hồi

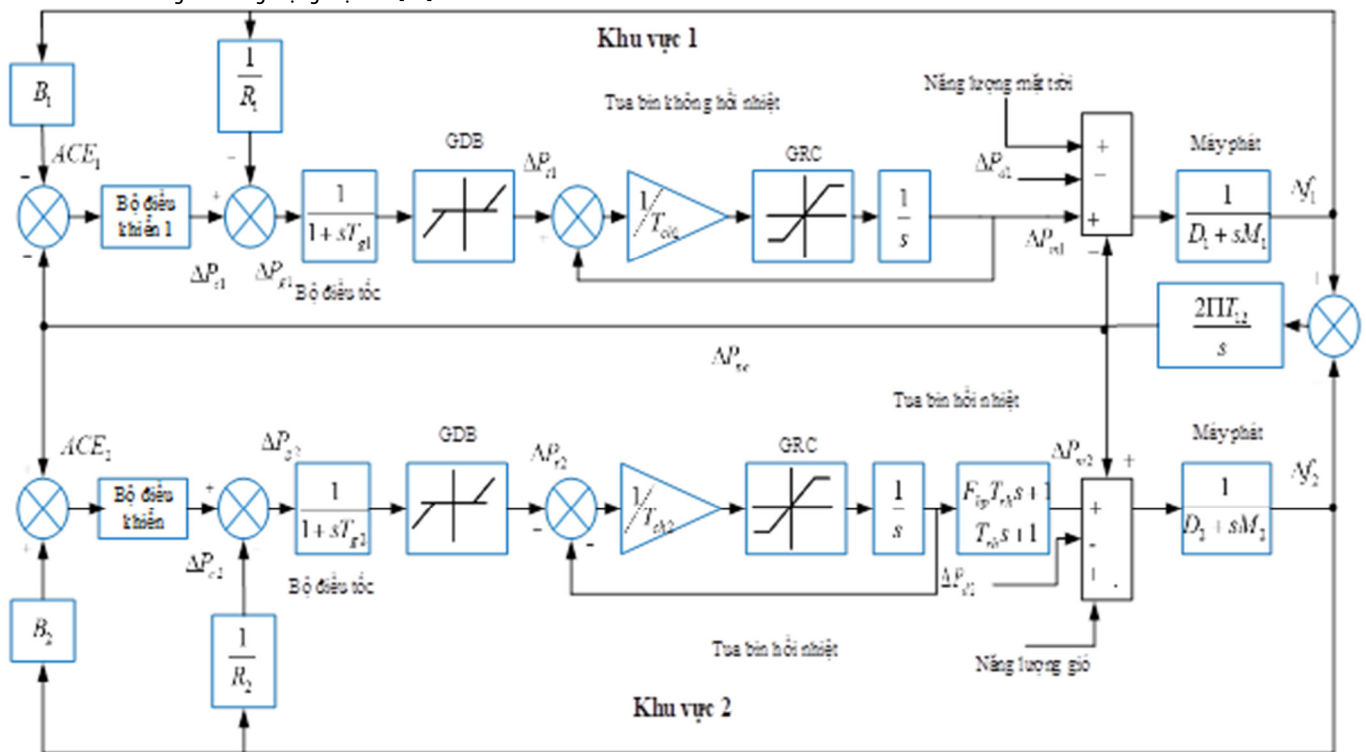
hiệt có xem xét đến các yếu tố phi tuyến GDB và GRC và có sự tham gia của các nguồn năng lượng tái tạo như là năng lượng gió, năng lượng mặt trời.



Hình 5. Mô tả nguồn năng lượng gió [25]



Hình 6. Mô tả nguồn năng lượng mặt trời [25]

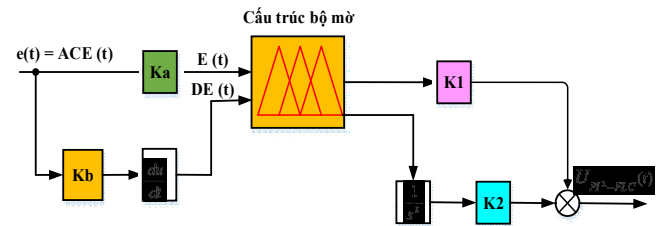


Hình 7. Mô hình hệ thống điện hai vùng phi tuyến có sự tham gia của các nguồn năng lượng tái tạo

3. BỘ ĐIỀU KHIỂN MỜ - PSO GWO - PI^λ

Bộ điều khiển Mờ - PSO GWO - PI^λ được thiết kế cho hệ thống điện hai vùng là: Vùng tua bin không hồi nhiệt, vùng tua bin hồi nhiệt với các yếu tố làm hệ thống phi tuyến như GDB, GRC như trên hình 8. Hệ thống có xem xét đến có các loại năng lượng tái tạo như năng lượng gió,

năng lượng mặt trời. Bộ điều khiển ổn định tần số cho hệ thống được thể hiện như hình 8.



Hình 8. Sơ đồ cấu trúc của bộ điều khiển Mờ - PSO GWO - PI^λ

Bộ điều khiển thiết kế cho hệ thống điện hai vùng tua bin không hồi nhiệt và vùng tua bin hồi nhiệt có tích hợp năng lượng tái tạo. Bộ điều khiển được thiết kế để đảm bảo ổn định tần số cho cả hai vùng, đồng thời xét đến ảnh hưởng của các nguồn năng lượng tái tạo như: Điện mặt trời và điện gió. Đầu vào của bộ điều khiển ở mỗi vùng nhận tín hiệu sai lệch tần số (Δf) để điều chỉnh công suất phù hợp. Nhằm giải quyết bài toán điều khiển phức tạp do tính phi tuyến của hệ thống và sự biến động từ năng

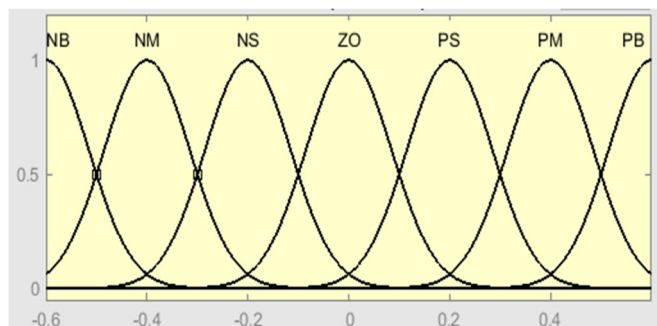
lượng tái tạo và tối ưu hóa đáp ứng quá độ và giảm sai lệch tần số giữa hai vùng. Độ sai lệch được đưa vào đầu vào của bộ điều khiển của hai vùng là:

$$e_1(t) = ACE_1 = B_1 \Delta f_1 + \Delta P_{tie12} \quad (7)$$

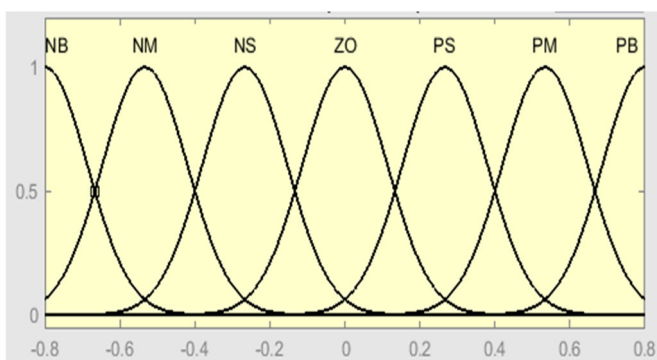
$$e_2(t) = ACE_2 = B_2 \Delta f_2 + \Delta P_{tie12} \quad (8)$$

Bộ điều khiển mờ PID có hai đầu vào là $e(t)$ và đạo hàm của $e(t)$. Đầu ra của bộ điều khiển là tín hiệu điều khiển u

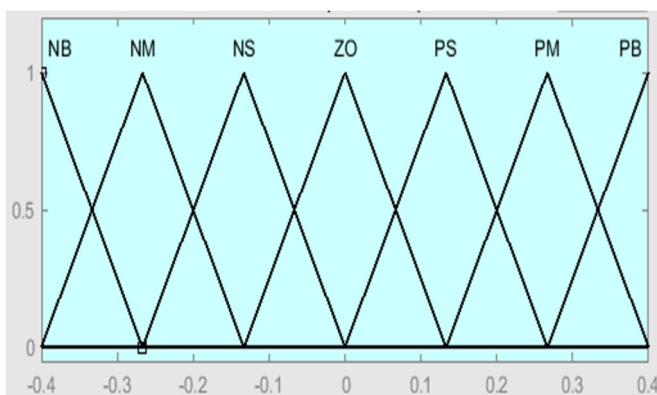
đưa vào máy phát tốc. Các hàm liên thuộc của biến đầu vào ACE, đạo hàm của ACE, đầu ra K1 và K2 được trình bày như hình 9.



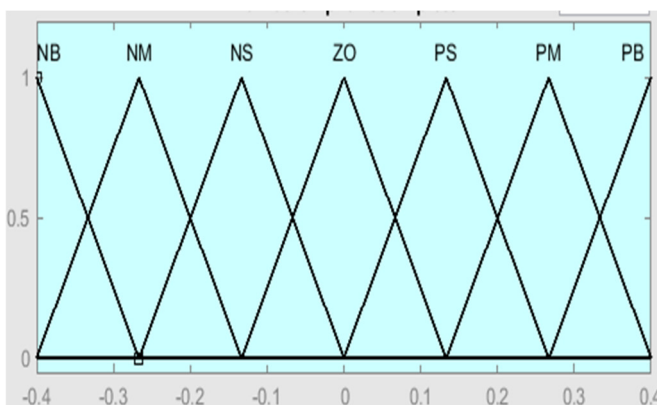
Hình 9. Hàm liên thuộc của ACE



Hình 10. Hàm liên thuộc của ΔACE



Hình 11. Hàm liên thuộc của K_p



Hình 12. Hàm liên thuộc của K_i

Bảng 1. Bảng luật mờ cho K_p

		ACE						
ΔACE		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZO
	NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
	ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	PM	ZO	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB

Bảng 2. Bảng luật mờ cho K_i

		ACE						
ΔACE		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NB	NB	NB	NB	NM	NM	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
	NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
	PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
	PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB	PB

Bảng 1 và 2 trình bày luật mờ của bộ điều khiển đã đề xuất. Trong đó NB: âm nhiều, NS: âm ít, ZO: không, PS: dương ít, PB: dương nhiều. Trong các phương pháp điều khiển hiện đại, thường sử dụng các phương pháp để tối ưu các tham số điều khiển dựa trên hàm mục tiêu. Hàm mục tiêu được xác định cho bộ điều khiển này được thể hiện ở công thức 9. Trong đó các Δf_1 , Δf_2 là các sai lệch tần số ở các vùng tua bin không hồi nhiệt và vùng tuabin hồi nhiệt. ΔP_{tie} là sự thay đổi công suất trên đường dây giữa các vùng.

$$J = IATE = \int_0^{t_{sim}} (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie}|) dt \quad (9)$$

Mục tiêu là để giảm thiểu hàm mục tiêu J trong các trường hợp khác nhau của các điều kiện thay đổi tải vận hành với các nguồn năng lượng tái tạo và xem xét đến dải chết của bộ điều tốc (GDB) cùng với sự phi tuyến của giới hạn tốc độ của máy phát (GRC). Áp dụng hàm mục tiêu được trình bày trong (9), một phương pháp tối ưu hóa hiệu quả có thể được sử dụng. Trong nghiên cứu này sử dụng kỹ thuật tối ưu PSO - GWO để tối ưu hóa hàm mục tiêu.

PSO là một phương pháp tối ưu dựa trên trí tuệ bầy đàn, sử dụng các phần tử di chuyển trong không gian tìm kiếm để xác định giải pháp tối ưu cho bài toán. Thuật toán lấy cảm hứng từ các tương tác xã hội quan sát được ở loài chim. PSO cung cấp cách tiếp cận tìm kiếm dựa trên quần thể để tối ưu hóa toàn cục, với ưu điểm chính là dễ triển khai và yêu cầu ít tham số điều chỉnh [26].

GWO là một thuật toán tối ưu mô phỏng hành vi săn mồi theo bầy của loài sói xám. Trong GWO, các cá thể dẫn đầu đàn được gọi là alpha (α) và là những cá thể tốt nhất. Các cá thể xếp thứ hai và thứ ba lần lượt được ký hiệu là beta (β) và delta (δ). Cấp bậc thấp nhất trong đàn sói là omega (ω), những cá thể này phải phục tùng tất cả các cá thể có thứ bậc cao hơn [27].

PSO-GWO là một thuật toán dựa trên bầy đàn mới được đề xuất có nhiều ưu điểm như dễ triển khai và tiêu thụ ít bộ nhớ. Ý tưởng chính là kết hợp khả năng tìm kiếm và khai thác của PSO và GWO để tạo ra một biến thể mạnh mẽ hơn với mức tiêu thụ bộ nhớ thấp. PSO-GWO được sử dụng để khai thác và khám phá vị trí của ba tác nhân đầu tiên trong không gian tìm kiếm một cách đồng thời.

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \quad (10)$$

$$\vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \vec{X}_\beta - \vec{X}| \quad (11)$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (12)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha) \quad (13)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta) \quad (14)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (15)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (16)$$

Trong đó, A_1, A_2, A_3, C_1, C_2 và C_3 đại diện cho các vector hệ số của ba con sói xếp hạng cao nhất, trong khi X_1, X_2 và X_3 biểu thị vị trí của ba con sói này so với con mỗi tương ứng. X_{123} xác định vị trí của nghiệm hiện tại.

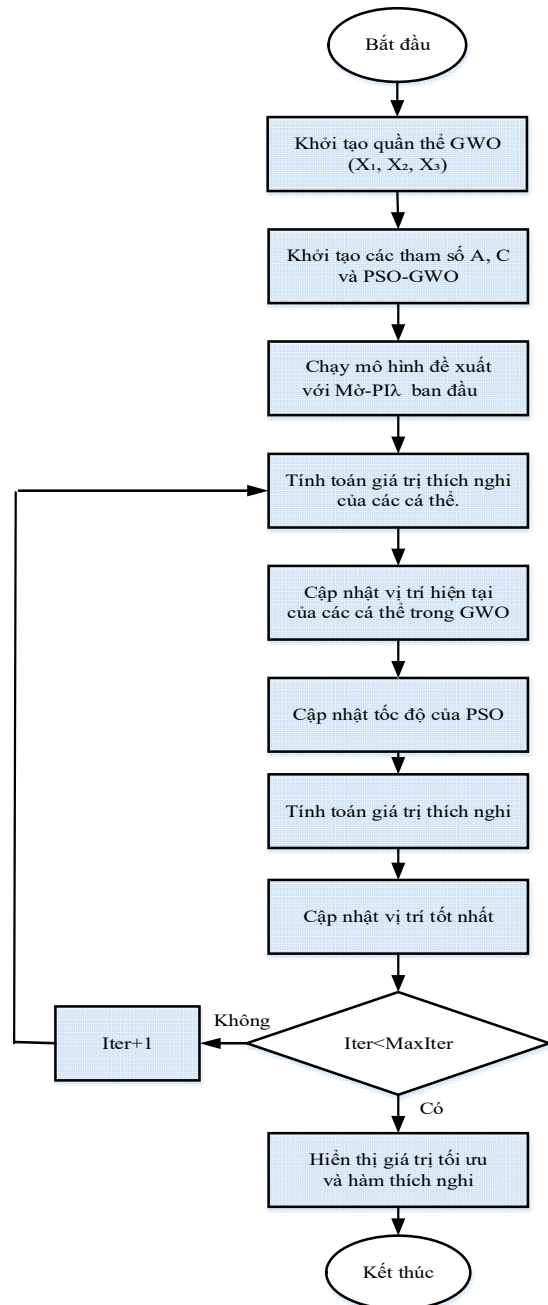
Các phương trình (17) và (18) mô tả cách kỹ thuật PSO được sử dụng để cập nhật vị trí và tốc độ của các con sói, lần lượt được ký hiệu là x_i^k, v_i^k .

$$v_i^{k+1} = (v_i^k + r_1 c_1 (x_1 - x_i^k) + r_2 c_2 (x_2 - x_i^k) + r_3 c_3 (x_3 - x_i^k)) \quad (17)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (18)$$

Trong đó, x_i^k, v_i^k lần lượt biểu thị vị trí và tốc độ đã được điều chỉnh của ba con sói α, β, δ . Các giá trị ngẫu nhiên $r_1 \in [0,1], r_2 \in [0,1]$ và $r_3 \in [0,1]$, đồng thời các tham số tối ưu hóa C_1, C_2 và C_3 được đặt giá trị là 0,5.

Mục tiêu của nghiên cứu là tối ưu hóa các thông số K_a, K_b, K_1, K_2 bộ điều khiển mờ-PI^λ đề xuất trong hệ thống điện hai vùng có xét đến các yếu tố phi tuyến GDB, GRC, các nguồn năng lượng tái tạo. Thuật toán tối ưu PSO-GWO được thực hiện để xác định giá trị tối ưu nhất cho các tham số của bộ điều khiển mờ PI^λ được minh họa trong hình 13.



Hình 13. Lưu đồ thuật toán PSO- GWO

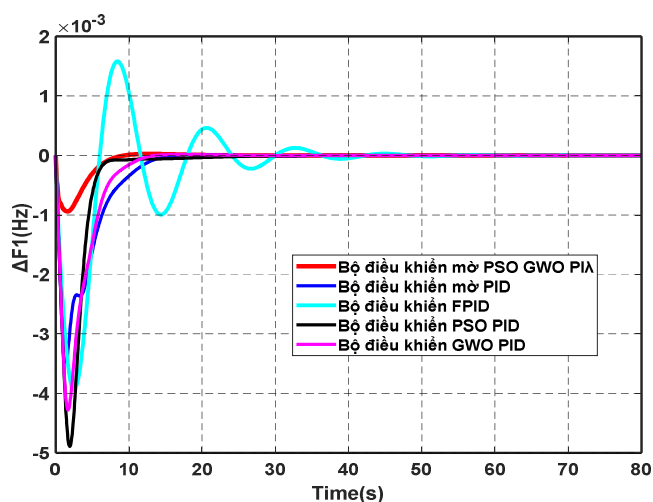
4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Kết quả mô phỏng là sai lệch tần số của hai vùng có sơ đồ mô tả như trên hình 7 và thông số của hệ thống được đưa trong bảng 3.

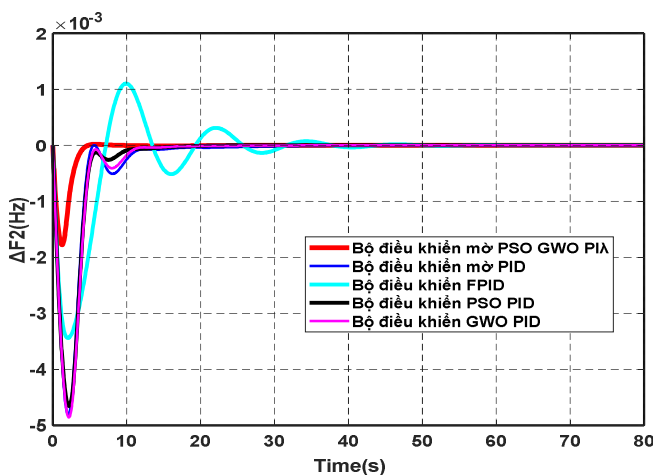
Bảng 3. Thông số của hệ thống [28]

Vùng tuabin không hồi nhiệt	Giá trị	Vùng tuabin hồi nhiệt	Giá trị
M_1 (p.u.s)	10	M_2 (p.u.s)	10
D_1 (p.u./Hz)	1	D_2 (p.u./Hz)	1
T_{ch1} (s)	0,3	T_{ch2} (s)	0,3
T_{g1} (s)	0,1	T_{g2} (s)	0,2
R_1 (Hz/p.u.)	0,05	R_2 (Hz/p.u.)	0,05
B_1 (p.u./Hz)	21	B_2 (p.u./Hz)	21
T_1 (p.u./rad.)	22,6	T_2 (p.u./rad.)	22,6
GRC (pu/min)	0,1	GDB (%)	0,06
GDB (%)	0,06	GRC (pu/min)	0,1

- Nhiều tải là hàm bước: $\Delta P_{d1} = \Delta P_{d2} = 0,04$ (pu)



Hình 14. Đáp ứng sai lệch tần số vùng 1 trong trường hợp 1

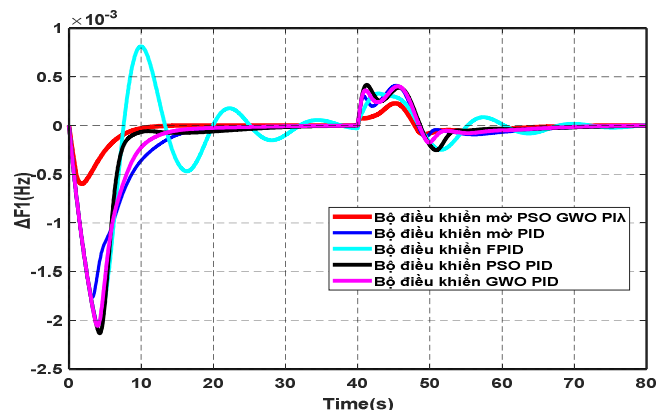


Hình 15. Đáp ứng sai lệch tần số vùng 2 trong trường hợp 1

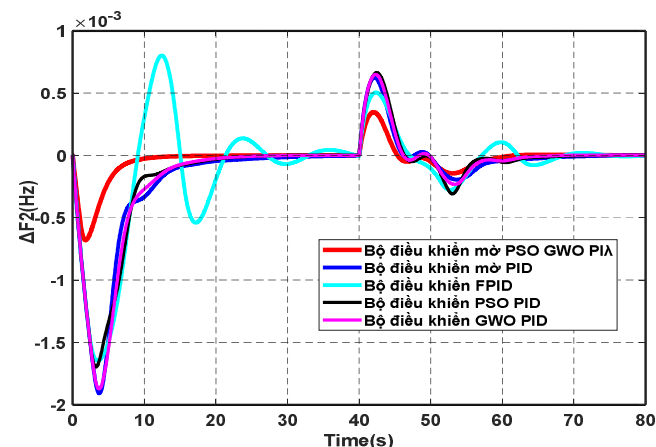
Từ kết quả mô phỏng, bộ điều khiển Mờ-PSO-GWO-PI^λ thể hiện chất lượng điều khiển tần số vượt trội nhất. Đáp ứng sai lệch tần số của hai vùng đạt được thời gian xác

lập nhanh nhất (chỉ khoảng 10 giây) cho thấy khả năng ổn định hệ thống một cách mau chóng sau nhiễu loạn và khi hệ thống có các yếu tố phi tuyến và sự tham gia của các nguồn năng lượng tái tạo. Đồng thời, độ quá điều chỉnh của bộ điều khiển này cũng được giữ ở mức rất thấp, đảm bảo hệ thống không có những dao động lớn trước khi đạt đến trạng thái ổn định. Tiếp theo, các bộ điều khiển Mờ PID, PSO PID và GWO PID cho thấy hiệu suất tương đương nhau với thời gian xác lập lần lượt khoảng 10 và 12 giây và độ quá điều chỉnh nhỏ. Cuối cùng, bộ điều khiển FPID mặc dù cải thiện đáng kể so với bộ điều khiển mờ PID thông thường, nhưng vẫn có thời gian xác lập chậm hơn (khoảng 15 giây) và độ quá điều chỉnh lớn hơn so với nhóm các bộ điều khiển được tối ưu hóa bằng thuật toán PSO và GWO. Như vậy, sự kết hợp PSO và GWO trong việc tối ưu hóa bộ điều khiển mờ PI^λ đã mang lại hiệu quả cao nhất trong việc ổn định tần số hệ thống, thể hiện qua thời gian xác lập nhanh và độ quá điều chỉnh được giảm thiểu đáng kể so với các phương pháp điều khiển khác.

- Nhiều tải là ngẫu nhiên: $\Delta P_{d1} = \Delta P_{d2} = 0,04$ (pu), thời gian lấy mẫu: 40 giây

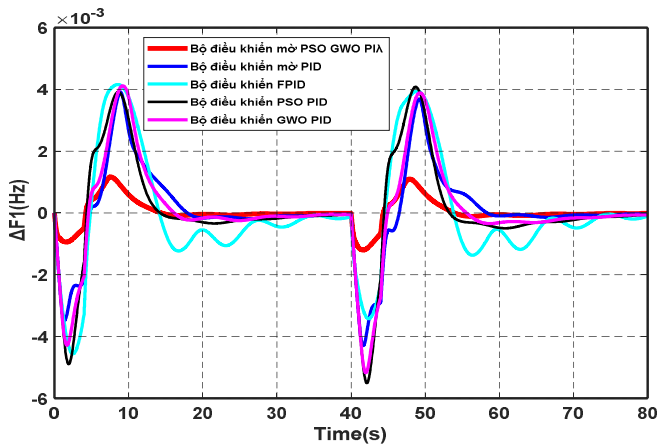


Hình 16. Đáp ứng sai lệch tần số vùng 1 trong trường hợp 2

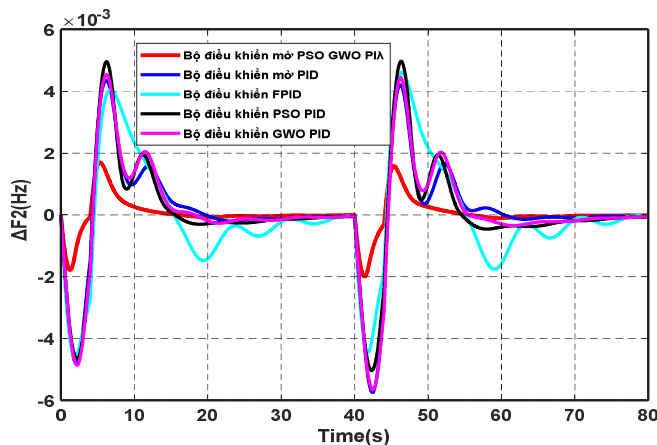


Hình 17. Đáp ứng sai lệch tần số vùng 2 trong trường hợp 2

• Nhiễu tải là hàm xung: $\Delta P_{d1} = \Delta P_{d2} = 0,03(\text{pu})$, chu kỳ: 40 giây, độ rộng xung: 10%



Hình 18. Đáp ứng sai lệch tần số vùng 1 trong trường hợp 3



Hình 19. Đáp ứng sai lệch tần số vùng 2 trong trường hợp 3

Bộ điều khiển Mờ-PSO-GWO-PI^λ có mô tả đáp ứng sai lệch tần số của hai vùng được thể hiện trên hình 14 đến 19 cho kết quả vượt trội hơn trong việc ổn định tần số cho hệ thống điện hai vùng phức tạp, bao gồm tua bin hồi nhiệt và không hồi nhiệt, cũng như các nguồn năng lượng tái tạo biến thiên như điện gió và mặt trời, đồng thời xử lý hiệu quả các yếu tố phi tuyến như GRB và GRC. So với các bộ điều khiển khác như Mờ PID, PSO PID, GWO PID và FPID, bộ điều khiển Mờ - PSO GWO - PI^λ thể hiện khả năng giảm thiểu độ quá điều chỉnh và rút ngắn thời gian xác lập đáng kể, đảm bảo tần số hệ thống nhanh chóng trở về trạng thái ổn định sau tình huống mất ổn định.

Sự kết hợp giữa logic mờ, thuật toán tối ưu PSO, GWO và bộ điều khiển PI^λ cho phép bộ điều khiển Mờ - PSO GWO - PI^λ thích ứng linh hoạt với những thay đổi đột ngột và phức tạp trong hệ thống. Trong khi các bộ điều khiển PID truyền thống, dù được tối ưu hóa bằng PSO hoặc GWO, vẫn gặp khó khăn trong việc xử lý các yếu tố phi tuyến và biến thiên, bộ điều khiển Mờ - PSO GWO - PI^λ thể

hiện khả năng điều chỉnh thông số điều khiển theo thời gian thực, đảm bảo hệ thống hoạt động ổn định trong mọi điều kiện.

Với những đáp ứng trên khi phụ tải thay đổi với các giá trị và hình dạng khác nhau bộ điều khiển Mờ - PSO GWO - PI^λ là giải pháp tối ưu cho việc ổn định tần số hệ thống điện hai vùng phức tạp, vượt trội hơn hẳn so với các bộ điều khiển khác về độ quá điều chỉnh và thời gian xác lập, đồng thời đảm bảo tính ổn định và linh hoạt trong điều kiện vận hành đa dạng.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này cho thấy rằng bộ điều khiển Mờ - PSO GWO - PI^λ đã chứng minh được hiệu suất vượt trội trong việc ổn định tần số cho hệ thống điện hai vùng phức tạp, bao gồm tua bin hồi nhiệt và không hồi nhiệt, có xét đến GRB, GRC, và các nguồn năng lượng tái tạo biến thiên. Khả năng thích ứng linh hoạt với những thay đổi đột ngột và phức tạp của hệ thống, cùng với độ quá điều chỉnh thấp và thời gian xác lập nhanh, đã khẳng định tính ưu việt của phương pháp này so với các bộ điều khiển khác như mờ PID, PSO PID, GWO PID và FPID.

Tuy nhiên, cần có những phương hướng để tăng chất lượng bộ điều khiển nhằm khắc phục trong các điều kiện vận hành khắc nghiệt hơn, chẳng hạn như khi hệ thống gặp sự cố lớn hoặc khi tỷ lệ thâm nhập của năng lượng tái tạo tăng cao, cần được thực hiện để đảm bảo tính ổn định và độ tin cậy của hệ thống. Việc tối ưu hóa các tham số của bộ điều khiển mờ-PSO-GWO-PI^λ bằng các thuật toán tối ưu hóa tiên tiến hơn, chẳng hạn như thuật toán học sâu hoặc thuật toán tiến hóa, có thể cải thiện hơn nữa hiệu suất của bộ điều khiển. Nghiên cứu các phương pháp điều khiển phân tán hoặc điều khiển dự đoán mô hình có thể giúp nâng cao khả năng điều khiển và ổn định của hệ thống điện hai vùng trong điều kiện vận hành phức tạp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Qian D., G. Fan, "Neural-Network-Based Terminal Sliding Mode Control for Frequency Stabilization of Renewable Power Systems," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 5(3), 706-717, 2018.
- [2]. Mohamed M.A., A.A.Z. Diab, H. Rezk, T. Jin, "A Novel Adaptive Model Predictive Controller for Load Frequency Control of Power Systems Integrated with DFIG Wind Turbines," *Neural Computing and Applications*, 1-11, 2019.
- [3]. Hussain I., S. Ranjan, D.C. Das, N. Sinha, "Performance Analysis of Flower Pollination Algorithm Optimized PID Controller for Wind-PV-SMES-BESS-Diesel Autonomous Hybrid Power System," *International Journal of Renewable Energy Research*, 7, 643-651, 2017..

- [4]. Kerdphol T., F.S. Rahman, Y. Mitani, "Virtual Inertia Control Application to Enhance Frequency Stability of Interconnected Power Systems with High Renewable Energy Penetration," *Energies*, 11, 2018.
- [5]. Sahu B.K., S. Pati, S. Panda, "Hybrid Differential Evolution Particle Swarm Optimization Optimised Fuzzy Proportional-Integral-Derivative Controller for Automatic Generation Control of Interconnected Power System," *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8, 1789-1800, 2014.
- [6]. Bahgaat N.K., M.I. El-Sayed, M.A.M. Hassan, F.A. Bendary, "Load Frequency Control in Power System via Improving PID Controller Based on Particle Swarm Optimization and ANFIS Techniques," *International Journal of System Dynamics Applications*, 3, 1-24, 2014.
- [7]. Malik H., V.M.T. Mahto, "Fractional Order Control and Simulation of Wind-Biomass Isolated Hybrid Power System Using Particle Swarm Optimization," in: Malik, H., Srivastava, S., Sood, Y., Ahmad, A. (eds) *Applications of Artificial Intelligence Techniques in Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 698, Springer, Singapore, 2019.
- [8]. Abdelaziz A.Y., E.S. Ali, "Cuckoo Search Algorithm Based Load Frequency Controller Design for Nonlinear Interconnected Power System," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 73, 632-643, 2015.
- [9]. Chaine S., M. Tripathy, D. Jain, "Non-dominated Cuckoo Search Algorithm Optimized Controllers to Improve the Frequency Regulation Characteristics of Wind Thermal Power System," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20, 1092-1105, 2017.
- [10]. Gheisarnejad M., "An Effective Hybrid Harmony Search and Cuckoo Optimization Algorithm Based Fuzzy PID Controller for Load Frequency Control," *Applied Soft Computing*, 65, 121-138, 2018.
- [11]. Ali E.S., S.M. Abd-Elazim, "BFOA Based Design of PID Controller for Two Area Load Frequency Control with Nonlinearities," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 51, 224-231, 2013.
- [12]. Dhillon S.S., J.S. Lather, S. Marwaha, "Multi-objective Load Frequency Control Using Hybrid Bacterial Foraging and Particle Swarm Optimized PI Controller," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 79, 196-209, 2016.
- [13]. Arora K., A. Kumar, V.K. Kamboj, D. Prashar, B. Shrestha, G.P. Joshi, "Impact of Renewable Energy Sources into Multi-area Multi-source Load Frequency Control of Interrelated Power System," *Mathematics*, 9, 186, 2021.
- [14]. Lal D.K., A.K. Barisal, M. Tripathy, "Load Frequency Control of Multi-source Multi-area Nonlinear Power System with DE-PSO Optimized Fuzzy PID Controller in Coordination with SSSC and RFB," *International Journal of Control and Automation*, 11, 61-80, 2018.
- [15]. Padhy S., S. Panda, "Application of a Simplified Grey Wolf Optimization Technique for Adaptive Fuzzy PID Controller Design for Frequency Regulation of a Distributed Power Generation System," *Protection and Control of Modern Power Systems*, 6, 1-16, 2021.
- [16]. Debnath M.K., S. Sinha, R.K. Mallick, "Application of Fuzzy-PIDF Controller for Automatic Generation Control Using Termite Correlation PSO Algorithm," *International Review of Automatic Control*, 10, 380, 2017.
- [17]. Prasun S., M. Basu, "New Approach in Two-area Interconnected AGC Including Various Renewable Energy Sources Using PSO," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 26, 1491-1504, 2018.
- [18]. Dey P.P., D.C. Das, A. Latif, S.M.S. Hussain, T.S. Ustun, "Active Power Management of Virtual Power Plant Under Penetration of Central Receiver Solar Thermal-Wind Using Butterfly Optimization Technique," *Sustainability*, 12, 6979, 2020.
- [19]. Abo-Elyousr F.K., A.Y. Abdelaziz, "A Novel Modified Robust Load Frequency Control for Mass-less Inertia Photovoltaics Penetrations via Hybrid PSO-WOA Approach," *Electric Power Components and Systems*, 47, 1744-1758, 2019.
- [20]. Alattar H., S.I. Selem, H.M. Metwally, A.A. Ibrahim, R. Aboelsaud, M.A. Tolba, A.M. El-Rifaie, "Performance Enhancement of Microgrid System with SMES Storage System Based on Mine Blast Optimization Algorithm," *Energies*, 12, 3110, 2019.
- [21]. Ranjan S., D.C. Das, S. Behera, N. Sinha, "Parabolic Trough Solar-Thermal-Wind-Diesel Isolated Hybrid Power System: Active Power/Frequency Control Analysis," *IET Renewable Power Generation*, 12, 1893-1903, 2018.
- [22]. Qian D., S. Tong, H. Liu, X. Liu, "Load Frequency Control by Neural-network-based Integral Sliding Mode for Nonlinear Power Systems with Wind Turbines," *Neurocomputing*, 173, 875-885, 2016.
- [23]. Ulbig A., T. Rinke, S. Chatzivasileiadis, G. Andersson, "Predictive Control for Real-time Frequency Regulation and Rotational Inertia Provision in Power Systems," in *Proceedings of the 52nd IEEE Conference on Decision and Control*, Florence, Italy, 2946-2953, 2013.
- [24]. Kundur P., *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Education, 2014.
- [25]. Khan I.A., H. Mokhlis, N.N. Mansor, H.A. Illias, A. Daraz, A.K. Ramasamy, M. Marsadek, A.R. Afzal, "Load Frequency Control in Power Systems with High Renewable Energy Penetration: A Strategy Employing PI^λ(1+PDF) Controller, Hybrid Energy Storage, and IPFC-FACTS," *Alexandria Engineering Journal*, 106, 337-366, 2024.
- [26]. Alam S., G. Dobbie, Y.S. Koh, P. Riddle, S. Ur Rehman, "Research on Particle Swarm Optimization Based Clustering: A Systematic Review of Literature and Techniques," *Swarm and Evolutionary Computation*, 17, 1-13, 2014.
- [27]. Mirjalili S., S.M. Mirjalili, A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61, 2014.
- [28]. Taher S.A., M.H. Fini, S.F. Aliabadi, "Fractional Order PID Controller Design for LFC in Electric Power Systems Using Imperialist Competitive Algorithm," *Ain Shams Engineering Journal*, 5(1), 121-135, 2014.

AUTHOR INFORMATION

Vuong Doan Diem

Faculty of Control and Automation, Electric Power University, Vietnam