

ÁP DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PI PHÂN SỐ CHO HỆ THỐNG ĐIỆN MẶT TRỜI VÀ BỘ LƯU ĐIỆN LẠI GHEP

APPLYING FRACTIONAL ORDER PI CONTROLLER FOR PV SOLAR AND HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM

Nguyễn Văn Hùng^{1,2,*}, Hoàng Văn Hoàn¹, Phạm Văn Huy¹,
Trịnh Thùy Dương¹, Trịnh Trọng Chương¹, Nguyễn Đức Huy²

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.239>

TÓM TẮT

Sự kết hợp hệ thống pin mặt trời (PV) và các hệ thống lưu trữ lai ghép (HESS) ngày càng phổ biến do mang nhiều lợi thế. Song song với sự phát triển các cấu hình kết nối thì các yêu cầu về đáp ứng của hệ thống cũng cần được nâng cao hơn. Bộ điều khiển PI truyền thống được sử dụng nhiều do có nhiều ưu điểm tiện dụng, tuy nhiên một số đặc tính đáp ứng cần được cải thiện, đặc biệt với các hệ thống mang nhiều sự biến động như hệ thống PV kết hợp HESS. Bài báo đề xuất áp dụng bộ điều khiển PI phân số nhằm cải thiện mức độ đáp ứng của hệ thống. Để chứng minh tính khả thi và hiệu quả của phương pháp đề xuất, bài báo thực hiện thử nghiệm và đánh giá kết quả sử dụng phần mềm Matlab/Simulink.

Từ khóa: Pin mặt trời; bộ lưu điện; bộ điều khiển PI; PI phân số

ABSTRACT

The combination of solar PV systems and hybrid energy storage systems is increasingly popular due to its many advantages. In parallel with the development of connection configurations, system response requirements also need to be improved. Traditional PI controllers are widely used due to their many convenient advantages, however, some response characteristics need to be improved, especially for systems with many fluctuations such as combined solar PV systems. This article proposes to apply a fractional order PI controller to improve the response level of the system. To demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed method, the article conducts experiments and evaluates the results using Matlab/Simulink software.

Keywords: PV system; HESS; PI Controller; fractional order PI

¹Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: hungnv@hauai.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/4/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 18/5/2024

Ngày chấp nhận đăng: 25/7/2024

1. GIỚI THIỆU

Sự hình thành và phát triển của các lưới điện nhỏ (MG) sử dụng các nguồn năng lượng tái tạo (NLTT) kết hợp với hệ nguồn lưu trữ lai ghép đang trở thành xu hướng [1, 2]. Trong số các nguồn NLTT, hệ thống năng lượng mặt trời được triển khai rộng rãi và có tiềm năng đóng góp đáng kể vào việc sản xuất năng lượng bền vững. Tuy nhiên, tính chất không liên tục của năng lượng mặt trời ảnh hưởng đến sự ổn định và độ tin cậy của lưới điện. Chính vì thế giải pháp nguồn năng lượng mặt trời kết hợp với bộ lưu điện lai ghép (HESS) cũng đang được áp dụng nhờ những ưu điểm vượt trội về khả năng cung cấp công suất cho phụ tải cũng như duy trì sự ổn định cho lưới điện nhỏ [3]. Bằng cách tích hợp nhiều công nghệ lưu trữ khác nhau việc bộ lưu điện lai ghép được kết hợp từ bộ lưu điện truyền thống và siêu tụ điện đem lại hiệu quả về khả năng lưu trữ năng lượng lớn và tốc độ xả nhanh được ứng dụng với hệ thống điện mặt trời cho ra tốc độ đáp ứng tần số và khả năng duy trì điện áp tốt [4, 5].

Song song đó, những tiến bộ trong lý thuyết điều khiển đã dẫn đến việc áp dụng các chiến lược điều khiển mới nhằm cải thiện hiệu suất của hệ thống lưu trữ năng lượng và khả năng phối hợp giữa các nguồn thành phần. Đa phần các hệ thống này được điều khiển bởi bộ điều khiển PID (BĐK PID) truyền thống nhờ ưu điểm phổ biến, dễ dàng điều khiển. Tuy nhiên, phương pháp này tồn tại một số vấn đề về tốc độ đáp ứng và khả năng đáp ứng với các đối tượng có tính bất định cao, thay đổi ngẫu nhiên như hệ thống PV [6, 7]. Vì vậy, cần có những cải thiện nhất định trong các bộ điều khiển nhằm tăng cường tốc độ đáp ứng, từ đó có thể khai thác tối đa ưu điểm của hệ nguồn lai ghép đem lại sự ổn định cho MG.

Một trong số cách tiếp cận nhằm cải thiện đáp ứng của BDK PID đó là BDK PID phân số (FOPID) [8, 9]. BDK FOPID là sự phối hợp các toán tử phân số và độ lợi của BDK. Với 5 tham số điều khiển có thể điều chỉnh, do vậy khi áp dụng bộ điều khiển FOPID để điều khiển tần số, dòng điện và điện áp của MG mang lại hiệu quả điều khiển cao. Chính vì lý do đó, sự linh hoạt điều khiển của BDK FOPID mà tốc độ phản hồi và khả năng giữ ổn định cho MG được cải thiện tương đối so với BDK PID truyền thống, nhờ sự tham gia của hai tham số phân số tích phân λ và phân số đạo hàm μ . Ngoài ra, phép tính phân số đưa ra các số hạng thứ tự phân số, cho phép lựa chọn tham số điều khiển với phạm vi rộng hơn mang lại độ lợi điều khiển tốt hơn và gia tăng tốc độ đáp ứng của bộ điều khiển. Tính linh hoạt bổ sung này cho phép BDK FOPID nâng cao được độ ổn định, cải thiện phản hồi nhất thời và loại bỏ nhiều cải thiện so với BDK PID thông thường [10-13].

Việc áp dụng FOPID điều chỉnh tần số MG đã được các nghiên cứu [14, 15] đề xuất. Tuy nhiên, các công bố này chưa chỉ ra đầy đủ sự ảnh hưởng của các biến động như thay đổi bức xạ mặt trời cũng như khi có sự thay đổi lớn trong công suất của phụ tải trong lưới điện nhỏ. Để thấy rõ được lợi ích cũng như ưu điểm của bộ biến đổi FOPID cần thiết so sánh các đặc tính chế độ trong bộ điều khiển truyền thống PID, vấn đề này chưa được trình bày trong các nghiên cứu trên.

Trong phạm vi bài báo, nhóm nghiên cứu đề xuất sử dụng FOPID thay thế để điều khiển hệ thống điện mặt trời kết hợp với bộ lưu điện lai ghép dựa trên các nghiên cứu đã được công bố trước đó. Bằng cách tận dụng những ưu điểm của phép tính phân số, các bộ điều khiển này mang lại hiệu suất được cải thiện và khả năng thích ứng và phản hồi nhất thời tốt hơn so với các bộ điều khiển thứ tự nguyên. Thông qua phân tích lý thuyết và nghiên cứu mô phỏng, nghiên cứu này nhằm mục đích làm sáng tỏ hiệu quả của bộ điều khiển FOPID trong việc nâng cao hiệu quả và độ tin cậy của lưới điện nhỏ sử dụng nguồn NLTT PV. Để chứng minh sự hiệu quả của BDK thông qua các kịch bản được xây dựng với lưới điện nhỏ vận hành ở chế độ tách đảo và các điều kiện bức xạ mặt trời khác nhau công cụ Matlab/Simulink được sử dụng để phục vụ quá trình thử nghiệm mô hình và đánh giá kết quả.

2. BỘ ĐIỀU KHIỂN FOPID

Phương trình vi phân của BDK FOPID:

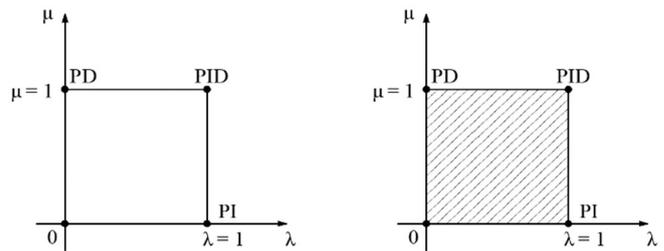
$$u(t) = k_p I(t) + k_i D^{-\lambda} I(t) + k_d D^{\mu} I(t) \tag{1}$$

Phương trình (1) trong miền Laplace:

$$G(s) = k_p + k_i s^{-\lambda} + k_d s^{\mu} \tag{2}$$

Điểm khác biệt giữa hai bộ PID và FOPID đến từ hai tham số phân số tích phân λ và phân số đạo hàm μ . Tuy nhiên, về bản chất bộ điều khiển PID là một trường hợp đặc biệt của BDK FOPID với hai tham số $\lambda = 1$ và $\mu = 1$. Chính vì thế, mà ta chỉ cần đặc biệt hóa hai tham số phân số tích phân λ và phân số đạo hàm μ để biến BDK FOPID trở thành một trong những BDK nằm trong bộ điều khiển PID bao gồm [16, 17]:

- BDK PID khi $\lambda = 1$ và $\mu = 1$;
- BDK PI khi $\lambda = 1$ và $\mu = 0$;
- BDK PD khi $\lambda = 0$ và $\mu = 1$;
- BDK P khi $\lambda = 0$ và $\mu = 0$;

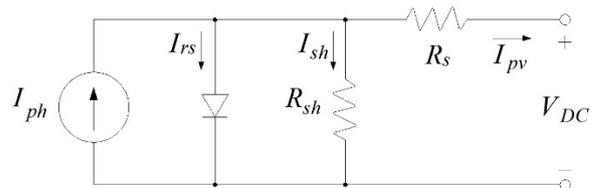


Hình 1. Mối quan hệ giữa bộ điều khiển PID số nguyên và bộ điều khiển FOPID

3. MÔ HÌNH PHẦN TỬ NGUỒN PV – HESS

3.1. Mô hình module PV

Mạch điện tương đương pin quang điện được minh họa trong hình 2 [18, 19].



Hình 2. Mạch điện tương đương pin quang điện

Tế bào quang điện được xem xét có thể được mô hình hóa toán học bằng phương trình sau:

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s)}{N_s A K T} \right) \right] \tag{3}$$

Trong đó: V_{pv} là điện áp đầu ra của tế bào PV (V); I_{pv} là dòng điện đầu ra của tế bào PV (A); N_s là số lượng module kết nối nối tiếp; N_p là số lượng module kết nối song song.

3.2. Mô hình bộ lưu điện lai ghép HESS

3.2.1. Mô hình bộ lưu điện (BESS)

Mạch điện tương đương và mô hình toán học của BESS được thể hiện như hình 3 [20].

Với biến trạng thái là dòng điện trên cuộn kháng, vòng lặp điều khiển dòng điện được biểu diễn trên hệ trục quay vuông góc dq. Với vectơ tín hiệu đầu ra BDK:

$$u_{di} = v_{td} + \omega L i_q - E_d \tag{13}$$

$$u_{qi} = v_{tq} - \omega L i_d - E_q \tag{14}$$

BDK dòng điện có hàm truyền như sau:

$$G_c(s) = \frac{k_{pc} + k_{ic} s^{-\lambda}}{Ls + R + k_{pc} + k_{ic} s^{-\lambda}} \tag{15}$$

Với giả thiết quá trình động học diễn ra trong vòng lặp điều khiển dòng điện có thời gian nhỏ hơn nhiều lần quá trình động học vòng lặp phía ngoài điện áp. Từ đó, có thể coi $i_d \approx i_{dref}$ và $i_q \approx i_{qref}$.

BDK có tín hiệu đầu ra như sau:

$$u_{de} = i_d - i_{Ld} + \omega C E_q \tag{16}$$

$$u_{qe} = i_q - i_{Lq} - \omega C E_d \tag{17}$$

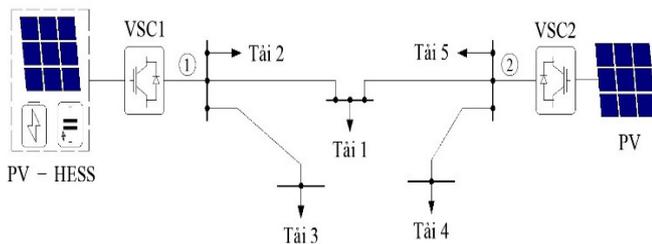
Vòng lặp điều khiển điện áp có hàm truyền như sau:

$$G_v(s) = \frac{k_{pv} + k_{iv} s^{-\lambda}}{C_s + k_{pv} + k_{iv} s^{-\lambda}} \tag{18}$$

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

Bảng 1. Thông số mô phỏng

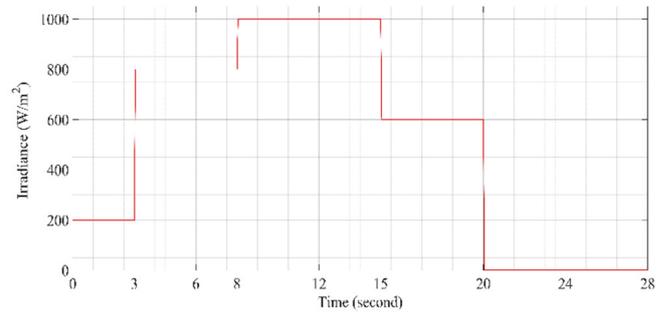
PV- HESS		Bộ điều khiển		Phụ Tải	
Công suất cực đại PV	121kW	K_{pv}	3	Tải 1	50 + j10 kVA
Điện áp tại MPP PV	300V	K_{iv}	20	Tải 2	50 + j10 kVA
Dòng Điện tại MPP PV	404,25A	λ_v, λ_c	0,3	Tải 3	80 + j20 kVA
Dung lượng HESS	1840Ah	K_{pc}	6	Tải 4	70 + j10 kVA
Dòng xả định mức HESS	800A	K_{ic}	10	Tải 5	30 + j10 kVA



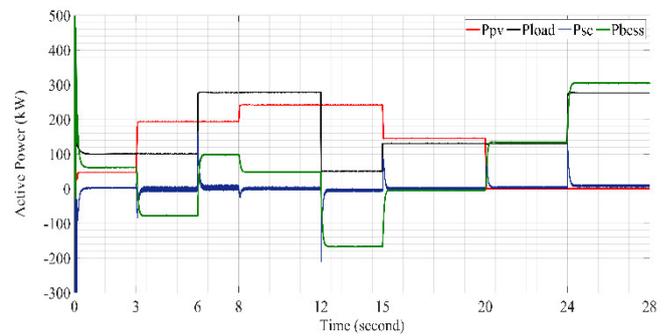
Hình 7. Mô hình lưới điện nhỏ PV- HESS

Lưới nghiên cứu được minh họa trong hình 7 và các thông số được cho trong bảng 1. Để chứng minh sự hiệu quả khi áp dụng FOPID thay thế mô hình PID truyền thống vào lưới điện nhỏ nhóm nghiên cứu tiến hành mô phỏng dựa trên lưới điện nhỏ và kịch bản đề xuất đưa ra

kết quả dựa trên đường đặc tính bức xạ mặt trời được thể hiện trong hình 8 và đồ thị phụ tải được thể hiện trong hình 9.

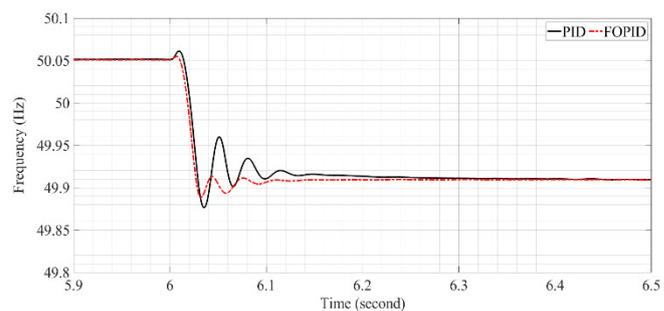


Hình 8. Đường đặc tính bức xạ mặt trời



Hình 9. Đồ thị phụ tải và công suất phát của các nguồn phân tán

Kịch bản đầu tiên, tại thời điểm 6s tiến hành tăng công suất phụ tải do sự mất cân bằng công suất lưới điện khi đó nguồn năng lượng lưu trữ trong HESS sẽ bù đắp năng lượng thiếu hụt nhằm đảm bảo cân bằng công suất trong lưới, tránh gây ra các ảnh hưởng xấu đến tần số, điện áp và sự ổn định lưới điện nhỏ. Hình 10 thể hiện kết quả đường đặc tính tần số tại thời điểm tăng công suất phụ tải.

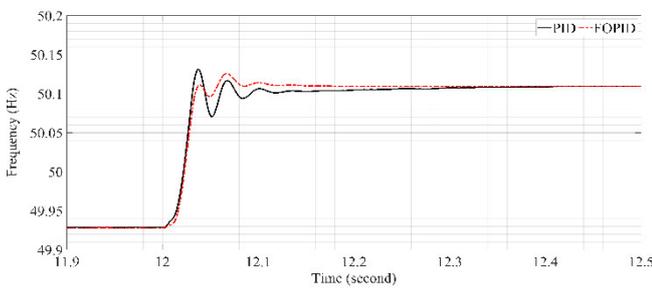


Hình 10. Đường đặc tính tần số thời điểm tăng công suất phụ tải

Kết quả đường đặc tính tần số trong hình 10 cho thấy khi áp dụng bộ điều khiển FOPI cho ra đường đặc tính tần số có biên độ dao động nhỏ hơn so với mô hình sử dụng BDK PI truyền thống. Ngoài ra, khi có sự tham gia của tham số phân số tích phân mà thời gian trở về ổn định của mô hình áp dụng BDK FOPI cũng được rút ngắn. Với tốc độ đáp ứng tần số được cải thiện tương đối, mô hình

sử dụng bộ điều khiển FOPI sẽ điều khiển linh hoạt hơn cũng như giữ vững sự ổn định của lưới điện nhỏ khi xảy ra các sự cố bất thường khác trên lưới.

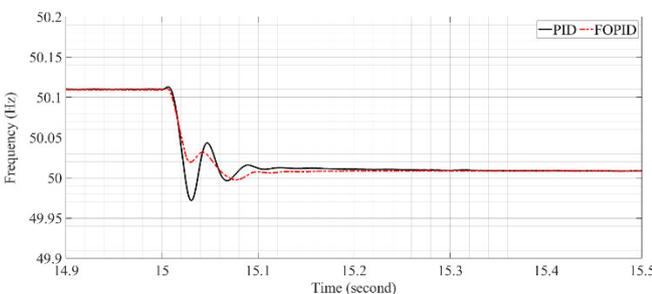
Kịch bản thứ hai, tại thời điểm 12s tiến hành giảm công suất phụ tải mô phỏng quá trình sa thải phụ tải theo thời gian thực được thể hiện trong hình 11. Nhờ sự điều khiển bởi khối điều khiển nghịch lưu xoay chiều thay đổi trạng thái của nguồn PV-HESS giúp công suất tải được cân bằng và đưa tần số nhanh chóng trở về ổn định. Ngoài ra, lượng công suất dư thừa sẽ được chuyển đổi và lưu trữ trong HESS nhờ khối điều khiển sạc/xả hai chiều. Mà bản chất của các khối điều khiển nghịch lưu xoay chiều và khối điều khiển sạc/xả hai chiều được thiết kế từ BDK PI hay FOPI.



Hình 11. Đường đặc tính tần số thời điểm giảm công suất phụ tải

Tuy nhiên, đường đặc tính tần số cho thấy khi sử dụng BDK FOPI cho ra kết quả đáp ứng tốt hơn với BDK PI. Cũng có thể nói, khi sử dụng BDK FOPI cho lưới điện nhỏ giúp cho quá trình thay đổi trạng thái của lưới điện nhỏ được linh hoạt và ít gây ra nhiễu loạn không đáng có.

Kịch bản thứ ba, sự linh hoạt của BDK FOPID còn được thể hiện tại thời điểm 15 giây khi đó nhóm nghiên cứu tiến hành giảm cường độ bức xạ mặt trời từ 1000W/m² xuống 600W/m² để giả lập tính không liên tục của hệ thống điện mặt trời, kết quả được thể hiện trong hình 12. Nhưng nhờ sự điều khiển của các vòng lặp điều khiển mà lưới điện nhỏ nhanh chóng trở về trạng thái ổn định.

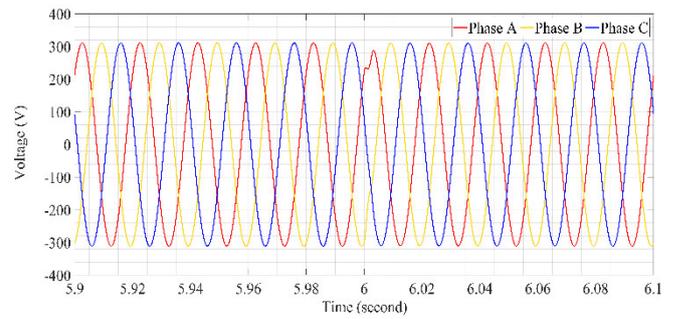


Hình 12. Đường đặc tính tần số thời điểm thay đổi bức xạ 1000W/m² xuống 600W/m²

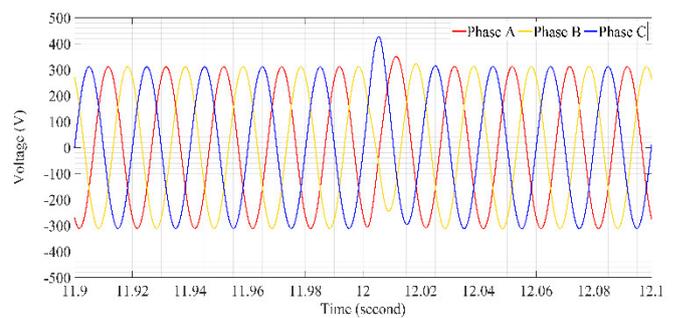
Kết quả đường đặc tính tần số cho thấy, tuy có một chút nhiễu loạn nhưng lại càng khẳng định thêm sự hiệu

quả khi áp dụng mô hình bộ điều khiển FOPID mang lại sự chính xác trong quá trình điều khiển và ổn định được tần số tốt hơn so với bộ điều khiển PID truyền thống.

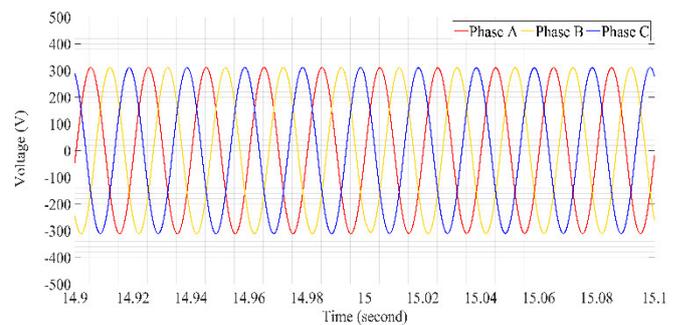
Sự tham gia bộ điều khiển FOPID vào các vòng lặp điều khiển dòng điện, điện áp giúp điện áp phía AC được giữ ổn định trong giới hạn điện áp cho phép. Dạng điện áp của từng quá trình thay đổi theo các kịch bản được thể hiện trên hình 13 14, 15.



Hình 13. Dạng sóng điện áp tại thời điểm tăng công suất phụ tải



Hình 14. Dạng sóng điện áp tại thời điểm giảm công suất phụ tải



Hình 15. Dạng sóng điện áp tại thời điểm giảm bức xạ mặt trời 1000W/m² xuống 600W/m²

5. KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

MG sử dụng nguồn lai ghép PV-HESS được nhóm nghiên cứu tiến hành áp dụng BDK FOPID thay thế bộ điều khiển PID truyền thống được mô phỏng trên công cụ Matlab/Simulink. Kết quả mô phỏng cho thấy tính linh hoạt của BDK FOPID trong việc điều khiển lưới điện nhỏ giúp nâng cao hiệu suất, giảm thiểu các vấn đề như dao động điện áp và ổn định tần số hiệu quả hơn so với BDK

PID truyền thống. Tuy nhiên, phải thừa nhận rằng việc áp dụng BDK PID mang đến sự đơn giản và dễ điều khiển, nhưng BDK FOPID mang lại sự chính xác, độ ổn định và độ tin cậy vượt trội trong việc xử lý các tình huống bất thường xảy ra trong MG.

Những nghiên cứu và phát triển trong tương lai nên tập trung vào việc giải quyết những thách thức thực tế liên quan đến việc triển khai BDK FOPID và đưa ra các chiến lược điều khiển phù hợp nhằm đảm bảo sự bền vững của lưới MG.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, trong đề tài nghiên cứu khoa học và phát triển công nghệ có mã số 12-2023-RD/HĐ-ĐHCN

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. U. Akram, M. Khalid, S. Shafiq, "An innovative hybrid wind-solar and battery-supercapacitor microgrid system-development and optimization," *IEEE Access*, 5, 25897-25912, 2017
- [2]. M. Boussetta, S. Motahhir, R. El Bachtiri, A. Allouhi, M. Khanfara, Y. Chaibi, "Design and embedded implementation of a power management controller for wind-PV-diesel microgrid system," *Int. J. Photoenergy*, 2019.
- [3]. B. Benlahbib, et al., "Experimental investigation of power management and control of a PV/wind/fuel cell/battery hybrid energy system microgrid," *Int. J. Hydrogen Energy*, 45, 53, 29110-29122, 2020.
- [4]. M. Mao, Y. Liu, P. Jin, H. Huang, L. Chang, "Energy coordinated control of hybrid battery-supercapacitor storage system in a microgrid," in *2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2013 - Conference Proceedings*, 2013.
- [5]. A. Karimi-Rizvandi, M. B. Sandjareh, M. H. Nazari, M. Ezati-Yaraziz, "A Novel Frequency Control Scheme for Autonomous Microgrid Using Cooperative Application of Supercapacitor-Battery HESS, Photovoltaics, LED Lighting Loads and TCLs," *IEEE Access*, 9, 57198-57214, 2021.
- [6]. M. U. Mutarraf, Y. Terriche, K. A. K. Niazi, F. Khan, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, "Control of hybrid diesel/PV/battery/ultra-capacitor systems for future shipboard microgrids," *Energies*, 12, 18, 1-23, 2019.
- [7]. S. Wen, S. Wang, G. Liu, R. Liu, "Energy management and coordinated control strategy of PV/HESS AC microgrid during islanded operation," *IEEE Access*, 7, 4432-4441, 2019.
- [8]. D. Pullaguram, S. Mishra, N. Senroy, M. Mukherjee, "Design and Tuning of Robust Fractional Order Controller for Autonomous Microgrid VSC System," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54, 1, 91-101, 2018
- [9]. H. Wang, G. Zeng, Y. Dai, D. Bi, J. Sun, X. Xie, "Design of a fractional order frequency PID controller for an islanded microgrid: A multi-objective extremal optimization method," *Energies*, 10, 10, 2017.

[10]. M. Regad, M. Helaimi, R. Taleb, H. Gabbar, A. Othman, "Optimal frequency control in microgrid system using fractional order pid controller using krill herd algorithm," *Electr. Eng. Electromechanics*, 2, 68-74, 2020.

[11]. H. A. Abumeteir, A. M. Vural, "Design and Optimization of Fractional Order PID Controller to Enhance Energy Storage System Contribution for Damping Low-Frequency Oscillation in Power Systems Integrated with High Penetration of Renewable Sources," *Sustain.*, 14, 9, 2022.

[12]. S. H. Sikder, M. M. Rahman, S. K. Sarkar, S. K. Das, "Fractional order robust PID controller design for voltage control of islanded microgrid," in *4th Int. Conf. Electr. Eng. Inf. Commun. Technol. iCEEICT 2018*, 234-239, 2018.

[13]. C. A. Monje, Y. Chen, B. M. Vinagre, D. Xue, V. Feliu, *Fractional Order Systems and Controls, Fundamentals and Applications*. Springer, 2010.

[14]. C. Michael, O. J. Tola, M. N. Nwohu, J. G. Ambafi, "Load Frequency Control of a Microgrid using Fractional Order PID Controller," in *2022 IEEE Nigeria 4th International Conference on Disruptive Technologies for Sustainable Development (NIGERCON)*, 2022.

[15]. D. Pullaguram, M. Mukherjee, S. Mishra, N. Senroy, "Non-linear fractional order controllers for autonomous microgrid system," in *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems, ICPS 2016*, 2, 2016.

[16]. C. Ismayil, R. S. Kumar, T. K. Sindhu, "Optimal fractional order PID controller for automatic generation control of two-area power systems," *Int. Trans. Electr. energy Syst.*, 20, 1-6, 2013.

[17]. K. Bingi, R. Ibrahim, M. N. Karsiti, S. M. Hassan, V. R. Harindran, *Fractional-order Systems and PID Controllers, Using Scilab and Curve Fitting Based Approximation Techniques*. Springer, 2020.

[18]. O. Abdelkhalek, et al., "Modeling and Control a DC-Microgrid Based on PV and HESS Hybrid Energy Storage System," in *First International Conference on Smart Grids, CIREI'2019*, ENP- Oran - Algeria, 2019.

[19]. K. Amara, Y. Amara, A. Malek, D. Hocine, E. Bourennane, "Comparative study of three Maximum Power Point Tracking algorithms for photovoltaic modules," *Revue des Energies Renouvelables*, 20, 2, 309-318, 2017.

[20]. J. Zeng, B. Zhang, C. Mao, Y. Wang, "Use of battery energy storage system to improve the power quality and stability of wind farms," in *2006 Int. Conf. Power Syst. Technol. POWERCON2006*, 1-6, 2006

[21]. S. R. Paital, P. C. Pradhan, A. Mohanty, P. K. Ray, M. Viswavandya, "Power management in wind-fuel cell-ultracapacitor based autonomous hybrid power system," *2018 IEEMA Eng. Infin. Conf. eTechNxT 2018*, 1-6, 2018

AUTHORS INFORMATION

**Nguyen Van Hung^{1,2}, Hoang Van Hoan¹, Pham Van Huy¹,
Trinh Thuy Duong¹, Trinh Trong Chuong¹, Nguyen Duc Huy²**

¹Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam

²K64-ET-LUH Student, School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam