

# ĐIỀU KHIỂN TẦN SỐ LƯỚI ĐIỆN NHỎ Ở CHẾ ĐỘ ĐỘC LẬP THÔNG QUA MÁY PHÁT ĐỒNG BỘ ẢO CÓ THÔNG SỐ TỰ ĐIỀU CHỈNH

FREQUENCY CONTROL OF MICROGRID IN AUTONOMOUS MODE VIA VIRTUAL SYNCHRONOUS GENERATOR WITH ADJUSTABLE PARAMETERS

Chu Thanh Bình<sup>1,\*</sup>, Nguyễn Hồng Sơn<sup>1</sup>, Nguyễn Bá Khang<sup>1</sup>, Phan Hồng Quang<sup>1</sup>, Mai Văn Nghĩa<sup>1</sup>, Phạm Văn Cường<sup>1</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.050>

## TÓM TẮT

Điều khiển các nguồn phân tán nối lưới thông qua bộ biến đổi công suất phỏng theo hoạt động của máy phát đồng bộ giúp cải thiện độ ổn định của lưới điện. Lưới điện nhỏ vận hành dưới nhiều chế độ hoạt động khác nhau do vậy các thông số của bộ điều khiển máy phát đồng bộ ảo cũng cần được điều chỉnh phù hợp với sự thay đổi của lưới. Bài báo đề xuất một mô hình điều khiển tần số lưới điện nhỏ ở chế độ độc lập thông qua máy phát đồng bộ ảo có thông số tự điều chỉnh. Bài báo cũng đã tiến hành mô phỏng quá trình điều khiển tần số lưới điện nhỏ ở chế độ độc lập trên công cụ Matlab/Simulink.

**Từ khóa:** Nguồn phân tán, lưới điện nhỏ, điều khiển tần số, máy phát đồng bộ ảo, thông số tự điều chỉnh.

## ABSTRACT

Controlling grid-connected distributed sources through a power converter that mimics synchronous generator operation improves grid stability. The microgrid operates under many different operating modes, so the parameters of the virtual synchronous generator controller also need to be adjusted in accordance with the changes of the grid. This paper proposes a microgrid frequency control model in autonomous mode through a virtual synchronous generator with adjustable parameters. The article also simulates the process of controlling the frequency of microgrid in independent mode on Matlab/Simulink tool.

**Keywords:** DG, microgrid, frequency control, virtual synchronous generator, adjustable parameters.

<sup>1</sup>Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

\*Email: binhthanhchu1410@gmail.com

Ngày nhận bài: 25/10/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/02/2023

Ngày chấp nhận đăng: 15/3/2023

## 1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, sự nóng lên của khí hậu toàn cầu gây ra bởi hiệu ứng nhà kính cùng với sản lượng của nhiên liệu hóa thạch ngày càng giảm và giá thành ngày càng tăng, việc sử dụng năng lượng tái tạo là một giải pháp đã và đang được

sử dụng rộng rãi ở các nước trên thế giới. Do vậy, việc tích hợp các nguồn này vào lưới điện truyền thống là một vấn đề đang được quan tâm nghiên cứu và ứng dụng [1-3].

Tuy nhiên, nguồn phân tán (DG) dựa trên biến tần kết nối với lưới điện có nhược điểm quán tính nhỏ [4]. Quán tính nhỏ gây ra biến đổi công suất quá nhanh trong trường hợp có nhiễu kéo theo các thông số chế độ như tần số và điện áp dao động với biên độ lớn có nguy cơ vượt ra ngoài giới hạn cho phép. Trong đó, việc thay đổi tần số hệ thống đột ngột sẽ ảnh hưởng đến sự vận hành an toàn, ổn định của lưới điện phân phối, trong khi các phương pháp điều khiển truyền thống chưa thể thích ứng với sự phát triển của hệ thống DG. Vấn đề sụt giảm tần số này càng trở nên nghiêm trọng với lưới điện nhỏ ở chế độ độc lập. Vì vậy, cần thiết có một phương pháp điều khiển mới để giảm thiểu sự thay đổi nhanh chóng của tần số và duy trì hoạt động ổn định của lưới điện.

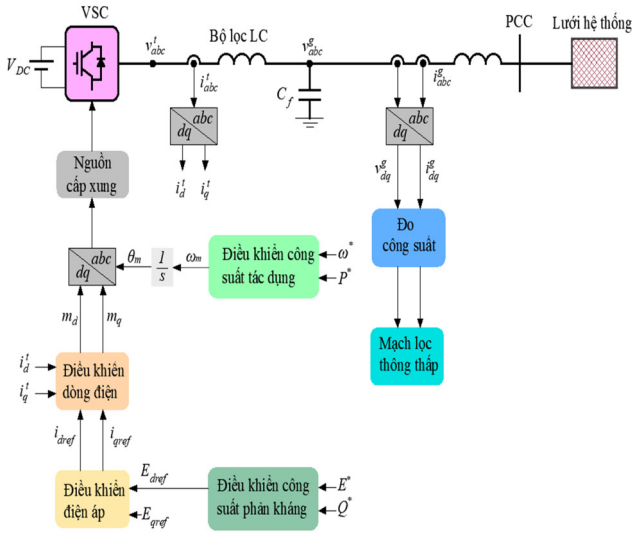
Gia tăng quán tính cho các nguồn phân tán nối lưới thông qua bộ biến đổi công suất là giải pháp bước đầu được áp dụng và cho kết quả khả thi [5]. Một trong số các phương pháp đó hướng tới điều khiển bộ biến đổi công suất phỏng theo sự hoạt động của máy phát điện đồng bộ hay còn gọi là máy phát đồng bộ ảo (VSG) [6]. Hầu hết các nghiên cứu hiện có về VSG sử dụng thông số bộ điều khiển cố định mà chưa xem xét tới các VSG có thông số tự điều chỉnh.

Nhằm cải thiện các sai lệch tần số trước những biến động trong lưới, bài báo đề xuất sử dụng bộ điều khiển VSG có thông số có thể điều chỉnh được bám theo sự thay đổi của tần số trong một lưới điện cụ thể. Hiệu quả của phương pháp đề xuất được xác minh bằng mô phỏng trên công cụ Matlab/Simulink.

## 2. BỘ BIẾN ĐỔI CÔNG SUẤT

Đối với các DG nối lưới qua bộ biến đổi công suất, diễn biến dao động tần số và điện áp khi có biến động công suất cũng cần được xem xét tương đương các máy phát

đồng bộ. Quá trình điều khiển công suất phát trên các DG này phụ thuộc vào vòng lặp điều khiển dòng điện bên trong và vòng lặp điều khiển điện áp bên ngoài [7]. Sơ đồ kết nối điều khiển độ dốc với các vòng lặp điều khiển dòng áp được thể hiện trong hình 1.

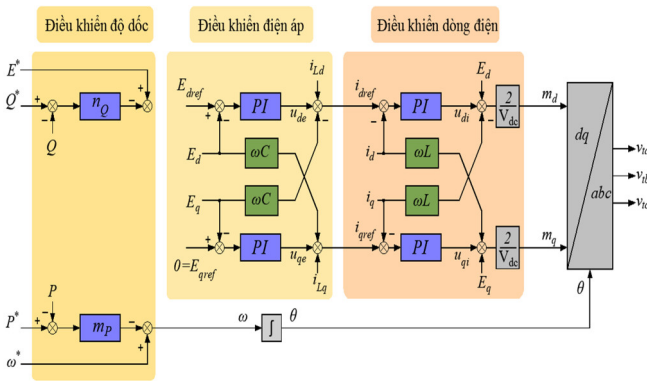


Hình 1. Sơ đồ khối điều khiển bộ biến đổi công suất

Sơ đồ khối điều khiển bộ biến đổi công suất dựa trên các khối cơ bản “Điều khiển công suất tác dụng”, khối “Điều khiển công suất phản kháng”, khối “Điều khiển dòng điện” và khối “Điều khiển điện áp” bên ngoài.

**2.1. Vòng lặp điều khiển dòng điện và điện áp**

Các bộ điều khiển bên trong DG cũng được thiết kế theo hướng đảm bảo các yêu cầu về tần số và điện áp, như được thể hiện trong hình 2. Vòng lặp điều khiển dòng điện nằm bên trong với các thông số đầu vào được tạo bởi bộ điều khiển điện áp ở phía ngoài [8]. Vòng lặp điều khiển độ dốc được thiết kế phía ngoài dựa trên hệ số phân bố công suất giữa các DG từ trước đó, tuy nhiên quá trình điều khiển diễn ra riêng biệt tại mỗi DG dựa trên các ràng buộc về tần số lưới điện [9].



Hình 2. Vòng lặp điều khiển điện áp và dòng điện

Giả thiết quá trình động học của vòng lặp điều khiển dòng điện phía trong diễn ra nhanh hơn rất nhiều lần quá trình động học vòng lặp điện áp phía ngoài, do đó với vòng lặp điện áp có thể chấp nhận  $i_d \approx i_{dref}$  và  $i_q \approx i_{qref}$  [10].

Vectơ tín hiệu đầu ra bộ điều khiển  $[u_{de}, u_{qe}]$  và vectơ tín hiệu đầu ra bộ điều khiển  $[u_{di}, u_{qi}]$

$$u_{de} = i_d - i_{Ld} + \omega C E_q \tag{1}$$

$$u_{qe} = i_q - i_{Lq} - \omega C E_d \tag{2}$$

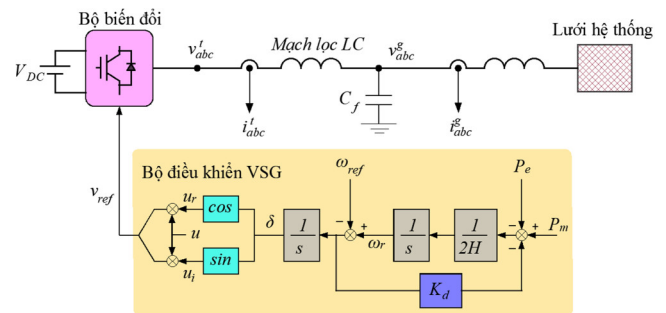
$$u_{di} = m_d + \omega L i_q - E_d \tag{3}$$

$$u_{qi} = m_q - \omega L i_d - E_q \tag{4}$$

**2.2. Mô hình máy phát đồng bộ ảo**

**2.2.1. Tổng quan máy phát đồng bộ ảo**

Để mô phỏng theo các quá trình động học trên máy phát điện đồng bộ, các bộ biến đổi cần được trang bị bộ điều khiển máy phát đồng bộ ảo VSG (Virtual Synchronous Generator Control). Hình 3 thể hiện mô hình khái quát máy phát đồng bộ ảo [11].



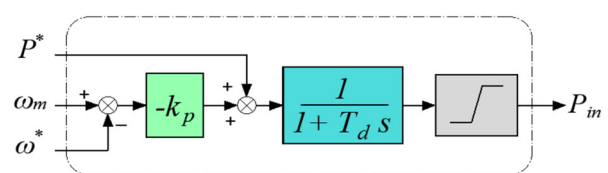
Hình 3. Mô hình khái quát máy phát đồng bộ ảo

Như được mô tả trong bài báo [3], mô hình toán học của một máy phát điện đồng bộ bao gồm phần cơ và phần điện. Có một mối quan hệ tương đương giữa hệ thống biến tần nối lưới và một hệ thống máy phát điện đồng bộ, trong đó phía một chiều có thể được coi là động cơ chính và biến tần với cuộn cảm của bộ lọc LC có thể được coi như một máy phát đồng bộ [12].

**2.2.2. Bộ điều khiển công suất tác dụng**

Khối “Điều khiển công suất tác dụng” gồm có hai khối nối tiếp đặc trưng cho hai quá trình “Bộ điều tốc” và “Phương trình quay”.

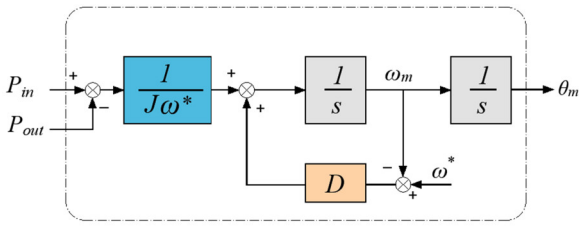
Mô hình “Bộ điều tốc” được thể hiện trong hình 4 được xây dựng dựa trên đường đặc tính quan hệ độ dốc  $k_p$  giữa  $P-\omega$ . Ngoài ra, một bộ trễ có hằng số thời gian trễ  $T_d$  phỏng theo trễ đáp ứng cơ học trên bộ điều tốc của máy phát điện đồng bộ.



Hình 4. Mô hình bộ điều tốc

Mô hình “Phương trình quay” mô tả mối liên hệ động học điện cơ trong máy phát điện đồng bộ được thể hiện trong hình 5. Với  $J$  là thông số phỏng theo mômen quán

tính rotor, D phỏng theo hệ số hãm của cuộn hãm trong máy phát điện đồng bộ.



Hình 5. Mô hình phương trình quay

Trong đó:

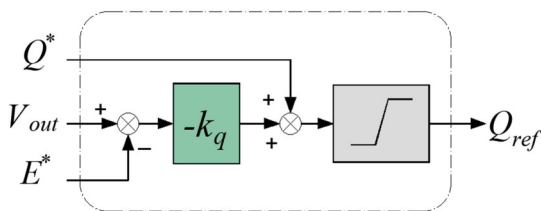
$$P_{in} = \frac{1}{1+T_D s} (P^* - k_p(\omega_m - \omega^*)) \tag{5}$$

$$P_{in} - P_{out} = J\omega^* \frac{d\omega_m}{dt} + D(\omega_m - \omega^*) \tag{6}$$

$$\theta_m = \int \omega_m dt \tag{7}$$

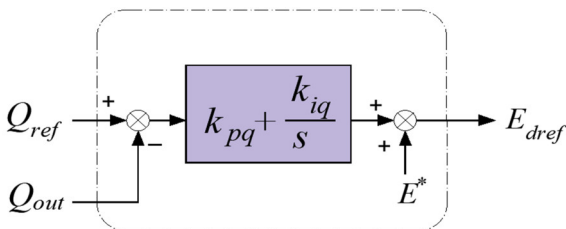
**2.2.3. Bộ điều khiển công suất phản kháng**

Song song với quá trình điều khiển tần số thông qua công suất tác dụng là quá trình điều khiển điện áp dựa trên điều khiển công suất phản kháng Q. Quá trình điều khiển công suất phản kháng Q cũng được phân thành hai giai đoạn và kết nối với bộ điều khiển điện áp phía bên trong của bộ điều khiển bộ biến đổi. Giai đoạn điều khiển độ dốc Q - V được thể hiện trong hình 6.



Hình 6. Điều khiển độ dốc công suất phản kháng

Nối tiếp bộ điều khiển độ dốc công suất phản kháng, để mô phỏng bộ điều khiển tự động công suất phản kháng trong máy phát điện đồng bộ cần thiết có bộ điều khiển PI công suất phản kháng được thể hiện trong hình 7.



Hình 7. Bộ điều khiển PI công suất phản kháng

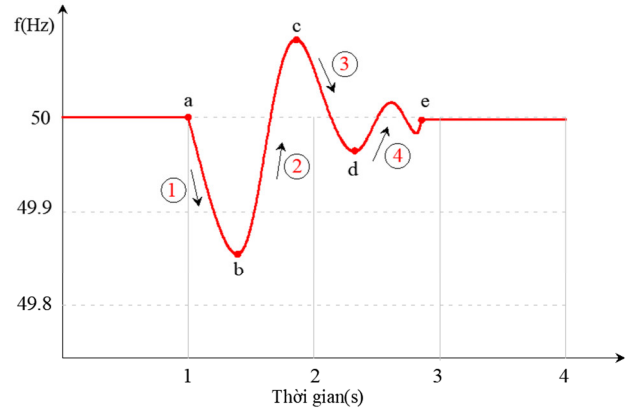
Trong đó:

$$Q_{ref} = Q_0 - k_q (V_{out} - E^*) \tag{8}$$

$$E_{dref} = E^* + (Q_{ref} - Q_{out}) \cdot \left( k_{pq} + \frac{k_{iq}}{s} \right) \tag{9}$$

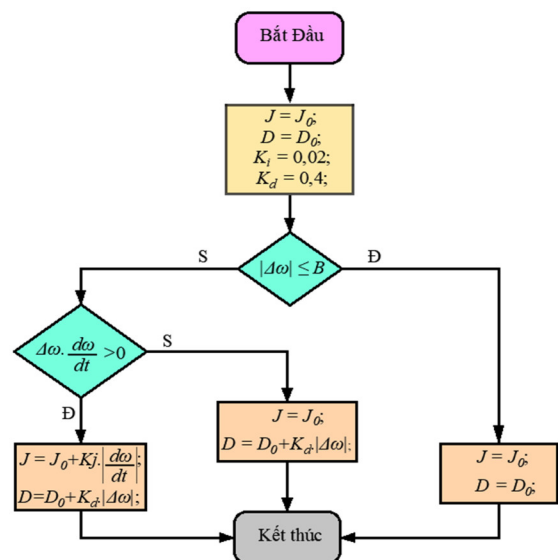
**3. MÔ HÌNH MÁY PHÁT ĐỘNG BỘ ẢO THÔNG SỐ TỰ ĐIỀU CHỈNH**

Phương pháp điều khiển thông số tự điều chỉnh được đề xuất nhằm cải thiện độ ổn định tần số cho lưới điện nhỏ. Dao động đầu tiên của tần số là dao động quan trọng nhất trong việc duy trì sự ổn định tần số tự do của hệ thống. Từ đó, phương pháp điều khiển sẽ bám theo sự thay đổi trong chu kỳ đầu để đưa ra sự thay đổi thông số J và D.



Hình 8. Đường cong dao động tần số của DG điển hình

Quá trình tự điều chỉnh của cả J và D trong mỗi giai đoạn của một chu kỳ dao động được tóm tắt trong hình 9. Một chu kỳ dao động được chia thành bốn phần đoạn như trong hình 8. Trong trường hợp Δω (Δω = ω - ω<sub>o</sub>) cùng với dấu dω/dt thì tần số giảm trong mỗi đoạn như trường hợp 1 và 3. Trong khi đó, khi Δω và dω/dt hoạt động theo hướng ngược lại trong đoạn 2 và 4 khi tần số bắt đầu quay trở lại trạng thái ổn định. Trường hợp cả Δω và dω/dt bằng 0, đó là thời điểm tần số lưới trở về trạng thái ổn định. Mục tiêu của phương pháp là giảm các dao động tần số một cách nhanh chóng bằng cách điều chỉnh các thông số J và D qua đó thay đổi các điều kiện tăng và giảm quán tính ảo. Dựa trên phân tích trên, các yếu tố quán tính ảo và thông số tự điều chỉnh được xây dựng như hình 9.

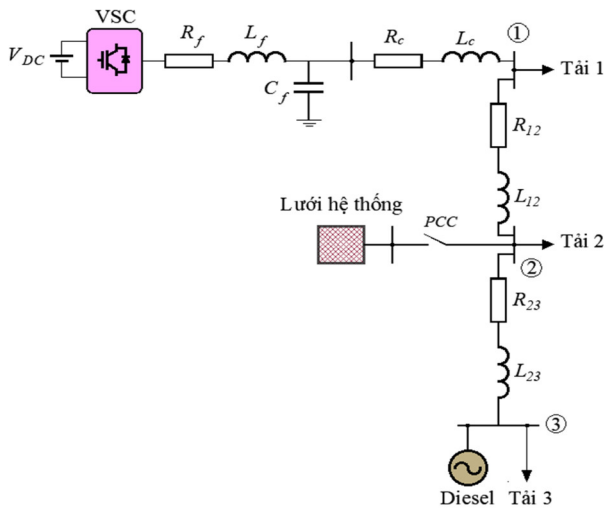


Hình 9. Lưu đồ thuật toán thông số tự điều chỉnh

Trong đó,  $J_0$  và  $D_0$  lần lượt là các giá trị trạng thái ổn định của  $J$  và  $D$ ;  $k_j$  và  $k_d$  lần lượt là các hệ số điều tốc của  $J$  và  $D$ ;  $B$  là giá trị ngưỡng cho  $\Delta\omega$ . Các thông số tự điều chỉnh đang hoạt động với các giá trị bình thường là  $J_0$  và  $D_0$  trong trường hợp trạng thái ổn định.

**4. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ**

Tiến hành mô phỏng mô hình hệ thống và các cấu trúc điều khiển được đề xuất trong hình 10 ở chế độ độc lập. Thông số các phần tử trong sơ đồ được cho trong bảng 1.

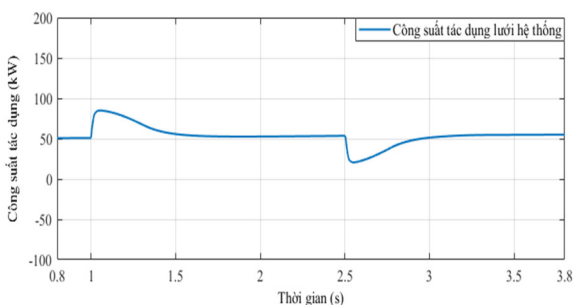


Hình 10. Sơ đồ lưới nghiên cứu

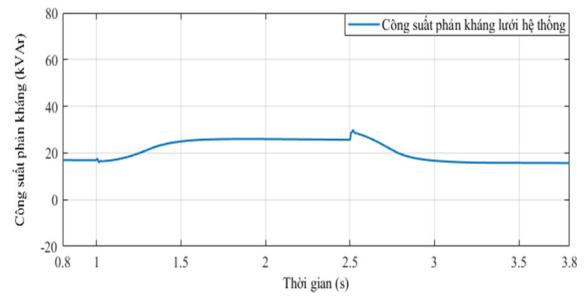
Bảng 1. Thông số DG và phụ tải

Thông số DG					Thông số tải		
$L_f$	0,1mH	$T_d$	0,01s	$k_{pv}$	2	Tải 1	50kW
$R_f$	1,0mΩ	$k_{pd}$	0,6	$k_{iv}$	$4,1 \cdot 10^3$	Tải 2	85kW
$C_f$	0,350mF	$k_{iq}$	60	$J$	0,0024kgm <sup>2</sup>	Tải 3	85kW
$k_p$	37,5	$k_{pc}$	1,57	$D$	0,02kgms <sup>-2</sup>	Tổng tải	220kW
$k_q$	20	$k_{ic}$	15,7	$B$	0,05		

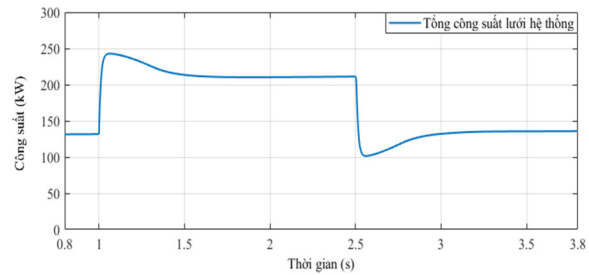
Quá trình mô phỏng diễn ra trong chế độ lưới điện nhỏ tách lưới khỏi lưới hệ thống. Tại thời điểm bắt đầu, phụ tải 1 và phụ tải 2 được cấp điện. Tại thời điểm 1s phụ tải 3 bắt đầu được cấp điện với công suất là 85kW. Tại thời điểm 2,5s phụ tải 3 được cắt ra. Kết quả mô phỏng công suất tác dụng và công suất phản kháng của DG được thể hiện trong hình 11, 12. Khi tải thay đổi ở tại thời điểm 1s, công suất của DG thay đổi và cân bằng công suất trong lưới.



Hình 11. Công suất tác dụng của phát ra trên DG

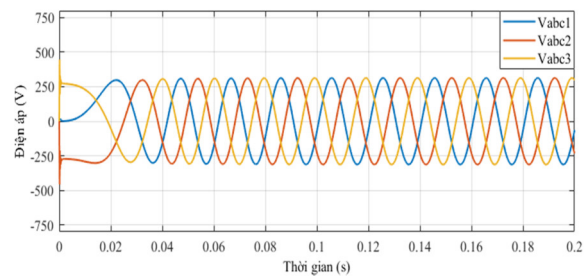


Hình 12. Công suất phản kháng của phát ra trên DG

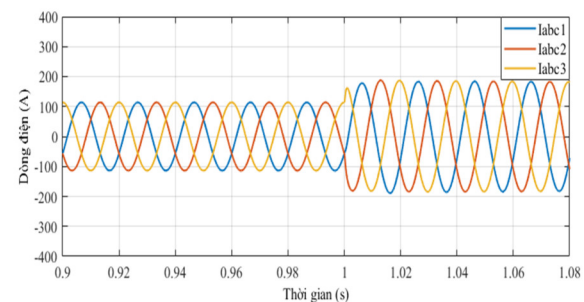


Hình 13. Tổng công suất phụ tải trên DG

Quá trình mô phỏng điện áp và dòng điện được thể hiện trong các hình 14, 15 lần lượt với  $V_{abc}$ ,  $I_{abc}$ .



Hình 14. Điện áp  $V_{abc}$  tại nút nguồn DG

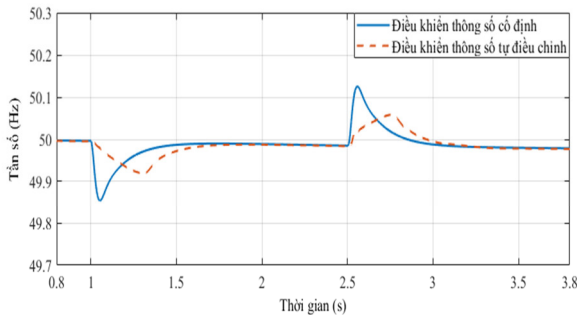


Hình 15. Dòng điện  $I_{abc}$  tại nút nguồn DG

Từ kết quả thể hiện trong hình 15, dòng điện tham chiếu khi tiến hành mô phỏng là 100A. Giá trị đỉnh của dòng điện tại thời điểm 1s là 120A. Sau đó dòng điện tham chiếu thay đổi từ 120A thành 180A trong khoảng 0,02s.

Kết quả mô phỏng tần số lưới điện trong hình 16 thể hiện sự khác nhau khi áp dụng phương pháp VSG có thông số tự điều chỉnh so với thông số cố định. Tần số lưới khi áp dụng phương pháp tự điều chỉnh có biên độ dao động tần số nhỏ hơn và tốc độ thay đổi tần số có lợi hơn cho lưới. Có thể thấy rằng hệ thống đang hoạt động ở chế độ lưới điện nhỏ tách lưới khỏi hệ thống và có sự thay đổi tần số tại thời

điểm 1s và 2,5s. Sau một khoảng thời gian tần số trở về trạng thái ổn định và cân bằng tần số trong lưới hệ thống. Vì vậy, dưới sự thay đổi của phụ tải và VSG có thông số tự điều chỉnh hệ thống hoạt động ở điểm ổn định mới.



Hình 16. So sánh tần số lưới điện cố định và tần số lưới điện có thông số điều chỉnh

## 5. KẾT LUẬN

Bài báo thực hiện áp dụng bộ điều khiển máy phát đồng bộ ảo VSG vào lưới điện độc lập nhằm cải thiện quán tính của các nguồn DG nối lưới thông qua bộ biến đổi công suất. Thông số của bộ điều khiển VSG có thể thay đổi được giúp tần số lưới nhanh chóng đi vào ổn định khi có biến động về công suất tác dụng.

Thuật toán thay đổi thông số bộ điều khiển VSG đã được bài báo đề xuất. Kết quả mô phỏng và so sánh kết quả khi áp dụng hai phương pháp điều khiển thông số cố định và phương pháp điều khiển dựa trên thông số tự điều chỉnh để xuất cho thấy phương pháp tự điều chỉnh này cho phép VSG tăng hoặc giảm quán tính ảo qua đó cải thiện một cách hiệu quả độ lệch và thời gian dao động của tần số lưới.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A. V. Timbus, 2006. *Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 5, pp. 1398-1409.
- [2]. J. Fang, X. Li, X. Yang, Y. Tang, 2017. *An Integrated Trap-LCL Filter with Reduced Current Harmonics for Grid-Connected Converters under Weak Grid Conditions*. IEEE Trans Power Electron, vol. 32, no. 11, pp. 8446-8457.
- [3]. Q. C. Zhong, G. Weiss, 2011. *Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 4, pp. 1259-1267.
- [4]. T. L. Vandoorn, J. C. Vasquez, J. de Kooning, J. M. Guerrero, L. Vandevelde, 2013. *Microgrids: Hierarchical control and an overview of the control and reserve management strategies*. IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 7, no. 4, pp. 42-55.
- [5]. J. Fang, H. Li, Y. Tang, F. Blaabjerg, 2018. *Distributed Power System Virtual Inertia Implemented by Grid-Connected Power Converters*. IEEE Trans Power Electron, vol. 33, no. 10, pp. 8488-8499.
- [6]. Z. Lu, M. Li, J. Wang, 2019. *Virtual Synchronous Generator Control Strategy Based on Improved Inner Loop Applied to Power Storage Converter*. in

Proceedings of 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference, CIEEC 2019, pp. 2055-2059.

[7]. I. Vechiu, O. Curea, A. Llarra, H. Camblong, 2011. *Control of power converters for microgrids*. COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 30, no. 1, pp. 300-309.

[8]. A. Yazdani, R. Iravani, 2006. *A unified dynamic model and control for the voltage-sourced converter under unbalanced grid conditions*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 3, pp. 1620-1629.

[9]. Nguyen Van Hung, Nguyen Thi Viet Hong, Nguyen Duc Huy, 2022. *Application model of virtual inertia swing equation based voltage source converter in frequency and voltage control of microgrid*. Journal of Science and Technology, Hanoi University of Industry, vol. 58 - Special, pp. 144-150.

[10]. Y. Li, L. Fan, 2017. *Stability Analysis of Two Parallel Converters with Voltage-Current Droop Control*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, no. 6, pp. 2389-2397.

[11]. R. Heydari, M. Savaghebi, S. Member, F. Blaabjerg, 2020. *Fast Frequency Control of Low-Inertia Hybrid Grid Utilizing Extended Virtual Synchronous Machine*. 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)

[12]. Taehan-Choñ'gi-Hakhoe, Annual IEEE Computer Conference, IEEE Industry Applications Conference, International Conference on Electrical Machines and Systems 2013.10.26-29 Busan, and ICEMS 2013.10.26-29 Busan, International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2013 26-29 Oct. 2013, Busan, Korea.

## AUTHORS INFORMATION

**Chu Thanh Binh, Nguyen Hong Son, Nguyen Ba Khang, Phan Hong Quang, Mai Van Nghia, Pham Van Cuong**

Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry