

# MỘT PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN TẦN SỐ HỆ THỐNG KẾT NỐI NHIỀU LƯỚI ĐIỆN NHỎ

## A METHOD OF FREQUENCY CONTROL OF INTERCONNECTED MICROGRIDS

Nguyễn Văn Hùng<sup>1,2,\*</sup>, Phan Hồng Quang<sup>1</sup>,  
Nguyễn Văn Thành<sup>1</sup>, Nguyễn Đức Huy<sup>2</sup>

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.294>

### TÓM TẮT

Sự hình thành các lưới điện nhỏ (MG) dựa trên các nguồn phân tán (DG) nhằm nâng cao độ tin cậy của hệ thống điện đang ngày càng trở nên phổ biến. Kết nối các MG theo các cấu hình khác nhau giúp gia tăng sự linh hoạt trong vận hành và điều khiển các thông số như tần số, điện áp của hệ thống. Tuy nhiên, việc kết nối các MG theo nhiều cấu hình khác nhau cũng yêu cầu chiến lược điều khiển phức tạp hơn. Bài báo đề xuất một chiến lược điều khiển tần số hệ thống các MG được kết nối theo hướng tiếp cận dựa trên máy phát đồng bộ ảo. Mục tiêu của chiến lược này là cải thiện tần số lưới điện và điều chỉnh phân bố công suất một cách hiệu quả giữa các MG. 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:** Điều khiển tần số; Lưới điện nhỏ kết nối; máy phát đồng bộ ảo.

### ABSTRACT

The formation of microgrids based on distributed generators to improve the reliability of the power system is becoming increasingly popular. Connecting microgrids in different configurations helps increase flexibility in the operation and control of parameters such as frequency and voltage of the system. However, connecting microgrids in various configurations also requires more complex control strategies. This paper proposes a frequency control strategy for systems of interconnected microgrids based on a virtual synchronous generator approach. This strategy aims to improve grid frequency and effectively regulate power allocation among microgrids. To demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed method, the paper conducts experiments and evaluates the results using Matlab/Simulink software.

**Keywords:** Frequency control; interconnected microgrids; virtual synchronous generator.

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

<sup>2</sup>Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

\*Email: [hung\\_nv@hauui.edu.vn](mailto:hung_nv@hauui.edu.vn)

Ngày nhận bài: 20/4/2024

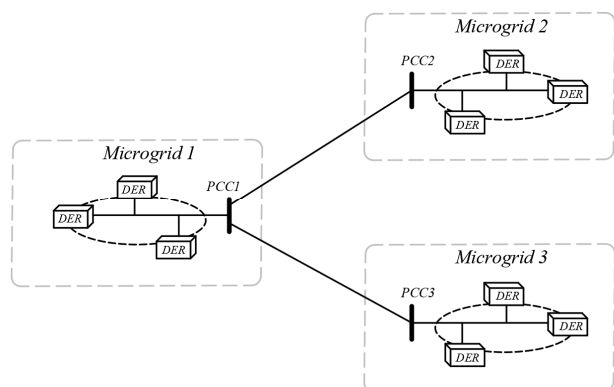
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 08/6/2024

Ngày chấp nhận đăng: 27/9/2024

### 1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, tỷ trọng các nguồn năng lượng phân tán (DER) ngày càng tăng trong hệ thống điện [1-3], đa phần các DER được nối lưới thông qua các bộ biến đổi điện tử công suất (IBRs). Các nguồn IBRs này có sự khác biệt lớn về quán tính so với các nguồn truyền thống là các máy phát đồng bộ. Điều này gây ra sự thiếu hụt quán tính đáng kể cho lưới điện, dẫn đến việc ổn định tần số của hệ thống điện bị ảnh hưởng nghiêm trọng [4, 5]. Máy phát đồng bộ ảo (VSG) được đề xuất nhằm gia tăng quán tính cho các nguồn IBRs giúp cải thiện tần số lưới điện [6-8].

Song song với sự gia tăng tỷ trọng các nguồn IBRs là sự hình thành ngày càng lớn các cụm MG có khả năng hoạt động nối lưới lớn hoặc hoạt động độc lập. Để gia tăng độ tin cậy cũng như các chỉ tiêu kinh tế-kỹ thuật, các cụm MG có xu hướng liên kết mềm với nhau tạo thành các hệ thống các lưới điện nhỏ kết nối IMGs. Một lưới điện IMGs được minh họa trong hình 1.



Hình 1. Một sơ đồ lưới điện IMGs

Sự hình thành MGs phụ thuộc chính vào các nguồn năng lượng tái tạo tại chỗ, do vậy sẽ tồn tại những MGs chỉ bao gồm các nguồn IBRs và không xuất hiện các

nguồn máy phát đồng bộ, cũng như các nguồn có dự trữ quán tính quay [9]. Sự ảnh hưởng do thiếu hụt quán tính quay tới các thông số lưới điện sẽ thể hiện rõ nét với lưới MGs chỉ dựa trên các IBRs [10, 11]. Do vậy với các lưới MG này, việc bù quán tính thông qua bộ điều khiển VSG là một giải pháp cần thiết. Lưới điện IMGs bao gồm nhiều MGs được liên kết mềm với nhau thông qua các máy cắt điện và mỗi lưới MG vận hành dựa trên các tiêu chí kinh tế - kỹ thuật khác nhau. Điều khiển tần số toàn lưới IMGs trong chế độ tách lưới hệ thống trở thành bài toán cân bằng công suất không chỉ trong nội bộ các MGs mà trong toàn lưới IMGs.

Việc áp dụng bộ điều khiển VSG trong điều khiển tần số MG đã được đề cập tới trong nghiên cứu [12]. Nghiên cứu này đã đề xuất một phương pháp điều khiển tần số MG, trong đó thông số bộ điều khiển được điều chỉnh bám theo tốc độ thay đổi tần số lưới điện. Tuy nhiên, việc áp dụng bộ điều khiển VSG trong điều khiển tần số lưới điện IMGs bao gồm nhiều MG có nhiều điểm mới cần phải được nghiên cứu. Cụ thể, quá trình đưa tần số lưới trở về giá trị danh định không chỉ phụ thuộc vào một VSG như trong nghiên cứu [12], mà cần được thực hiện tại nhiều VSG tại các lưới MG khác nhau. Một trong các điều kiện cũng cần quan tâm đối với với lưới IMGs đó là công suất truyền tải giữa các MG trong các chế độ khác nhau do giới hạn truyền tải giữa đường nối liên kết các MG. Bài báo đề xuất một chiến lược điều khiển tần số lưới điện IMGs theo hướng tiếp cận dựa trên máy phát đồng bộ ảo. Những vấn đề chính bài báo sẽ đề cập:

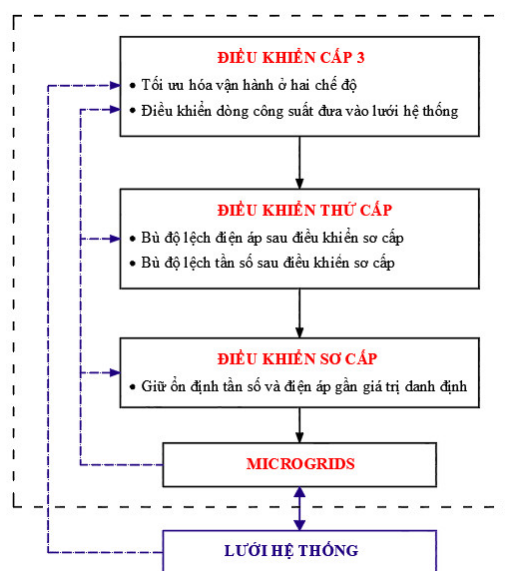
- Mô hình điều khiển cho nhiều lưới điện nhỏ đơn lẻ dựa trên bộ điều khiển máy phát đồng bộ ảo;
- Đề xuất một mô hình cải thiện tần số lưới điện IMGs và điều chỉnh phân bố công suất một cách hiệu quả giữa các lưới điện nhỏ.
- Ứng dụng mô hình để xuất lên một lưới điện IMGs cụ thể.

## 2. PHÂN CẤP ĐIỀU KHIỂN MGs

Phân cấp điều khiển MGs có thể chia thành 3 cấp: Sơ cấp, thứ cấp và cấp ba được thể hiện trong hình 2. Điều khiển sơ cấp tập trung vào các vòng lặp điều khiển dòng điện và điện áp nội bộ các DGs. Điều khiển thứ cấp có nhiệm vụ đảm bảo đưa sai số điện áp và tần số về không trước mỗi sự thay đổi của tải và nguồn. Điều khiển cấp ba có nhiệm vụ giữ ổn định MGs trước các sự cố nghiêm trọng, ngoài ra trong chế độ làm việc bình thường điều khiển cấp ba còn có nhiệm vụ giúp MGs vận hành tối ưu chỉ tiêu kinh tế [13].

Điều khiển sơ cấp đóng vai trò quan trọng trong phân cấp điều khiển MGs. Cấp điều khiển này có phạm vi điều chỉnh trong các vòng lặp điều khiển dòng điện và điện áp nội bộ các DERs nhằm đáp ứng nhanh nhất với các thay đổi diễn ra trong MGs. Tùy thuộc vào công nghệ mỗi DER khác nhau như máy phát cảm ứng, máy phát đồng bộ hoặc các nguồn phân tán nối lưới thông qua các bộ biến đổi thì điều khiển sơ cấp sẽ khác nhau. Trong cấp điều khiển này, ngoài điều khiển nội bộ các DERs còn xuất hiện điều khiển phân bố công suất giữa các DERs với nhau thông qua các vòng lặp ngoài điều khiển dòng điện và điện áp. Điều chỉnh phân bố công suất giữa các DERs đáp ứng lại yêu cầu cân bằng công suất trong lưới nhằm điều chỉnh các thông số điện áp và tần số trong toàn lưới.

Điều khiển thứ cấp trong MG tương tự điều khiển thứ cấp trong lưới truyền thống, đó là giảm độ lệch tần số và điện áp còn lại sau điều khiển sơ cấp, đưa các đại lượng này về giá trị danh định. Cấp điều khiển này được thực hiện đồng loạt, tác động đồng thời tới toàn bộ DERs và phụ tải. Khi MG hoạt động ở chế độ nối lưới, toàn bộ DERs sử dụng giá trị đặt từ lưới hệ thống làm tham chiếu, nhưng các giá trị tham chiếu sẽ không còn khi MG hoạt động ở chế độ tách lưới. Do vậy, khi MG hoạt động ở chế độ tách lưới, một DER hoặc nhiều DERs sẽ được lựa chọn làm điểm tham chiếu tùy theo từng phương thức điều khiển MG.



Hình 2. Phân cấp điều khiển MGs

Điều khiển cấp ba được thực hiện trong chế độ MG nối lưới thông qua bộ điều khiển trung tâm. Cấp điều khiển này điều chỉnh trào lưu công suất giữa lưới hệ thống và MG trong chế độ nối lưới với mục tiêu tối ưu chỉ tiêu kinh tế thông qua việc điều khiển tần số và biên độ điện áp

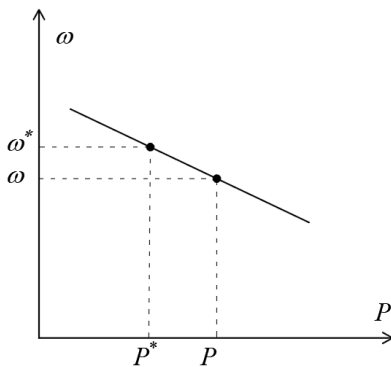
trong MG. Điều khiển cấp ba có vai trò quan trọng với MG trong quá trình tách lưới và nối lưới trở lại.

### 3. ĐIỀU KHIỂN TẦN SỐ LƯỚI ĐIỆN IMGs

#### 3.1. Bộ điều khiển độ dốc truyền thống

Việc giữ các dao động tần số trong giới hạn cho phép khi các kích động xuất hiện là điều rất quan trọng. Quá trình duy trì ổn định tần số được thực hiện theo từng giai đoạn. Trong giai đoạn đầu của quá trình, đặc tính tính đặc trưng của mỗi nguồn phát sẽ đóng vai trò chính trong việc ngăn tần số dao động quá mức giới hạn. Trong giai đoạn kế tiếp, sự điều chỉnh từ bộ điều khiển trung tâm giúp đưa tần số trở về giá trị danh định [14].

Đối với các máy phát đồng bộ, đặc tính tính giữa tần số và công suất tác dụng là đặc tính tự nhiên, tuy nhiên với các nguồn IBRs việc xây dựng đường đặc tính này giúp thuận lợi trong quá trình điều khiển và phân bổ công suất giữa các nguồn. Đường đặc tính P- $\omega$  được minh họa trong hình 3.



Hình 3. Đặc tính tính độ dốc

Bộ điều khiển độ dốc với vector biến đầu vào công suất tác dụng:

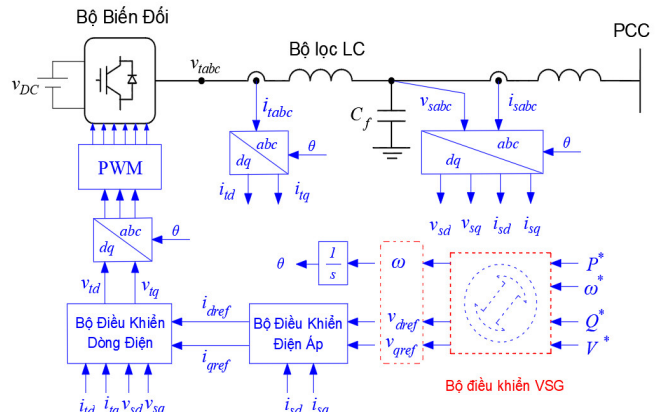
$$\omega = \omega^* + m_p (P^* - P_{out}) \tag{1}$$

Công suất P trong hệ trục vuông góc dq:

$$P_{out} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (v_d^g \cdot i_d^g + v_q^g \cdot i_q^g) \tag{2}$$

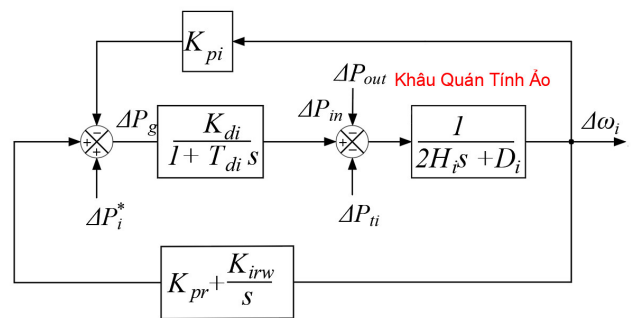
#### 3.2. Bộ điều khiển VSG

Một hệ thống lưới điện nhỏ hoạt động dựa trên bộ biến tần, mỗi cấu trúc điều khiển DER tích hợp bộ điều khiển sơ cấp và thứ cấp. Cấu trúc điều khiển chính bao gồm: VSG, vòng lặp điều khiển điện áp, vòng lặp điều khiển dòng điện. Bài viết này tập trung vào việc điều khiển tần số và điều chỉnh phân bổ công suất. Tuy nhiên, vòng lặp điện áp và dòng điện có sự tác động lớn tới hệ thống làm mất cân bằng của MG [15]. Hình 4 thể hiện cấu trúc áp dụng bộ điều khiển VSG vào IBR nguồn áp.



Hình 4. Cấu trúc IBR sử dụng bộ điều khiển VSG

Bộ điều khiển VSG bao gồm hai khâu điều khiển sơ cấp và điều khiển thứ cấp và một khâu quán tính ảo. Khâu quán tính ảo được xây dựng phỏng theo đặc tính quán tính của máy phát đồng bộ. Hai khâu điều khiển sơ cấp và điều khiển thứ cấp giúp đưa tần số về giá trị đặt khi các kích động về công suất tác dụng xuất hiện thông qua đại lượng  $P_{out}$ . “Khâu quán tính” mô tả mối liên hệ động học điện cơ được thêm vào bộ điều khiển IBR nguồn áp nhằm giảm thiểu sự thiếu hụt quán tính của các thiết bị điện tử công suất qua đó giúp các nguồn IBR có thể hoạt động gần với sự phỏng theo hoạt động máy phát đồng bộ. Sơ đồ khối mô hình bộ điều khiển VSG được thể hiện trong hình 5.



Hình 5. Sơ đồ khối mô hình bộ điều khiển VSG

Phương trình toán học mô tả bộ điều khiển VSG:

$$\Delta P_{in} - \Delta P_{out} - \Delta P_{ti} = 2H_i s \cdot \Delta \omega_i + D \Delta \omega_i \tag{3}$$

$$\Delta P_{in} = \Delta P_g \cdot \frac{K_{di}}{1 + T_{di} s} \tag{4}$$

$$\Delta P_g = \Delta P_i^* + \Delta \omega \left( K_{pr} + \frac{K_{irw}}{s} \right) - \Delta \omega \cdot K_{pi} \tag{5}$$

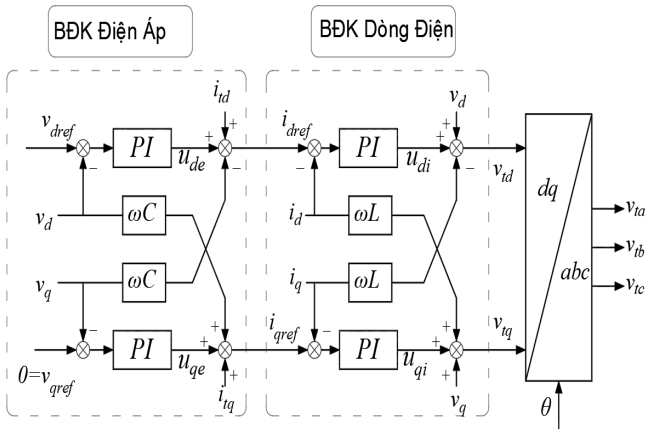
Trong đó: H: Hằng số quán tính ảo [s]; D: Hằng số hãm [pu]; K<sub>p</sub>: Hệ số độ dốc trong điều khiển sơ cấp; K<sub>pr</sub>: Hệ số tỷ lệ của điều khiển thứ cấp; K<sub>irw</sub>: Hệ số tích phân của điều khiển thứ cấp; T<sub>d</sub>: Thời gian trễ [s].

### 3.3. Bộ điều khiển dòng điện và điện áp

Tín hiệu đầu ra của bộ điều khiển VSG được đưa vào các bộ điều khiển phía trong bao gồm bộ điều khiển dòng và áp, hình 6 minh họa chi tiết các đầu vào ra và bộ điều khiển được sử dụng trong bộ điều khiển dòng, áp. Cụ thể, vectơ tín hiệu đầu ra bộ điều khiển điện áp được xác định như sau:

$$u_{de} = i_d - i_{Ld} + \omega C_e v_q \tag{6}$$

$$u_{qe} = i_q - i_{Lq} - \omega C_e v_d \tag{7}$$



Hình 6. Sơ đồ khối bộ điều khiển điện áp và dòng điện [16]

Tín hiệu đầu vào bộ điều khiển dòng điện:

$$i_{dref} = (v_{dref} - v_d) \left( K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} \right) + i_{td} - v_q \cdot \omega C_f \tag{8}$$

$$i_{qref} = (v_{qref} - v_q) \left( K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} \right) + i_{tq} + v_d \cdot \omega C_f \tag{9}$$

Tín hiệu đầu ra của bộ điều khiển dòng điện:

$$u_{di} = v_{td} + \omega L_f i_q - v_d \tag{10}$$

$$u_{qi} = v_{tq} - \omega L_f i_d - v_q \tag{11}$$

Và vectơ đầu ra của bộ điều khiển dòng điện được xác định như sau:

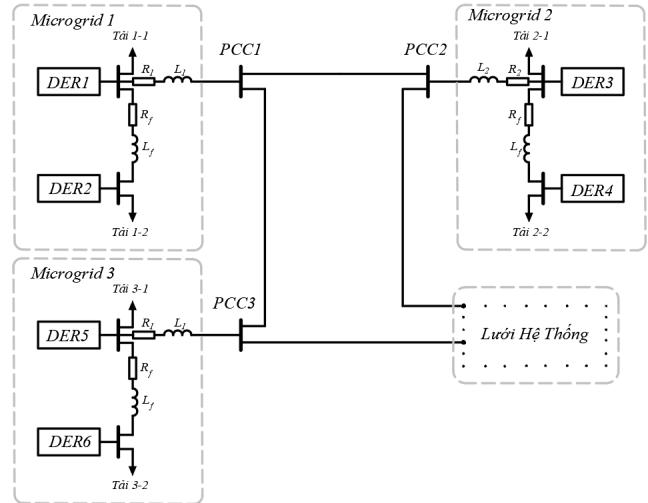
$$v_{td} = k_{pc} (i_{dref} - i_{td}) + k_{ic} \cdot v_{id} + v_{sd} - \omega L_f \cdot i_{tq} \tag{12}$$

$$v_{tq} = k_{pc} (i_{qref} - i_{tq}) + k_{ic} \cdot v_{iq} + v_{sq} + \omega L_f \cdot i_{td} \tag{13}$$

## 4. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ

### 4.1. Mô hình IMGs nghiên cứu

Mô hình kết nối lưới điện nhỏ được mô tả trong hình 7 vận hành ở chế độ tách đảo. Trong đó, mỗi MG yêu cầu một nguồn DER hoạt động ở chế độ nguồn áp kết hợp với một DER hoạt động ở chế độ nguồn dòng. Thông số của lưới nghiên cứu được thể hiện trong bảng 1 và 2.



Hình 7. Mô hình IMGs nghiên cứu

Bảng 1. Thông số lưới và phụ tải

Bộ lọc		Phụ tải		DER	
Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
R <sub>f</sub>	2,2mΩ	Phụ tải 1	45 + j12 kVA	P <sub>DER1</sub> *, P <sub>DER3</sub> *, P <sub>DER5</sub> *	120, 30, 30kW
L <sub>f</sub>	0,7 mH	Phụ tải 2	30 + j5 kVA	Q <sub>DER1</sub> *, Q <sub>DER3</sub> *, Q <sub>DER5</sub> *	35, 15, 15kVAr
C <sub>f</sub>	2,2 mF	Phụ tải 3	30 + j5 kVA	P <sub>DER2,4,6</sub> * + jQ <sub>DER2,4,6</sub> *	30+j10 kVA

Bảng 2. Thông số bộ điều khiển

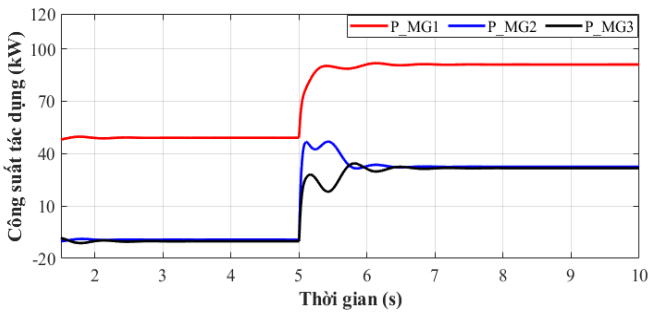
Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
K <sub>pc</sub>	2,5	H	1,8s
K <sub>ic</sub>	625	D	0,12pu
K <sub>pv</sub>	2,5	T <sub>d</sub>	0,01s
K <sub>iv</sub>	100		

### 4.2. Mô phỏng

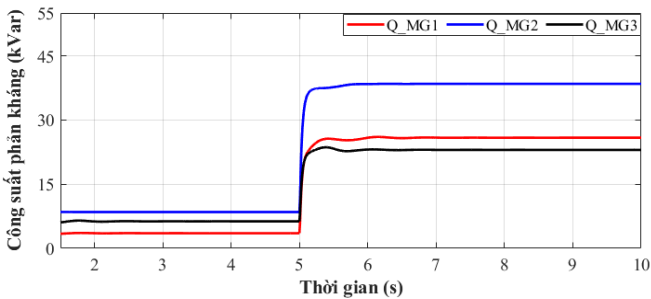
Bài báo tiến hành mô phỏng các kịch bản khác nhau với các kích động khác nhau của việc thay đổi phụ tải của lưới IMG. Các thông số công suất từ các MGs thành phần được phân bổ nhằm đưa thông số chế độ tần suất về giá trị danh định cũng được quan sát nhằm kiểm tra sự phân bổ công suất giữa các MGs. Tiếp đến là quan sát sự thay đổi của tần số lưới điện IMG khi xảy ra các biến động công suất và tiến hành so sánh giữa hai phương pháp sử dụng bộ điều khiển VSG và sử dụng bộ điều khiển độ dốc truyền thống.

Tại thời điểm 5s, mô phỏng quá trình phụ tải tổng tăng 160kW. Hình 8, 9 thể hiện công suất riêng lẻ của các nguồn DER. Ở đây, các DER 1,3,5 được xác định làm việc

theo chế độ nguồn áp và DER 2, 4, 6 được xác định làm việc theo chế độ nguồn dòng. Với các nguồn MG 1, 2, 3 với các thông số ràng buộc của đường liên kết giữa các MG mà nguồn MG 2, 3 có mức tăng công suất là như nhau. Duy nhất có MG 1 có mức tăng công suất lớn, nhằm bù đắp phần công suất còn lại để có thể duy trì tần số ở mức danh định. Có thể nói, lưới MG1 đang đóng vai trò chủ đạo trong việc duy trì tần số.

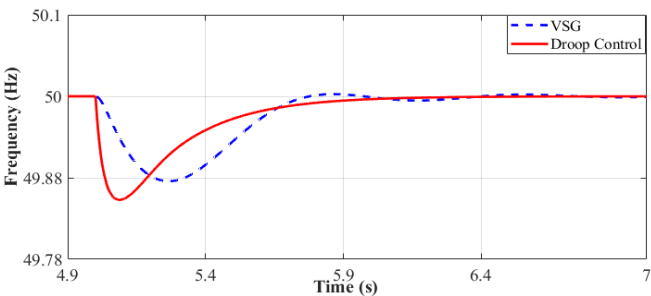


Hình 8. Công suất tác dụng tại các điểm PCC khi tăng tải



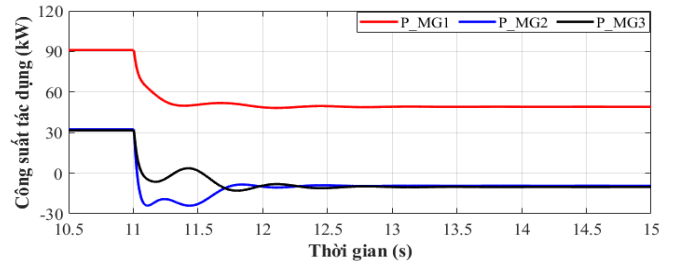
Hình 9. Công suất phản kháng tại các điểm PCC khi tăng tải

Hình 10 cho sự thay đổi của tần số khi có kích động về công suất tác dụng. Tại thời điểm trước khi xảy ra kích động, tần số giảm theo và khi có sự thay đổi công suất của các MG thành phần thì tần số có xu hướng quay trở lại giá trị tần số danh định. Với trường hợp sử dụng bộ điều khiển VSG cho thấy mức giảm tần số giảm đáng kể so với phương pháp điều khiển độ dốc truyền thống. Điều này giúp cho lưới điện IMG hoạt động tốt, tránh được các tác động cắt không đáng có của hệ thống bảo vệ khi tần số xuống thấp trong giai đoạn đầu của kích động.

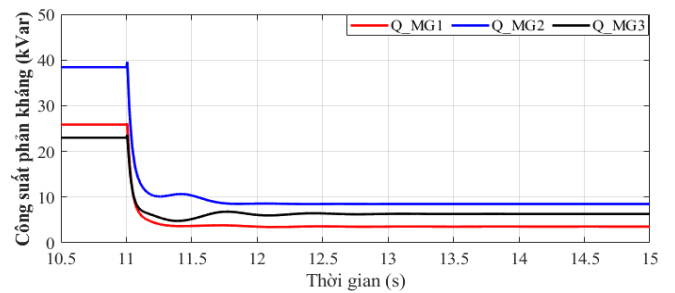


Hình 10. So sánh tần số khi sử dụng bộ điều khiển VSG và Độ dốc khi tăng tải

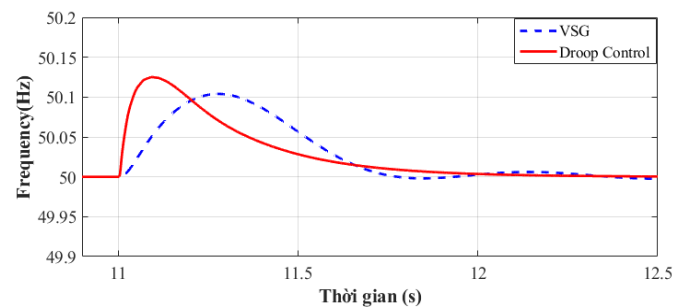
Tương tự với kích động tăng công suất phụ tải tại thời điểm 5s, mô phỏng tiến hành cắt tải tại thời điểm 11s với lượng công suất 160kW. Kết quả công suất và tần số được thể hiện trong hình 11, 12 và 13.



Hình 11. Công suất tác dụng tại các điểm PCC khi giảm tải



Hình 12. Công suất phản kháng tại các điểm PCC khi giảm tải



Hình 13. So sánh tần số khi sử dụng bộ điều khiển VSG và Độ dốc khi giảm tải

Có thể nhận thấy về mặt công suất, mức thay đổi phân bố công suất cũng tương đồng với mức thay đổi khi có thay đổi tăng công suất tải. Về tần số lưới điện, bộ điều khiển VSG cũng thể hiện rõ ưu điểm so với bộ điều khiển truyền thống. Mức tăng tần số do giảm tải của bộ điều khiển VSG đã giảm hơn so với mức tăng tần số theo phương pháp điều khiển độ dốc truyền thống.

### 5. KẾT LUẬN

Sự liên kết các lưới MG trở thành các IMGs là xu thế do mang nhiều ưu điểm như nâng cao độ tin cậy của hệ thống điện. Tuy nhiên đi kèm theo đó là sự phức tạp của hệ thống điều khiển với nhiều kịch bản tách ghép lưới thành phần MG và lưới hệ thống. Một trong số các bài toán liên quan tới lưới IMG là điều khiển dòng chuyển

công suất giữa các lưới MG nhằm duy trì tần số lưới điện. Bài toán này phức tạp do cần thỏa mãn nhiều yếu tố mang tính riêng biệt của từng MG, như các chỉ tiêu về kinh tế - kỹ thuật cũng như khả năng tải của các đường dây liên kết.

Bài báo đã bước đầu trình bày một phương pháp điều khiển tần số trong lưới IMG thông qua bộ điều khiển VSG nhằm gia tăng quán tính của hệ thống. Bài báo cũng đã tiến hành xây dựng các mô hình mô phỏng thành phần, qua đó xây dựng được mô hình mô phỏng cho một lưới IMG có ba lưới MG thành phần. Quá trình mô phỏng với các kích động bao gồm tăng một lượng lớn công suất tải cũng như giảm lượng lớn công suất tải trong lưới IMG ở chế độ tách đảo. Kết quả cho thấy, mô hình đề xuất duy trì được tần số ở mức danh định khi có các kích động công suất. Kết quả so sánh tần số lưới điện cũng cho thấy ưu điểm của bộ điều khiển VSG so với bộ điều khiển độ dốc truyền thống.

Dựa trên các kết quả bước đầu trong bài báo này, trong thời gian tới, nhóm nghiên cứu tiếp tục xây dựng các mô hình điều khiển tối ưu có xét tới các điều kiện ràng buộc nội bộ trong các MG riêng biệt, bao gồm các yếu tố liên quan tới thị trường điện.

### LỜI CẢM ƠN

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

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Z. Shuai, et al., "Microgrid stability: Classification and a review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 58, 167-179, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.201.
- [2]. S. N. V. Bramareswara Rao, et al., "Power Quality Improvement in Renewable-Energy-Based Microgrid Clusters Using Fuzzy Space Vector PWM Controlled Inverter," *Sustain.*, 14, 8, 2022. doi: 10.3390/su14084663.
- [3]. U. Markovic, O. Stanojevic, P. Aristidou, E. Vrettos, D. Callaway, G. Hug, "Understanding Small-Signal Stability of Low-Inertia Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, 36, 5, 3997-4017, 2021. doi: 10.1109/TPWRS.2021.3061434.
- [4]. J. Liu, Y. Miura, T. Ise, "Comparison of Dynamic Characteristics between Virtual Synchronous Generator and Droop Control in Inverter-Based Distributed Generators," *IEEE Trans. Power Electron.*, 31, 5, 3600-3611, 2016. doi: 10.1109/TPEL.2015.2465852.
- [5]. M. Ashabani, F. D. Freijedo, S. Golestan, J. M. Guerrero, "Inducverters: PLL-Less Converters With Auto-Synchronization and Emulated Inertia Capability," *IEEE Trans. Smart Grid*, 7, 3, 1660-1674, 2016. doi: 10.1109/TSG.2015.2468600.

[6]. Q. C. Zhong, G. Weiss, "Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58, 4, 1259-1267, 2011. doi: 10.1109/TIE.2010.2048839.

[7]. J. Meng, D. Wang, Y. Wang, F. Guo, J. Yu, "An improved damping adaptive grid-forming control for black start of permanent magnet synchronous generator wind turbines supported with battery energy storage system," *IET Gener. Transm. Distrib.*, 17, 2, pp. 354-366, 2023. doi: 10.1049/gtd2.12753.

[8]. H. Liu, B. Yang, S. Xu, M. Du, S. Lu, "Universal Virtual Synchronous Generator Based on Extended Virtual Inertia to Enhance Power and Frequency Response," *Energies*, 16, 7, 2023. doi: 10.3390/en16072983.

[9]. M. Farrokhabadi, et al., "Microgrid Stability Definitions, Analysis, and Examples," *IEEE Trans. Power Syst.*, 35, 1, 13-29, 2020. doi: 10.1109/TPWRS.2019.2925703.

[10]. M. Paolone, et al., "Fundamentals of power systems modelling in the presence of converter-interfaced generation," *Electr. Power Syst. Res.*, 189, no. June, 106811, 2020. doi: 10.1016/j.epsr.2020.106811.

[11]. F. Milano, F. Dorfler, G. Hug, D. J. Hill, G. Verbič, "Foundations and challenges of low-inertia systems (Invited Paper)," in *20th Power Syst. Comput. Conf. PSCC 2018*, 1-25, 2018. doi: 10.23919/PSCC.2018.8450880.

[12]. C. T. Binh, N. H. Son, N. B. Khang, P. H. Quang, M. V. Nghia, P. V. Cuong, "Frequency control of microgrid in autonomous mode via virtual synchronous generator with adjustable parameters," *Journal of Science and Technology, Hanoi University of Industry*, 59, 2A, 110-114, 2023. doi: 10.57001/huih5804.2023.050. (in Vietnamese)

[13]. J. M. Guerrero, M. Chandorkar, T. L. Lee, P. C. Loh, "Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids," Part I: Decentralized and Hierarchical Control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 60, 4, 1254-1262, 2013. doi: 10.1109/TIE.2012.2194969.

[14]. A. Bidram, S. Member, A. Davoudi, "Hierarchical Structure of Microgrids Control System," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1-14, 2012.

[15]. J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, P. Rodríguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27, 11, 4734-4749, 2012.

[16]. Y. Li, L. Fan, "Stability Analysis of Two Parallel Converters with Voltage-Current Droop Control," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32, 6, 2389-2397, 2017.

### AUTHORS INFORMATION

**Nguyen Van Hung<sup>1,2</sup>, Phan Hong Quang<sup>1</sup>, Nguyen Van Thanh<sup>1</sup>, Nguyen Duc Huy<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam

<sup>2</sup>School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam