

Xây dựng mô hình bộ biến đổi kết nối lưới điện sử dụng công nghệ tạo lưới

Nguyễn Quang Minh, Cao Thành Trung*, Hoàng Anh

Đại học Bách khoa Hà Nội, 1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam.

*Tác giả liên hệ: trung.caothanh@hust.edu.vn

Nhận bài: 05/9/2024; Hoàn thiện: 07/11/2024; Chấp nhận đăng: 15/11/2024; Xuất bản: 06/12/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2024.51-57>

TÓM TẮT

Hiện nay, bộ biến đổi nghịch lưu sử dụng công nghệ tạo lưới (Grid-Forming Inverter) đang thu hút sự quan tâm và đầu tư nghiên cứu trên toàn thế giới vì đây là bước tiến quan trọng hướng tới mục tiêu đạt được một xã hội 100% sử dụng năng lượng tái tạo. Tuy nhiên, kiến thức cơ bản về công nghệ này vẫn còn hạn chế. Bài báo này trình bày cấu trúc của hệ thống điều khiển cho bộ biến đổi nghịch lưu với công nghệ tạo lưới theo thiết kế đơn giản. Trước tiên, mô hình trạng thái tổng quát của hệ thống được xây dựng nhằm đánh giá tính ổn định. Sau đó, các thông số hoạt động của hệ thống được kiểm nghiệm, đồng thời hệ thống được mô phỏng trên phần mềm PSCAD để phân tích. Kết quả nghiên cứu sẽ làm rõ các khái niệm và cấu trúc của công nghệ tạo lưới, đồng thời đề xuất phương pháp đánh giá tính ổn định và cung cấp hướng dẫn sử dụng công cụ mô phỏng cho hệ thống này.

Từ khóa: Công nghệ tạo lưới; Điều khiển droop; Mô hình trạng thái; Ổn định hệ thống điện.

1. MỞ ĐẦU

Ngày nay, các nguồn năng lượng tái tạo ngày càng đóng vai trò quan trọng trong việc cung cấp điện năng cho lưới điện. Để tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo vào lưới điện, việc sử dụng các bộ biến đổi là rất cần thiết. Các bộ biến đổi này thường được điều khiển kết nối với lưới sử dụng hai phương pháp là công nghệ bám lưới và công nghệ tạo lưới [1].

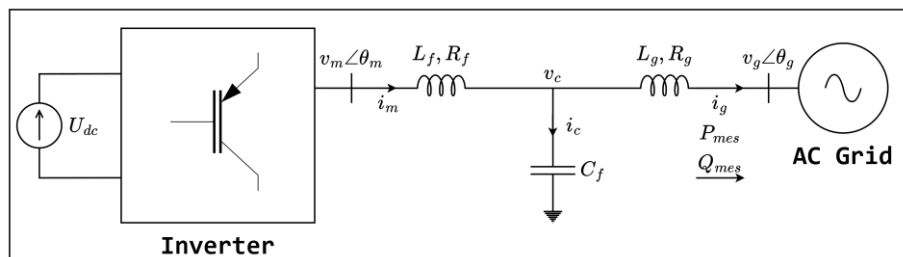
Đối với công nghệ bám lưới, nguồn điện sẽ có tính chất như một nguồn dòng, và ngược lại, công nghệ tạo lưới có tính chất như một nguồn áp [2]. Đối với bám lưới thông thường, một bộ khóa pha sẽ được sử dụng để giúp cho nguồn phát ra luôn có tần số và góc pha đồng bộ với lưới và công suất sẽ được điều khiển thông qua dòng điện [3]. Còn đối với tạo lưới, công suất sẽ được điều khiển thông qua bộ điều khiển droop, chủ động hỗ trợ lưới điện ổn định về mặt tần số.

Với sự đơn giản của công nghệ bám lưới, nó được ưa chuộng và sử dụng rộng rãi trong các nguồn năng lượng tái tạo ngày nay. Tuy nhiên, việc gia tăng tỉ trọng năng lượng tái tạo kết nối với lưới sử dụng công nghệ bám lưới sẽ làm ảnh hưởng rất nhiều tới sự ổn định của lưới điện [4]. Điều này xảy ra bởi các nguồn sử dụng bộ biến đổi sẽ không cung cấp quán tính cho hệ thống, điều mà các nguồn máy phát đồng bộ làm được. Chính vì thế, công nghệ tạo lưới với các khả năng hỗ trợ ổn định hệ thống điện là một giải pháp đang được tập trung nghiên cứu [5].

Điều khiển bộ biến đổi sử dụng công nghệ tạo lưới có độ phức tạp rất lớn, các tham số điều khiển cần phải được tính toán chính xác để hệ thống có thể hoạt động ổn định. Cấu trúc cơ bản của phương pháp điều khiển sử dụng công nghệ tạo lưới được trình bày trong [6]. Trong bài báo này, mô hình của hệ thống sử dụng công nghệ tạo lưới và mô hình trạng thái của nó sẽ được xây dựng ở chương 2. Ở chương 3, bộ tham số điều khiển sẽ được tìm ra thông qua quá trình phân tích tích ổn định sử dụng mô hình trạng thái tìm được ở chương 2. Tiếp theo, hệ thống sẽ được mô phỏng trên phần mềm PSCAD và kết quả sẽ được bàn luận ở chương 4. Cuối cùng là kết luận sẽ được trình bày ở chương 5.

2. NỘI DUNG CẢN GIẢI QUYẾT

2.1. Xây dựng mô hình điều khiển



Hình 1. Sơ đồ kết nối lưới điện.

Hình trên thể hiện sơ đồ kết nối giữa bộ biến đổi nghịch lưu và lưới điện. Trong hệ thống này, nguồn điện một chiều được chuyển đổi thành điện áp xoay chiều ba pha thông qua bộ biến đổi nghịch lưu. Dòng điện này sẽ thông qua bộ lọc để lọc các sóng hài và nhiễu cao tần sinh ra bởi bộ biến đổi nghịch lưu. Cuối cùng, dòng điện sẽ đi qua đường dây truyền tải rồi nối với lưới điện.

Trong nghiên cứu này, sơ đồ mạch của bộ chuyển đổi nguồn áp hai mức, ba pha. Cấu trúc của bộ chuyển đổi rất linh hoạt, có thể hoạt động như một bộ nghịch lưu (inverter) hoặc bộ chỉnh lưu (rectifier). Dòng năng lượng trong mạch bộ chuyển đổi là hai chiều, cho phép năng lượng truyền từ phía DC sang phía AC và ngược lại.

Các đại lượng cũng như chiều quy ước đã được thể hiện trong hình. Trong phần này, sơ đồ tín hiệu điều khiển cho bộ biến đổi nghịch lưu theo công nghệ tạo lưới sẽ được trình bày. Ngoài ra, trong sơ đồ này, nguồn một chiều và bộ biến đổi nghịch lưu có thể được coi là một nguồn xoay chiều. Từ đó, sơ đồ có thể được biểu diễn thông qua sáu phương trình động học sau:

$$\frac{L_f}{\omega_b} \frac{di_{md}}{dt} = v_{md} - v_{cd} - R_f i_{md} + \omega_0 L_f i_{mq} \quad (1)$$

$$\frac{L_f}{\omega_b} \frac{di_{mq}}{dt} = v_{mq} - v_{cq} - R_f i_{mq} - \omega_0 L_f i_{md} \quad (2)$$

$$\frac{L_g}{\omega_b} \frac{di_{gd}}{dt} = v_{cd} - V_g \cos \theta - R_g i_{gd} + \omega_0 L_g i_{gq} \quad (3)$$

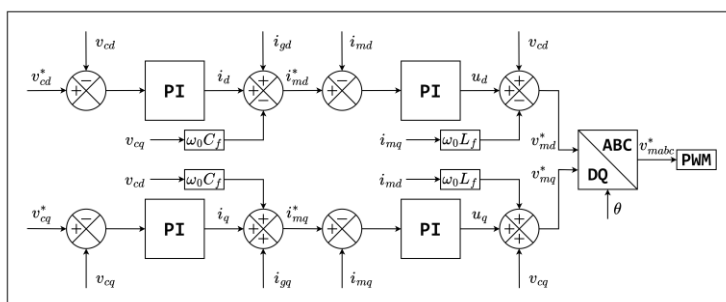
$$\frac{L_g}{\omega_b} \frac{di_{gq}}{dt} = v_{cq} + V_g \sin \theta - R_g i_{gq} - \omega_0 L_g i_{gd} \quad (4)$$

$$\frac{C_f}{\omega_b} \frac{dv_{cd}}{dt} = i_{md} - i_{gd} + \omega_0 C_f v_{cq} \quad (5)$$

$$\frac{C_f}{\omega_b} \frac{dv_{cq}}{dt} = i_{mq} - i_{gq} - \omega_0 C_f v_{cd} \quad (6)$$

2.1.1. Điều khiển vòng trong

Từ phương trình (1), (2), (5) và (6), ta xây dựng được mô hình điều khiển vòng bên trong như sau:



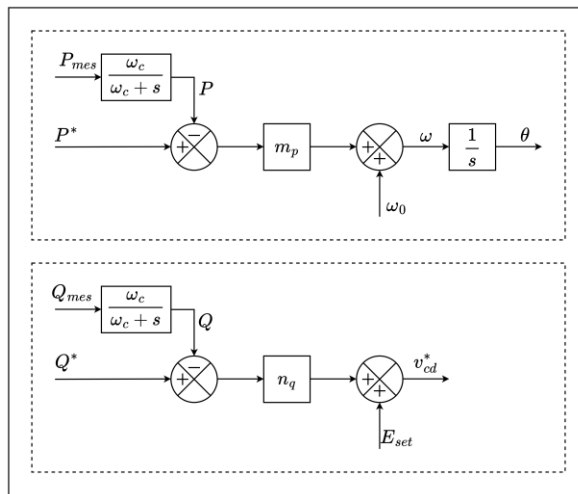
Hình 2. Sơ đồ tín hiệu điều khiển vòng trong.

Trong đó, bốn bộ điều khiển tỉ lệ - tích phân (PI) đã được sử dụng để điều khiển điện áp, dòng

điện trên trục d và trục q. Các đầu vào của vòng điều khiển này sẽ là tín hiệu điện áp tham chiếu và góc pha được lấy từ quá trình điều khiển vòng ngoài.

2.1.2. Điều khiển vòng ngoài

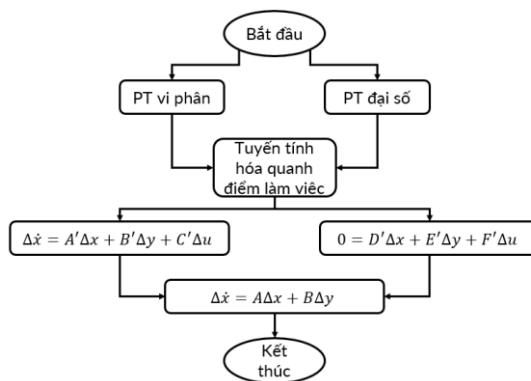
Điều khiển Droop, với các nguyên lý đã được khẳng định trong việc quản lý các máy phát đồng bộ, cũng hoàn toàn có thể áp dụng hiệu quả cho bộ biến đổi nghịch lưu theo công nghệ tạo lưới [7]. Bằng cách áp dụng điều khiển Droop cho các bộ biến đổi nghịch lưu sử dụng công nghệ tạo lưới, chúng có thể mô phỏng hành vi của các máy phát đồng bộ, cung cấp các chức năng quan trọng như chia sẻ tải và ổn định tần số mà không cần các hệ thống liên lạc phức tạp. Trong nghiên cứu này, bộ lọc thông thấp sẽ được sử dụng để giảm thiểu các thay đổi nhanh chóng của tần số lưới và loại bỏ nhiễu trong quá trình đo lường. Hình 3 thể hiện sơ đồ tín hiệu của vòng điều khiển bên ngoài được sử dụng.



Hình 3. Sơ đồ điều khiển vòng ngoài.

2.2. Xây dựng mô hình trạng thái

Từ mô hình điều khiển bên trên, ta sẽ xây dựng mô hình trạng thái theo lưu đồ trong hình 4.



Hình 4. Lưu đồ tìm ma trận trạng thái.

Bước 1, ta cần biểu diễn toàn bộ mối quan hệ của các đại lượng trong hệ thống. Các phương trình này sẽ được chia thành 2 nhóm là nhóm các phương trình vi phân và nhóm các phương trình đại số.

Bước 2, ta sẽ tuyến tính hóa các phương trình trên quanh điểm làm việc để xuất hiện biến chênh

lệch. Từ đó, ta sẽ có được hệ các phương trình vi phân và phương trình đại số đã được tuyến tính hóa.

Bước 3, từ hệ phương trình vi phân tuyến tính, ta suy ra được phương trình ma trận sau:

$$\Delta \dot{x} = A' \Delta x + B' \Delta y + C' \Delta u \quad (7)$$

Và từ các phương trình đại số tuyến tính, ta suy ra được phương trình ma trận:

$$0 = D' \Delta x + E' \Delta y + F' \Delta u \quad (8)$$

Bước 4, từ phương trình (10) và (11), ta xác định được mô hình trạng thái:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta y \quad (9)$$

Với các ma trận A, B được xác định như sau:

$$A = A' - B'(E')^{-1}D' \quad (10)$$

$$B = C' - B'(E')^{-1}F' \quad (11)$$

Cuối cùng, ta thu được ma trận A với kích thước 13x13. Ma trận sẽ được sử dụng để phân tích tính ổn định trong chương tiếp theo.

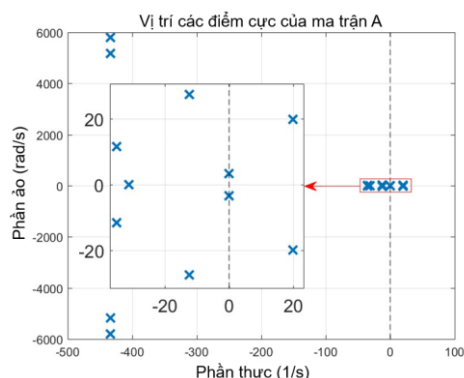
3. PHÂN TÍCH TÍNH ỔN ĐỊNH

Hệ thống được chọn có các tham số được thể hiện trong bảng 1. Ngoài ra, các tham số của bộ điều khiển cũng được tính toán sơ bộ và thể hiện trong bảng bên dưới.

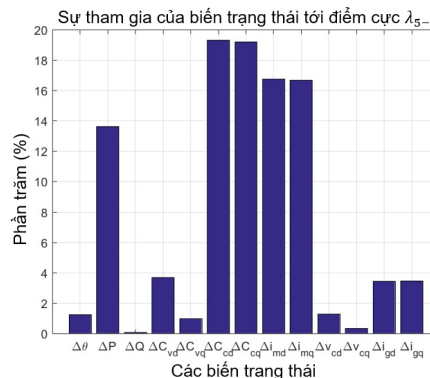
Bảng 1. Tham số đầu vào của hệ thống.

Tham số	Giá trị	Đơn vị	Tham số	Giá trị	Đơn vị
U_{dc}	1.45	kV	f	50	Hz
U_{ac}	0.69	kV	L_f	0.1137	mH
S_{base}	2	MVA	C_f	882	μF
P	0.8	MW	L_g	0.039	mH
m_p	0.07	pu	K_{pc}	0.4001	pu
n_q	0.001	pu	K_{ic}	171.88	pu
K_{pv}	0.017	pu	ω_c	31.4	Rad/s
K_{iv}	0.75	pu			

Sử dụng mô hình trạng thái đã tính ở chương trước, ta có thể xác định các giá trị riêng khi sử dụng bộ tham số bên trên. Hình 5 thể hiện vị trí các điểm cực trên đồ thị trục thực và trục ảo. Hình cho thấy vẫn có 2 điểm cực nằm phía bên phải trục ảo. Điều này đồng nghĩa với việc hệ thống vẫn chưa ổn định và các tham số cần được điều chỉnh.

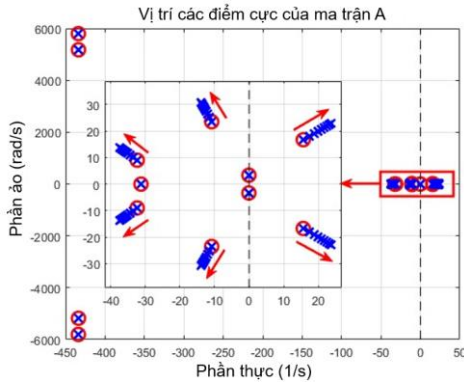


Hình 5. Vị trí các điểm cực.

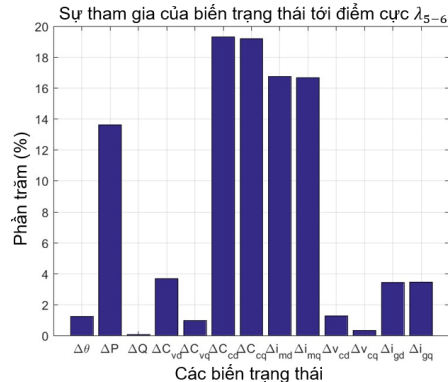


Hình 6. Sự tham gia của các biến trạng thái.

Tiếp theo, sự tham gia của các biến trạng thái lên các điểm cực nằm phía bên phải trục ảo sẽ được phân tích. Kết quả được thể hiện ở hình 6 cho thấy các biến trạng thái có ảnh hưởng nhiều nhất tới vị trí 2 điểm cực trên tương ứng với hàng số 2, 6, 7, 8, 9 của ma trận A. Nhờ đó, ta xác định được các tham số cần thay đổi chủ yếu là các tham số của bộ điều khiển. Tham số của các bộ biến đổi xe được phân tích độ nhạy, nghĩa là thay đổi theo các bước nhỏ và quan sát sự thay đổi của các điểm cực. Độ nhạy khi thay đổi giá trị m_p được thể hiện trong hình 7 và các giá trị khác được thực hiện tương tự.



Hình 7. Phân tích độ nhạy khi thay đổi m_p .



Hình 8. Vị trí của các điểm cực cuối cùng.

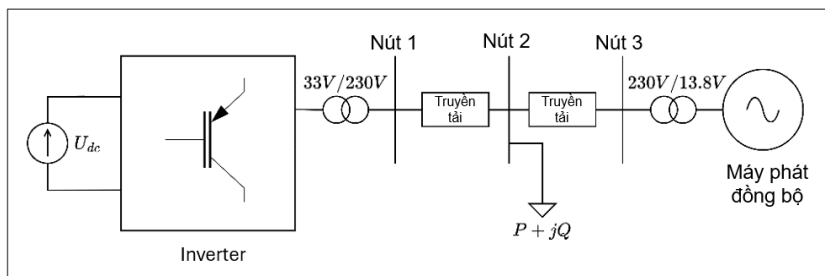
Cuối cùng, các tham số của bộ điều khiển được lựa chọn sao cho toàn bộ các điểm cực nằm ở phía bên trái trục ảo như hình 8 và ta thu được các tham số mới như trong bảng 2.

Bảng 2. Tham số điều khiển cuối cùng.

Tham số	Giá trị	Đơn vị	Tham số	Giá trị	Đơn vị
m_p	0.08	pu	K_{pc}	0.73	pu
n_q	0.001	pu	K_{ic}	1.19	pu
K_{pv}	0.52	pu	ω_c	31.4	Rad/s
K_{iv}	1.16	pu			

4. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ

4.1. Phương pháp, công cụ mô phỏng



Hình 9. Sơ đồ mô phỏng.

Sơ đồ trong hình 9 thể hiện cấu trúc của hệ thống được mô phỏng gồm có 3 nút chính. Nút đầu tiên là nguồn thông qua bộ biến đổi, nút thứ 2 là tải tiêu thụ và nút cuối cùng là máy phát đồng bộ được mô phỏng như một nhà máy thủy điện.

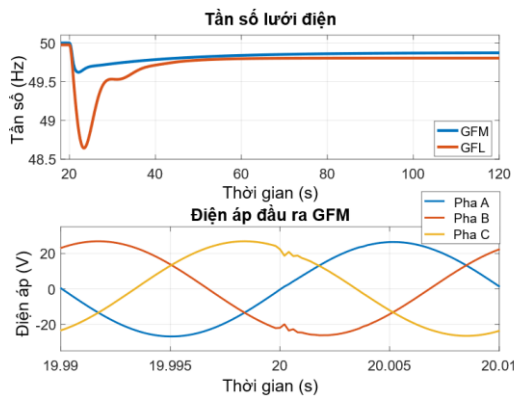
Phần mềm mô phỏng được sử dụng là PSCAD, một công cụ rất tiện ích cho việc mô phỏng hệ thống điện, đặc biệt là khi cần mô phỏng các phương pháp điều khiển. Hệ thống được mô phỏng tương đồng với các sơ đồ đã được đưa ra ở trên.

4.2. Kết quả mô phỏng và bình luận

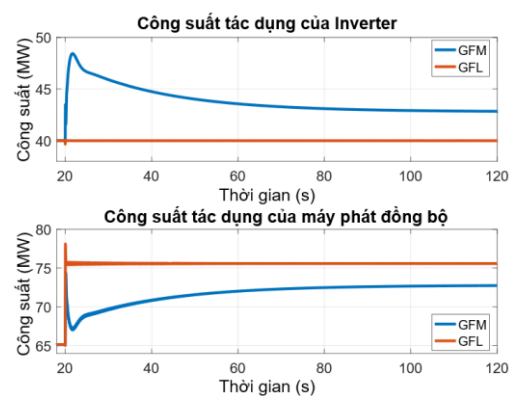
Hệ thống sẽ được mô phỏng trong trường hợp sự cố quá tải xảy ra. Ở giây thứ 20, công suất tiêu thụ tăng 10% so với định mức. Tổng công suất tiêu thụ tăng từ 105 MW lên 115.5 MW. Công suất tác dụng phát ra bởi nguồn điện sử dụng bộ biến đổi và máy phát thủy điện được thể hiện trong hình 11. Trong đó, đường màu xanh đại diện cho hệ thống sử dụng công nghệ tạo lưới và đường màu đỏ đại diện cho hệ thống sử dụng công nghệ bám lưới.

Dựa trên đồ thị công suất, ta có thể thấy công suất tác dụng được phát ra bởi các nguồn sử dụng bộ biến đổi đã tăng từ 40 MW lên khoảng 48 MW khi sử dụng công nghệ tạo lưới để bù cho lượng công suất thiếu hụt do sự cố. Điều này xảy ra nhờ có vòng điều khiển Droop công suất tác dụng ở vòng ngoài. Trong khi đó, công suất tác dụng phát ra khi sử dụng công nghệ bám lưới vẫn giữ nguyên ở 40 MW trong suốt quá trình sự cố xảy ra bởi hệ thống này chưa có hệ thống điều khiển để bù công suất. Công suất phát ra bởi hệ thống sử dụng công nghệ tạo lưới giảm dần về giá trị đặt trong khoảng thời gian sau đó.

Đồ thị còn lại trong hình 11 thể hiện công suất tác dụng phát ra bởi máy phát thủy điện. Đồ thị cho thấy mô hình máy phát thủy điện đã đáp ứng được việc phát ra công suất bù cho lượng thiếu hụt do sự cố xảy ra. Từ 65 MW, lượng công suất tác dụng đã tăng ngay lập tức lên khoảng 76 MW. Dựa vào tốc độ tăng này, ta có thể thấy lượng quán tính mà máy phát đồng bộ cung cấp cho hệ thống là nhiều hơn so với lượng mà bộ biến đổi sử dụng công nghệ tạo lưới đem lại. Lượng công suất mà máy phát thủy điện này luôn thay đổi phù hợp với sự thay đổi của công suất phát ra bởi nguồn điện còn lại.



Hình 10. Tần số lưới và điện áp sau sự cố.



Hình 11. Công suất tác dụng sau sự cố.

Tiếp theo, tần số lưới và điện áp đầu ra được thể hiện trong hình 10. Tuy nhiên, điện áp đầu ra chỉ được thể hiện trong trường hợp sử dụng công nghệ tạo lưới. Điều này là bởi vì điện áp đầu ra không có nhiều thay đổi khi sự cố xảy ra ở cả 2 trường hợp. Chúng cũng thể hiện rằng điện áp đã được điều khiển tốt. Còn đối với đồ thị tần số, ta có thể thấy rằng ở trường hợp sử dụng công nghệ tạo lưới là đường màu xanh, nhờ có lượng công suất bù ra bởi quá trình điều khiển Droop công suất tác dụng mà tần số của lưới điện đã sụt chậm hơn rất nhiều so với khi sử dụng công nghệ bám lưới (đường màu đỏ). Tần số khi sử dụng công nghệ tạo lưới chỉ sụt xuống giá trị thấp nhất là khoảng 49.6 Hz, và sau đó phục hồi về khoảng 49.8 Hz. Trong khi đó, ở trường hợp còn lại, tần số sụt xuống khoảng 48.7 Hz và sau đó chỉ phục hồi được về khoảng 49.8 Hz.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng được mô hình điều khiển cũng như tìm được mô hình trạng thái của hệ thống sử dụng công nghệ tạo lưới. Đồng thời, bài báo cũng đã mô phỏng được hệ thống sử dụng công cụ PSCAD. Các kết quả của bài báo cho thấy rằng, hệ thống đã ổn định với các tham số điều

khuyến chọn được. Hiệu quả của công nghệ tạo lưới trong việc ổn định tần số lưới điện cũng được thể hiện khi so sánh với công nghệ băm lưới.

Trong nghiên cứu này, các tham số điều khiển mới chỉ được tính toán sao cho hệ thống ổn định. Chính vì thế, việc tính chọn bộ tham số điều khiển tối ưu cần được xem xét ở các nghiên cứu tiếp theo. Bên cạnh đó, các nguồn năng lượng tái tạo cũng cần được tích hợp vào hệ thống thay vì sử dụng nguồn một chiều đơn thuần. Cuối cùng, hệ thống cần được đánh giá khi kết nối với một mạng lưới điện tiêu chuẩn gồm nhiều nút hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg and P. Rodríguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 11, pp. 4734-4749, (2012).
- [2]. B. Pawar, E. I. Batzelis, S. Chakrabarti and B. C. Pal, "Grid-Forming Control for Solar PV Systems With Power Reserves," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 12, no. 4, pp. 1947-1959, (2021).
- [3]. H. Zhang, W. Xiang, W. Lin and J. Wen, "Grid Forming Converters in Renewable Energy Sources Dominated Power Grid: Control Strategy, Stability, Application, and Challenges," Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 9, no. 6, pp. 1239-1256, (2021).
- [4]. Rathnayake, D. B., Akrami, M., Phurailatpam, C., Me, S. P., Hadavi, S., Jayasinghe, G., Zabihi, S., & Bahrani, B., "Grid Forming Inverter Modeling, Control, and Applications," IEEE Access, vol. PP, pp. 1-1, (2021).
- [5]. P. Piya, M. Ebrahimi, M. Karimi-Ghartemani and S. A. Khajehoddin, "Fault Ride-Through Capability of Voltage-Controlled Inverters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 10, pp. 7933-7943, (2018).
- [6]. Qoria Taoufik, Quentin Cossart, Chuanyue Li, François Gruson, Frédéric Colas, Xavier Kestelyn, Xavier Guillaud, "D3.2 - Local control and simulation tools for large transmission systems," (2018).
- [7]. Q. -C. Zhong and G. Weiss, "Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 4, pp. 1259-1267, (2011).

ABSTRACT

Modeling of grid-connected inverter using grid-forming technology

Currently, grid-forming inverter technology is attracting attention and research investment worldwide, as it represents a critical step toward achieving a society powered entirely by renewable energy. However, foundational knowledge of this technology remains limited. This paper presents the control system structure for a grid-forming inverter with a simple design approach. First, a general state-space model of the system is developed to assess stability. Then, the system's operational parameters are verified, and simulations are conducted on PSCAD software for further analysis. The results clarify the key concepts and structure of grid-forming technology, propose a method for stability assessment, and provide guidance on utilizing simulation tools for this system.

Keywords: Grid-forming; Droop control; State-space model; Power system stability.