

# ĐIỀU KHIỂN CÔNG SUẤT TRONG MICROGRID BẰNG PHƯƠNG PHÁP TRỞ KHÁNG ẢO CẢI TIẾN

Lương Tấn Nhật, Lê Khắc Sinh, Phạm Thị Xuân Hoa\*

Trường Đại học Công Thương Thành phố Hồ Chí Minh

\*Email: hoaptx@huit.edu.vn

Ngày nhận bài: 05/12/2022; Ngày chấp nhận đăng: 01/3/2023

## TÓM TẮT

Trong bài này đã đề xuất một phương pháp nhằm tăng độ chính xác của việc chia sẻ công suất phản kháng cho các bộ nghịch lưu mắc song song trong microgrid, phương pháp này được thực hiện bằng cách tự động điều chỉnh các giá trị của trở kháng ảo để điều chỉnh điện áp đầu ra của bộ nghịch lưu. Các trở kháng ảo được tự động điều chỉnh để bù cho sự khác biệt về điện áp đầu ra của các bộ nghịch lưu do ảnh hưởng của trở kháng đường dây. Điện áp đầu ra của bộ nghịch lưu sẽ được điều chỉnh thích ứng theo sự thay đổi của tải, phương pháp này giúp cải thiện đáng kể độ chính xác trong việc chia sẻ công suất phản kháng cho các bộ nghịch lưu, đảm bảo sự ổn định của điện áp và tần số trong microgrid. Phương pháp điều khiển đơn giản và không cần biết thông số trở kháng đường dây. Tính khả thi và hiệu quả của phương pháp đề xuất được chứng minh bằng các kết quả mô phỏng.

*Từ khóa:* Trở kháng ảo, chia sẻ công suất, điều khiển điện áp, bộ nghịch lưu kết nối song song.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Microgrid bao gồm một hệ thống các nguồn phát điện phân tán (distributed generation -DG), sử dụng các nguồn năng lượng tái tạo như năng lượng mặt trời, năng lượng gió và ắc quy lưu trữ. Microgrid cho phép các DG hoạt động ở chế độ độc lập hoặc được chia thành lưới. Tuy nhiên, vấn đề điều khiển các Microgrids độc lập vẫn còn nhiều thách thức, chẳng hạn như khó khăn trong việc duy trì cân bằng công suất và chia sẻ công suất phản kháng. Khi một Microgrid đang hoạt động ở chế độ độc lập, mỗi thiết bị DG có thể cung cấp năng lượng tương ứng với công suất định mức của nó, để đạt được điều này, các kỹ thuật điều khiển droop tần số và droop điện áp giảm được sử dụng. Mặc dù kỹ thuật droop tần số P/f có thể đạt được sự chia sẻ công suất chính xác, nhưng kỹ thuật điện áp droop Q/V thường cho kết quả không chính xác trong việc chia sẻ công suất phản kháng do sự khác biệt về trở kháng của các đơn vị DG và cũng do sự khác biệt về công suất định mức của các đơn vị DG. Đã có một số nghiên cứu cải tiến phương pháp droop để loại bỏ ảnh hưởng của trở kháng đường dây đối với việc chia sẻ năng lượng cho các bộ nghịch lưu được kết nối song song trong Microgrid [1-7].

Trong trường hợp tổng quát (trở kháng đường dây có cả X và R), có các nghiên cứu về droop tổng quát, các nghiên cứu này sử dụng phương pháp biến đổi hệ trục tọa độ ảo để chuyển đổi về một trong hai dạng: Droop P'/f và Q'/V hoặc Droop P'/V và Q'/f. Phương pháp này có ưu điểm là thực hiện đơn giản, linh hoạt, điều chỉnh điện áp và tần số thông qua điều chỉnh cả công suất tác dụng và phản kháng nên thực tế hơn và cho đáp ứng động tốt hơn so với phương pháp Droop truyền thống. Nhược điểm chính của phương pháp này là bị ảnh hưởng bởi các tham số dòng và tham số cần biết đầu tiên là tham số dòng [1, 2].

Một số nghiên cứu đã đề xuất điều khiển Droop kết hợp với trở kháng ảo để cải thiện việc chia sẻ công suất tác dụng và phản kháng [3-6], trở kháng ảo cho phép điều chỉnh điện áp đầu ra tham chiếu của biến tần dựa trên dòng điện đầu ra phản hồi nhân với trở kháng ảo. Tuy nhiên, trong phương pháp này cần phải biết trước thông số trở kháng đường dây để chọn trở kháng ảo.

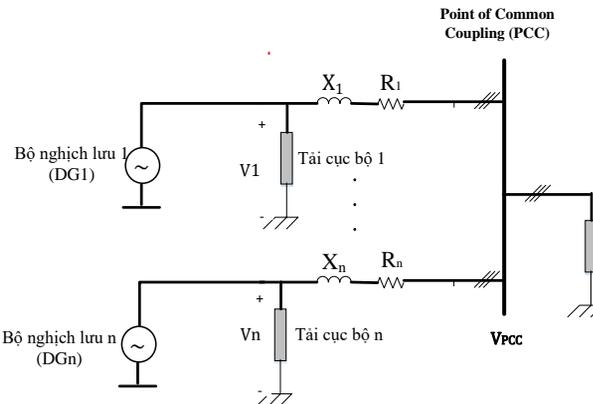
Một nghiên cứu gần đây đã được trình bày trong bài báo [8], trong đó trình bày tổng quan về các chiến lược điều khiển chia sẻ công suất phản kháng khác nhau cho các DG trong Microgrid độc lập. Những ưu điểm và nhược điểm của các chiến lược điều khiển chia sẻ công suất đã được so sánh để đánh

giá ưu và nhược điểm của chúng. Kết quả phân tích so sánh này cho thấy rằng tất cả các phương pháp mới đều cải thiện kỹ thuật cổ điển, hiệu suất của các phương pháp này thay đổi đáng kể. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng cho thấy các phương pháp này gặp phải một số vấn đề như độ nhạy cao đối với các tham số trở kháng đường truyền trong microgrid. Ngoài ra, quá trình điều chỉnh và độ ổn định của hệ thống bị ảnh hưởng rất nhiều bởi tham số của bộ điều khiển. Kết quả chính của sự so sánh này là các phương pháp mới đều là những cải tiến so với kỹ thuật droop truyền thống, nhưng các thông số có tác động lớn đến hiệu suất của phương pháp. Trong số đó, phương pháp điều khiển dựa trên kỹ thuật droop đã được sử dụng rộng rãi để điều khiển P/f trong các ứng dụng thực tế nhờ hiệu quả tốt của nó. Tuy nhiên, việc áp dụng kỹ thuật droop để chia sẻ công suất phản kháng có một số nhược điểm như chia sẻ công suất phản kháng không chính xác, tiềm ẩn mất ổn định do tuần hoàn công suất phản kháng. Do đó, vấn đề thiết kế bộ điều khiển Q/V hiệu quả để điều chỉnh điện áp và chia sẻ công suất phản kháng cho lưới điện siêu nhỏ vẫn là một bài toán mở cần được tiếp tục nghiên cứu và tìm hiểu.

Trong bài này, một bộ điều khiển droop kết hợp với trở kháng ảo thích ứng được đề xuất, trong đó các giá trị điện trở và điện kháng của khối trở kháng ảo thích ứng được tự động điều chỉnh để thích ứng với độ lệch của trở kháng đường truyền từ bộ nghịch lưu đến điểm ghép nối chung (Point of common coupling - PCC). Khi đó điện áp đầu ra của các bộ nghịch lưu cũng được điều chỉnh tương ứng để bù lại sự sai lệch đó. Phương pháp điều khiển đơn giản và không cần biết các tham số của trở kháng đường dây, phương pháp này giúp cải thiện đáng kể độ chính xác của việc chia sẻ công suất phản kháng. Việc chia sẻ công suất chính xác cho các bộ nghịch lưu sẽ đảm bảo sự ổn định của điện áp và tần số trong microgrid.

Phương pháp đề xuất trong bài này có thể loại bỏ những nhược điểm của phương pháp trở kháng ảo thông thường.

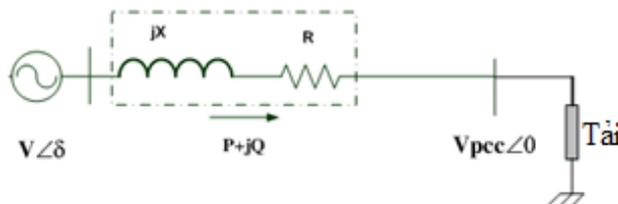
Trọng tâm của bài viết này là cải thiện độ chính xác của việc chia sẻ công suất và chỉ các tải tuyến tính được xem xét.



Hình1. Microgrid bao gồm n bộ nghịch lưu được kết nối song song thông qua một bus AC chung

## 2. BỘ ĐIỀU KHIỂN ĐỀ XUẤT

### 2.1. Phương pháp droop truyền thống



Hình 2. Sơ đồ tương đương của bộ nghịch lưu kết nối với tải

Theo Hình 2, công suất tác dụng và phản kháng do bộ nghịch lưu cung cấp được tính như sau:

$$P = \frac{V}{R^2 + X^2} [R(V - V_{PCC} \cos \delta) + XV_{PCC} \sin \delta] \quad (1)$$

$$Q = \frac{V}{R^2 + X^2} [-RV_{PCC} \sin \delta + X(V - V_{PCC} \cos \delta)] \quad (2)$$

Khi góc  $\delta$  nhỏ và  $X \gg R$ , phương trình (1) và (2) được viết lại như sau:

$$\delta \cong \frac{XP}{VV_{PCC}} \quad (3)$$

$$V - V_{PCC} \cong \frac{XQ}{V} \quad (4)$$

Biểu thức (3) và (4) cho thấy rằng tần số phụ thuộc vào công suất tác dụng  $P$  và độ lệch điện áp phụ thuộc vào công suất phản kháng  $Q$ . Từ biểu thức (3) và (4), chúng ta có thể kết luận rằng điện áp được điều khiển bởi  $Q$  và tần số là do  $P$  điều khiển. Do đó, đặc tính droop  $P/f$  và  $Q/V$  được sử dụng theo biểu thức (5), (6):

$$\omega = \omega_0 - m_p P \quad (5)$$

$$V = V_0 - m_q Q \quad (6)$$

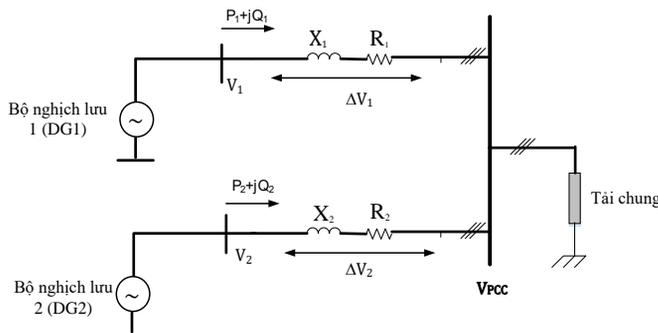
Theo tài liệu [2], hệ số độ dốc  $m_p$  và  $m_q$  được chọn theo độ lệch điện áp và tần số cho phép so với định mức:

$$m_p = \frac{\omega_0 - \omega_{\min}}{P_{\max}} ; m_q = \frac{V_0 - V_{\min}}{Q_{\max}} \quad (7)$$

Phương trình (1) và (2) chỉ ra rằng một sự thay đổi rất nhỏ trong trở kháng đường dây sẽ có tác động rất lớn đến công suất phát ra của bộ nghịch lưu. Kết quả phân tích và mô phỏng trong nghiên cứu [5] cho thấy trở kháng của đường dây cáp hay trở kháng của đường dây trên không ít ảnh hưởng đến công suất truyền của một bộ nghịch lưu riêng biệt nhưng lại có tác động lớn đến nhiều bộ nghịch lưu kết nối song song trong microgrid. Trong thực tế, microgrid bao gồm các bộ nghịch lưu được kết nối song song và kết nối với tải thông qua một đường dây dài, rõ ràng trở kháng đường dây ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng điều khiển của hệ thống và có thể dẫn đến mất ổn định hệ thống, sụt áp bởi các trở kháng gây ra sai lệch trong điều khiển công suất đầu ra của bộ nghịch lưu. Các nghiên cứu [1-15] đã cho thấy khi tất cả các bộ nghịch lưu kết nối song song đang hoạt động ở cùng tần số ở trạng thái ổn định, trở kháng đường dây không ảnh hưởng đáng kể đến việc chia sẻ công suất tác dụng, nhưng trở kháng đường dây ảnh hưởng đáng kể đến việc chia sẻ công suất phản kháng giữa các bộ nghịch lưu. Điều quan trọng là nếu các bộ nghịch lưu có công suất định mức khác nhau, thì trở kháng đường dây phải được điều chỉnh tỷ lệ nghịch với công suất định mức tương ứng của các bộ nghịch lưu, khi đó việc chia sẻ công suất mới đạt được chính xác. Nhưng hạn chế của kỹ thuật này là cần phải biết thông số trở kháng đường dây, mà thông số trở kháng đường dây thường không có sẵn.

Vì vậy, bài này sẽ đề xuất giải pháp bù sai lệch tổng trở đường dây bằng cách sử dụng một tổng trở ảo gồm  $X_v$  và  $R_v$ , trong đó  $X_v$  và  $R_v$  có thể điều chỉnh được, khi đó độ lệch tổng trở đường dây sẽ được điều chỉnh cho sự chia sẻ công suất trở nên chính xác. Phương pháp này không cần biết trở kháng đường dây.

Giả sử có hai bộ nghịch lưu được kết nối song song và chúng có sơ đồ mạch như trong Hình 3.



Hình 3. Mạch tương đương của microgrid với hai bộ nghịch lưu mắc song song

Từ Hình 3, điện áp rơi trên trở kháng đường dây 1 và 2 có thể được viết như sau:

$$\Delta V_1 = \frac{P_1 R_1 + Q_1 X_1}{V_0} \quad (8)$$

$$\Delta V_2 = \frac{P_2 R_2 + Q_2 X_2}{V_0} \quad (9)$$

$$V_1 = V_{pcc} + \Delta V_1 \quad (10)$$

$$V_2 = V_{pcc} + \Delta V_2 \quad (11)$$

Các phương trình (8) đến (11) đã chỉ ra điều kiện chia sẻ công suất đúng cho các bộ nghịch lưu là:

$$\Delta V_1 = \Delta V_2$$

Hay nói cách khác, điều kiện chia sẻ công suất đúng cho các bộ nghịch lưu là:

$$\begin{cases} P_1 R_1 = P_2 R_2 \\ Q_1 X_1 = Q_2 X_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{P_2}{P_1} = \frac{R_1}{R_2} \\ \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{X_1}{X_2} \end{cases} \quad (12)$$

Giả sử rằng, ta gọi sự khác biệt về trở kháng đường dây giữa hai bộ nghịch lưu là:

$$\Delta X = X_1 - X_2$$

$$\Delta R = R_1 - R_2$$

### Trường hợp 1:

Nếu bộ nghịch lưu 1 và bộ nghịch lưu 2 có cùng công suất định mức

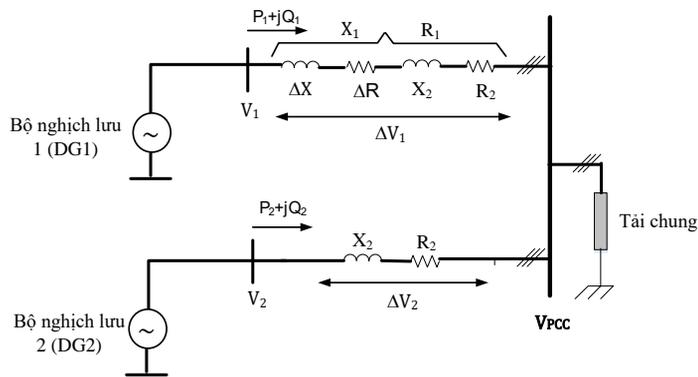
$P_{1dm} = P_{2dm}$  thì điều kiện chia sẻ công suất đúng cho hai bộ nghịch lưu là:

$$\begin{cases} R_1 = R_2 \\ X_1 = X_2 \end{cases}$$

Điều đó có nghĩa là trở kháng của hai đường phải giống nhau và  $\Delta R = 0, \Delta X = 0$

### Trường hợp 2:

Nếu bộ nghịch lưu 1 và bộ nghịch lưu 2 có công suất định mức khác nhau (Hình 4)



Hình 4. Mạch tương đương của microgrid với hai bộ nghịch lưu khác nhau

$P_{2dm} = 2P_{1dm}$  thì điều kiện chia sẻ công suất đúng cho các bộ nghịch lưu là:

$$\begin{cases} R_1 = 2R_2 \\ X_1 = 2X_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta R = R_2 \\ \Delta X = X_2 \end{cases}$$

Và đồng thời các hệ số droop  $m_p$  và  $m_q$  phải được chọn sao cho:

$$\begin{cases} m_{p1} = 2m_{p2} \\ m_{q1} = 2m_{q2} \end{cases}$$

Khi đó thì sẽ cho kết quả chia công suất như sau:

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 \Rightarrow V_1 = V_2 \Rightarrow Q_2 = 2Q_1 \text{ và } P_2 = 2P_1$$

Điều đó có nghĩa là điều kiện để chia sẻ công suất chính xác giữa các bộ nghịch lưu là trở kháng đường dây phải tỷ lệ nghịch với công suất định mức của các bộ nghịch lưu tương ứng.

**Trường hợp tổng quát:**

Nếu bộ nghịch lưu 1 và bộ nghịch lưu 2 có công suất định mức khác nhau  $P_{2dm} = nP_{1dm}$  thì điều kiện chia sẻ công suất đúng cho các bộ nghịch lưu là:

$$\begin{cases} R_1 = nR_2 \\ X_1 = nX_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta R = (n-1)R_2 \\ \Delta X = (n-1)X_2 \end{cases}$$

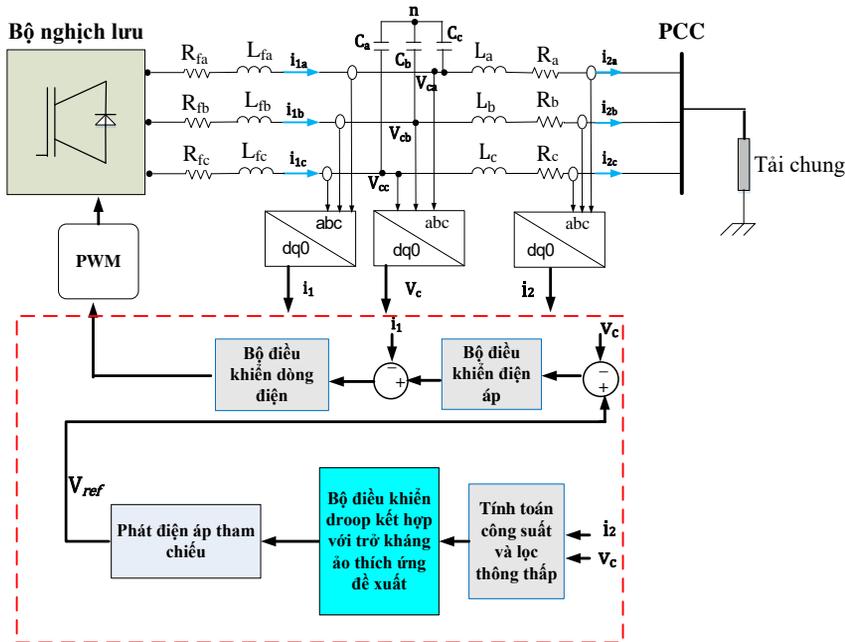
Và đồng thời các hệ số droop  $m_p$  và  $m_q$  phải được chọn sao cho:

$$\begin{cases} m_{p1} = n m_{p2} \\ m_{q1} = n m_{q2} \end{cases}$$

Khi đó thì sẽ cho kết quả chia công suất như sau:

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 \Rightarrow V_1 = V_2 \Rightarrow Q_2 = nQ_1 \text{ và } P_2 = nP_1$$

Để xây dựng hệ thống điều khiển chia công suất cho các bộ nghịch lưu kết nối song song trong microgrid, trước tiên cần phải xây dựng mô hình điều khiển công suất cho một bộ nghịch lưu trong microgrid.



Hình 5. Sơ đồ khối của bộ điều khiển đề xuất cho một bộ nghịch lưu

Sơ đồ khối của mô hình điều khiển công suất cho một bộ nghịch lưu được thể hiện ở Hình 5 gồm có:

- Vòng điều khiển bên ngoài là vòng điều khiển công suất droop kết hợp với trở kháng ảo thích ứng được đề xuất để điều khiển công suất phát của các nguồn (các bộ nghịch lưu-inverter).
- Vòng điều khiển bên trong là vòng điều khiển dòng điện (current control) để điều khiển dòng điện ở ngõ ra của bộ nghịch lưu ( $i_1$ ) và vòng điều khiển điện áp (voltage control) để điều khiển điện áp ở ngõ ra của bộ nghịch lưu sau khi lọc ( $V_c$ ).
- Bộ điều chế vec tơ không gian (modulator) để tạo ra điện áp 3 pha ở ngõ ra của bộ nghịch lưu 3 pha ( $V_{inv}$ ).

**2.2. Bộ điều khiển droop kết hợp với trở kháng ảo thích ứng để xuất**

Giả sử rằng chúng ta gọi sự khác biệt về trở kháng đường dây giữa hai bộ biến tần là:

$$\begin{cases} \Delta R = R_1 - R_2 \\ \Delta X = X_1 - X_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_1 = R_2 + \Delta R \\ X_1 = X_2 + \Delta X \end{cases}$$

$$\Delta V_1 = \frac{P_1 R_1 + Q_1 X_1}{V_0} = \frac{P_1 R_2 + Q_1 X_2}{V_0} + \frac{P_1 \Delta R + Q_1 \Delta X}{V_0} = \Delta \tilde{V}_1 + \delta \tilde{V}_1 \quad (13)$$

Mặt khác, điện áp tham chiếu ở đầu ra của bộ điều khiển droop có thể được viết:

$$V_{1ref} = V_{PCC} + \Delta V_1 = V_{pcc} + \Delta \tilde{V}_1 + \delta \tilde{V}_1 \quad (14)$$

$$V_{2ref} = V_{PCC} + \Delta V_2 \quad (15)$$

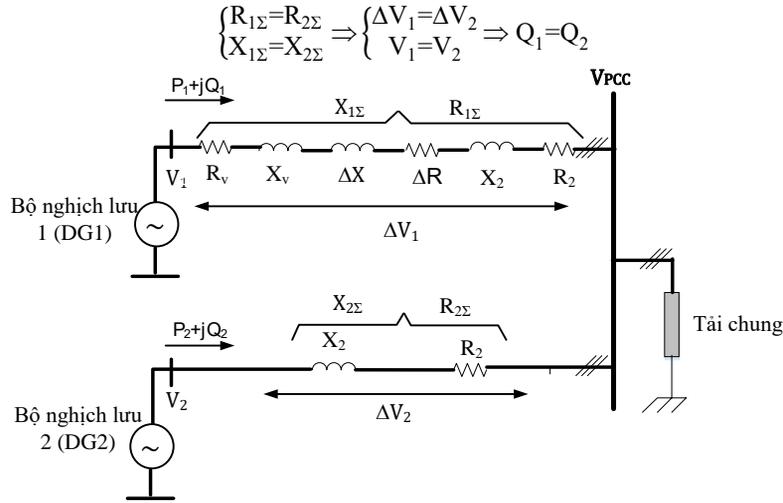
Giả sử chúng ta chọn giải pháp sử dụng trở kháng ảo để loại bỏ sai số của trở kháng đường dây nhằm phân chia công suất chính xác cho các bộ nghịch lưu, khi đó sẽ có các trường hợp:

Nếu  $P_{2dm} = P_{1dm}$  thì ta phải chọn trở kháng ảo sao cho  $R_v + \Delta R = 0$  và  $X_v + \Delta X = 0$  như Hình 6.

Trong đó:  $R_v$  là điện trở ảo ( $\Omega$ ),  $X_v = \omega L_v$  là điện kháng ảo ( $\Omega$ )

$$\begin{cases} R_v + \Delta R = 0 \\ X_v + \Delta X = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_v = -\Delta R \\ X_v = -\Delta X \end{cases}$$

Giả sử gọi  $X_{1\Sigma}$  và  $R_{1\Sigma}$  là tổng trở tương đương của các đường dây sau khi thêm vào các trở kháng ảo, theo Hình 6 ta có:



Hình 6. Mô hình microgrid với hai bộ nghịch lưu kết nối song song sử dụng trở kháng ảo

Nếu  $P_{2dm} = 2P_{1dm}$  thì chúng ta phải chọn trở kháng ảo sao cho  $R_v + \Delta R = R_2$  và  $X_v + \Delta X = X_2$  như trình bày trong hình 6.

$$\begin{cases} R_v + \Delta R = R_2 \\ X_v + \Delta X = X_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_v = 2R_2 - R_1 \\ X_v = 2X_2 - X_1 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} R_{1\Sigma} = 2R_{2\Sigma} \\ X_{1\Sigma} = 2X_{2\Sigma} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta V_1 = \Delta V_2 \\ V_1 = V_2 \end{cases} \Rightarrow Q_2 = 2Q_1$$

Trong trường hợp tổng quát, nếu  $P_{2dm} = nP_{1dm}$  thì chúng ta phải chọn trở kháng ảo sao cho:

$$\begin{cases} R_v = nR_2 - R_1 \\ X_v = nX_2 - X_1 \end{cases}$$

Và các hệ số droop  $m_p$  và  $m_q$  được chọn:  $\begin{cases} m_{p1} = nm_{p2} \\ m_{q1} = nm_{q2} \end{cases}$

Giả sử rằng chọn được các trở kháng ảo thỏa mãn các trường hợp đã phân tích ở trên, khi đó ta sẽ có kết quả:

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V \Rightarrow \begin{cases} V_{1ref} = V_{pcc} + \Delta V \\ V_{2ref} = V_{pcc} + \Delta V \end{cases}$$

Điều đó có nghĩa là độ lệch sụt áp do độ lệch của trở kháng đường dây đã được bù, khi đó điện áp ở đầu ra của bộ nghịch lưu là  $V_1 = V_2 = V_{pcc} + \Delta V$  và công suất phản kháng của bộ nghịch lưu được phân chia chính xác theo tỷ lệ công suất định mức của chúng.

Tuy nhiên, việc lựa chọn trở kháng ảo đáp ứng các trường hợp đã phân tích ở trên là rất khó khăn. Bởi vì giá trị chính xác của tham số đường dây là không cố sẵn. Mặt khác, các thông số đường dây có thể thay đổi tùy theo nhiệt độ và cấu trúc của microgrid. Nguyên nhân khiến thông số trở kháng đường dây trong microgrid bị thay đổi:

**Thay đổi cấu trúc microgrid:**

Khi chúng ta thay đổi cấu trúc của microgrid để đáp ứng nhu cầu sử dụng điện hoặc khi tâm phụ tải thay đổi, chúng ta có thể di chuyển điểm đầu nối chung (PCC) về gần tâm phụ tải; hoặc khi chúng ta mở rộng hoặc sắp xếp lại nguồn năng lượng tái tạo, chúng ta thay đổi vị trí của các bộ nghịch lưu gần hơn với bus DC chung. Khi đó trở kháng của các đường dây sẽ thay đổi đáng kể.

**Ảnh hưởng của nhiệt độ đến điện trở dây dẫn:**

Điện trở đường dây luôn thay đổi theo nhiệt độ môi trường. Sự thay đổi trị số của điện trở tuyến tính với sự thay đổi của nhiệt độ, khi nhiệt độ tăng thì trị số của điện trở tăng và ngược lại.

Vì vậy, để giải quyết các vấn đề khó khăn trong việc lựa chọn các giá trị trở kháng ảo, bài này đã đề xuất một phương pháp điều chỉnh thích nghi các giá trị trở kháng ảo như thể hiện trong Hình 7. Bộ điều khiển trong Hình 7 bao gồm bộ điều khiển droop kết hợp với bộ điều khiển thích ứng các trở kháng ảo được đề xuất.

**Bộ điều khiển droop kết hợp với trở kháng ảo thích ứng được đề xuất**

Khối điều khiển droop thực hiện chia sẻ công suất giữa các bộ nghịch lưu, khối này hoạt động dựa trên phương trình (5) và (6).

Khối trở kháng ảo thích nghi là để bù chênh lệch điện áp rơi của các đường dây, khối này giúp cho việc chia sẻ công suất chính xác hơn. Khối này được thiết lập như sau:

Đầu tiên, chúng ta chọn các giá trị ban đầu cho trở kháng ảo  $R_v$  và  $X_v$ . Các trở kháng ảo này được chọn theo các yếu tố như công suất định mức của bộ nghịch lưu, công suất tải, khoảng cách truyền tải, vật liệu dây dẫn, v.v. Các trở kháng ảo này sẽ tạo ra điện áp rơi trên đường dây theo biểu thức:

$$\Delta V_v = \frac{PR_v + QX_v}{V_0} \tag{16}$$

**Khối trở kháng ảo đề xuất:**

Khối trở kháng ảo được biểu diễn theo công thức:

$$v_{\text{ao}} = Z_{\text{ao}} \cdot i_2 = R_v i_2 + L_v \frac{di_2}{dt} \tag{17}$$

Chiếu công thức (17) lên hệ tọa độ dq0:

$$v_{dv} = i_{2d} R_v + L_v \frac{di_{2d}}{dt} - i_{2q} \omega L_v \tag{18}$$

$$v_{qv} = i_{2q} R_v + L_v \frac{di_{2q}}{dt} + i_{2d} \omega L_v \tag{19}$$

Do điện cảm  $L_v$  nhỏ nên bỏ qua thành phần  $L_v \frac{di_{2d}}{dt}$  và  $L_v \frac{di_{2q}}{dt}$  nên công thức (18) và (19) có thể viết:

$$v_{dv} = i_{2d} R_v - i_{2q} X_v \tag{20}$$

$$v_{qv} = i_{2q} R_v + i_{2d} X_v \tag{21}$$

Trong đó:  $R_v$  là điện trở ảo ( $\Omega$ )  $X_v = \omega L_v$  là điện kháng ảo ( $\Omega$ )

Khối trở kháng ảo được thành lập gồm 2 công thức (20) và (21).

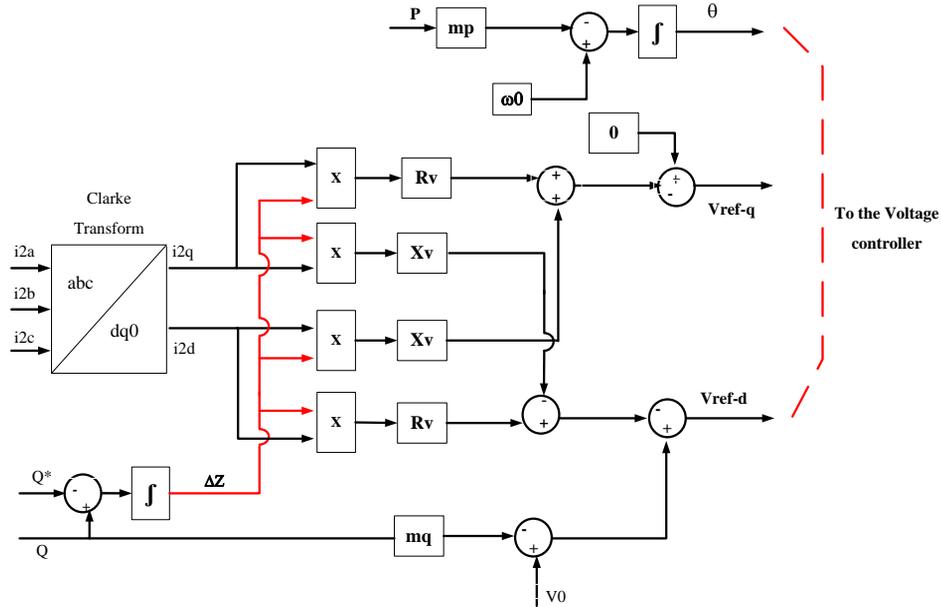
Do các thông số chính xác của trở kháng đường dây không được biết. Do đó, việc lựa chọn các giá trị ban đầu cho trở kháng ảo cũng không chính xác.

Vì vậy, để bù sụt áp trên đường dây một cách chính xác, bước tiếp theo là thiết lập một biến trở ( $\Delta Z$ ),  $\Delta Z$  này nhằm mục đích điều chỉnh giá trị trở kháng ảo đã chọn ở trên.

$\Delta Z$  được thiết lập bởi khâu tích phân như trong phương trình (22). Phương trình (22) cho thấy  $\Delta Z$  được điều chỉnh thông qua việc điều chỉnh công suất phản kháng  $Q$  theo  $Q^*$ , ứng với một giá trị  $Q$  và  $Q^*$  nào đó thì một giá trị " $\Delta Z$ " tương ứng sẽ được đưa ra để điều chỉnh bù cho sụt áp trên đường dây.

$$\Delta Z = k_p \int (Q - Q^*) dt \quad (22)$$

Trong đó:  $k_p$  là hằng số tích phân



Hình 7. Bộ điều khiển droop kết hợp với trở kháng ảo thích ứng được đề xuất

Biến  $\Delta Z$  được điều chỉnh để thay đổi giá trị trở kháng ảo như đề xuất trong bài này. Để đạt được điều này, mỗi bộ nghịch lưu sẽ gửi công suất phản kháng đo được ( $Q$ ) của nó đến hệ thống quản lý năng lượng (energy management system -EMS). EMS tính toán giá trị công suất phản kháng tham chiếu ( $Q_i^*$ ) ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) cho mỗi bộ nghịch lưu dựa trên công suất định mức của bộ nghịch lưu và tổng công suất tải ( $Q^*$ ) trong Microgrid. Theo đó, mỗi bộ nghịch lưu sẽ nhận giá trị công suất phản kháng tham chiếu của nó ( $Q_1^*$ ,  $Q_2^*$ ,  $Q_n^*$ ) từ EMS trở lại bộ điều khiển trong Hình 7 và điều chỉnh các trở kháng ảo để bù cho sự chênh lệch của các trở kháng đường dây. Khi phụ tải thay đổi, giá trị công suất phản kháng tham chiếu ( $Q_i^*$ ) sẽ được điều chỉnh tương ứng. Do đó, mỗi DG sẽ sử dụng công suất phản kháng tham chiếu ( $Q_i^*$ ) để điều chỉnh các trở kháng ảo của nó,  $Q_i^*$  sẽ là một giá trị công suất phản kháng tham chiếu cố định cho đến khi tổng công suất phản kháng của phụ tải thay đổi. Do đó, mỗi bộ nghịch lưu sẽ sử dụng công suất tham chiếu  $Q^*$  của nó để điều chỉnh thích ứng  $\Delta Z$ , sau đó độ lệch của trở kháng đường dây sẽ được điều chỉnh để việc chia sẻ công suất trở nên chính xác.

Truyền thông không được sử dụng trong vòng kín của bộ điều khiển chia sẻ công suất, nhưng truyền thông được sử dụng để làm giá trị tham chiếu cho công suất phản kháng  $Q_i^*$ . Do đó, độ chính xác trong việc chia sẻ công suất ở trạng thái xác lập sẽ không bị ảnh hưởng bởi độ trễ thời gian trong các kênh truyền thông.

Mục tiêu của bộ điều khiển không phải là điều chỉnh trực tiếp công suất phản kháng mà là điều chỉnh trở kháng ảo để bù cho ảnh hưởng của sự chênh lệch về trở kháng đường dây đối với việc chia sẻ công suất phản kháng.

### 2.3. Khối tính công suất và lọc thông thấp

Công suất tác dụng và phản kháng do bộ nghịch lưu tạo ra được tính toán trong hệ tọa độ  $\alpha\beta$  tĩnh [8]:

$$p = \frac{3}{2} (i_{2\alpha} v_{c\alpha} + i_{2\beta} v_{c\beta}) \quad (23)$$

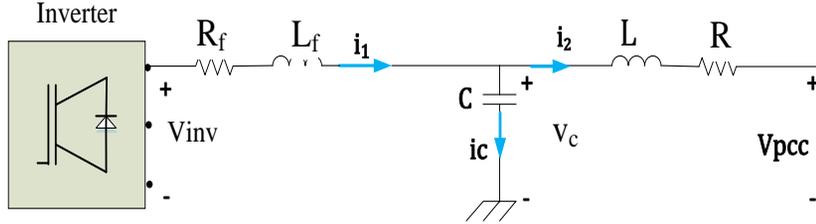
$$q = \frac{3}{2} (i_{2\alpha} v_{c\beta} - i_{2\beta} v_{c\alpha}) \quad (24)$$

Công suất tác dụng và phản kháng ở đầu ra của bộ lọc thông thấp (LPF):

$$P = \frac{\omega_c}{S + \omega_c} p \quad (25)$$

$$Q = \frac{\omega_c}{S + \omega_c} q \quad (26)$$

#### 2.4. Thiết kế bộ điều khiển điện áp và dòng điện



Hình 8. Sơ đồ tương đương của một bộ nghịch lưu được kết nối với tải

Theo tài liệu [10-12], từ Hình 8, ta có các phương trình:

$$\begin{cases} i_{1d} = i_{2d} + C \frac{dv_{cd}}{dt} - \omega C v_{cq} + i'_d = \\ \Delta i_d + i_{2d} - \omega C v_{cq} + i'_d \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} i_{1q} = i_{2q} + C \frac{dv_{cq}}{dt} + \omega C v_{cd} + i'_q = \\ \Delta i_q + i_{2q} + \omega C v_{cd} + i'_q \end{cases} \quad (28)$$

Trong đó:

$$\begin{cases} \Delta i_d = k_{pv} (v_{cd}^* - v_{cd}) + k_{iv} \int (v_{cd}^* - v_{cd}) dt \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} \Delta i_q = k_{pv} (v_{cq}^* - v_{cq}) + k_{iv} \int (v_{cq}^* - v_{cq}) dt \end{cases} \quad (30)$$

Phương trình (27) đến (30) dành cho bộ điều khiển điện áp.

$$\begin{cases} v_{invd} = L_f \frac{di_{1d}}{dt} + R_f i_{1d} - \omega L_f i_{1q} + v_{cd} \\ = \Delta v_d - \omega L_f i_{1q} + v_{cd} \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{cases} v_{invq} = L_f \frac{di_{1q}}{dt} + R_f i_{1q} + \omega L_f i_{1d} + v_{cq} \\ = \Delta v_q + \omega L_f i_{1d} + v_{cq} \end{cases} \quad (32)$$

Trong đó:

$$\begin{cases} \Delta v_d = k_{pi} (i_{1d}^* - i_{1d}) + k_{ii} \int (i_{1d}^* - i_{1d}) dt \end{cases} \quad (33)$$

$$\begin{cases} \Delta v_q = k_{pi} (i_{1q}^* - i_{1q}) + k_{ii} \int (i_{1q}^* - i_{1q}) dt \end{cases} \quad (34)$$

Phương trình (31) đến (34) dành cho bộ điều khiển dòng điện.

### 3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

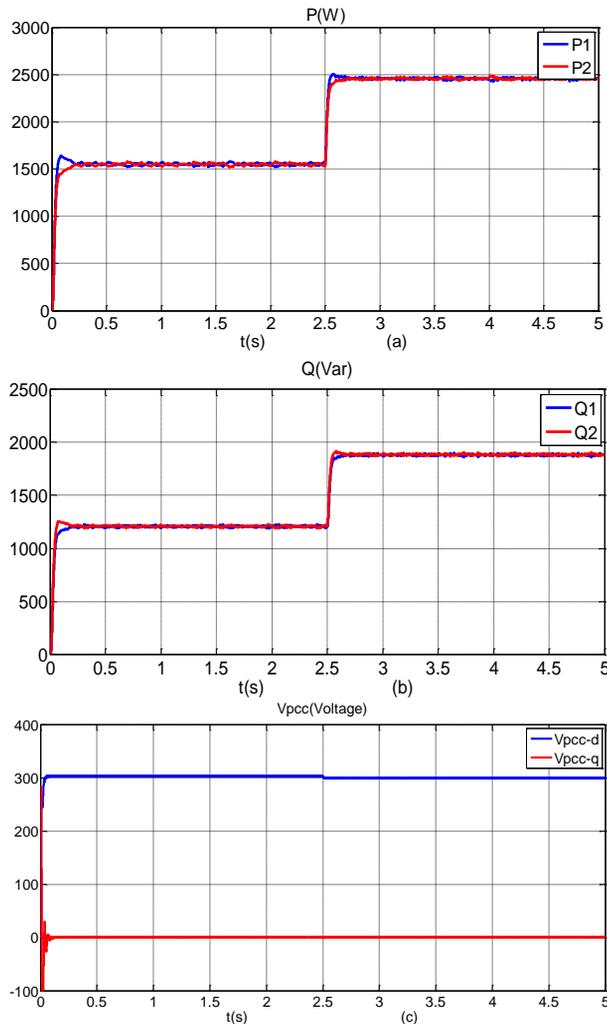
Bộ điều khiển đề xuất được mô phỏng bằng Matlab/Simulink, bộ điều khiển này thực hiện chia công suất cho 2 bộ nghịch lưu 4kVA, các thông số của bộ điều khiển được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Bảng thông số mô phỏng

Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
$V_{cd}$ (V)	600	$f_0$ (Hz)	50
$L_f$ (mH)	4,2	S(kVA)	4
$R_f$ ( $\Omega$ )	0,1	$V_{AC,p}$ (V)	310
$C$ ( $\mu$ F)	2,2	$f_c$ (kHz)	10
Trở kháng các đường dây			
$L_1$ (mH)	2	$R_1$ ( $\Omega$ )	2
$L_2$ (mH)	1	$R_2$ ( $\Omega$ )	0,8
Trở kháng ảo			
$L_v$ (mH)	0,1	$R_v$ ( $\Omega$ )	0,1

### 3.1. Trường hợp 1- Tỉ số công suất định mức 1:1

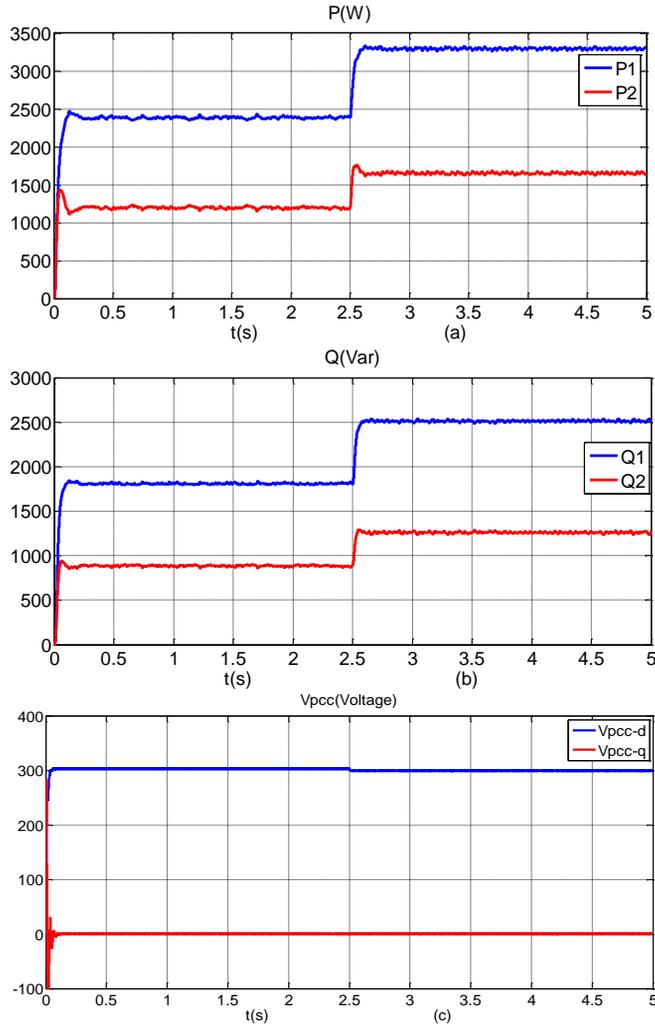
Trường hợp này thực hiện chia sẻ công suất cho 2 bộ nghịch lưu với tỷ lệ 1:1 bằng bộ điều khiển đề xuất. Kết quả mô phỏng chia sẻ công suất và điện áp tại PCC được trình bày trong Hình 9.



Hình 9. (a) Chia sẻ công suất tác dụng, (b) Chia sẻ công suất phản kháng, (c) Điện áp tại điểm kết nối chung-VPCC

### 3.2. Trường hợp 2- Tỷ số công suất định mức 2:1

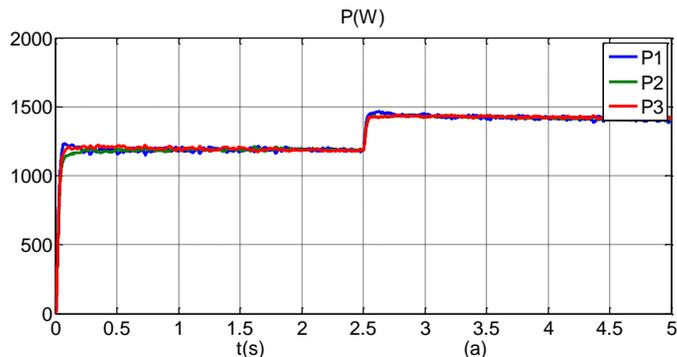
Trường hợp này thực hiện chia sẻ công suất cho 2 bộ nghịch lưu với tỷ lệ 2:1 bằng bộ điều khiển đề xuất. Kết quả mô phỏng chia sẻ công suất và điện áp tại PCC được trình bày trong Hình 10.

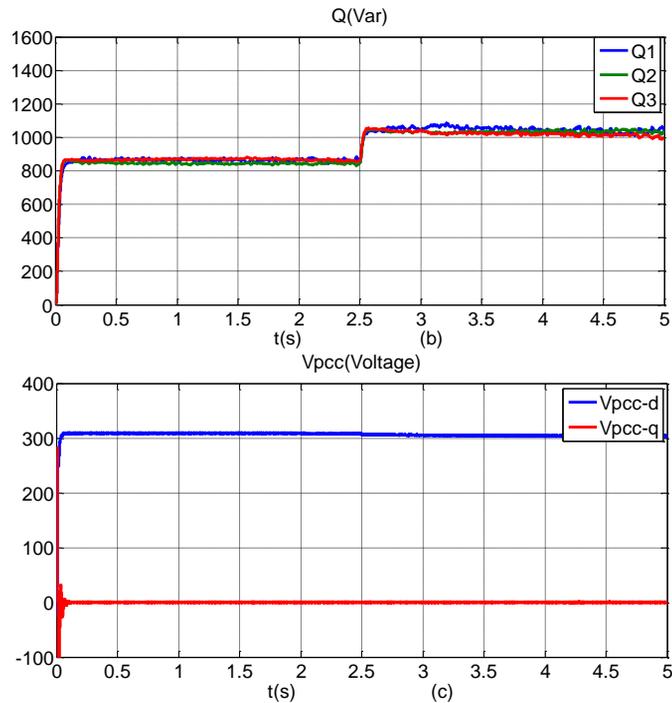


Hình 10. (a) Chia sẻ công suất tác dụng, (b) Chia sẻ công suất phản kháng, (c) Điện áp tại điểm kết nối chung-VPCC

### 3.3. Trường hợp 3- Tỷ số công suất định mức 1:1:1

Trường hợp này thực hiện chia sẻ công suất cho 3 bộ nghịch lưu với tỷ lệ 1:1:1 bằng bộ điều khiển đề xuất. Kết quả mô phỏng chia sẻ công suất và điện áp tại PCC được trình bày trong Hình 11.



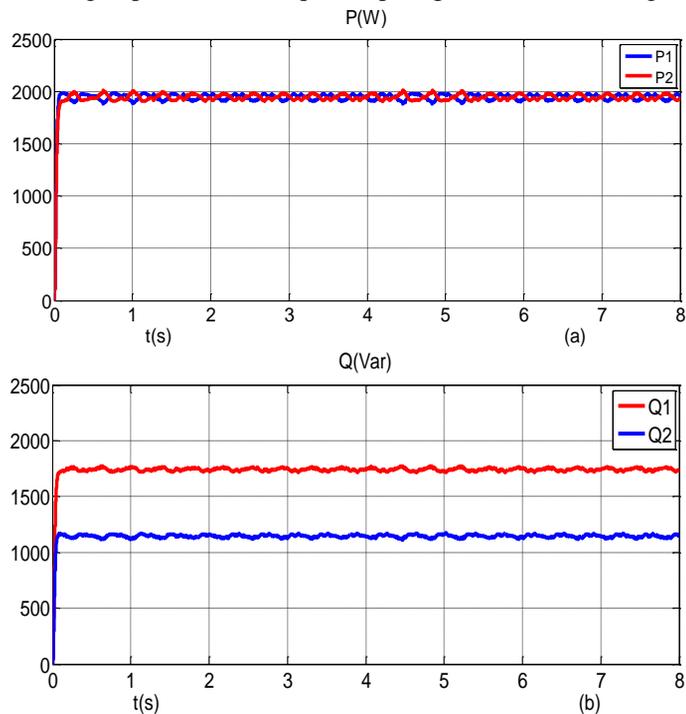


Hình 11. (a) Chia sẻ công suất tác dụng, (b) Chia sẻ công suất phản kháng, (c) Điện áp tại điểm kết nối chung- $V_{PCC}$

### 3.4. Trường hợp 4

Để cho thấy hiệu suất chia sẻ công suất phản kháng được cải thiện, một số mô phỏng đã được thực hiện với cùng tham số trở kháng đường dây cho bộ điều khiển đề xuất và bộ droop truyền thống.

Trường hợp này thực hiện chia công suất cho 2 bộ nghịch lưu với tỷ lệ 1:1 sử dụng bộ điều khiển droop truyền thống. Thông số trở kháng đường dây trong trường hợp này giống như thông số trở kháng đường dây trong các trường hợp trên. Các kết quả mô phỏng được thể hiện trong Hình 12.



Hình 12. (a) Chia sẻ công suất tác dụng, (b) Chia sẻ công suất phản kháng

Hình 9a, 9b, 10a, 10b, 11a và 11b cho thấy bộ điều khiển được đề xuất cho kết quả chia sẻ công suất chính xác với tỷ lệ công suất định mức ngay cả khi tải thay đổi, đáp ứng quá độ và đáp ứng xác lập của nó cũng rất tốt và thời gian trạng thái ổn định được thiết lập sớm.

Như thể hiện trong Hình 12, khi trở kháng của hai đường dây khác nhau như trong bảng 1, Hình 12a cho thấy việc chia sẻ công suất tác dụng không bị ảnh hưởng bởi trở kháng đường dây. Tuy nhiên, Hình 12b cho thấy việc chia sẻ công suất phản kháng không đúng với tỷ lệ công suất định mức của các bộ nghịch lưu. Nói cách khác, trở kháng đường dây không ảnh hưởng đến việc chia sẻ công suất tác dụng nhưng lại ảnh hưởng rất lớn đến việc chia sẻ công suất phản kháng, nó cũng ảnh hưởng đến sự ổn định của hệ thống.

Hình 9c, 10c và 11c cho thấy biên độ điện áp ở tải nằm trong giới hạn cho phép so với giá trị điện áp chuẩn định mức là 310 V.

Hiệu suất của các bộ điều khiển được đánh giá bằng tỷ lệ phần trăm sai lệch. Độ lệch khi chia sẻ công suất phản kháng được đánh giá bằng:

$$e_{qi}\% = \frac{Q_i - Q_i^*}{Q_i^*} \times 100\%$$

$Q_i$  là công suất phản kháng đo được ở đầu ra của biến tần  $i$ ,  $Q_i^*$  là công suất phản kháng mong muốn chia cho biến tần  $i$ .

#### Hiệu suất của bộ điều khiển droop truyền thống:

Hình 12b cho thấy độ chính xác khi chia sẻ công suất phản kháng của bộ điều khiển droop thông thường là 19% đối với bộ nghịch lưu 1 và -19% đối với bộ nghịch lưu 2:

$$e_{q1}\% = \frac{Q_1 - Q_1^*}{Q_1^*} \times 100\% = \frac{1725 - 1450}{1450} \times 100\% = 19\%$$

$$e_{q2}\% = \frac{Q_2 - Q_2^*}{Q_2^*} \times 100\% = \frac{1175 - 1450}{1450} \times 100\% = -19\%$$

#### Hiệu suất của bộ điều khiển được đề xuất:

Hình 9b cho thấy độ chính xác để chia sẻ công suất phản kháng của bộ điều khiển được đề xuất là 0,24% đối với bộ nghịch lưu 1 và -0,24% đối với bộ nghịch lưu 2:

$$e_{q1}\% = \frac{Q_1 - Q_1^*}{Q_1^*} \times 100\% = \frac{1243 - 1240}{1240} \times 100\% = 0,24\%$$

$$e_{q2}\% = \frac{Q_2 - Q_2^*}{Q_2^*} \times 100\% = \frac{1237 - 1240}{1240} \times 100\% = -0,24\%$$

Kết quả mô phỏng trên cho thấy phương pháp điều khiển đề xuất cho kết quả tốt trong việc chia sẻ công suất cho phụ tải và đảm bảo chất lượng điện áp cung cấp cho phụ tải.

## 4. KẾT LUẬN

Phương pháp điều khiển droop kết hợp với trở kháng ảo thích ứng đề xuất đã điều khiển chia công suất cho 3 bộ nghịch lưu mắc song song trong microgrid, phương pháp điều khiển này cho kết quả chia công suất chính xác cho các bộ nghịch lưu kết nối song song trong microgrid độc lập, đảm bảo sự ổn định của điện áp và tần số trong microgrid. Phương pháp điều khiển đơn giản, dễ thực hiện và không cần biết thông số trở kháng đường dây. Bộ điều khiển được đề xuất đã cải thiện những thiếu sót của bộ điều khiển droop truyền thống, đáp ứng việc đồng bộ hóa các bộ nghịch lưu trong microgrid độc lập.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Zhong Q. - Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **60** (4) (2013) 1281-1290. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2146221>
2. Han H., Hou X., Yang J., Wu J. - Review of power sharing control strategies for islanding operation of AC Microgrids. *IEEE Trans. Smart Grid* **7** (1) (2016) 200-215. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2434849>
3. Hossain M., Pota H., Issa W. - Overview of AC Microgrid controls with inverter-interfaced generations. *Energies* **10** (9) (2017) 1300. <https://doi.org/10.3390/en10091300>
4. Perreault D. J., Selders R. L., Kassakian J. G. - Frequency based current-sharing techniques for paralleled power converters. *IEEE Trans. Power Electron* **13** (4) (1998) 626-634. <https://doi.org/10.1109/63.704128>
5. Zhang Y., Ma H. - Theoretical and experimental investigation of networked control for parallel operation of inverters. *IEEE Trans. Ind. Electron* **59** (4) (2012) 1961-1970. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2165459>
6. Guan Y., Vasquez J., Guerrero J. - A simple autonomous current-sharing control strategy for fast dynamic response of parallel inverters in islanded microgrids. *Energies* (2014) 415-422. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2014.6850426>
7. Cho B., Sul S. - Power sharing strategy in parallel operation of inverters for distributed power system under line impedance inequality. *IEEE ECCE Asia Downunder* (2013) 358-364. <https://doi.org/10.1109/ECCE-Asia.2013.6579121>
8. Sao C., Lehn P. - Control and power management of converter fed Microgrids. *IEEE Trans. Power Syst* **23** (3) (2008) 1088-1098. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.922232>
9. Pressman A., Billings K., Morey T. - *Switching Power Supply Design Third Edition*, ISBN 978-0-07-148272-1.
10. Kim J., Lee Y., Kim H., Han B. - A new reactive-power sharing scheme for two inverter-based distributed generations with unequal line impedances in islanded microgrids. *Energies* **10** (11) (2017) 1800. <https://doi.org/10.3390/en10111800>
11. Nazib A., Holmes D., McGrath B. - Decoupled DSOGI-PLL for improved three phase grid synchronisation. *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)*, Niigata, Japan (2018) 3670-3677. <https://doi.org/10.23919/IPEC.2018.8507364>
12. Xiao F., Dong L., Li L. - A frequency-fixed SOGI-based PLL for single-phase grid-connected converters. *IEEE Trans. Power Electron* **32** (3) (2017) 1713-1719. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2606623>
13. Golestan S., Mousazadeh S. - A critical examination of frequency-fixed second-order generalized integrator-based phase-locked loops. *IEEE Trans. Power Electron* **32** (9) (2017) 6666-6672. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2674973>
14. Guan Y., Feng W. - A novel grid-connected harmonic current suppression control for autonomous current sharing controller-based AC Microgrids. *IEEE* (2018) 132-140. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2018.8557795>
15. Liu X., Gong R. - A control strategy of microgrid-connected system based on VSG, *IEEE International Conference on Power. Intelligent Computing and Systems* (2020) 164-172. <https://doi.org/10.1109/ICPICS50287.2020.9201955>
16. Du G., Liu Z., Du F. - Performance improvement of model predictive control using control error compensation for power electronic converters based on the Lyapunov function. *Journal of Power Electronics* **17** (4) (2017) 983-990. <https://doi.org/10.6113/JPE.2017.17.4.983>

## **ABSTRACT**

### **POWER CONTROL IN MICROGRID USING IMPROVED VIRTUAL IMPEDANCE METHOD**

Luong Tan Nhat, Le Khac Sinh, Pham Thi Xuan Hoa\*

*Ho Chi Minh City University of Industry and Trade*

\*Email: *hoaptx@huit.edu.vn*

In this article, a method is proposed to increase the accuracy of reactive power-sharing for parallel-connected inverters in Microgrid, this method is done by automatically adjusting the values of the virtual impedance to adjusting the output voltage of the inverters. The virtual impedances are automatically adjusted to compensate for the difference in the output voltage of the inverters due to the influence of the line impedances. The output voltage of the inverters will be adaptively adjusted according to the change of the load, this method greatly improves the accuracy in the reactive power sharing the correct power sharing for the inverters will ensure the stability of voltage and frequency in the Microgrid. The control method is simple and does not need to know the line impedance parameter. The feasibility and effectiveness of the proposed strategy are proven by simulation and experimental results.

*Keywords:* Virtual impedance, droop control, power sharing, voltage control, parallel inverter.