

# Thiết kế và phân tích phương pháp điều khiển chia công suất cho các bộ nghịch lưu trong Microgrid độc lập

Phạm Thị Xuân Hoa\*, Trần Thị Như Hà

**Tóm tắt**—Trong bài này, đề xuất một phương pháp chia công suất phản kháng bằng cách điều chỉnh độ dốc điện áp droop, nhằm làm tăng độ chính xác cho việc chia công suất phản kháng. Sai lệch về trở kháng đường dây dẫn đến sai lệch về độ sụt áp trên đường dây được bù trừ bằng việc điều chỉnh độ dốc điện áp droop. Độ dốc điện áp droop được điều chỉnh thích ứng theo sự thay đổi của tải, phương pháp đề xuất sẽ cho kết quả chia công suất phản kháng chính xác hơn rất nhiều so với các phương pháp thông thường. Phương pháp điều khiển thì đơn giản và không đòi hỏi phải biết trước thông số của các trở kháng đường dây. Tính khả thi và hiệu quả của chiến lược đề xuất được chứng minh bằng các kết quả mô phỏng.

**Từ khóa**—Điều khiển chia công suất, lưới siêu nhỏ, kết nối song song các bộ nghịch lưu, điều khiển Droop, microgrid độc lập, trở kháng đường dây.

## 1 GIỚI THIỆU

Hệ thống phân phối (distributed generation - DG) gần đây đã được sự chú ý như là một giải pháp tiềm năng để đáp ứng nhu cầu gia tăng điện, để giảm bớt sự quá tải trên hệ thống điện hiện có, và để kết hợp năng lượng tái tạo. Khái niệm Microgrid đã nổi lên như một cách tiếp cận đầy hứa hẹn để phối hợp các loại khác nhau của nguồn năng lượng có hiệu quả. Microgrid cũng cho phép các đơn vị DG làm việc trong một cấu hình độc lập hoặc kết lưới [1 - 2]. Tuy nhiên, vấn đề điều khiển Microgrid độc lập vẫn là vấn đề thách thức, chẳng hạn như khó khăn trong việc

duy trì sự cân bằng công suất và chia sẻ công suất phản kháng. Khi một Microgrid đang hoạt động ở chế độ độc lập, mỗi đơn vị nguồn phát DG có thể cung cấp công suất theo tỷ lệ công suất định mức của nó. Để đạt được điều này, kỹ thuật điều khiển tần số và điện áp Droop được sử dụng. Lý do cho sự phổ biến của kỹ thuật điều khiển Droop là nó cung cấp một khả năng điều khiển phân cấp mà không phụ thuộc vào các liên kết truyền thông bên ngoài [3]. Có thể sử dụng truyền thông, nhưng truyền thông được sử dụng bên ngoài vòng điều khiển Droop để nâng cao hiệu suất hệ thống mà không làm giảm độ tin cậy [4 - 12]. Mặc dù kỹ thuật Droop tần số (Droop P/f) có thể đạt được độ chính xác cho việc chia sẻ công suất tác dụng, nhưng kỹ thuật Droop điện áp (Droop Q/V) thường cho kết quả sai lệch trong việc chia sẻ công suất phản kháng do sai lệch về trở kháng của các đơn vị DG, và cũng có thể do sự khác nhau về công suất định mức của các đơn vị DG [13]. Do đó, vấn đề chia sẻ công suất phản kháng trong Microgrid độc lập đã nhận được sự chú ý đáng kể trong các nghiên cứu và nhiều kỹ thuật điều khiển đã được phát triển để giải quyết vấn đề này. Trong nghiên cứu [14] sử dụng phương pháp Droop kết hợp với việc điều chỉnh để bù sai lệch điện áp ở ngõ ra của bộ điều khiển Droop truyền thông, nhằm khử đi ảnh hưởng của sự mất cân bằng trở kháng đường dây. Tuy nhiên, kết quả chia công suất của phương pháp này có độ chính xác không cao. Một phương pháp điều khiển Droop kết hợp với trở kháng ảo để giảm thiểu sai lệch trong việc chia sẻ công suất phản kháng được trình bày trong các nghiên cứu [15 - 18], phương pháp trở kháng ảo cho phép điều chỉnh điện áp ngõ ra tham chiếu của bộ nghịch lưu dựa vào hồi tiếp dòng ngõ ra nhân với trở kháng ảo. Phương pháp này có thể giảm sai lệch trong việc chia công suất bởi vì phương pháp này làm giảm sai lệch của trở kháng ngõ ra. Tuy nhiên, sự xuất hiện của các trở kháng ảo có thể dẫn đến sự sụt giảm chất lượng

Ngày nhận bản thảo: 07-10-2018; Ngày chấp nhận đăng: 20-12-2018; Ngày đăng: 30-12-2018

Phạm Thị Xuân Hoa và Trần Thị Như Hà là giảng viên của khoa Điện-Điện tử trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm TP.HCM. (e-mail: hoaptx@cntp.edu.vn; hattn@cntp.edu.vn)

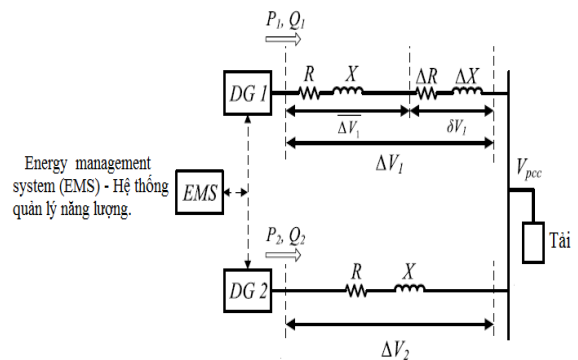
điện áp hệ thống, vì vậy không đảm bảo cho việc điều chỉnh điện áp [4 - 5]. Một phương pháp Droop mới được trình bày để giảm lỗi chia sẻ công suất kháng, lỗi chia sẻ có thể được giảm xuống, nhưng không hoàn toàn loại bỏ và hiệu suất cải thiện là không đáng kể nếu tải cục bộ được kết nối tại đầu ra của từng đơn vị nguồn phát DG [19 - 21].

Nghiên cứu [22 - 23] đã trình bày một cấu trúc điều khiển phân cấp để giải quyết từng yêu cầu của hệ thống theo các cấp khác nhau, gồm có 3 cấp: cấp điều khiển thứ 3 thực hiện điều khiển dòng công suất giữa Microgrid và lưới điện, cấp điều khiển thứ 2 chịu trách nhiệm cho việc tối ưu hóa các hoạt động của Microgrid; cấp điều khiển thứ 1 thực hiện điều khiển bù cho sự sai lệch điện áp và tần số gây ra bởi hoạt động của cấp điều khiển thứ 2. Ngoài ra, điều khiển cấp thứ 2 chịu trách nhiệm điều khiển phục hồi biên độ điện áp và tần số tại thanh cái chung để giữ tần số và điện áp của Microgrid nằm trong giới hạn cho phép; cấp điều khiển thứ 1 thực hiện duy trì điện áp và tần số Microgrid ổn định trong chế độ độc lập. Điều này rất cần thiết để đảm bảo điều khiển chia công suất tác dụng, công suất phản kháng trong trường hợp tải tuyến tính và phi tuyến. Ngoài ra, việc điều khiển chia công suất sẽ tránh được dòng điện cân bằng không mong muốn. Tuy nhiên, các kết quả của nghiên cứu này chưa khảo sát chia công suất cho các bộ nghịch lưu trong trường hợp mất cân bằng của trở kháng đường dây nối từ các bộ nghịch lưu đến điểm chung. Nghiên cứu [24] cho rằng các yếu tố ảnh hưởng đến việc chia sẻ công suất phản kháng được phân tích trên cơ sở lý thuyết của từ thông ảo, nghiên cứu này đã dựa vào các phép đo lường điện áp và dòng điện ở ngõ ra của bộ nghịch lưu để ước lượng véc tơ từ thông ảo, từ đó thiết kế một bộ điều khiển chia công suất phản kháng bao gồm ba phần: điều khiển bù, điều khiển phục hồi điện áp và điều khiển từ thông. Các kết quả mô phỏng chỉ ra rằng hệ thống điều khiển được đề xuất có thể đạt được sự chia sẻ công suất phản kháng chính xác. Tuy nhiên, về mô hình toán học của bộ điều khiển này khá phức tạp, việc mô hình toán học sẽ khó khăn hơn nếu Microgrid có các tải cục bộ ở ngõ ra của bộ nghịch lưu hoặc các tải phi tuyến.

Trong bài này, đề xuất một phương pháp chia công suất phản kháng bằng cách điều chỉnh độ dốc điện áp Droop, nhằm làm tăng độ chính xác cho việc chia công suất phản kháng trong trường hợp mất cân bằng của trở kháng đường dây nối từ các bộ nghịch lưu đến điểm chung. Độ dốc

điện áp Droop được điều chỉnh thích ứng theo sự thay đổi của tải.

Cấu hình của Microgrid khảo sát được hiển thị trong hình 1. Các bộ nghịch lưu trong Microgrid được kết nối song song với nhau thông qua điểm chung (PCC- Point of common coupling). Microgrid gồm có n hệ thống (DG1,...DGn). Mỗi hệ thống DG gồm các nguồn phát điện nhỏ (microsource) là: năng lượng mặt trời, gió, diesel,...; hệ thống tích trữ năng lượng; và một bộ nghịch lưu. Cấu trúc này với các microsource kết nối nhau trên bus DC của bộ nghịch lưu nhằm làm giảm số lượng bộ nghịch lưu, nên giảm chi phí đầu tư, thuận tiện cho việc điều khiển, ắc quy tích trữ giúp ổn định điện áp ở ngõ vào của bộ nghịch lưu. Cấu trúc Microgrid này cho phép giảm tổn thất trên đường dây, nâng cao hiệu suất nguồn phát và nâng cao độ tin cậy. Trong chế độ độc lập, Microgrid ngay lập tức phải thực hiện chia công suất cho các bộ nghịch lưu để ổn định tần số và điện áp.

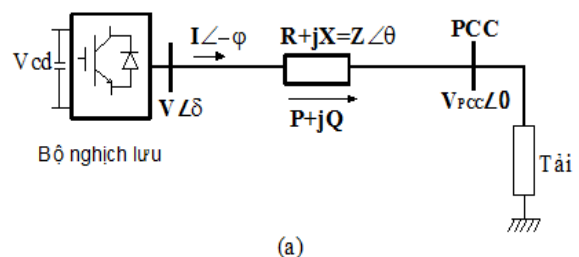


Hình 1. Cấu hình của Microgrid độc lập với hệ thống quản lý năng lượng

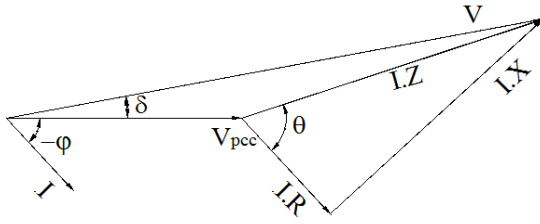
## 2 PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN ĐỀ XUẤT

### 2.1 Cơ sở lý thuyết của phương pháp điều khiển chia công suất

Theo các nghiên cứu [1 - 32] thì cơ sở lý thuyết của phương pháp điều khiển đề xuất được hình thành trên cơ sở của phương pháp Droop truyền thống, được thành lập bằng cách phân tích mạch tương đương của bộ nghịch lưu kết nối với tải được thể hiện ở hình 2.



(a)



(b)

**Hình 2.** (a) Sơ đồ phát công suất của một bộ nghịch lưu, (b) đồ thị vec tơ dòng điện và điện áp

R và X lần lượt là điện trở và điện kháng của đường dây ( $\Omega$ ).

I là dòng điện chạy trên đường dây nối từ bộ nghịch lưu đến điểm chung (A).

Từ hình 2, công suất cung cấp bởi bộ nghịch lưu được tính:

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

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

Từ (1) và (2) suy ra:

$$\sin \delta = \frac{XP - RQ}{VV_{PCC}} \quad (3)$$

$$V - V_{PCC} \cos \delta = \frac{RP + XQ}{V} \quad (4)$$

Trường hợp đường dây có  $X \gg R$  và góc  $\delta$  nhỏ. Khi đó công thức (3) và (4) có thể viết:

$$\delta \cong \frac{XP}{VV_{PCC}} \quad (5)$$

$$V - V_{PCC} \cong \frac{XQ}{V} \quad (6)$$

Công thức (5) và (6) lần lượt cho thấy độ lệch tần số phụ thuộc vào công suất tác dụng P và độ lệch điện áp phụ thuộc vào công suất phản kháng Q. Vì vậy điện áp ngõ ra bộ nghịch lưu được điều khiển bởi Q, tần số ngõ ra bộ nghịch lưu được điều khiển bởi P. Do đó, chúng ta có đặc tính của Droop P/f và Q/V được thể hiện trong công thức (7) và (8):

$$\omega = \omega_0 - m_p P \quad (7)$$

$$V = V_0 - m_q Q \quad (8)$$

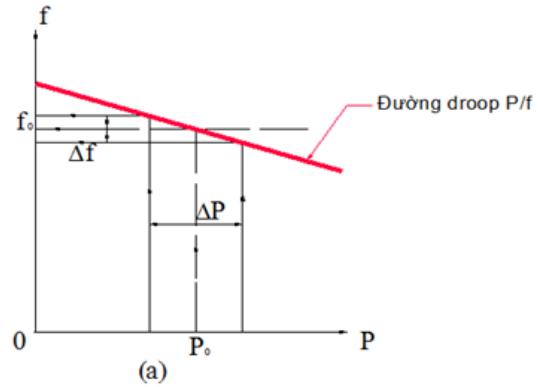
Hệ số Droop  $m_p$  và  $m_q$  được chọn theo độ thay đổi điện áp và tần số cho phép so với định mức:

$$m_p = \frac{\omega_0 - \omega_{\min}}{P_{\max}} \quad ; \quad m_q = \frac{V_0 - V_{\min}}{Q_{\max}} \quad (9)$$

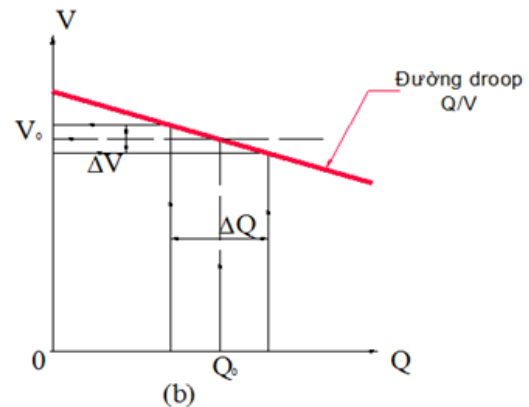
Trong đó: P và Q lần lượt là công suất tác dụng và phản kháng do bộ nghịch lưu phát ra;  $V_0$

và  $\omega_0$  lần lượt là điện áp định mức và tần số góc định mức của nguồn và tải; V và  $\omega$  lần lượt là điện áp và tần số góc ở ngõ ra của bộ nghịch lưu,  $V_{\min}$  và  $\omega_{\min}$  lần lượt là điện áp và tần số góc cực tiểu cho phép của Microgrid.

Theo tiêu chuẩn EN 50160 thì độ lệch tần số cho phép là 1% so với tần số định mức và độ lệch điện áp cho phép là  $\pm 10\%$  so với điện áp định mức.



(a)



(b)

**Hình 3.** Đồ thị biểu diễn đường đặc tính Droop (a) Đặc tính Droop P/f, (b) Đặc tính Droop Q/V

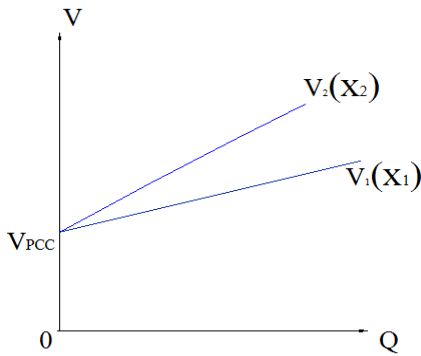
Trong trường hợp trở kháng đường dây nối giữa các bộ nghịch lưu đến điểm chung PCC khác nhau thì ta có thể thấy rằng việc thực hiện chia tải chính xác theo tỉ lệ công suất định mức, cũng như việc điều chỉnh sai lệch công suất và sai lệch điện áp so với giá trị định mức là rất khó khăn bởi vì nó phụ thuộc vào các thông số của hệ thống.

Theo nghiên cứu [1 - 20] thì việc chia công suất tác dụng theo phương pháp Droop không bị ảnh hưởng đáng kể bởi sự sai lệch về trở kháng đường dây nối giữa các bộ nghịch lưu đến điểm chung PCC. Tuy nhiên, sự sai lệch về trở kháng đường dây sẽ ảnh hưởng rất lớn đến việc chia công suất phản kháng, được trình bày như sau:

Công thức (6) có thể viết lại:

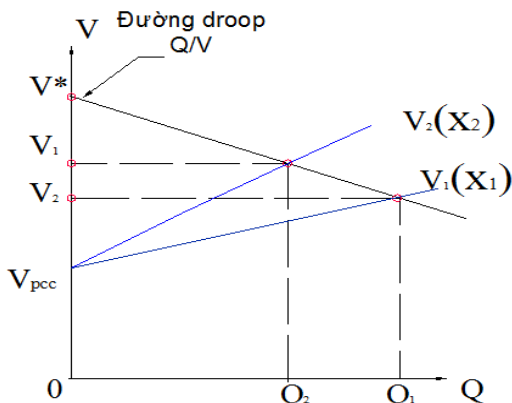
$$V = V_{PCC} + \frac{Q \cdot X}{V} \tag{10}$$

Đường đặc tuyến của (10) cho 2 bộ nghịch lưu có trở kháng đường dây khác nhau được thể hiện trong hình 4.



Hình 4. Đường đặc tuyến điện áp theo công suất kháng

Theo hình 4 ta thấy khi kháng hai đường dây khác nhau thì đường đặc tuyến  $Q = f(V)$  cũng khác nhau.



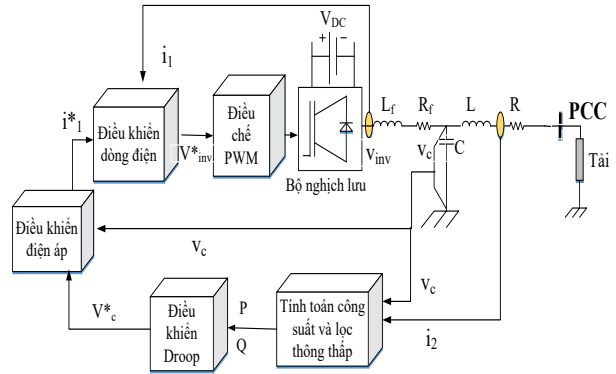
Hình 5. Đường đặc tính điện áp theo công suất kháng và đường đặc tính Droop Q/V

Hình 5 cho thấy hai bộ nghịch lưu có cùng công suất định mức nhưng được kết nối đến các đường dây có kháng khác nhau thì sinh ra sai lệch trong việc chia công suất kháng, vì  $X_2 > X_1$  nên dẫn đến công suất được chia cho hai bộ nghịch lưu  $Q_2 < Q_1$

2.2 Bộ điều khiển chia công suất đề xuất

Trong bài này, đề xuất một phương pháp chia công suất phản kháng bằng cách điều chỉnh độ dốc điện áp Droop Q/V, nhằm làm tăng độ chính xác cho việc chia công suất phản kháng. Độ dốc điện áp Droop được điều chỉnh thích ứng theo sự thay đổi của tải thông qua hệ thống quản lý năng lượng EMS (energy management system).

Sơ đồ khối của mô hình điều khiển công suất cho một bộ nghịch lưu được thể hiện ở hình 6, gồm có các khối:



Hình 6. Sơ đồ khối của bộ điều khiển công suất cho một bộ nghịch lưu

- Vòng điều khiển bên ngoài là vòng điều khiển công suất (Droop control), 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 ( $v_{inv}$ ).

Bộ điều khiển công suất cho một bộ nghịch lưu gồm các khối sau:

2.2.1 Khối tính toán công suất (power calculation)

Khối tính toán công suất được tham khảo theo tài liệu [21]:

Công suất 3 pha trên hình 5 trong hệ tọa độ quay dq0 được tính theo các công thức sau:

$$p = \frac{3}{2} (i_{2d} v_{cd} + i_{2q} v_{cq}) \tag{11}$$

$$q = \frac{3}{2} (i_{2d} v_{cq} - i_{2q} v_{cd}) \tag{12}$$

Giả sử rằng vec tơ điện áp  $v_c$  trùng với trục d, ta có  $v_{cd} = |v_c|$  và  $v_{cq} = 0$ , khi đó công suất tác dụng và công suất phản kháng sẽ tỉ lệ với các thành phần dòng điện  $i_d$  và  $i_q$ :

$$p = \frac{3}{2} i_{2d} v_{cd} \tag{13}$$

$$q = -\frac{3}{2} i_{2q} v_{cd} \tag{14}$$

Giá trị trung bình của công suất tác dụng và công suất phản kháng tương ứng với các thành phần cơ bản có thể thu được bởi lọc thông thấp:

$$P = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} p \quad (15)$$

$$Q = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} q \quad (16)$$

Trong đó  $\omega_c$  là tần số cắt.

Giá trị trung bình của công suất tác dụng (P) và công suất phản kháng (Q) được đưa vào bộ điều khiển công suất (điều khiển Droop).

### 2.2.2 Khối điều khiển Droop đề xuất

Sai lệch về trở kháng đường dây dẫn đến sai lệch về độ sụt áp trên đường dây được bù trừ bằng việc điều chỉnh độ dốc điện áp Droop Q/V, độ dốc điện áp Droop được điều chỉnh thích ứng theo sự thay đổi của tải.

Theo nghiên cứu [1 - 20] thì việc chia công suất tác dụng theo phương pháp Droop P/f sẽ không bị ảnh hưởng đáng kể bởi sự sai lệch về trở kháng đường dây nối giữa các bộ nghịch lưu đến điểm chung PCC. Tuy nhiên, sự sai lệch về trở kháng đường dây sẽ ảnh hưởng rất lớn đến việc chia công suất phản kháng theo phương pháp Droop Q/V. Vì vậy trong bài này thì bộ điều khiển Droop đề xuất vẫn giữ nguyên phương trình Droop P/f trong công thức (7). Tuy nhiên, phương trình Droop Q/V trong công thức (8) được cải tiến như sau:

$$V = V_0 - (m_q + \Delta m_q)Q \quad (17)$$

Trong đó:

$$\Delta m_q = k_p \int (Q - Q^*) dt \quad (18)$$

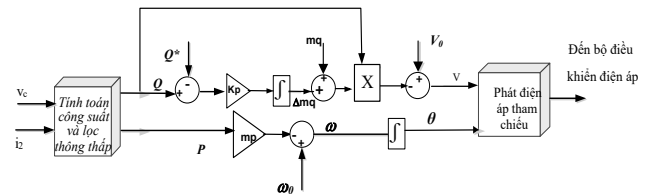
Hệ số độ dốc  $m_q$  được tính theo công thức (9).

Phương pháp cải tiến bộ điều khiển Droop điện áp (Droop Q/V) để nâng cao độ chính xác trong việc chia công suất phản kháng. Cụ thể của phương pháp này là điều chỉnh độ dốc của phương trình Droop điện áp theo công suất phản kháng (Droop Q/V) để bù đắp cho độ sụt áp trên đường dây (do ảnh hưởng của sai lệch về trở kháng đường dây) bằng cách sử dụng các liên kết truyền thông qua hệ thống quản lý năng lượng EMS. Bus truyền thông để tạo thuận lợi cho việc hiệu chỉnh độ dốc điện áp Droop. Độ dốc của phương trình Droop điện áp được hiệu chỉnh thông qua hiệu chỉnh giá trị công suất phản kháng ở ngõ ra của mỗi bộ nghịch lưu, cụ thể như sau:

Mỗi DG gửi công suất phản kháng đo lường Q của chính nó đến EMS, EMS sẽ tính toán giá trị tham chiếu  $Q_i^*$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) cho mỗi DG dựa trên công suất định mức của DG và công suất  $Q^*$  của tổng công suất tải trong Microgrid. Theo đó, mỗi DG sẽ nhận phân giá trị tham chiếu của mình ( $Q_1^*, Q_2^*, \dots, Q_n^*$ ) từ EMS trở về để đưa vào bộ điều khiển ở công thức (18) và thực hiện việc điều chỉnh hệ số độ dốc để bù trừ cho sai lệch về độ sụt áp trên đường dây.

Khi tổng tải thay đổi, các giá trị tham chiếu  $Q_i^*$  sẽ được điều chỉnh sao cho phù hợp và bắt đầu điều khiển. Do đó, mỗi DG sẽ sử dụng công suất phản kháng tham chiếu  $Q_i^*$  của nó để điều chỉnh thích nghi hệ số độ dốc của chính nó,  $Q_i^*$  sẽ là một giá trị tham chiếu cố định cho đến khi tổng công suất phản kháng của tải thay đổi.

Bộ điều khiển Droop đề xuất để điều chỉnh hệ số độ dốc  $m_q$  được hiển thị trong hình 7.



Hình 7. Sơ đồ khối của bộ điều khiển Droop đề xuất cho một bộ nghịch lưu

Bằng cách điều chỉnh các hệ số độ lợi tích phân  $k_p$  cho các bộ điều khiển Droop đề xuất của các DG ở công thức (18). Khi xác lập thì các giá trị công suất Q của các DG phát ra sẽ tiến đến một giá trị công suất bằng nhau theo tỉ lệ định mức, điều này có nghĩa là loại bỏ được sai lệch về sụt áp trên đường dây, hay nói cách khác là loại bỏ được ảnh hưởng của sự sai lệch về trở kháng đường dây. Cuối cùng là bộ điều khiển đề xuất chia công suất đúng theo tỉ lệ công suất định mức của các bộ nghịch lưu.

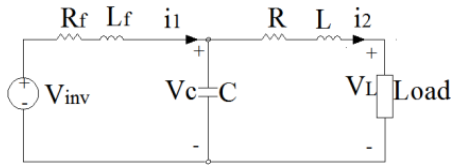
Hệ số  $k_p$  được chọn và điều chỉnh phụ thuộc vào tốc độ mà công suất phản kháng ngõ ra của bộ nghịch lưu đạt được theo mong muốn (chọn thời gian quá độ  $t_{qd}$  từ 1,5s đến 2s và sai số xác lập  $\varepsilon=0,02$ ) cân nhắc giữa thời gian quá độ với độ vọt lố công suất (thời gian  $t_{qd}$  chọn càng nhỏ thì hệ thống đáp ứng càng nhanh, nhưng độ vọt lố cao).

EMS thăm dò định kỳ cho việc đo lường công suất phản kháng ngõ ra của các DG. Tốc độ cập nhật cho các dữ liệu công suất phản kháng của các DG có thể được lựa chọn dựa trên các thông số kỹ thuật của các liên kết truyền thông. Do thực tế

rằng giá trị  $Q^*$  tham chiếu được cập nhật định kỳ, thời gian chậm cập nhật thông tin chậm trễ sẽ không có ảnh hưởng vào việc chia sẻ công suất phản kháng ở trạng thái ổn định. Hơn nữa, các vòng lặp điều chỉnh là đủ chậm mà sự tương tác là không đáng kể với động học Microgrid, được khống chế bởi bộ lọc thông thấp [25 - 26].

2.2.3 Khối điều khiển điện áp và dòng điện

Bộ điều khiển điện áp và dòng điện được thành lập dựa vào sơ đồ hình 6.



Hình 8. Mạch điện tương đương một pha của bộ nghịch lưu kết nối với tải

Trong đó:

R là điện trở của đường dây ( $\Omega$ )

L là điện cảm của đường dây (H)

$R_f$  là điện trở của tụ lọc ( $\Omega$ )

$L_f$  là điện cảm của tụ lọc (H)

C là điện dung của bộ lọc (F).

$i_1$  là dòng điện ở ngõ ra của bộ nghịch lưu.

$i_2$  là dòng điện chạy trên đường dây.

$V_c$  là điện áp trên tụ lọc.

$V_{inv}$  là điện áp ở ngõ ra của bộ nghịch lưu.

Từ hình 8, có thể viết:

$$\begin{cases} i_1 = i_2 + C \frac{dv_c}{dt} & (19) \\ v_{inv} = L_f \frac{di_1}{dt} + R_f i_1 + v_{cd} & (20) \end{cases}$$

Công thức (19) và (20) có thể được viết:

$$i_{1d} = i_{2d} + C \frac{dv_{cd}}{dt} - \omega C v_{cq} \quad (21)$$

$$i_{1q} = i_{2q} + C \frac{dv_{cq}}{dt} + \omega C v_{cd} \quad (22)$$

$$v_{invd} = L_f \frac{di_{1d}}{dt} + R_f i_{1d} - \omega L_f i_{1q} + v_{cd} \quad (23)$$

$$v_{invq} = L_f \frac{di_{1q}}{dt} + R_f i_{1q} + \omega L_f i_{1d} + v_{cq} \quad (24)$$

• Bộ điều khiển điện áp:

Công thức (21) và (22) có thể được viết:

$$\begin{cases} i_{1d} = i_{2d} + C \frac{dv_{cd}}{dt} - \omega C v_{cq} \\ \quad = \Delta i_d + i_{2d} - \omega C v_{cq} & (25) \\ i_{1q} = i_{2q} + C \frac{dv_{cq}}{dt} + \omega C v_{cd} \\ \quad = \Delta i_q + i_{2q} + \omega C v_{cd} & (26) \end{cases}$$

Trong đó:

$$\begin{cases} \Delta i_d = k_{pv}(v_{cd}^* - v_{cd}) + \\ \quad k_{iv} \int (v_{cd}^* - v_{cd}) dt & (27) \\ \Delta i_q = k_{pv}(v_{cq}^* - v_{cq}) + \\ \quad k_{iv} \int (v_{cq}^* - v_{cq}) dt & (28) \end{cases}$$

Các hệ số  $k_{pv}$ ,  $k_{iv}$  lần lượt là hệ số khuếch đại và hệ số tích phân của bộ điều khiển điện áp.

Bộ điều khiển điện áp trong hình 9a được thành lập từ công thức (25) đến (28).

• Bộ điều khiển dòng điện:

Công thức (23) và (24) có thể được viết:

$$\begin{cases} v_{invd} = L_f \frac{di_{1d}}{dt} + R_f i_{1d} - \omega L_f i_{1q} + v_{cd} \\ \quad = \Delta v_d - \omega L_f i_{1q} + v_{cd} & (29) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{invq} = L_f \frac{di_{1q}}{dt} + R_f i_{1q} + \omega L_f i_{1d} + v_{cq} \\ \quad = \Delta v_q + \omega L_f i_{1d} + v_{cq} & (30) \end{cases}$$

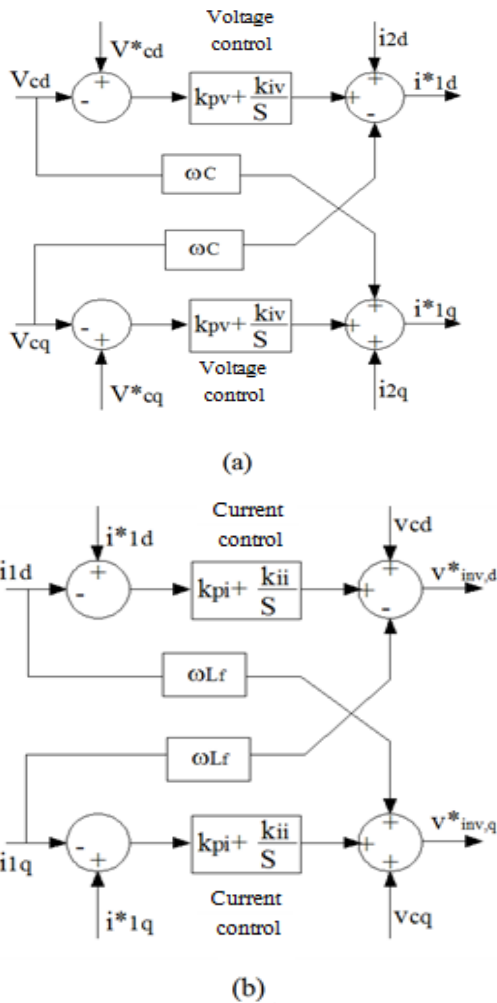
Trong đó:

$$\begin{cases} \Delta v_d = k_{pi}(i_{1d}^* - i_{1d}) + \\ \quad k_{ii} \int (i_{1d}^* - i_{1d}) dt & (31) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta v_q = k_{pi}(i_{1q}^* - i_{1q}) + \\ \quad k_{ii} \int (i_{1q}^* - i_{1q}) dt & (32) \end{cases}$$

Các hệ số  $k_{pi}$ ,  $k_{ii}$  lần lượt là hệ số khuếch đại và hệ số tích phân của bộ điều khiển dòng điện.

Bộ điều khiển dòng điện trong hình 9b được thành lập từ công thức (29) đến (32).



Hình 9. a) Bộ điều khiển điện áp, b) Bộ điều khiển dòng điện

Khảo sát tính ổn định của bộ điều khiển:

Tham khảo theo tài liệu [27], viết lại các phương trình từ (25) đến (32) trong miền tần số:

$$V_1(S) = (k_{pv} + \frac{k_{iv}}{S})(V_c^*(S) - V_c(S)) + I_2(S) \quad (33)$$

$$V_m(S) = (k_{pi} + \frac{k_{ii}}{S})(I_1^*(S) - I_1(S)) + V_c(S) \quad (34)$$

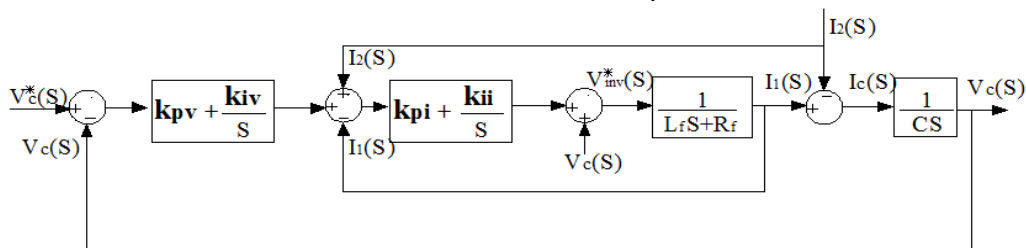
Từ các phương trình (33), (34) và mạch hình 8, ta có sơ đồ khối của bộ điều khiển dòng điện và điện áp trong miền tần số như ở hình 10.

Hàm truyền tương đương của sơ đồ hình 10:

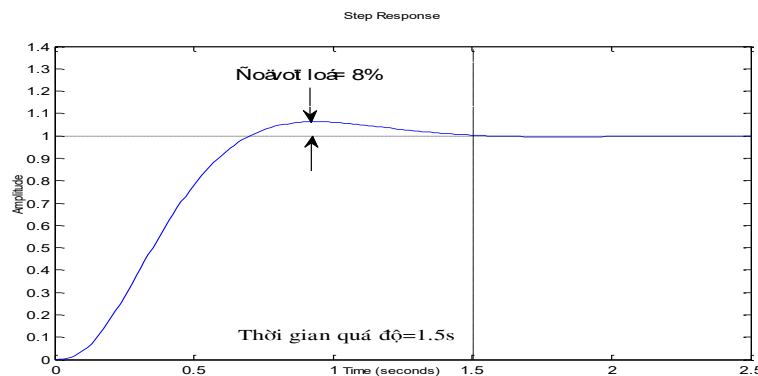
$$G(S) = \frac{V_c(S)}{V_c^*(S)} = \frac{\frac{k_{ic}}{R_f \cdot C}(S + \frac{k_{iv}}{k_{pv}})}{S^3 + \frac{k_{ic}}{R_f}S^2 + \frac{k_{pc} \cdot k_{pv}}{L_f \cdot C}S + \frac{k_{pc} \cdot k_{iv}}{L_f \cdot C}} \quad (35)$$

Các hệ số  $k_{pi}$   $k_{pv}$   $k_{ii}$   $k_{iv}$  có thể được chọn sao cho tất cả các cực của hàm truyền (35) nằm bên trái mặt phẳng phức để hệ luôn ổn định và có sai số xác lập từ 2% đến 5% so với giá trị tham chiếu. Hình 11 cho thấy đáp ứng bước của bộ điều khiển điện áp ứng với các hệ số  $k_{pi}$   $k_{pv}$   $k_{ii}$   $k_{iv}$  đã chọn.

Tùy theo phạm vi điều khiển của tải và các thông số đường dây mà ta có thể điều chỉnh các hệ số  $k_{pi}$   $k_{pv}$   $k_{ii}$   $k_{iv}$  sao cho các cực của hàm truyền (35) nằm bên trái mặt phẳng phức, để hệ luôn ổn định.



Hình 10. Sơ đồ khối của bộ điều khiển dòng điện và điện áp trong miền tần số



Hình 11. Đáp ứng bước của bộ điều khiển điện áp khi chọn các hệ số  $k_{pi}=10$ ;  $k_{pv}=01$ ;  $k_{ii}=1$ ;  $k_{iv}=005$

3 KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

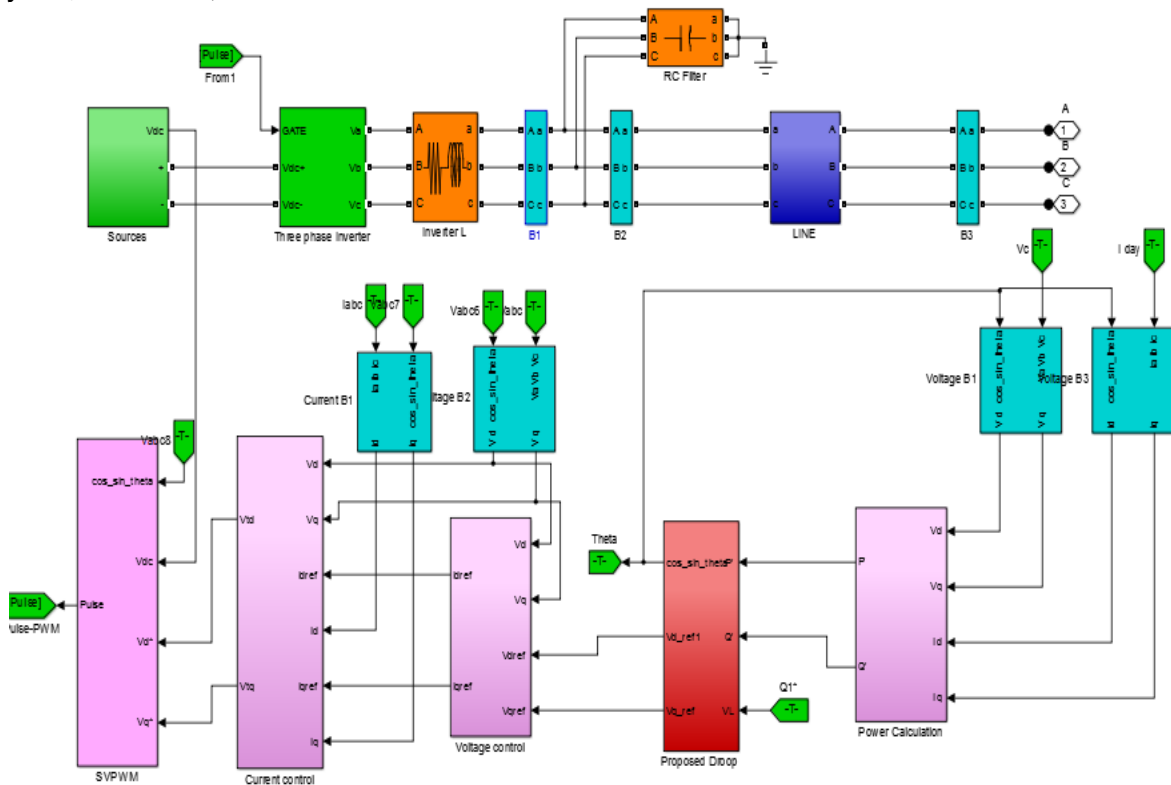
Một Microgrid với ba nguồn phát công suất DG được mô phỏng trong Matlab/simulink để kiểm tra bộ điều khiển đề xuất, và để chứng minh tính khả thi của bộ điều khiển đề xuất cho Microgrid với hơn hai BNL. Các thông số hệ thống được thể hiện trong Bảng 1. Ba đơn vị DG là giống hệt nhau và thông số bộ lọc cũng giống nhau, thông số trở kháng đường dây khác nhau. Để cho thấy tính chính xác của bộ điều khiển đề xuất thì thực hiện mô phỏng bằng hai bộ điều khiển (bộ điều khiển Droop truyền thống và bộ điều khiển Droop đề xuất), sau đó so sánh kết quả của chúng.

**Ghi chú:** Bộ điều khiển đề xuất được thiết kế trong trường hợp thông số của các đường dây thì khác nhau. Các thông số điện trở và điện cảm của dây dẫn được chọn theo công suất của phụ tải, tham khảo từ sách “Cung cấp điện” của nhóm tác giả Nguyễn Xuân Phú, Nguyễn Công Hiền, Nguyễn Bội Khuê, nhà xuất bản Khoa học kỹ thuật TP. HCM, năm 1998.

Các hệ số Droop tần số  $m_p$  và Droop điện áp  $m_q$  được chọn theo công thức (9).

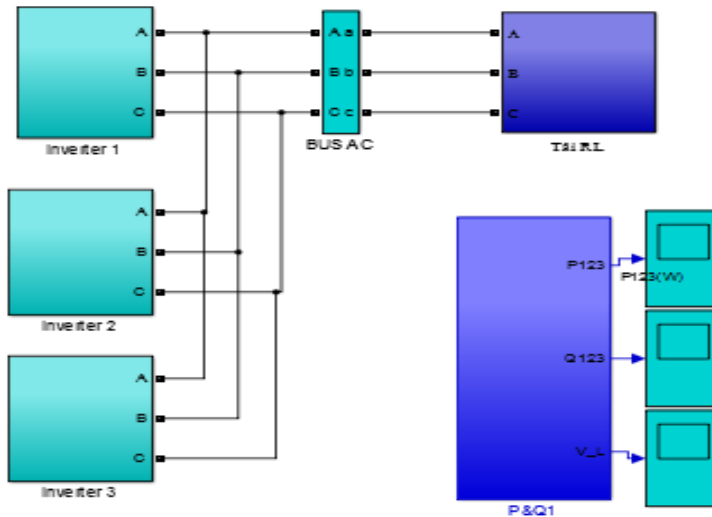
BẢNG I  
BẢNG CÁC THÔNG SỐ MÔ PHỎNG

Thông số của bộ nghịch lưu và bộ điều khiển	Giá trị
Công suất định mức S	4 kVA
Điện áp định mức V0	311 V
Điện cảm bộ lọc $L_f$	1,2mH
Điện trở bộ lọc $R_f$	0,2Ω
Điện dung bộ lọc C	50μF
Tần số đóng cắt $f_s$	10kHz
Tần số lấy mẫu $f_T$	5kHz
Hệ số Droop điện áp $m_q$	0,0017V/Var
Hệ số Droop tần số $m_p$	0,0001Rad/s.W
Trở kháng đường dây thứ 1	1+j0.314 Ω
Trở kháng đường dây thứ 2	0.8+j0.2513 Ω
Trở kháng đường dây thứ 3	0.6+j0.1885 Ω



Hình 12. Mô hình chi tiết của bộ điều khiển chia công suất cho một bộ nghịch lưu bằng phương pháp đề xuất



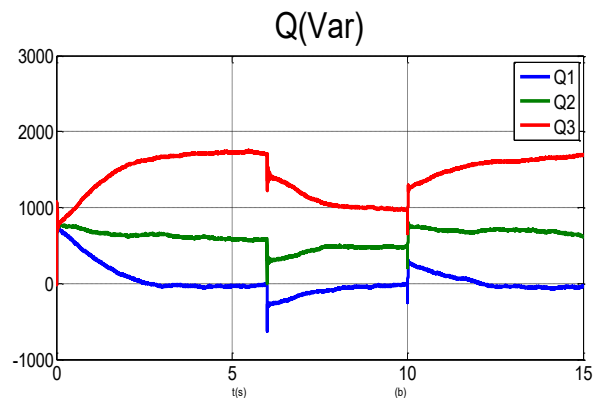
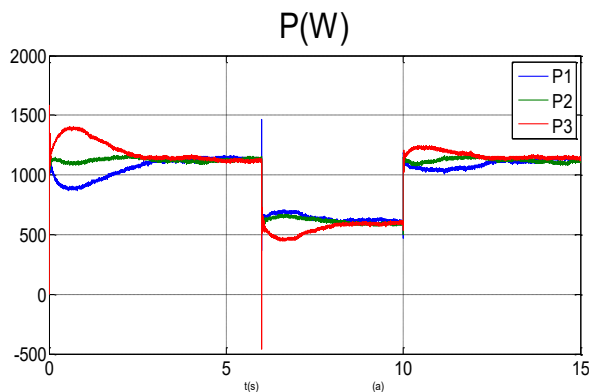


**Hình 13.** Mô hình của bộ điều khiển chia công suất cho 3 bộ nghịch lưu song song bằng phương pháp đề xuất

Mô hình mô phỏng trên hình 12 bao gồm các khối chính sau:

1. Nguồn DC (sources-Vdc)
2. Bộ nghịch lưu 3 pha gồm 6 khóa (Three phase inverter)
3. Bộ lọc (filter)
4. Trở kháng đường dây (line impedance)
5. Khối tính toán công suất (power calculation)
6. Khối Droop đề xuất (Proposed Droop)
7. Khối điều khiển điện áp (voltage control)
8. Khối điều khiển dòng điện (current control)
9. Khối điều chế xung (SVPWM)

### 3.1. Mô phỏng chia công suất bằng cách sử dụng điều khiển Droop truyền thống



**Hình 14.** Mô phỏng chia công suất với bộ điều khiển Droop truyền thống (a) Công suất tác dụng, (b) Công suất phản kháng

Hình 14 cho thấy trong trường hợp trở kháng các đường dây khác nhau thì bộ điều khiển Droop truyền thống cho kết quả chia công suất tác dụng tương đối chính xác. Tuy nhiên, khả năng chia công suất phản kháng là rất kém khi trở kháng đường dây là khác nhau.

Sai lệch khi chia công suất tác dụng được tính:

$$e_p \% = \frac{P_i - P_i^*}{P_i^*} \cdot 100\%$$

$P_i$  là công suất tác dụng được đo tại đầu ra của bộ nghịch lưu  $i$  và  $P_i^*$  là công tác dụng mong muốn được chia của bộ nghịch lưu  $i$ .

Xét sai số chia công suất tác dụng khi xác lập trong khoảng thời gian từ 0s đến 6s:

$$\begin{aligned} e_p \% &= \frac{P_i - P_i^*}{P_i^*} \cdot 100\% \\ &= \frac{1180 - 1150}{1150} \cdot 100\% = 2,6\% \end{aligned}$$

Sai lệch khi chia công suất phản kháng được tính:

$$e_q \% = \frac{Q_i - Q_i^*}{Q_i^*} \cdot 100\%$$

$Q_i$  là công suất phản kháng được đo tại đầu ra của bộ nghịch lưu  $i$  và  $Q_i^*$  là công suất phản kháng mong muốn được chia của bộ nghịch lưu  $i$ .

Xét sai số chia công suất phản kháng của bộ nghịch lưu 1 khi xác lập trong khoảng thời gian từ 0s đến 6s:

$$\begin{aligned} e_q \% &= \frac{Q_i - Q_i^*}{Q_i^*} \cdot 100 \\ &= \frac{1150 - 750}{750} \cdot 100\% = 53\% \end{aligned}$$

Ta thấy sai lệch khi chia công suất phản kháng là rất lớn, có thể dẫn đến mất ổn định hệ thống.

### 3.2. Mô phỏng chia công suất bằng cách sử dụng điều khiển Droop đề xuất

Hình 15 cho thấy bộ điều khiển đề xuất có tính chính xác cao trong việc chia sẻ công suất tác dụng và công suất phản kháng khi trở kháng các đường dây khác nhau, có sai số không đáng kể. Đảm bảo chất lượng điện áp cung cấp cho tải ( $V_{PCC} = 307,5V$ ).

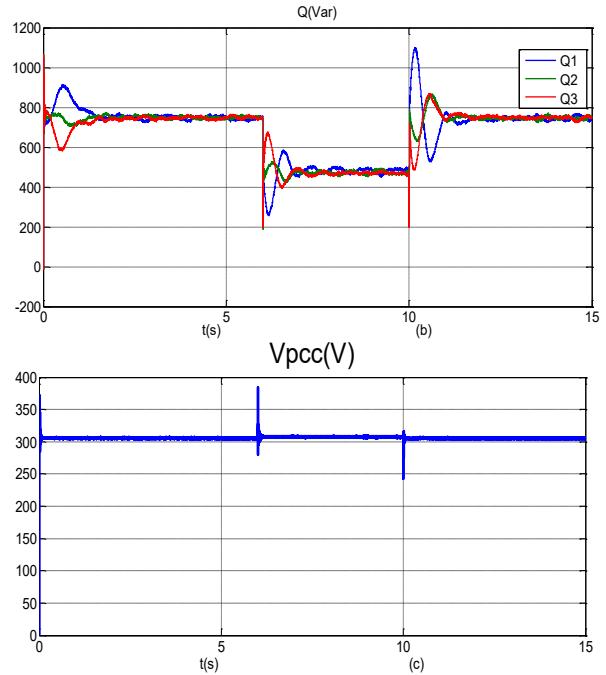
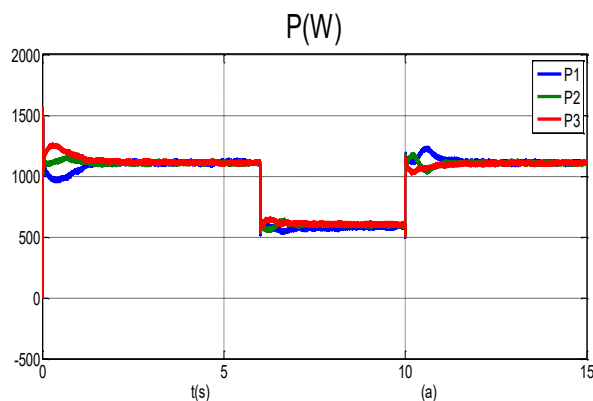
Xét sai số chia công suất tác dụng khi xác lập trong khoảng thời gian từ 0s đến 6s:

$$\begin{aligned} e_p \% &= \frac{P_i - P_i^*}{P_i^*} \cdot 10 \\ &= \frac{1155 - 1150}{1150} \cdot 100\% = 0,43 \end{aligned}$$

Xét sai số chia công suất phản kháng của bộ nghịch lưu 1 khi xác lập trong khoảng thời gian từ 0s đến 6s:

$$\begin{aligned} e_q \% &= \frac{Q_i - Q_i^*}{Q_i^*} \cdot 100 \\ &= \frac{752 - 750}{750} \cdot 100\% = 0,26\% \end{aligned}$$

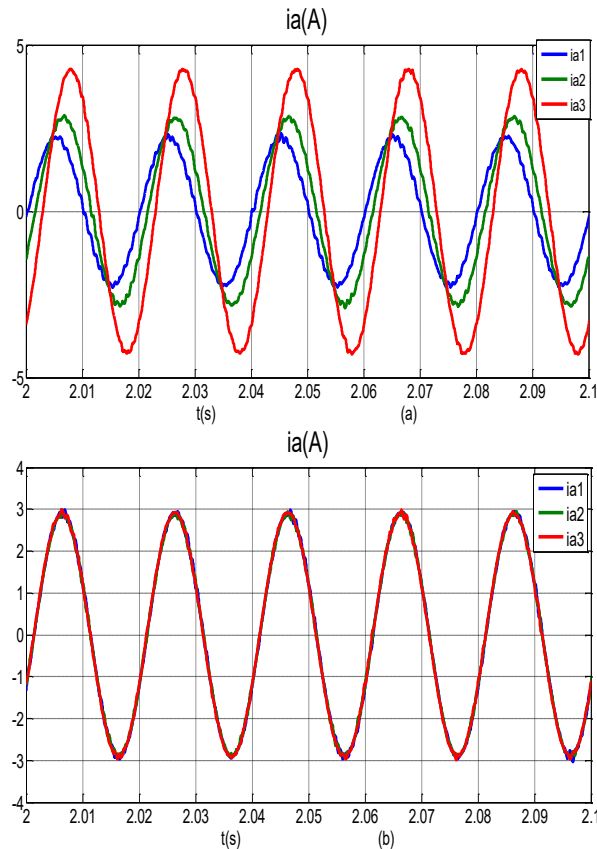
Ta thấy sai lệch khi chia công suất tác dụng và phản kháng là không đáng kể.



**Hình 15.** Mô phỏng chia công suất với bộ điều khiển Droop đề xuất (a) Công suất tác dụng, (b) Công suất phản kháng, (c) Điện áp tại tải

Hình 16 mô phỏng dòng điện chạy trên các đường dây pha a của các bộ nghịch lưu khi trở kháng các đường dây khác nhau. Hình 16a cho thấy với bộ điều khiển Droop thông thường thì dòng điện chạy trên các đường dây pha a của các bộ nghịch lưu lệch pha nhau và biên độ không bằng nhau. Điều này là do ảnh hưởng của sự sai lệch về trở kháng của các đường dây, sai lệch trở kháng dẫn đến sai lệch về sụt áp trên đường dây, mà các bộ nghịch lưu lại kết nối chung với nhau tại điểm PCC nên dẫn đến điện áp tại đầu đường dây không bằng nhau, theo nguyên lý Droop ở công thức (8) thì sẽ dẫn đến công suất phát ra của các bộ nghịch lưu không bằng nhau nên dòng điện trên các pha tương ứng cũng không trùng nhau.

Hình 16b cho thấy với bộ điều khiển Droop đề xuất thì dòng điện chạy trên các đường dây pha a của các bộ nghịch lưu cùng pha nhau và biên độ bằng nhau, do các hệ số Droop điện áp được điều chỉnh để bù trừ sự sai lệch về sụt áp trên đường dây nên loại bỏ được ảnh hưởng của sự sai lệch về trở kháng đường dây.



**Hình 16.** Mô phỏng dòng điện trên 3 dây pha a của 3 bộ nghịch lưu, (a) Sử dụng bộ điều khiển Droop truyền thống, (b) Sử dụng bộ điều khiển Droop đề xuất

#### 4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, một chiến lược điều khiển để nâng cao độ chính xác trong việc chia công suất phản kháng trong Microgrid độc lập được đề xuất và được chứng minh bằng mô phỏng. Hệ số độ dốc của phương trình Droop điện áp được điều chỉnh để bù đắp cho sự sai lệch về điện áp rơi trên đường dây. Kết quả mô phỏng cho thấy sự chia sẻ công suất phản kháng bằng cách sử dụng phương pháp đề xuất thì cho sai lệch không đáng kể, khả năng chia công suất của bộ điều khiển đề xuất thì tốt hơn rất nhiều so với phương pháp Droop truyền thống.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] M. A. Zamani, T. S. Sidhu, A. Yazdani, "Investigations into the control and protection of an existing distribution network to operate as amicrogrid: A case study," *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 61 no. 4, pp. 1904–1915, 2014.

[2] J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, A. G. Madureira, "Defining control strategies for microgrids islanded operation," *IEEE Transactions Power Systems*, vol. 21 no. 2, pp. 916–924, 2006.

[3] J. He and Y. W. Li, "An enhanced microgrid load demand sharing strategy," *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 27 no. 9, pp. 3984–3995, 2012.

[4] J. M. Guerrero, M. Chandorkar, T.-L. Lee, and P. C. Loh, "Accurate reactive power sharing in an islanded microgrid using adaptive virtual impedance," *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 60 no. 4, pp. 1254–1262, 2013.

[5] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuña, and M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids—A general approach towards standardization," *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 58 no. 1, pp. 158–172, 2011.

[6] M. N. Marwali, J.-W. Jung, and A. Keyhani, "Control of distributed generation systems—Part II: Load sharing control," *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 19 no. 6, pp. 1551–1561, 2004.

[7] J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, M. Savaghebi, J. Eloy-Garcia, and R. Teodorescu, "Modeling, analysis, and design of stationary-referenceframe droop-controlled parallel three-phase voltage source inverters," *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 60 no. 4, pp. 1271–1280, 2013.

[8] M. Savaghebi, A. Jalilian, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Secondary control scheme for voltage unbalanced compensation in an islanded droopcontrolled microgrid," *IEEE Transactions Smart Grid*, vol. 3 no. 2, pp. 797–807, 2012.

[9] M. Savaghebi, A. Jalilian, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Secondary control for voltage quality enhancement in microgrids," *IEEE Transactions Smart Grid*, vol. 3 no. 4, pp. 1893–1902, 2012.

[10] Q. Shafiee, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Distributed secondary control for islanded microgrids—A novel approach," *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 29 no. 2, pp. 1018–1031, 2014.

[11] J. Kim, J. M. Guerrero, P. Rodriguez, R. Teodorescu, and K. Nam, "Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverterbased flexible AC microgrid," *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 26 no. 3, pp. 689–701, 2011.

[12] W. Yao, M. Chen, J. Matas, J. M. Guerrero, and Z.-M. Qian, "Design and analysis of the droop control method for parallel inverters considering the impact of the complex impedance on the power sharing," *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 58 no. 2, pp. 576–588, 2011.

[13] J. M. Guerrero, J. Matas, L. G. de Vicuña, M. Castilla, and J. Miret, "Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive impedance," *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 54 no. 2, pp. 994–1004, 2007.

[14] J. M. Guerrero, L. G. de Vicuña, J. Matas, M. Castilla, and J. Miret, "Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control," *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 52 no. 4, pp. 1126–1135, 2005.

- [15] A. Tuladhar, H. Jin, T. Unger, and K. Mauch, "Control of parallel inverters in distributed AC power systems with consideration of line impedance Effect," *IEEE Transactions power electronics*, vol. 36 no. 1, pp. 131–138, 2016.
- [16] R. H. Lasseter, B. Schenkman, J. tevens, H. Vollkommer, D. Klapp, E. Linton, H. Hurtado and J. Roy, "CERTS Microgrid laboratory test bed," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26 no. 1, pp. 325–332, 2011.
- [17] F. Katiraei and M. R. Irvani, "Power management strategies for a Microgrid with multiple distributed generation units," *IEEE Transactions Power Electronic*, vol. 21 no. 5, pp. 1821–1831, 2005.
- [18] Hai chuan, Niu Meng Jiang, Daming Zhang and John Fletcher, "Autonomous Micro-Grid Operation by Employing Weak Droop Control and PQ Control," *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 563-570, 2014.
- [19] Q.C. Zhong, "Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel," *IEEE Transactions Power Electronics*, vol. 60 no. 4, pp. 1281–1290, 2013.
- [20] M. A. Abusara, J. M. Guerrero and S. M. Sharkh, "Line-interactive ups for Microgrids," *IEEE Transactions Electronics*, vol. 61 no. 3, pp. 1292–1300, 2014.
- [21] Remus Teodorescu, Marco Liserre and Pedro Rodríguez, "Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems," ISBN: 978-0-470-05751-3, 2011.
- [22] M. Anwar, M. I. Marei and A. A. El-Sattar, "Generalized Droop-based control for an islanded Microgrid," *2017 12th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*, Cairo, 2017, pp. 717-722.
- [23] L. Yi-xi, X. Jia-zhu and L. Long-fu, "An improved Droop control strategy in the islanding operation," *2013 Chinese Automation Congress, Changsha*, 2013, pp. 723-727.
- [24] A. Wang and J. Zhang, "A novel reactive power control strategy in virtual flux Droop control," *2017 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Book of Abstracts*, Lodz, 2017, pp. 1-2.
- [25] E. A. A. Coelho, P. C. Cortizo, and P. F. D. Garcia, "Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone AC supply systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 2, pp. 533–542, Mar./Apr. 2002.
- [26] H. J. Avelar, W. A. Parreira, J. B. Vieira, L. de Freitas, and E. A. A. Coelho, "A state equation model of a single-phase grid-connected inverter using a Droop control scheme with extra phase shift control action," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 3, pp. 1527–1537, Mar. 2012.
- [27] Jae-Hyuk Kim Yoon-Seok Lee Hyun-Jun Kim and Byung-Moon Han "A New Reactive-Power Sharing Scheme for Two Inverter-Based Distributed Generations with Unequal Line Impedances in Islanded Microgrids" *Energies* 2017 10 1800.

**Phạm Thị Xuân Hoa** nhận bằng kỹ sư Kỹ thuật điện tại trường đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM. Năm 2002, nhận bằng Thạc sĩ về Thiết bị mạng và Nhà máy điện năm 2006 tại trường đại học Bách khoa ĐHQG-HCM, nhận bằng Tiến Sĩ năm 2018 tại trường đại học Bách khoa ĐHQG-HCM. Hiện nay đang là giảng viên tại khoa Điện-Điện tử trường đại học Công nghiệp thực phẩm TP.HCM. Hướng nghiên cứu chính là điều khiển năng lượng điện và microgrid.

**Trần Thị Như Hà** nhận bằng kỹ sư Điện tử tại trường đại học Bách khoa Đà Nẵng năm 2010, nhận bằng Thạc sĩ về Tự động hóa năm 2018 tại trường đại học Giao thông Vận tải TP.HCM. Hiện nay đang là giảng viên tại khoa Điện-Điện tử trường đại học Công nghiệp thực phẩm TP.HCM. Hướng nghiên cứu chính là điều khiển tự động.

# Design and analysis of the droop control method for Islanded Microgrid

Hoa Xuan Pham Thi\*, Ha Nhu Tran Thi  
Ho Chi Minh City University of Food Industry  
\*Corresponding email: hoaptx@cntp.edu.vn

Received: 07-10-2017; Accepted: 20-12-2018; Published: 30-12-2018

**Abstract**—In this paper, a reactive power sharing method by adjusting the droop voltage slope is proposed, in order to increase the accuracy of the reactive power sharing. The mismatch of line impedances lead to mismatch of voltage drop across the line is compensated by adjusting the droop

voltage slope. The droop voltage slope is adjusted to adaptive with the change of load, the results of proposed method is more accurate reactive power sharing than conventional methods. The feasibility and effectiveness of the proposed strategy are evidenced by the simulation results.

**Index terms**—Power sharing control, Microgrid, parallel inverter, droop control, islanded microgrid, line impedance.