

Phân tích thiết kế sơ đồ điều khiển droop mới các bộ nghịch lưu kết nối song song trong Microgrid độc lập

- Lê Minh Phương¹
- Nguyễn Minh Huy¹
- Phạm Thị Xuân Hoa¹
- Trần Quang Thọ²

¹ Khoa Điện – Điện Tử, Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM

² Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM

(Bản nhận ngày 26 tháng 05 năm 2015, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 25 tháng 08 năm 2015)

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kỹ thuật chia tải mới cho các bộ nghịch lưu áp ba pha kết nối song song trong lưới độc lập. Trong đó đề xuất bộ điều khiển droop cải tiến cho phép chia tải chính xác tỷ lệ với công suất định mức của bộ nghịch lưu đảm bảo giảm sụt áp do ảnh hưởng của tải và các hệ số droop và duy trì điện áp tải trong phạm vi định mức. Trong đó công suất tác dụng và công suất phản kháng được chia bằng cách điều chỉnh điện áp theo điện áp Droop tham chiếu trong điều kiện nhiều bộ nghịch lưu làm việc song song với sự khác biệt rõ rệt giữa tổng trở đường dây, tổng

trở ngõ ra của các bộ nghịch lưu áp. Ngoài ra bài báo trình bày khả năng khắc phục những nhược điểm của giải thuật Droop truyền thống bằng việc phân tích lý thuyết cho trường hợp tổng trở ngõ ra mang tính trở. Mô hình điều khiển được mô phỏng bằng Matlab-Simulink cho ba bộ biến tần nguồn áp kết nối song song. Kết quả mô phỏng cho thấy ưu điểm của sơ đồ đề xuất, cụ thể sai số chia công suất tác dụng của sơ đồ truyền thống đạt đến 8.7% trong khi với sơ đồ đề xuất là 0.6% và độ sụt áp giảm đáng kể trong sơ đồ đề xuất.

Từ khóa: Các bộ nghịch lưu song song, điều khiển Droop truyền thống, chia công suất.

1. GIỚI THIỆU

Hiện nay hệ thống lưới phân phối điện cục bộ (DG) sử dụng nguồn năng lượng tái tạo mặt trời, gió và nguồn lưu trữ được phát triển rộng rãi. Tuy nhiên các nguồn điện này không trực tiếp tạo ra điện áp xoay chiều 3 pha được, vì vậy yêu cầu phải sử dụng các bộ nghịch lưu nguồn áp 3 pha làm giao diện. Các bộ nghịch lưu này tạo lưới siêu nhỏ (Microgrid) trước khi kết nối với lưới điện [1] - [4].

Để truyền tải lượng công suất lớn hay kết nối

nhiều nguồn phát với lưới cần thiết kết nối và vận hành song song các bộ nghịch lưu do khả năng mang dòng điện lớn của các thiết bị bán dẫn bị hạn chế. Một lý do khác là các bộ nghịch lưu hoạt động song song sẽ tạo thành hệ thống dự phòng, nâng cao độ tin cậy hệ thống đồng thời tạo tính linh hoạt cho phép đóng ngắt nguồn vào lưới một cách dễ dàng. [3]. Hình. 1 mô tả một hệ thống Microgrid cung cấp điện với một số bộ nghịch

lưu áp ba pha kết nối song song và chia tải thông qua một bus AC chung .

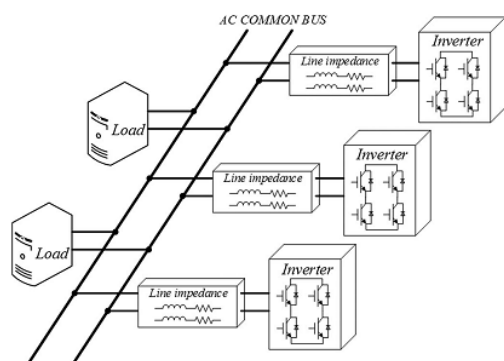


Fig. 1. Power supply system with the parallel inverters.

Hình 1. Sơ đồ khối Microgrid gồm các bộ nghịch lưu kết nối song song

Việc kết nối song song các các bộ nghịch lưu chung thành cái AC là vấn đề khó khăn và phức tạp hơn nhiều so với việc kết nối song song các nguồn DC, vì mỗi bộ nghịch lưu phải đảm bảo chia đúng tải đồng thời đảm bảo đồng bộ trong hệ thống. Về lý thuyết, nếu điện áp đầu ra của mỗi nghịch lưu có cùng một biên độ, tần số và độ lệch pha, dòng điện tải sẽ được phân phối đồng đều. Tuy nhiên, do sự khác biệt về thông số giữa chúng cũng như các sự khác biệt trở kháng đường dây kết nối, dòng tải sẽ không bằng nhau và thực tế này sẽ dẫn đến việc xuất hiện dòng điện cân bằng chạy giữa các bộ biến đổi và có thể gây quá tải hoặc thậm chí gây hư hỏng [3].

Vấn đề đặt ra trong việc kết nối song song các bộ nghịch lưu là làm thế nào để chia tải và đảm bảo chúng được kết nối hay ngắt một cách linh hoạt không ảnh hưởng đến độ tin cậy của hệ thống. Sự phát triển nhanh chóng của các bộ xử lý tín hiệu kỹ thuật số đã làm tăng các kỹ thuật điều khiển hoạt động song song các bộ nghịch lưu. Những sơ đồ điều khiển có thể được phân thành hai nhóm chính [3],[5]:

Dạng thứ nhất dựa trên các kỹ thuật chia tải tích cực, và phần lớn trong số họ có nguồn gốc từ

các sơ đồ điều khiển song song các bộ dc-dc, như điều khiển tập trung, dạng master-slave (MS), chia tải trung bình (ALS) , và điều khiển chuỗi tròn (3C). Mặc dù các sơ đồ điều khiển này đều đạt được kết quả điều khiển điện áp và chia tải tốt nhưng các sơ đồ này yêu cầu bắt buộc có giao tiếp trao đổi tín hiệu giữa các bộ nghịch lưu thông qua hệ thống truyền thông.

Dạng thứ hai hoạt động dựa trên việc sử dụng nguyên lý Droop, được sử dụng rộng rãi trong hệ thống phát điện thông thường . Ưu điểm là không cần hệ thống thông tin truyền thông giữa các bộ nghịch lưu với nhau.. Theo phương pháp này việc điều chỉnh tần số và biên độ điện áp đầu ra được thực hiện theo công suất tác dụng và công suất phản kháng cung cấp bởi bộ nghịch lưu. Phương pháp droop đạt được độ tin cậy cao và tính linh hoạt trong phân bố các mô-đun, vì chỉ sử dụng phép đo công suất tại chỗ.

Tuy nhiên, phương pháp droop truyền thống có một số nhược điểm làm hạn chế phạm vi ứng dụng của nó, như: a) đáp ứng chậm với sự thay đổi của tải; b) phải cân bằng giữa độ chính xác trong chia công suất và độ lệch tần số và điện áp; c) mất cân bằng thành phần hài dòng điện; và d) phụ thuộc nhiều vào đường dây và trở kháng đầu ra của biến tần.

Vì vậy, mặc dù có sự tiến bộ đáng kể trong việc nghiên cứu các giải pháp, nhưng vẫn tồn tại vấn đề chia tải chính xác tỷ lệ với công suất định mức của bộ nghịch lưu. Đặc biệt, độ chính xác trong việc chia tải của công suất phản kháng (theo Q-E và P- ω droop) là không cao [6. Một số phương pháp phát triển để chia sẻ tải bằng nhau, như trong [7], không thể áp dụng trực tiếp để chia sẻ theo tỷ lệ theo công suất định mức của các bộ nghịch lưu. Một vấn đề khác đặt ra là điện áp đầu ra giảm do sự gia tăng của tải và do chính bộ điều khiển Droop [7]. Do đó, vấn đề chia tải tỷ lệ cần phải được nghiên cứu trên cơ sở hệ thống.

Trong các sơ đồ điều khiển Droop truyền thống, để chia công suất theo tỷ lệ công suất định mức các bộ nghịch lưu kết nối song song, các bộ nghịch lưu phải có cùng trở kháng và phải có điện áp tại điểm kết nối phải bằng nhau. Cả hai điều kiện rất khó thực hiện và đây là lý do chính khi áp dụng giải thuật truyền thống khó đạt được độ chính xác của việc chia công suất khi thông số của đường dây kết nối khác nhau.

Bài báo đề xuất sơ đồ điều khiển Droop mới cho phép chia tải tỷ lệ chính xác giữa các bộ nghịch lưu vận hành song song trong Microgrids ở chế độ độc lập trong điều kiện khác biệt về thông số đường dây và trở kháng đầu ra bộ nghịch lưu. Ngoài ra, sơ đồ điều khiển đề xuất cho phép điều khiển duy trì điện áp tải trong định mức và giảm ảnh hưởng của tải, hệ số droop điện áp.

Trong bài báo này, sơ đồ điều khiển droop đề xuất được phân tích dựa trên cơ sở là điện trở đầu ra các bộ nghịch lưu mang tính trở nhưng nó có thể được áp dụng cho trường hợp là thuần cảm và tổng quát, bằng cách sử dụng phương pháp droop Q-E và P- ω .

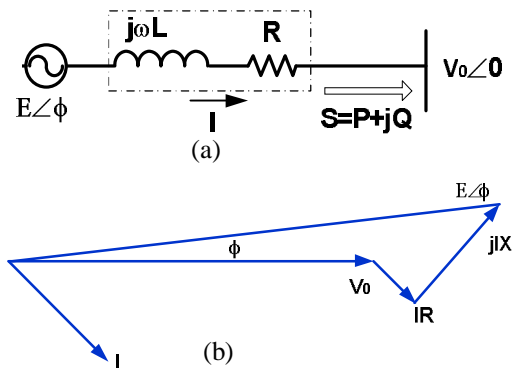
2. PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT (DROOP CONTROL) VÀ CHIA TẢI

Phương pháp điều khiển trượt (Droop control) các bộ nghịch lưu - còn được gọi là phương pháp điều khiển độc lập hay không dây, hoạt động dựa trên nguyên lý trong hệ thống điện, tức là dựa trên nguyên lý tự điều chỉnh của máy phát điện đồng bộ trong chế độ kết nối lưới : công suất tác dụng tăng khi điện áp giảm, công suất phản kháng tăng khi tần số lưới tăng.

Trong trường hợp các bộ nghịch lưu kết nối song song, công suất tác dụng và công suất phản kháng cung cấp cho các thanh cái AC là giá trị trung bình, và vì vậy tín hiệu này sẽ được sử dụng để làm tín hiệu tham chiếu điều chỉnh tần số và biên độ điện áp đầu ra của các bộ nghịch lưu. Phương pháp droop đạt được độ tin cậy cao và đảm bảo tính linh hoạt trong việc sắp đặt vị trí y

của các mô-đun vì nó chỉ sử dụng các phép đo tại chỗ.

Nguyên tắc của phương pháp điều khiển trượt truyền thống được giải thích bằng cách xem xét một mạch tương đương của một bộ nghịch lưu [9] kết nối với AC bus và phân tích dựa trên định lý Thevenin được thể hiện ở hình 2. Trong hình này, $E\angle\phi$ là điện áp hở mạch của bộ nghịch lưu, I là dòng điện, ϕ độ lệch pha giữa điện áp đầu ra bộ nghịch lưu và điện áp bus AC, $V_0\angle 0$ là điện áp bus AC chung, $R + j\omega L$ là trở kháng đầu ra của biến tần, trong đó bao gồm các trở kháng đầu ra và trở kháng đường dây, và Z và θ là biên độ và lệch pha tương ứng.



Hình 2.(a) Sơ đồ tương đương của bộ nghịch lưu kết nối Microgrid; (b) Biểu đồ vector điện áp dòng điện

Sơ đồ điện được này được mô tả bởi vector điện áp, dòng điện tương ứng được thể hiện trong hình 2 (b).

Công suất bộ nghịch lưu cung cấp được tính như sau:

$$S = \bar{V}_0 * \bar{I}^* = P + jQ = \frac{V_0 E}{Z} \angle(\theta - \phi) - \frac{V_0^2}{Z} \angle\theta \tag{1}$$

Trong đó \bar{I}^* - số phức liên hợp của vector dòng điện và:

$$\bar{I} = \frac{E\angle\phi - V_0\angle 0}{Z\angle\theta} = \frac{E}{Z} \angle(\phi - \theta) - \frac{V_0}{Z} \angle(-\theta) \tag{2}$$

$$\bar{Z} = R + jX \quad (3)$$

Do đó, công suất tác dụng và công suất phản kháng của bộ nghịch lưu có thể biểu diễn dưới dạng sau:

$$P = \left(\frac{V_0 E}{Z} \cos \phi - \frac{V_0^2}{Z}\right) \cos \theta + \frac{V_0 E}{Z} \sin \phi \sin \theta \quad (4)$$

$$Q = \left(\frac{V_0 E}{Z} \cos \phi - \frac{V_0^2}{Z}\right) \sin \theta - \frac{V_0 E}{Z} \sin \phi \cos \theta \quad (5)$$

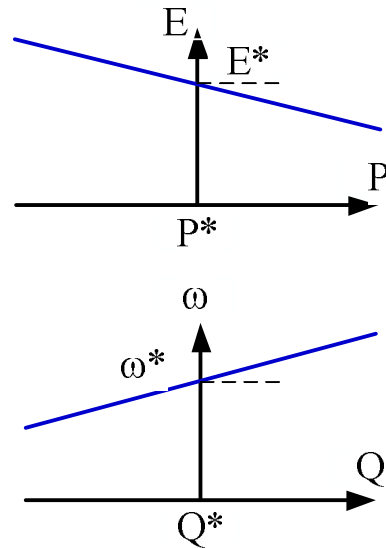
Các thành phần cảm ứng của các trở kháng đường dây trong lưới cao thế và trung thế có giá trị cao hơn nhiều so với thành phần điện trở, ngược lại các thành phần cảm ứng của các trở kháng đường dây trong lưới hạ thế là không đáng kể và chủ yếu là mang tính trở, như được trình bày trong [9].

Do phạm vi bài báo liên quan đến lưới hạ thế, ở đó thành phần điện trở của đường dây khá lớn so với thành phần cảm ứng của kháng trở bộ nghịch lưu do vậy có thể coi $\cos \theta = 1$; $\sin \theta = 0$. Ngoài ra, thực tế góc lệch giữa điện áp đầu ra bộ nghịch lưu và điện áp bus AC ϕ có giá trị nhỏ, do đó $\sin \phi \Rightarrow \phi$ và $\cos \delta = 1$, từ biểu thức (4) và (5) ta có:

$$P = \frac{E V_0 \cos \phi - V_0^2}{R} \Rightarrow E - V_0 \approx \frac{R P}{V_0} \quad (6)$$

$$Q = -\frac{E V_0 \sin \phi}{R} \Rightarrow \phi \approx -\frac{R Q}{E V_0} \quad (7)$$

Biểu thức (6) và (7) cho thấy một mối quan hệ trực tiếp giữa góc điện (tần số) với công suất phản kháng Q, và điện áp với công suất tác dụng P. Từ những phương trình này, chúng ta có thể kết luận rằng Q tỷ lệ với góc pha ϕ và P tỷ lệ nghịch với hiệu điện áp $(E - V_0)$. Vì vậy, đặc tính droop P-V và Q- ω được sử dụng theo công thức (8) như trình bày trên hình 3

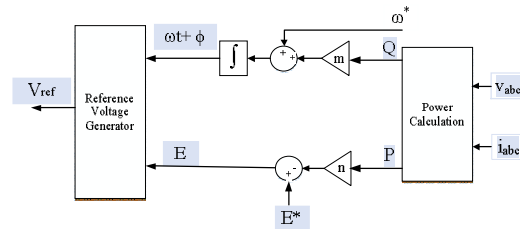


Hình 3. Đặc tính droop điện áp và tần số khi tổng trở ngõ ra mang tính trở.

$$\begin{cases} E = E^* - nP \\ \omega = \omega^* + mQ \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó ω^* và E^* là tần số biên độ điện áp của bộ nghịch lưu khi không tải và m và n là hệ số droop của tần số và biên độ điện áp.

Trên cơ sở biểu thức (8), sơ đồ điều khiển droop được thiết kế và được thể hiện như trong hình 4



Hình 4. Sơ đồ điều khiển Droop truyền thống

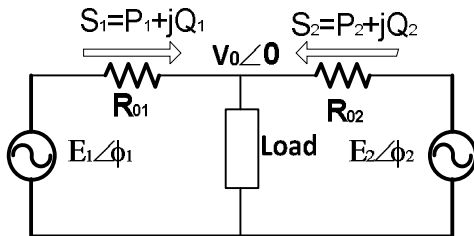
Sơ đồ điều khiển Droop bao gồm các khối chính sau: a) khối tạo điện áp tham chiếu; b) khối tính toán công suất tải và c) khối điều khiển công suất P,Q. Trong đó điện áp tham chiếu được tính như trong công thức (9) và công suất phản kháng Q là tỷ lệ thuận với $(-\phi)$. Để đảm bảo rằng: các

vòng hồi tiếp ($Q - \omega$) là vòng hồi tiếp âm mà nó có thể điều chỉnh tần số, thì dấu trước (m^*Q) phải là dấu (+) để làm cho tần số tăng lên. Các hệ số droop n và m thường được xác định bằng tỷ lệ điện áp giảm mong muốn (nP^*/E^*) và tỷ lệ tăng tần số (mQ^*/E^*), tương ứng. Trong đó P^* là công suất tác dụng và công suất phản kháng Q^* định mức, E^* , ω^* - điện áp và tốc độ góc bộ nghịch lưu khi không tải.

$$v_{ref} = \sqrt{2}E \sin(\omega t + \phi) \quad (9)$$

3. CHẾ ĐỘ LÀM VIỆC SONG SONG CÁC BỘ NGHỊCH LƯU

Phân tích hoạt động của các bộ nghịch lưu kết nối song song tích hợp sơ đồ điều khiển Droop trong cấu hình lưới Microgrid như trình bày trong hình 5. Những phân tích trong các phần tiếp theo sẽ được thực hiện đối với các trường hợp với hai bộ nghịch lưu, tuy nhiên có thể được áp dụng cho nhiều bộ nghịch lưu kết nối song song. Các bộ nghịch lưu trong hình 5 có thể được coi là tập hợp các nguồn của các mạng điện phân phối và là nguồn áp được kết nối với thanh cái tải chung thông qua đường dây. Để đơn giản trong việc phân tích ta giả thiết các đường dây có điện trở lần lượt là R_{01} và R_{02} và thành phần cảm của đường dây là không đáng kể.



Hình 5. Hai bộ nghịch lưu hoạt động song song

Các điện áp tham chiếu tương ứng của hai bộ nghịch lưu

$$\begin{cases} v_{ref1} = \sqrt{2}E_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) \\ v_{ref2} = \sqrt{2}E_2 \sin(\omega_2 t + \phi_2) \end{cases} \quad (10)$$

Như sẽ được giải thích, để đạt được chia công suất chính xác, tất cả các bộ nghịch lưu cần phải có cùng điện áp tại điểm kết nối tải $v_0 = V_0 \angle 0$. Như vậy

$$V_0 = v_{ref1} - R_{01}i_1 = v_{ref2} - R_{02}i_2 \quad (11)$$

Các hệ số m và n và được xác định dựa trên công suất định mức và sai lệch tối đa cho phép của tần số sức và điện áp.

$$n = \frac{V_{0dmax} - V_{0dmin}}{Q_{max}}; \quad m = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{P_{max}}$$

Trong một microgrid với N bộ nghịch lưu kết nối song song, và để cho các bộ nghịch lưu có thể chia sẻ công suất theo tỷ lệ, các hệ số droop của nghịch lưu phải tỷ lệ nghịch với công suất định mức tức là, n_i , m_i và phải thỏa mãn các ràng buộc sau đây [10].

$$\begin{cases} n_1 P_1 = n_2 P_2 = \dots = n_N P_N = \Delta E_{max} \\ m_1 Q_1 = m_2 Q_2 = \dots = m_N Q_N = \Delta \omega_{max} \end{cases} \quad (12)$$

Trong đó, $\Delta \omega_{max}$ và ΔE_{max} là độ lệch tốc độ góc và điện áp tối đa cho phép, P_i và Q_i là công suất tác dụng, công suất phản kháng định mức nguồn thứ i . Từ biểu thức (12) có thể suy ra

$$\frac{n_1}{m_1} = \frac{n_2}{m_2} = \dots = \frac{n_N}{m_N} \quad (13)$$

A. Chia công suất tác dụng

Thay thế biểu thức (8) vào công thức (6) ta tính được công suất tác dụng cung cấp bởi từng bộ nghịch lưu như sau:

$$P_1 = \frac{E^* \cos \phi_1 - V_0}{n_1 \cos \phi_1 + \frac{R_{01}}{V_0}}; \quad P_2 = \frac{E^* \cos \phi_2 - V_0}{n_2 \cos \phi_2 + \frac{R_{02}}{V_0}} \quad (14)$$

Để hai bộ nghịch lưu chia công suất chính xác theo tỷ lệ, phải thỏa mãn điều kiện (12), nghĩa là:

$$n_1 P_1 = n_2 P_2 \Leftrightarrow \frac{E^* \cos \phi_1 - V_0}{\cos \phi_1 + \frac{R_{01}}{n_1 V_0}} = \frac{E^* \cos \phi_2 - V_0}{\cos \phi_2 + \frac{R_{02}}{n_2 V_0}} \quad (15)$$

Từ đó ta suy ra, để thỏa mãn điều (15) thì

$$\begin{cases} \frac{n_1}{R_{01}} = \frac{n_2}{R_{02}} \\ \phi_1 = \phi_2 \end{cases} \quad (16)$$

Nói cách khác n_i nên được chọn sao cho tỷ lệ với điện trở đầu ra R_{0i} và độ lệch điện áp của từng bộ nghịch lưu phải bằng nhau.

Thay điều kiện (8) vào (6) ta được chênh lệch điện áp giữa hai bộ nghịch lưu:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \frac{E^* \cos \phi_1 - V_0}{\cos \phi_1 + \frac{R_{01}}{n_1 V_0}} - \frac{E^* \cos \phi_2 - V_0}{\cos \phi_2 + \frac{R_{02}}{n_2 V_0}} \quad (17)$$

Nếu (16) thỏa mãn thì (17) thỏa mãn và khi đó

$$\Delta E = E_2 - E_1 = 0 \Leftrightarrow E_1 = E_2$$

Như vậy điều kiện để hai bộ nghịch lưu chia đều công suất tác dụng là

$$\begin{cases} E_1 = E_2 \\ \frac{n_1}{R_{01}} = \frac{n_2}{R_{02}} \end{cases} \quad (18)$$

Theo (8) chênh lệch công suất tác dụng phụ thuộc vào độ lệch điện áp:

$$\Delta P_i = -\frac{1}{n_i} \Delta E_i \quad (19)$$

Sai số chia công suất được xác định theo công thức:

$$e_p \% = \frac{P_1}{P_1^*} - \frac{P_2}{P_2^*} = \frac{E^* - E_1}{n_1 P_1^*} - \frac{E^* - E_2}{n_2 P_2^*} = \frac{E^*}{n_i P_i^*} \frac{\Delta E}{E^*} \quad (20)$$

B. Chia công suất phản kháng

Thay thế biểu thức (8) vào công thức (7) ta tính được công suất cung cấp bởi từng bộ nghịch lưu như sau:

$$Q_1 = \frac{E_1 V_0}{R_{01}} \sin \phi_1; \quad Q_2 = \frac{E_2 V_0}{R_{02}} \sin \phi_2 \quad (21)$$

Để đảm bảo tính chính xác của việc chia công suất phản kháng cho hai bộ nghịch lưu song song, phải thỏa mãn điều kiện (12):

$$Q_1 m_1 = Q_2 m_2 \Leftrightarrow m_1 \frac{E_1 V_0}{R_{01}} \sin \phi_1 = m_2 \frac{E_2 V_0}{R_{02}} \sin \phi_2 \quad (22)$$

Khi hệ thống đang ở trạng thái xác lập, hai bộ nghịch lưu làm việc theo cùng một tần số $\omega_1 = \omega_2$ tức là $\phi_1 = \phi_2$ và $E_1 = E_2$ thì :

$$\frac{m_1}{R_{01}} = \frac{m_2}{R_{02}} \quad (23)$$

Điều kiện để hai bộ nghịch lưu chia đều công suất phản kháng thì

$$\begin{cases} \phi_1 = \phi_2 \\ \frac{m_1}{R_{01}} = \frac{m_2}{R_{02}} \end{cases} \quad (24)$$

Từ (18) và (24) ta rút ra kết luận là để nghịch lưu với trở kháng đầu ra là thuần trở đạt được chia công suất tác dụng chính xác tỷ lệ với công suất định mức của chúng trong điều kiện (18), thì cũng đạt được tỷ lệ thuận chia chính xác công suất phản kháng. Nếu đạt được tỷ lệ thuận chia công suất phản kháng theo điều kiện (24), thì cũng đạt được tỷ lệ thuận chia sẻ công suất tác dụng.

Như vậy với sơ đồ điều khiển Droop truyền thống, theo biểu thức (20) hệ số droop n giảm thì sai số chia công suất tăng, tuy nhiên độ sụt áp

giảm $\frac{n_i P_i^*}{E^*}$ và ngược lại khi n tăng độ sụt áp tăng và sai số chia công suất giảm vì vậy phải tối

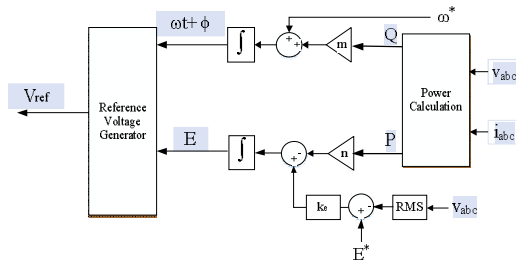
ưu hóa hai chỉ số này để hệ thống đạt đáp ứng yêu cầu.

Để đảm bảo chia đều công suất tác dụng và phản kháng phải đảm bảo thỏa mãn đồng thời điều kiện $E_1 = E_2$ và $\phi_1 = \phi_2$. Tuy nhiên, trong thực tế việc đáp ứng yêu cầu này là rất khó khăn bởi vì luôn luôn có số lỗi tính toán, nhiễu. Ngoài ra, độ lệch điện áp, sai khác chia công suất còn phụ thuộc vào công suất tải, hệ số droop và thông số trở kháng đường dây. Vì vậy, với giải thuật droop truyền thống việc chia tải chính xác là rất khó khăn.

4. SƠ ĐỒ ĐIỀU KHIỂN DROOP ĐỀ XUẤT

Theo biểu thức (10), điện áp tải V_0 giảm khi tải tăng. Các điện áp cũng giảm do sự ảnh hưởng của hệ số droop, theo biểu thức (8). Hệ số n_i càng nhỏ thì điện áp giảm càng ít. Tuy nhiên, hệ số n_i cần phải đủ lớn để đáp ứng nhanh về công suất. Để đảm bảo rằng điện áp nằm trong phạm vi yêu cầu, cần phải bù vào sụt áp $E^* - V_0$ một giá trị nhất định.

Để giải quyết vấn đề trên, dựa vào nguyên tắc cơ bản của lý thuyết điều khiển, ta có thể thêm vào ΔE_i thông qua một bộ khuếch đại k_e , và ta thu được bộ điều khiển droop cải tiến được trình bày trên hình 5. Với sơ đồ điều khiển này có giảm đáng kể ảnh hưởng của lỗi tính toán, nhiễu ... , đồng thời đảm bảo chia công suất chính xác theo tỷ lệ và không phụ thuộc vào sự thay đổi của các tham số.



Hình 6. Sơ đồ điều khiển đề xuất

Điện áp droop trong (4) có thể viết lại như sau :

$$\Delta E_i = E_i - E^* = -n_i P_i \quad (25)$$

Và điện áp E_i có thể xác định qua việc lấy tích phân ΔE_i :

$$E_i = \int_0^t \Delta E_i dt \quad (26)$$

Trong trạng thái xác lập tích phân bằng là 0, do đó

$$n_i P_i = k_e (E^* - V_0) \quad (27)$$

Điều kiện để các bộ nghịch lưu làm việc song song và chia công suất tác dụng tỷ lệ với công suất định mức của chúng thì phải thỏa mãn điều kiện (12), có nghĩa là là vế phải luôn của biểu thức (27) bằng nhau đối với tất cả các bộ nghịch lưu. Điều này thực hiện bằng cách lựa chọn giá trị k_e của các bộ nghịch lưu là như nhau, tức là

$$n_i P_i = K_e (E^* - V_0) = const \quad (28)$$

Như vậy đảm bảo chia công suất tác dụng chính xác theo tỷ lệ mà không cần điều khiển cho điện áp các bộ nghịch lưu E_i phải bằng nhau như trường hợp bộ điều khiển droop thông thường. Độ chính xác của việc chia sẻ công suất tác dụng không còn phụ thuộc vào trở kháng đầu ra biến tần (bao gồm cả trở kháng đường dây) và cũng là không bị ảnh hưởng với các lỗi tính toán số học và rối loạn.

Sai số trong việc chia sẻ công suất tác dụng xuất phát từ lỗi trong đo lường giá trị hiệu dụng của điện áp tải. Từ (27), độ lệch công suất tác dụng ΔP_i do sai số đo lường trị hiệu dụng điện áp ΔV_{0i} được xác định:

$$\Delta P_i = -\frac{k_e}{n_i} \Delta V_{0i} \quad (29)$$

Đối với hai bộ nghịch lưu hoạt động song song với công suất định mức P_1^*, P_2^* , Tỷ lệ sai

số chia công suất với sai số đo lường trị hiệu dụng điện áp $\Delta V_0 = V_{02} - V_{01}$ được xác định

$$e_p \% = \frac{P_1}{P_1^*} - \frac{P_2}{P_2^*} = \frac{\Delta P_1}{P_1^*} - \frac{\Delta P_2}{P_2^*} = \frac{k_e E^*}{n_i P_i^*} \frac{\Delta V_0}{E^*} \quad (30)$$

Nếu cảm biến đo tại điểm nối chung là chính xác thì ΔV_0 bằng 0 thì việc chia sẻ công suất chính xác có thể đạt được. $e_p\%$ là phần trăm sai số chia tải và tỷ lệ với tỷ lệ sai số đo lường $\Delta V_0/E^*$. Nếu điện áp V_0 của tất cả các bộ nghịch lưu được đo lường chính xác và bằng nhau thì sai số chia công suất tác dụng theo tỷ lệ sẽ bằng 0.

Sơ đồ điều khiển cho phép giảm sụt giảm trong điện áp tải. Từ (15), điện áp tải là

$$V_0 = E^* - \frac{n_i}{k_e} P_i = E^* - \frac{n_i P_i}{k_e E^*} E^* \quad (31)$$

Theo sơ đồ điều khiển đề xuất có thể bù sự sụt giảm điện áp do ảnh hưởng tải và hiệu ứng droop và do đó, cung cấp khả năng tốt hơn nhiều điều chỉnh điện áp. Sự sụt giảm điện áp ở đây không còn được quyết định bởi các trở kháng đầu ra như trong sơ đồ truyền thống mà phụ thuộc vào thông số n_i , k_e và công suất P_i . Độ sụt áp $n_i P_i^*/k_e E^*$ điều khiển giảm bằng cách tăng k_e . Tuy nhiên, khi có sai số trong các phép đo điện áp hiệu dụng giữa các bộ nghịch lưu, thì phải cân nhắc giữa cải thiện chất lượng điện áp và độ chính xác của việc chia công suất vì sự sụt giảm điện áp tỷ lệ thuận với n_i/k_e nhưng sai số chia công suất lại tỉ lệ nghịch với n_i/k_e .

5. THIẾT KẾ MÔ HÌNH ĐIỀU KHIỂN

Từ kết quả phân tích ở phần IV, sơ đồ khối Microgrid bao gồm ba bộ nghịch lưu kết nối song song được trình bày trên hình 7. Trong đó các bộ nghịch lưu được tích hợp bởi bộ điều khiển với tín hiệu vào chung là điện áp và tốc độ đặt. Tín hiệu hồi tiếp bao gồm điện áp và dòng điện của đo lường của từng bộ nghịch lưu.

Hình 8. Trình bày sơ đồ điều khiển 01 bộ nghịch lưu theo phương pháp đề xuất bao gồm: a) khối tính toán công suất; b) khối điều khiển droop đề xuất; c) khối điều khiển điện áp; d) khối điều khiển dòng điện

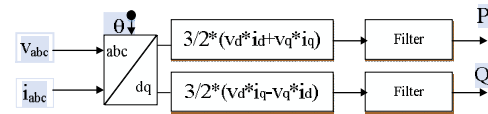
5.1 Khối tính toán công suất – Power Calculation.

Như thể hiện trong hình dưới đây, giá trị tức thời của công suất tác dụng và phản kháng được tính từ điện áp và dòng điện ngõ ra của bộ nghịch lưu đo được. Các thành phần công suất tức thời được qua bộ lọc thấp qua, thể hiện trong (4), để thu được công suất tác dụng, phản kháng ở tần số cơ bản. Trong đó ω_c là tần số cắt của bộ lọc thông thấp:

$$P = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (32)$$

$$Q = \frac{3}{2} (v_d i_q - v_q i_d) \quad (33)$$

$$F(s) = \frac{\omega_c}{\omega_c + s} \quad (34)$$

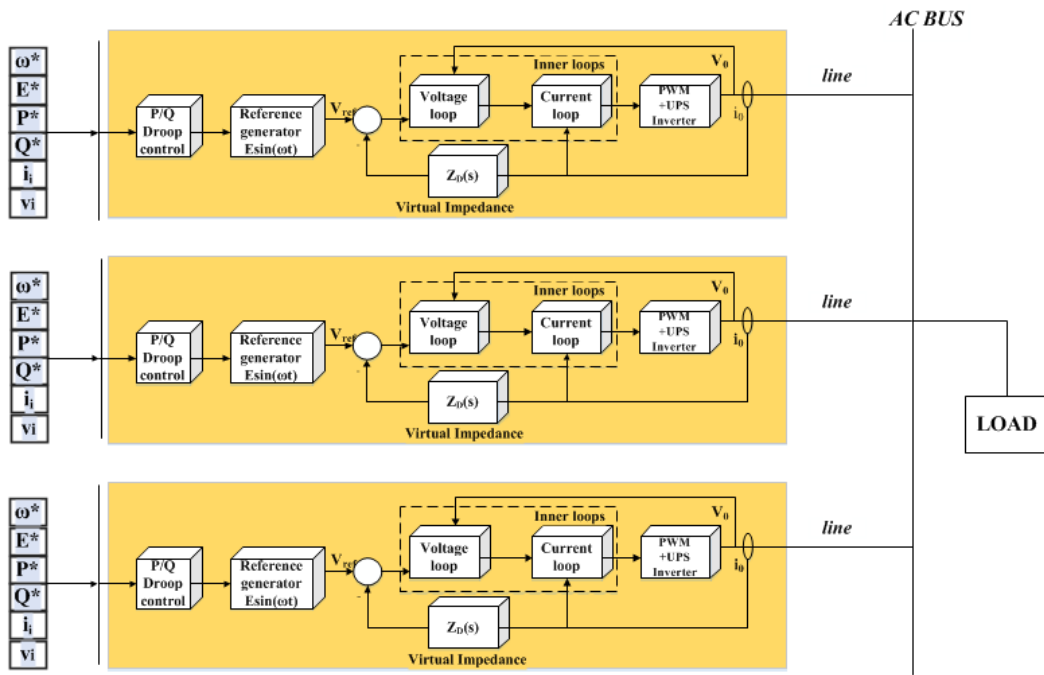


Việc điều khiển chia công suất P và Q giữa các bộ nghịch lưu được thực hiện bằng sơ đồ điều khiển droop – như được trình bày trong hình 6 phần IV. Tần số, điện áp đặt này được thiết lập theo hệ số droop và pha được thiết lập bằng

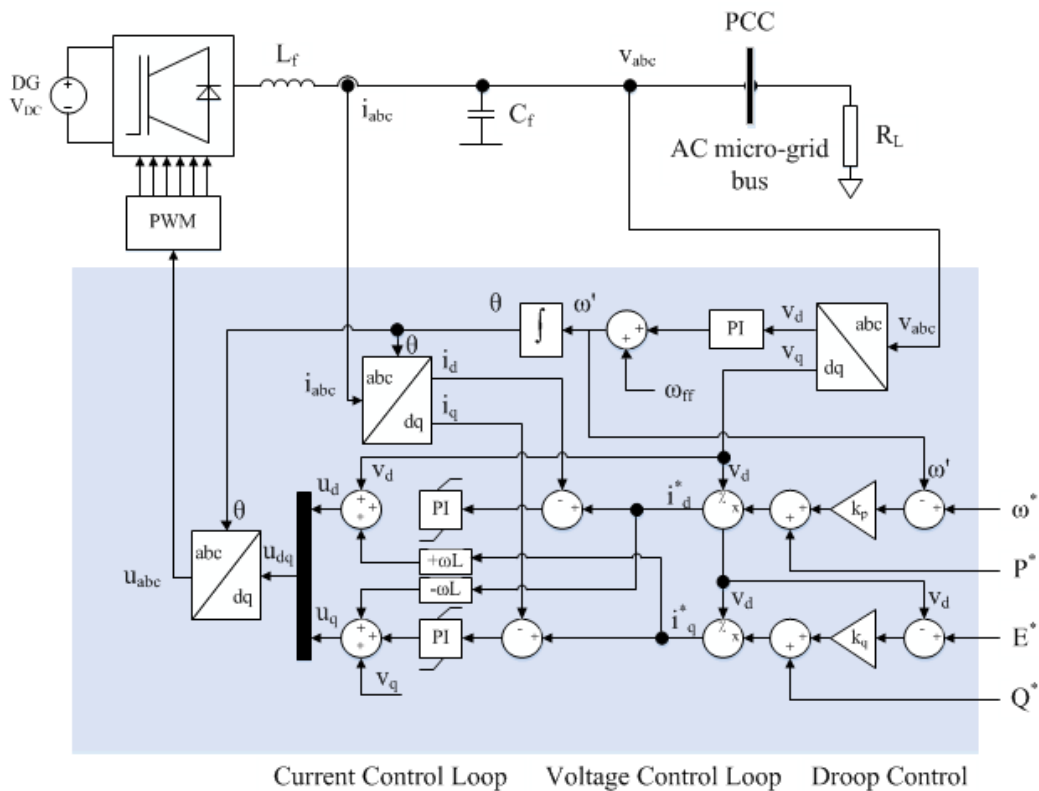
$$\omega = \omega - m_i Q \quad (35)$$

$$\theta = \omega * t - \int m_i Q dt \quad (36)$$

$$E = \int [k_e (E^* - V_0) - nP] dt \quad (37)$$



Hình 7. Sơ đồ khối điều khiển Microgrid gồm ba bộ nghịch lưu kết nối song song



Hình 8. Sơ đồ điều khiển bộ nghịch lưu theo phương pháp đề xuất.

5.2 Vòng điều khiển điện áp – Voltage Control Loop.

Hình 8 mô tả bộ điều khiển áp bao gồm vòng điều khiển feedback và feedforward. Điện áp ngõ ra được điều khiển bằng bộ PI, các phương trình quan hệ vào ra được lập như sau

$$i_{id}^* = F i_d - \omega^* C_f v_q + K_{pv} (v_d^* - v_d) + K_{iv} \phi_d \quad (38)$$

$$i_{iq}^* = F i_q + \omega^* C_f v_q + K_{pv} (v_q^* - v_q) + K_{iv} \phi_q \quad (39)$$

Phương trình trạng thái cho vòng hồi tiếp áp được viết như phương trình bên trên. Ngõ ra của bộ điều khiển áp là dòng điện đặt vào bộ điều khiển dòng.

5.3 Vòng điều khiển dòng điện - Current controller Loop.

Mô hình của bộ điều khiển dòng cũng tương tự bộ điều khiển áp. Dòng điện trên cuộn lọc đầu ra được điều khiển bằng bộ PI controller. 2 biến trạng thái cũng được lựa chọn để lập phương trình trạng thái vòng điều khiển

$$v_{id}^* = -\omega^* L_f i_q + K_{pc} (i_d^* - i_d) + K_{ic} \gamma_d \quad (40)$$

$$v_{iq}^* = \omega^* L_f i_d + K_{pc} (i_q^* - i_q) + K_{ic} \gamma_q \quad (41)$$

6. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Mô hình điều khiển được mô phỏng bằng phần mềm Matlab/Simulink, trong đó thực hiện điều khiển 3 bộ nghịch lưu công suất định mức 2kW với thông số mô hình được trình bày trong bảng 1 theo hai phương pháp: truyền thống và phương pháp đề xuất trong 4 trường hợp. Kết quả mô phỏng được so sánh, đánh giá và kết luận.

Bảng 1. Các thông số cơ bản của các biến tần.

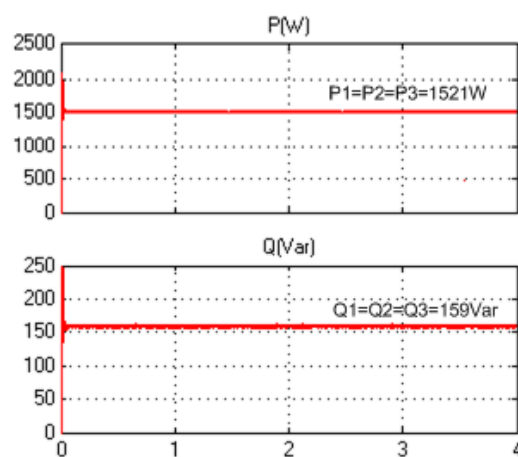
| Ký hiệu | Tham số | Giá trị |
|--------------------|--------------------------|-----------|
| E^* (V) | Điện áp ngõ ra danh định | 311 |
| ω^* (rad/s) | Tần số danh định | $2\pi 50$ |

| n (V/W) | Hệ số droop điện áp | 1×10^{-2} |
|--------------------|---------------------|-----------------------|
| m (Hz/Var) | Hệ số droop tần số | 34.3×10^{-6} |
| ke | Hệ số | 1 |
| V_{DC} | Điện áp ngõ vào | 600V |
| R_f (Ω) | Điện trở cuộn lọc | 0.1 Ω ; |
| C_f (F) | Tụ lọc ngõ ra | 20×10^{-6} F |
| Tải (kW) | Tải chung lớn nhất | 6. |

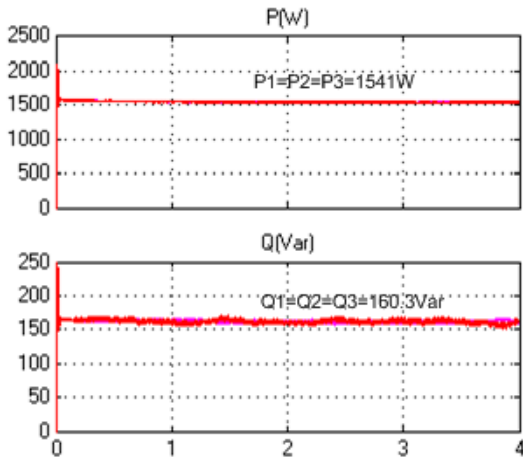
a) Trường hợp 1- công suất định mức các inverter và thông số đường dây là như nhau và có giá trị theo bảng dưới đây.

| Thông số | Inverter 1 | Inverter 1 | Inverter 1 |
|---------------|------------|------------|------------|
| R(Ω) | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| L(H) | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| Pdm*(pu) | 1 | 1 | 1 |

Mô phỏng được tiến hành cho hai sơ đồ truyền thống và sơ đồ đề xuất với tải chung là 4.5 kW được thể hiện trên hình 9, 10. Kết quả cho thấy khả năng đáp ứng và chia tải của hệ thống là rất tốt, độ sai số khi chia công suất tác dụng và phản kháng là như nhau và gần bằng 0.



Hình 9. Công suất các bộ nghịch lưu theo sơ đồ truyền thống.

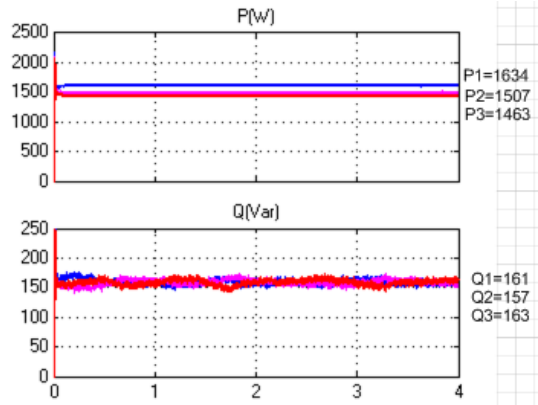


Hình 10. Công suất các bộ nghịch lưu theo sơ đồ đề xuất.

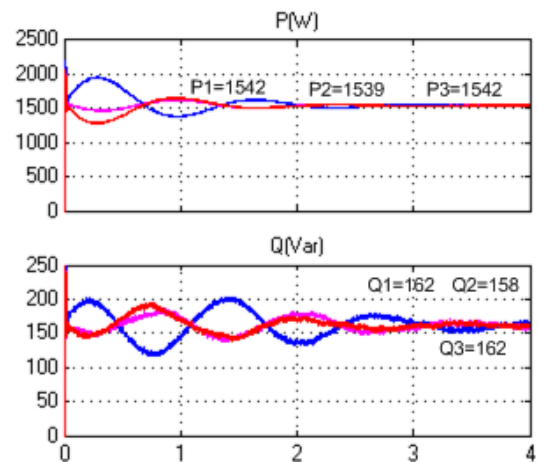
b) Trường hợp 2- công suất định mức các inverter như nhau, thông số đường dây là khác nhau và có giá trị theo bảng dưới đây.

| Thông số | Inverter 1 | Inverter 2 | Inverter 3 |
|-----------------------|------------|------------|------------|
| R(Ω) | 0.3 | 0.7 | 0.9 |
| L(H) | 0.001 | 0.002 | 0.003 |
| P _{dm} *(pu) | 1 | 1 | 1 |

Mô phỏng được tiến hành cho hai sơ đồ truyền thống và sơ đồ đề xuất với tải chung là 4.5 kW được thể hiện trên hình 11, 12. Kết quả cho thấy thời gian xác lập của sơ đồ truyền thống nhanh hơn so với sơ đồ đề xuất (3 s). Sai số khi chia công suất phản kháng của hai sơ đồ là như nhau và bằng 0. Tuy nhiên, sai số khi chia công suất tác dụng của sơ đồ truyền thống là khá lớn đặc biệt giữa inverter 1 và inverter 3 là 8,7% (theo công thức (30)), trong khi sai số trong sơ đồ đề xuất là không đáng kể.



Hình 11. Công suất các bộ nghịch lưu theo sơ đồ truyền thống.



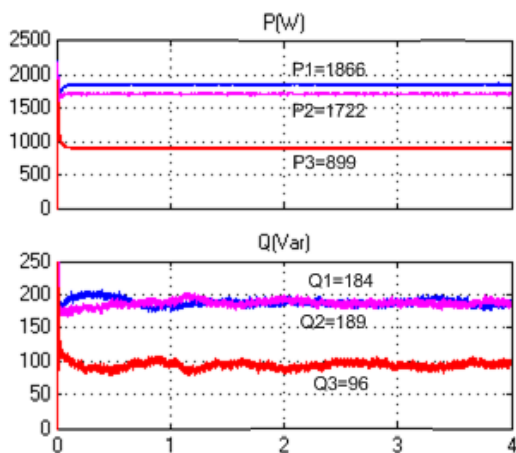
Hình 12. Công suất các bộ nghịch lưu theo sơ đồ đề xuất.

c) Trường hợp 3- công suất định mức các inverter, thông số đường dây là khác nhau và có giá trị theo bảng dưới đây.

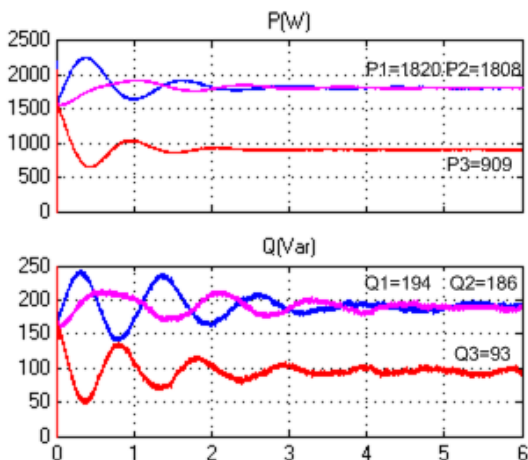
| Thông số | Inverter 1 | Inverter 2 | Inverter 3 |
|-----------------------|------------|------------|------------|
| R(Ω) | 0.3 | 0.7 | 0.9 |
| L(H) | 0.001 | 0.002 | 0.003 |
| P _{dm} *(pu) | 1 | 1 | 1/2 |

Mô phỏng được tiến hành cho hai sơ đồ truyền thống và sơ đồ đề xuất với tải chung là 4.5 kW được thể hiện trên hình 13, 14. Kết quả cho thấy sai số khi chia công suất phản kháng của hai

sơ đồ là như nhau và rất nhỏ. Các bộ nghịch lưu chia tải tỷ lệ theo công suất định mức của chúng. Tỷ lệ chia tải trong sơ đồ đề xuất được đảm bảo và chính xác. Sai số khi chia công suất tác dụng của sơ đồ truyền thống giữa inverter 1 và inverter 2 là 7,2% , giữa inverter 1 và inverter 3 là 3,4% trong khi sai số trong sơ đồ đề xuất là 0.6% và 0.1%.



Hình 13. Công suất các bộ nghịch lưu theo sơ đồ truyền thống.

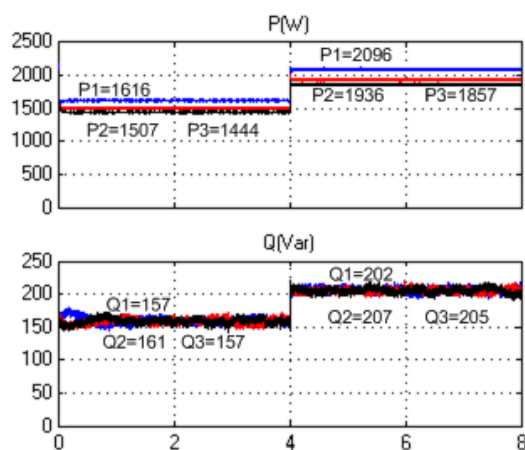


Hình 14. Công suất các bộ nghịch lưu theo sơ đồ đề xuất.

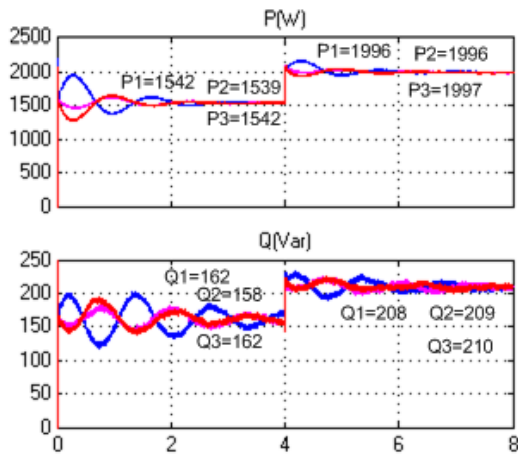
d) Trường hợp 4- thay đổi tải chung với công suất định mức các inverter, thông số đường dây là khác nhau và có giá trị theo bảng dưới đây.

| Thông số | Inverter 1 | Inverter 2 | Inverter 3 |
|-----------------------|------------|------------|------------|
| R(Ω) | 0.3 | 0.7 | 0.9 |
| L(H) | 0.001 | 0.002 | 0.003 |
| P _{dm} *(pu) | 1 | 1 | 1/2 |

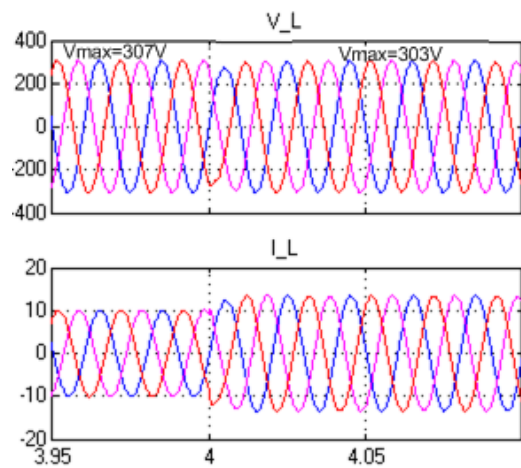
Mô phỏng được tiến hành cho hai sơ đồ truyền thống và sơ đồ đề xuất với tải chung thay đổi từ 4.5 kW đến 6 kW được thể hiện trên hình 15, 16. Kết quả cho thấy đáp ứng của hai sơ đồ là như nhau. Trong đó, thời gian xác lập của sơ đồ truyền thống nhanh hơn so với sơ đồ đề xuất. Tuy nhiên, sai số khi chia công suất tác dụng của sơ đồ truyền thống giữa các inverter lớn hơn nhiều so với sơ đồ đề xuất. Dạng điện áp và dòng điện được thể hiện trong hình 17 và 18 cho thấy độ sụt áp của của sơ đồ truyền thống lớn hơn so với sơ đồ đề xuất: khi tải định mức 14V so với 8V; và 9V so với 4V.



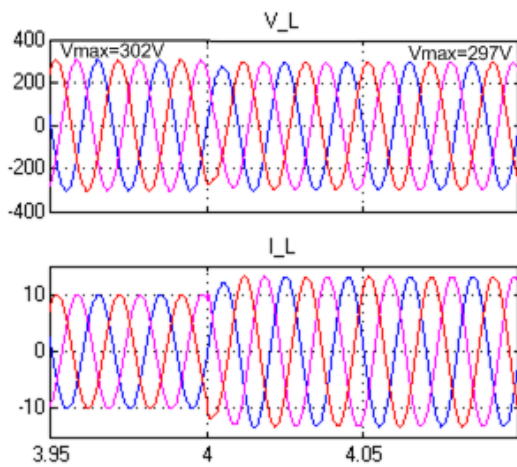
Hình 15. Công suất các bộ nghịch lưu theo sơ đồ truyền thống.



Hình 16. Công suất các bộ nghịch lưu theo sơ đồ đề xuất.



Hình 18. Điện áp và dòng điện tải trong sơ đồ đề xuất



Hình 17. Điện áp và dòng điện tải trong sơ đồ truyền thống

7. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày sơ đồ điều khiển Droop cải tiến cho phép chia công suất chính xác tỷ lệ với công suất định mức của các bộ nghịch lưu áp ba pha kết nối song song trong lưới độc lập. Sơ đồ đề xuất không yêu cầu điều kiện bằng nhau của các điện áp ra của các bộ nghịch, hay tỷ lệ điện trở của các đường dây với hệ số droop. Kết quả mô phỏng cho nhiều bộ nghịch lưu cho thấy ưu điểm vượt trội của sơ đồ đề xuất so với sơ đồ truyền thống đặc biệt được thể hiện trong trường hợp thông số đường dây kết nối của các bộ nghịch lưu khác nhau. Khi đó, sai số chia công suất tác dụng của sơ đồ truyền thống đạt đến 8.7% trong khi với sơ đồ đề xuất là 0.6%. Độ sụt áp trong sơ đồ đề xuất được cải thiện từ 50%-65% so với sơ đồ truyền thống.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ đề tài mã số B2014-20-06.

Analysis and design of new droop control scheme for three-phase parallel inverters in standalone Microgrid.

- Le Minh Phuong ¹
- Nguyen Minh Huy ¹
- Pham Thi Xuân Hoa ¹
- Tran Quang Tho ²

¹ Faculty of Electrical & Electronic Engineering, HCMC University of Technology, VNU-HCM

² HCMC University of Technology and Education

ABSTRACT

*This paper presents a new load sharing technique for parallel-connected three-phase inverters in **Standalone Microgrid**. The paper proposed improvements droop controller to accurate load share by ratio with rated power of the inverter. In addition, the proposed scheme ensures reduced load voltage droop due to the load and droop. In the paper, the active power and reactive power are divided by voltage regulation under reference voltage in conditions of stark difference between line impedances, In*

Keywords: parallel inverters, Droop control, virtual output impedance, power sharing.

addition the paper presents the ability to overcome the disadvantages of traditional droop scheme. The proposed model is simulated by Matlab-Simulink for 3 parallel-connected three-phase inverters. The simulation results proved the technical soundness and advantages of the proposed in comparison with a tradition scheme even if the output impedance is resistance reactance in power sharing and load voltage drop reduce problems.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. R. Lasseter, "Microgrids," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting, 2002, vol. 1, pp. 305–308.
- [2]. G. Weiss, Q.-C. Zhong, T. C. Green, and J. Liang. (2004, Jan.). Horepetitive control of DC-AC converters in microgrids. IEEE Trans. Power Electron. [Online]. 19(1), pp. 219–230. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2003.820561>
- [3]. J. Guerrero, J. Vasquez, J. Matas, M. Castilla, and L. García de Vicuña, "Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 3, pp. 726–736, Mar. 2009.
- [4]. S. V. Iyer, M. N. Belur, and M. C. Chandorkar, "A generalized computational method to determine stability of a multi-inverter microgrid," IEEE Trans. Power

- Electron., vol. 25, no. 9, pp. 2420–2432, Sep. 2010.
- [5]. J. M. Guerrero, L. García de Vicuña, and J. Uceda, “Uninterruptible powersupply systems provide protection,” IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 1, no. 1, pp. 28–38, 2007.
- [6]. M. Chandorkar, D. Divan, and R. Adapa, “Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, no. 1, pp. 136–143, Jan./Feb. 1993.
- [7]. C. Sao and P. Lehn, “Autonomous load sharing of voltage source converters,” IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 2, pp. 1009–1016, Apr. 2005.
- [8]. Wei Yao, Min Chen, José Matas, Josep M. Guerrero, Senior Member, IEEE, and Zhao-Ming Qian, Senior Member, IEEE “Design and Analysis of the Droop Control Method for Parallel Inverters Considering the Impact of the Complex Impedance on the Power Sharing”. IEEE Trans On Industrial Electronics, vol. 58, no. 2, pp. 576–588, Feb. 2011.
- [9]. Joan Rocabert, Member, IEEE, Alvaro Luna, Member, IEEE, Frede Blaabjerg, Fellow, IEEE, and Pedro Rodríguez, Senior Member, IEEE “Control of Power Converters in AC Microgrids” IEEE Trans On Power Electronics, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, Feb. 2012.
- [10]. J. Guerrero, L. Hang, and J. Uceda, “Control of distributed uninterruptible power supply systems,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 8, pp. 2845–2859, Aug. 2008.
- [11]. Dan Wu; Fen Tang; Guerrero, J.M.; Vasquez, J.C.; Guoliang Chen; Libing Sun "Autonomous active and reactive power distribution strategy in islanded microgrids", Autonomous active and reactive power distribution strategy in islanded microgrids Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE
- [12]. Dan Wu; Fen Tang; Vasquez, J.C.; Guerrero, J.M “Control and analysis of droop and reverse droop controllers for distributed generations” Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), 2014 11th International