



## TRIỆT TIÊU THÀNH PHẦN MỘT CHIỀU CỦA DÒNG ĐIỆN NỔI LƯỚI CHO BỘ NGHỊCH LƯU NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI

Đỗ Thành Hiếu, Trần Xuân Tiến, Nguyễn Văn Nhân, Ngô Văn Tuấn

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên

Ngày tòa soạn nhận được bài báo: 02/07/2019

Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 05/08/2019

Ngày bài báo được duyệt đăng: 22/08/2019

### Tóm tắt:

Thông qua việc phân tích mối quan hệ giữa thành phần DC của dòng điện nổi lưới và sự sai lệch tồn tại ở giá trị lấy mẫu của điện áp và dòng điện xoay chiều, từ đó xác định các nguyên nhân làm xuất hiện thành phần DC. Mạch lọc thông thấp được sử dụng để thực hiện sự phân tách thành phần DC của dòng điện nổi lưới. Thành phần DC tại đầu ra sẽ được loại bỏ bằng cách thêm vòng điều khiển kín. Đồng thời, một bộ lọc thông cao được đưa ra để lọc giá trị lấy mẫu điện áp, giúp triệt tiêu sai lệch. Ngoài ra, đặc tính sóng hài của bộ lọc thông cao sẽ bù cho độ trễ pha của vòng lặp dòng điện, làm tăng hệ số công suất của dòng điện đầu ra. Cuối cùng, hiệu quả của giải pháp đề xuất được kiểm chứng thông qua đánh giá chỉ số méo sóng hài, hệ số công suất và chỉ số thành phần DC của dòng điện lưới trong điều kiện tải khác nhau.

**Từ khóa:** Nghịch lưu nổi lưới, thành phần một chiều, sóng hài, bộ lọc thông thấp.

### 1. Đặt vấn đề

Trong những năm gần đây, với hiệu suất chuyển đổi cao, kích thước nhỏ và chi phí thấp nên các bộ nghịch lưu PV không có máy biến áp cách ly đã được sử dụng rộng rãi ở dải công suất nhỏ và trung bình trong hệ thống năng lượng mặt trời (NLMT) nổi lưới [1-3]. Tuy nhiên, nó cũng có nhiều nhược điểm, một trong số đó là tồn tại thành phần dòng điện một chiều (Direct Current - DC) ở đầu ra bộ nghịch lưu bơm vào lưới điện [2].

Ở điều kiện lý tưởng, thành phần dòng điện DC ở đầu ra của bộ nghịch lưu sẽ không xuất hiện. Tuy nhiên, trên thực tế do sự sai lệch trong khâu đo lường, chuyển đổi và sự khác nhau về thông số của các van công suất nên sẽ tồn tại thành phần này ở đầu ra bộ nghịch lưu. Sự hiện diện của dòng điện DC dễ gây ra sự bão hòa ở máy biến áp truyền tải và ăn mòn nối đất của các trạm biến áp. Do đó, các tiêu chuẩn và quy định đã được xây dựng để giới hạn thành phần dòng điện DC bơm vào lưới điện [4-5].

Để ngăn chặn việc bơm dòng điện DC vào lưới, một số giải pháp có hiệu quả khác nhau đã được đề xuất trong [6-8]. Các giải pháp triệt tiêu dòng điện DC đã đề xuất có thể chia ra làm bốn loại: ngăn chặn dòng điện DC bằng tụ điện, sơ đồ cấu trúc nghịch lưu cải tiến với khả năng triệt tiêu dòng điện DC, điều khiển phát hiện dòng điện một chiều và phát hiện điện áp một chiều bơm vào lưới điện. Giải pháp chặn dòng điện DC bằng tụ điện là

sử dụng một tụ điện nối liền giữa bộ nghịch lưu và lưới điện [6]. Nhưng giải pháp này có nhược điểm là đòi hỏi một tụ điện công kênh, tốn kém và có thể gây thêm tổn thất. [7] đã trình bày một giải pháp để chặn dòng điện một chiều bằng cách sử dụng tụ điện ảo, tuy nhiên, phản ứng động của hệ thống điều khiển vòng kín bị ảnh hưởng bởi nó. Giải pháp điều khiển phát hiện dòng điện sử dụng cảm biến dòng để phát hiện dòng điện DC bơm vào lưới, nhưng hiệu quả của nó bị hạn chế bởi độ chính xác của cảm biến do đặc tính zero trôi đáng kể của cảm biến dòng hiệu ứng Hall. Để giải quyết vấn đề trôi tại điểm zero, một bộ nghịch lưu tự động hiệu chỉnh đã được Armstrong đề xuất [8]. Tuy nhiên, giải pháp này phức tạp hơn do yêu cầu xác định trạng thái chuyển đổi của cầu H để đo độ trôi zero vốn có của hệ thống.

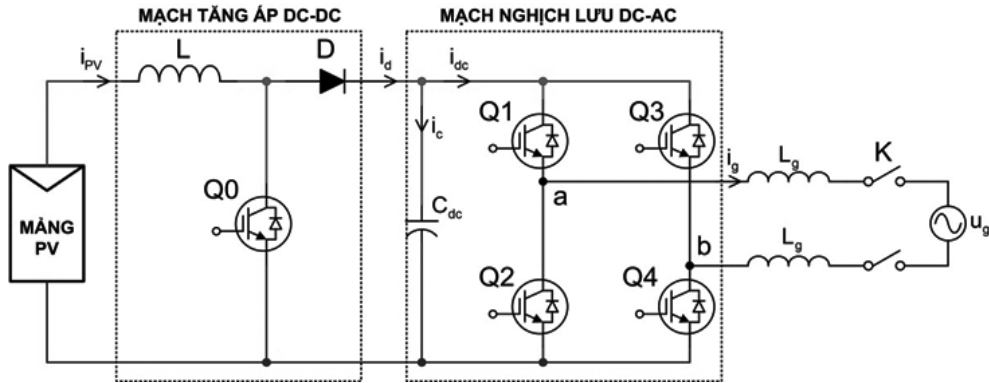
Trong bài báo này, tác giả đầu tiên đi tiến hành xây dựng sơ đồ khối và xác định hàm truyền đạt của dòng điện đầu ra bộ nghịch lưu, từ đó phân tích nguyên nhân và đưa ra giải pháp để loại bỏ sự xuất hiện của thành phần DC ở dòng điện đầu ra. Cuối cùng kết quả thực nghiệm được trình bày để chứng minh sự đúng đắn của giải pháp đề xuất.

### 2. Sơ đồ cấu trúc của bộ nghịch lưu NLMT một pha nổi lưới

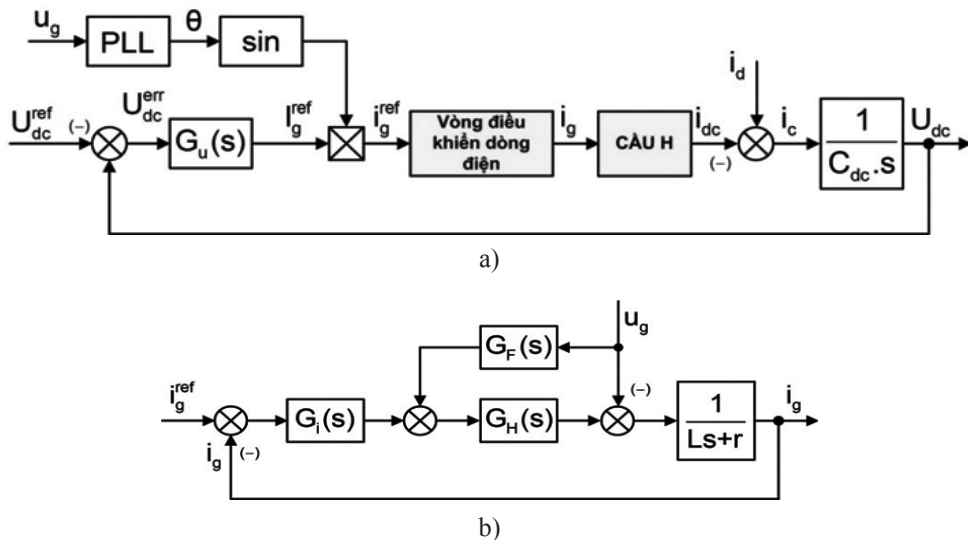
Sơ đồ cấu trúc phần cứng của bộ nghịch lưu NLMT một pha nổi lưới không cách ly kiểu 2 tầng

được trình bày như trên Hình 1. Tầng phía trước hay chính là mạch điện tăng áp DC-DC, nó có chức năng dựa vào giá trị dòng điện  $i_{PV}$  và điện áp  $u_{PV}$  đo được từ mảng PV để thực hiện điều khiển bám điểm công suất cực đại (Maximum Power Point Tracking – MPPT). Tầng phía sau là mạch nghịch lưu kiểu cầu H, và ở đây tác giả lựa chọn mạch vòng điện áp một chiều và mạch vòng dòng điện xoay chiều để

điều khiển. Trong đó, mạch vòng bên ngoài thông qua điện áp một chiều đo được tại hai đầu của tụ điện là  $u_{dc}$  để thực hiện cân bằng năng lượng điện giữa đầu vào và đầu ra, mạch vòng bên trong kiểm soát sự cùng pha và cùng tần số giữa điện áp lưới điện  $u_g$  và dòng điện hòa lưới  $i_g$  nhằm đạt được hệ số công suất bằng 1.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc phân cứng của bộ nghịch lưu năng lượng mặt trời một pha nối lưới không cách ly



Hình 2. Sơ đồ khối của hai vòng điều khiển phản hồi điện áp và dòng điện

### 3. Phân tích thành phần DC của dòng điện kết nối lưới

#### 3.1. Hàm truyền đạt của dòng điện $i_g$

Hai vòng điều khiển phản hồi kín dòng điện và điện áp được sử dụng rất rộng rãi trong chiến lược điều khiển kết nối lưới. Hình 2(a) và Hình 2(b) tương ứng là sơ đồ khối điều khiển của vòng phản hồi điện áp bên ngoài và vòng phản hồi dòng điện bên trong.

Trong Hình 2(a), giá trị điện áp sai lệch  $U_{dc}^{err} = U_{dc} - U_{dc}^{ref}$  đưa tới đầu vào bộ điều khiển điện

áp  $G_u(s)$ ; sau đó tín hiệu từ đầu ra của bộ điều khiển này là biên độ tham chiếu của dòng điện nối lưới được nhân với tín hiệu góc pha của điện áp lưới là  $\sin\theta$  từ đầu ra khối vòng khóa pha (PLL, Phase Locked Loop), nhằm tạo ra giá trị đặt tức thời của dòng điện kết nối lưới  $i_g^{ref}(t) = I_g^{ref} \times \sin\theta$ . Tại vòng lặp dòng điện, tín hiệu đầu ra là dòng điện được kết nối lưới  $i_g(t)$  có cùng pha và cùng tần số với điện áp lưới, sau khi đưa vào mạch cầu H thì sẽ thu được dòng điện một chiều  $i_{dc}$  ở đầu ra.

Hình 2(b) là sơ đồ vòng lặp dòng điện, trong

đó  $i_g^{ref}(t) = I_g^{ref} \times \sin\theta$  là giá trị đặt tức thời của dòng điện nối lưới;  $G_I(s)$  thể hiện hàm truyền đạt của bộ điều khiển dòng điện;  $G_H(s)$  là hàm truyền đạt của mạch cầu H;  $G_F(s)$  là hàm truyền đạt của khâu phản hồi điện áp lưới. Thông qua quá trình biến đổi, ta thu được hàm truyền đạt của dòng điện xoay chiều nối lưới như sau:

$$I_g(s) = \frac{G_I(s)G_H(s) \times I_g^*(s)}{Ls + r + G_I(s)G_H(s)} + \frac{[G_F(s)G_H(s) - 1]U_g(s)}{Ls + r + G_I(s)G_H(s)} \quad (1)$$

Từ biểu thức (1) thấy rằng, nếu  $G_F(s) = 1/G_H(s)$  thì có thể loại bỏ ảnh hưởng của điện áp lưới  $U_g(s)$  tới dòng điện đầu ra thông qua phương thức thực hiện bù điện áp lưới. Khi đó, dòng điện đầu ra  $I_g(s)$  chỉ liên quan đến dòng điện tham chiếu  $I_g^*(s)$ . Trong kỹ thuật điều khiển số của bộ nghịch lưu nối lưới, dòng điện tham chiếu là sóng hình sin chuẩn do DSP (Digital Signal Controller) cung cấp, vì vậy ở trường hợp lý tưởng nhất thì trong dòng điện nối lưới sẽ không tồn tại thành phần dòng điện DC.

**3.2. Phân tích thành phần DC của dòng điện kết nối lưới**

Từ phân tích trong mục 3.1 có thể thấy rằng, với dòng điện tham chiếu là sóng hình sin tiêu chuẩn thì dòng điện đầu ra sẽ không tồn tại thành phần DC ở trường hợp lý tưởng. Tuy nhiên, do tồn tại độ lệch “Không” ở khâu đo lường của các cảm biến dòng điện, cảm biến điện áp; đồng thời do sự đóng cắt không đồng thời của các van công suất, vì vậy rất khó tránh khỏi sự có mặt thành phần DC trong dòng điện nối lưới. Hình 3 là sơ đồ vòng lặp dòng điện khi xem xét tới các yếu tố gây ra sự xuất hiện của thành phần DC. Trong đó, hàm truyền đạt của mạch nghịch lưu cầu H được coi như một khâu tỉ lệ, tức là:  $G_H(s) = K_H$

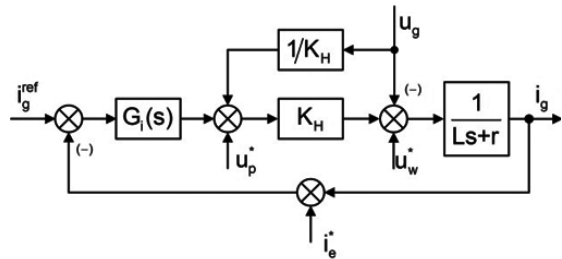
Tín hiệu  $u_p^*$  biểu thị thành phần một chiều xuất hiện do sự đóng cắt không đồng thời của các van công suất trong mạch cầu H; tín hiệu  $u_w^*$  là thành phần một chiều tồn tại trong điện áp lưới và  $i_e^*$  biểu thị lượng sai lệch xuất hiện ở khâu lấy mẫu dòng điện. Xem xét tới các thành phần DC khác nhau, bộ điều khiển dòng điện sử dụng là bộ điều chỉnh PI và có hàm truyền đạt như sau:

$$G_I(s) = K_p^{(i)} + \frac{K_I^{(i)}}{s} \quad (2)$$

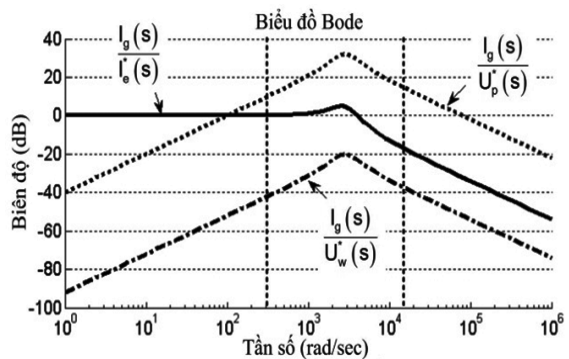
Xét tới sự ảnh hưởng của các thành phần DC khác nhau và coi dòng điện tham chiếu là sin chuẩn,

ta thu được hàm truyền đạt của dòng điện đầu ra bộ nghịch lưu như sau:

$$I_g(s) = \frac{s.U_w^*(s) + s.U_p^*(s).K_H - [K_p^{(i)}.s + K_I^{(i)}].K_H.I_e^*(s)}{L.s^2 + [r + K_p^{(i)}.K_H]s + K_I^{(i)}.K_H} \quad (3)$$



Hình 3. Sơ đồ khối vòng lặp dòng điện bao gồm các thành phần một chiều



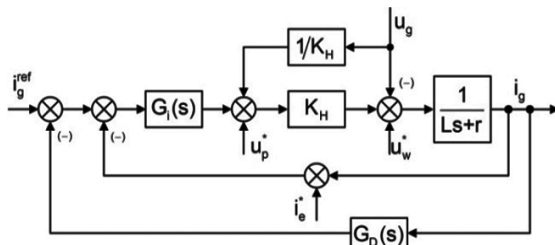
Hình 4. Đồ thị Bode của dòng điện đầu ra xét tới sự ảnh hưởng của các thành phần DC khác nhau

Đồ thị Bode của dòng điện đầu ra khảo sát tới sự ảnh hưởng độc lập của các thành phần DC khác nhau được trình bày trên Hình 4. Trong đó,  $K_H = 400$ ;  $L = 5$  mH;  $r = 5$  mΩ;  $K_p^{(i)} = 0,025$ ;  $K_I^{(i)} = 100$ .

Từ Hình 4 có thể thấy rằng, với bộ điều khiển dòng điện lựa chọn là bộ điều chỉnh PI, thì thành phần nhiễu DC của 2 yếu tố ảnh hưởng là  $u_p^*$  và  $u_w^*$  sẽ bị suy giảm khi truyền tới cuối đầu ra; và  $u_w^*$  nói chung có ảnh hưởng không đáng kể nên có thể bỏ qua; trong khi đó  $i_e^*$  không có bất kỳ sự suy hao nào. Do đó, có thể kết luận rằng thành phần DC trong dòng điện xoay chiều đầu ra bộ nghịch lưu chủ yếu gây ra bởi độ lệch “Không” của giá trị lấy mẫu dòng điện, và biên độ của thành phần DC trong dòng điện đầu ra giống như phần bù DC của kênh phản hồi nhưng ngược pha.

Vì vậy, thông qua phân tích thành phần DC của dòng điện đầu ra là có thể loại bỏ thành phần DC của hệ thống.

**3.3. Phương án đề xuất triệt tiêu thành phần DC của dòng điện nối lưới**



Hình 5. Sơ đồ khối của vòng lặp dòng điện với quá trình phân tách thành phần DC

Để triệt tiêu thành phần DC, trước tiên sử dụng mạch lọc thông thấp để phân tách thành phần DC của dòng điện đầu ra, sau đó tiến hành vòng lặp điều khiển kín đối với thành phần DC đã phân tách ở đầu ra. Sơ đồ khối của vòng lặp dòng điện với quá trình phân tách thành phần DC được thể hiện trên Hình 5. Trong đó hàm truyền đạt của mạch lọc thông thấp để phân tách thành phần DC được thể hiện trong biểu thức sau:

$$G_D(s) = \frac{K_D}{R.C.s + 1} = \frac{100}{0,306.s + 1} \quad (4)$$

Ngoài ra, để giảm thành phần DC do sai lệch trong quá trình lấy mẫu thì trong chương trình điều khiển chức năng hiệu chỉnh điểm “Không” sẽ được khởi động; mỗi lần bật nguồn, phần bù sai lệch của kênh đo tín hiệu thành phần DC và kênh đo tín hiệu dòng điện xoay chiều sẽ được đo lường trước khi thực hiện nối lưới. Thêm nữa, để giảm thành phần DC gây ra bởi sự trôi của giá trị lấy mẫu điện áp thì trong thực nghiệm bộ lọc thông cao sẽ được sử dụng để lọc các giá trị được lấy mẫu. Và trong khi loại bỏ sự trôi của quá trình lấy mẫu điện áp, đặc tính sớm pha của bộ lọc thông cao sẽ bù cho độ trễ pha của vòng lặp dòng điện, làm tăng hệ số công suất của dòng điện đầu ra. Hàm truyền của bộ lọc thông cao được thể hiện ở biểu thức (5):

$$G_{HF}(s) = \frac{s}{s + 20} \quad (5)$$

Lúc này, góc pha được bù bởi bộ lọc thông cao là khoảng 1<sup>o</sup> đến 1,5<sup>o</sup>.

**4. Thực nghiệm và đánh giá kết quả**

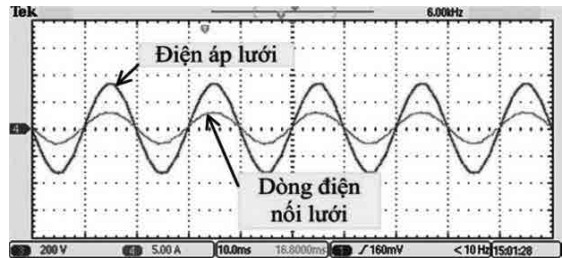
**4.1. Các thông số thực nghiệm chính**

Mảng quang điện thực hiện trong thực nghiệm là bộ thiết bị mô phỏng quang điện CHROMA-2150H và công suất tối đa của bộ nghịch lưu là 1500 W; giá trị cuộn cảm trong mạch tăng áp BOOST là L<sub>b</sub> = 2 mH và van bán dẫn được lựa chọn là IGBT

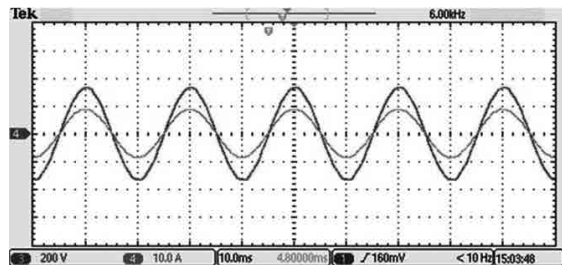
loại IKW75N60T. Tính toán và lựa chọn tụ điện kết nối giữa mạch tăng áp BOOST và mạch nghịch lưu có giá trị là C<sub>dc</sub> = 2400 μF, cuộn cảm lọc đầu ra mạch nghịch lưu L = 5mH, mô đun IGBT cầu H thực hiện nhiệm vụ nghịch lưu là F4-50R06W1E3 và lựa chọn chip vi điều khiển DSP TMS320F28335.

**4.2. Kết quả thực nghiệm**

Hình 6(a) và Hình 6(b) tương ứng là dạng sóng điện áp lưới và dòng điện đầu ra mạch nghịch lưu nối lưới với trường hợp đầy tải và non tải. Từ kết quả dễ dàng kết luận rằng, góc lệch pha giữa dòng điện đầu ra mạch nghịch lưu nối lưới luôn luôn đồng pha với điện áp lưới.



(a) Trường hợp với công suất tải là 485 W



(b) Trường hợp với công suất tải là 1492 W

Hình 6. Kết quả thực nghiệm

Để đánh giá hiệu quả của giải pháp đề xuất, trong thực nghiệm đã sử dụng thiết bị phân tích chất lượng điện năng PW3198 để tiến hành kiểm tra chất lượng dòng điện đầu ra mạch nghịch lưu nối lưới. Kết quả thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1 trình bày kết quả đo độ méo sóng hài THD, hệ số công suất và thành phần dòng điện một chiều bơm vào lưới của dòng điện đầu ra mạch nghịch lưu nối lưới trong các trường hợp công suất tải khác nhau khi không và có sử dụng giải pháp đề xuất. Kết quả chỉ ra rằng, giải pháp đề xuất có hiệu quả trong việc triệt tiêu thành phần một chiều của dòng điện nối lưới. Thêm nữa, trong tất cả các trường hợp hệ số công suất của thiết bị luôn lớn hơn 0,999, thành phần DC luôn nhỏ hơn 0,5% và chỉ số THD luôn nhỏ hơn 5% khi công suất tải lớn hơn 30% công suất định mức.



Bảng 1. Thông số chất lượng điện năng với công suất tải thay đổi trong trường hợp không và có sử dụng giải pháp đề xuất

P(W)	THD (%)		PF (%)		DC (%)	
	Không sử dụng giải pháp đề xuất	Sử dụng giải pháp đề xuất	Không sử dụng giải pháp đề xuất	Sử dụng giải pháp đề xuất	Không sử dụng giải pháp đề xuất	Sử dụng giải pháp đề xuất
295	8,56	6,47	99,25	99,98	-0,75	-0,2
369	7,42	5,26	99,18	99,98	-0,69	-0,14
485	7,08	4,39	99,15	99,97	-0,63	-0,17
660	6,55	3,27	99,14	99,97	-0,58	-0,11
740	5,80	3,02	99,12	99,96	-0,56	-0,08
835	5,34	2,72	98,56	99,96	-0,45	-0,12
932	4,67	2,59	98,25	99,95	-0,41	-0,07
1065	4,32	2,46	98,24	99,95	-0,39	-0,13
1210	4,15	2,20	98,11	99,95	-0,28	-0,02
1305	4,03	2,01	97,78	99,95	-0,32	-0,09
1379	3,89	1,94	97,63	99,95	-0,25	-0,07
1492	3,86	1,86	97,50	99,95	-0,25	0,01

## 5. Kết luận

(1) Trong kỹ thuật điều khiển số với bộ nghịch lưu, độ lệch “Không” của giá trị lấy mẫu là nguyên nhân chính gây ra sự xuất hiện của thành phần DC trong dòng điện nối lưới;

(2) Với vòng lặp dòng điện sử dụng bộ điều chỉnh PI, nó sẽ lọc nhiễu DC một cách hiệu quả

nhưng không thể loại bỏ sự trôi DC của kênh phản hồi dòng điện;

(3) Bằng cách thêm khâu phân tách thành phần DC của dòng điện nối lưới, sau đó tiến hành vòng lặp điều khiển kín đối với thành phần DC đã phân tách, từ đó sẽ triệt tiêu có hiệu quả thành phần DC ở dòng điện nối lưới.

## Tài liệu tham khảo

- [1]. Kerekes, T., Teodorescu, R., Rodriguez, P., Vazquez, G., and Aldabas, E., A New High-Efficiency Single-Phase Transformerless PV Inverter Topology. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, **58**, pp. 184-191.
- [2]. Infield, D. G., Onions, P., Simmons, A. D. and Smith, G. A., Power quality from multiple grid-connected single-phase inverters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, **19**, pp. 1983-1989.
- [3]. Blewitt, W. M., Atkinson, D. J., Kelly, J. and Lakin, R. A., Approach to low-cost prevention of DC injection in transformerless grid connected inverters. *IET Power Electronics*, 2010, **3**, pp. 111-119.
- [4]. AS 4777.2, Grid connection of energy system via inverters Part 2: inverter requirements Australia. 2002.
- [5]. IEEE 929-2000, *IEEE Recommended Practice for Utility interface of photovoltaic (PV) Systems*, 3 April, 2000.
- [6]. González, R., López, J., Sanchis, P. and L. Marroyo, Transformerless inverter for single-phase photovoltaic systems. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2007, **no. 2**, pp. 693-697.
- [7]. Guo, X., Wu, W., Herong, W. and G. San, DC injection control for grid-connected inverters based on virtual capacitor concept. *Proc. IEEE Electrical Machines and Systems Conf.*, Wuhan, China, 2008, pp. 2327-2330.
- [8]. Armstrong, M., Atkinson, D. J. C., Johnson, M. and T. D. Abeyasekera, Auto-calibrating DC link current sensing technique for transformerless, grid connected, H-Bridge inverter systems. *IEEE Trans. Power Electron*, 2006, **5**, pp. 1385-1393.

**SUPPRESSION OF THE DC COMPONENT IN GRID INJECTION CURRENT  
FOR PHOTOVOLTAIC GRID-TIED INVERTERS**

**Abstract:**

*This work deals with identifying the main causes of DC component appearance by analyzing the relationship between the DC component in grid injection current and the deviation existing in sampling value of AC voltage and AC current. Then the DC component is separated through a low-pass filter circuit. The DC component is eliminated by an appending closed-loop control. Simultaneously, a high pass filter (HPF) is introduced to filter sampling voltage value, which suppressed the deviation of the sampling voltage value. In addition, the phase delay existing in the current loop, which improves the power factor, will be compensated by the phase leading of the HPF. Eventually, the effectiveness of the proposed method is verified through the test of the total harmonic distortion (THD) index, the power factor, and the DC component index of the grid-injection current under different load conditions.*

**Keywords:** *Grid-tied inverter; DC component; Harmonics; Low pass filter.*