

ĐIỀU KHIỂN NGHỊCH LƯU NỔI LƯỚI BA PHA KHI MẤT CÂN BẰNG ĐIỆN ÁP

CONTROL OF THREE-PHASE GRID-CONNECTED INVERTERS UNDER UNBALANCED VOLTAGE FAULTS

Trần Quang Thọ

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM, Việt Nam

Ngày toà soạn nhận bài 29/11/2018, ngày phản biện đánh giá 5/12/2018, ngày chấp nhận đăng 24/12/2018

TÓM TẮT

Các bộ nghịch lưu nối lưới sử dụng năng lượng tái tạo như gió và mặt trời hiện nay được ứng dụng rất phổ biến với công suất ngày càng lớn. Do đó, chúng bị ảnh hưởng đáng kể khi nguồn điện lưới xảy ra sự cố như mất cân bằng điện áp. Khi điện áp nguồn lưới mất cân bằng làm xuất hiện thành phần thứ tự nghịch. Các bộ điều khiển dòng điện thông thường không xem xét các thành phần này nên có thể gây ra việc quá dòng điện của bộ nghịch lưu nối lưới và làm cho các linh kiện bán dẫn công suất bị hư hỏng. Bài báo này đề xuất một phương pháp điều khiển bộ nghịch lưu nối lưới có kiểm soát dòng điện trong phạm vi định mức trong điều kiện điện áp nguồn lưới mất cân bằng. Các kết quả khảo sát trên Matlab/Simulink đã cho thấy tính hiệu quả của phương pháp đề xuất so với phương pháp thông thường hiện nay.

Từ khóa: nghịch lưu nối lưới; điện áp mất cân bằng; giới hạn dòng điện; bù công suất phản kháng; điện áp thứ tự nghịch.

ABSTRACT

Grid-connected inverters using renewable energies such as wind and photovoltaic powers are adopted very popularly with increasing capacity. Therefore, they are significantly affected when the unbalanced grid voltages occur. At that time, the negative sequences appear, traditional current controllers in grid-connected inverters usually do not consider these components. Thus, they can cause over-current of the inverters and make the power semiconductor components damage. This paper proposes a method for controlling grid-connected inverters with over-current protection under unbalanced grid voltages. The simulated results have validated the performance of the proposed method compared with that of the traditional one.

Keywords: grid-connected inverters; unbalanced voltages; current limitation; reactive power compensation; negative sequences.

1. GIỚI THIỆU

Nhu cầu sử dụng điện từ năng lượng tái tạo như điện gió và điện mặt trời ngày càng phổ biến do tính bền vững và thân thiện với môi trường. Tuy nhiên, nguồn điện năng lượng tái tạo này lại có đặc điểm không ổn định do phụ thuộc nhiều vào thời tiết. Do đó, để có một nguồn điện hiệu quả có chất lượng cao, các nguồn năng lượng này cần được nối với lưới điện. Khi đó, các bộ nghịch lưu nối lưới bán dẫn công suất thường được sử dụng

[1], [2] để biến đổi các nguồn năng lượng tái tạo thành nguồn điện xoay chiều có thông số phù hợp để kết nối với lưới điện.

Trong điều kiện vận hành bình thường, các bộ nghịch lưu nối lưới chủ yếu phát công suất tác dụng vào lưới điện. Tuy nhiên, các bộ nghịch lưu nối lưới còn phải có khả năng bù công suất phản kháng để hỗ trợ hệ thống điện khi có sự cố sụt áp hay mất cân bằng điện áp của nguồn lưới [3], [4] theo tiêu chuẩn nối lưới [5]–[7]. Khi có sự cố sụt áp

hay mất cân bằng của điện áp lưới sẽ làm xuất hiện thành phần thứ tự nghịch [8]–[10]. Chính các thành phần này làm suy giảm khả năng phát điện của thiết bị. Khi điện áp nguồn suy giảm, nếu giữ nguyên công suất định mức sẽ làm tăng dòng điện. Chính sự tăng dòng điện này gây ra hư hỏng linh kiện công suất. Với các phương pháp điều khiển thông thường không có khả năng giới hạn dòng điện có thể làm cho bộ nghịch lưu bị quá dòng điện định mức cho phép.

Có nhiều kỹ thuật đã được công bố để điều khiển nghịch lưu nối lưới trong điều kiện mất cân bằng điện áp [11], [12]. Tuy nhiên, các phương pháp này chủ yếu quan tâm đến cân bằng dòng điện các pha để giảm tải chưa xem xét đến khả năng bị quá dòng điện của bộ biến đổi, đồng thời các phương pháp này cũng sử dụng nhiều linh kiện hơn nên làm tăng chi phí và điều khiển phức tạp.

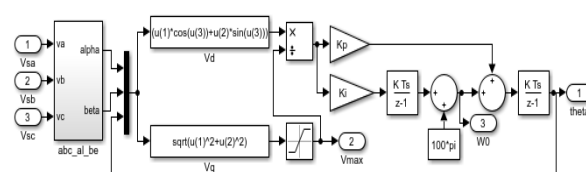
Kỹ thuật điều khiển bảo hòa trong [13] dựa vào bảng trạng thái công suất để điều khiển nghịch lưu, nhưng việc giải quyết vấn đề quá độ của thành phần thứ tự không vẫn còn quá phức tạp do bản chất dao động của công suất thứ tự không [14]. Điều này ảnh hưởng đến việc phân bổ công suất của cả ba pha. Thông thường, việc nối tam giác máy biến áp được sử dụng để khóa thành phần dòng điện thứ tự không, tuy nhiên, kiểu nối dây quấn này có thể dẫn đến quá điện áp khi có sự cố 1 pha [15]. Để giải quyết vấn đề này, công bố trong [16] đề nghị phương pháp điều khiển thông qua phép biến đổi công suất tức thời nhằm cải thiện khả năng truyền công suất của bộ nghịch lưu nối lưới đồng thời loại bỏ các dao động công suất. Tuy nhiên, việc bị quá dòng điện của bộ biến đổi vẫn chưa được xem xét. Trong khi vấn đề quá dòng điện của linh kiện là một trong những nguyên nhân quan trọng nhất gây hư hỏng bộ biến đổi.

Bài báo này đề nghị một phương pháp điều khiển để giới hạn dòng điện của nghịch lưu nối lưới trong điều kiện mất cân bằng điện áp bằng cách sử dụng vòng khóa pha có xem xét ảnh hưởng của thành phần điện áp thứ tự nghịch.

2. PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN TRUYỀN THỐNG

2.1 Dò điện áp lưới sử dụng vòng khóa pha

Trong các phương pháp thông thường, biên độ điện áp lưới được nhận biết thông qua các cảm biến điện áp nhờ phép tính của vòng khóa pha PLL (phase-locked loop) như hình 1.



Hình 1. Nguyên lý tính điện áp V_{max} của PLL

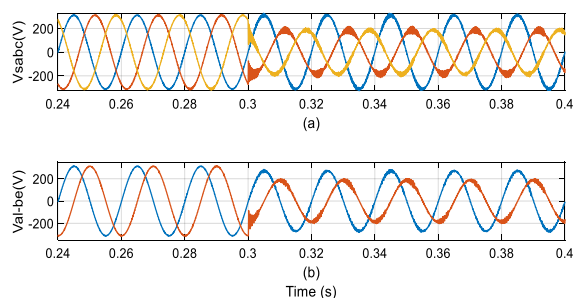
Trong đó, V_{sa} , V_{sb} , V_{sc} là điện áp của ba pha nguồn lưới. Các điện áp V_{α} và V_{β} được biến đổi theo Clark như công thức sau:

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Biên độ điện áp được xác định như (2):

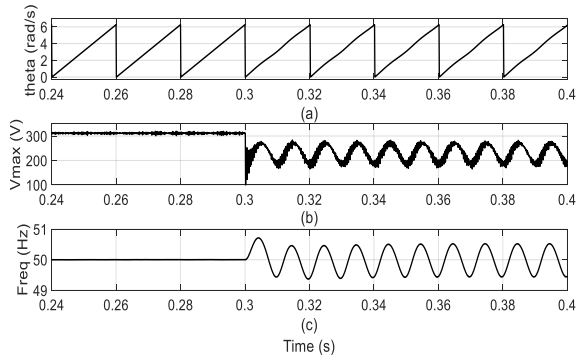
$$V_{max} = \sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \quad (2)$$

Trong điều kiện vận hành bình thường với điện áp 3 pha cân bằng thì không có thành phần thứ tự nghịch và thứ tự không nên biên độ điện áp V_{max} xác định đúng trạng thái định mức của hệ thống. Tuy nhiên, khi mất cân bằng điện áp tại thời điểm 0.3s thì biên độ điện áp V_{α} và V_{β} bị chênh lệch như hình 2.



Hình 2. Điện áp khi mất cân bằng tại 0.3s (pha B và C có biên độ bằng 60% định mức)

Điều này làm cho các thông số của vòng khóa pha ước lượng được như: góc pha θ , biên độ V_{max} , tần số f bị dao động như hình 3.



Hình 3. Thông số ước lượng của PLL thông thường

2.2 Điều khiển công suất

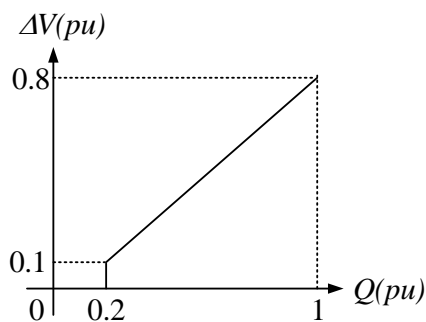
Trong điều kiện vận hành bình thường, công suất tác dụng P luôn được trích xuất cực đại từ các nguồn năng lượng tái tạo. Khi có sự cố sụt giảm điện áp nhỏ hơn 90% định mức thì bộ nghịch lưu nối lưới phải có nhiệm vụ ưu tiên phát công suất phản kháng Q để hỗ trợ hệ thống điện theo tiêu chuẩn nối lưới như (3) và hình 4, với ràng buộc định mức công suất như (4) và được thể hiện trên hình 5. Trong đó, S là công suất định mức của bộ biến đổi, $\Delta V(\%)$ là độ sụt áp, $V_{\max n}$ là biên độ điện áp định mức và V_{\max} là biên độ điện áp ước lượng được bởi vòng khóa pha PLL.

$$\Delta V(\%) = \frac{V_{\max n} - V_{\max}}{V_{\max n}} * 100\% \quad (3)$$

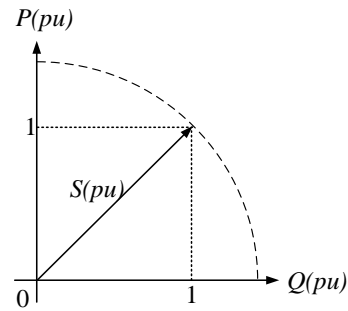
$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (4)$$

Dòng điện đặt khi đó được tính như sau:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha_ref} \\ i_{\beta_ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (5)$$



Hình 4. Tiêu chuẩn của công suất phản kháng nên bơm vào lưới điện khi có sự cố sụt giảm điện áp



Hình 5. Định mức công suất

3. PHƯƠNG PHÁP ĐỀ XUẤT

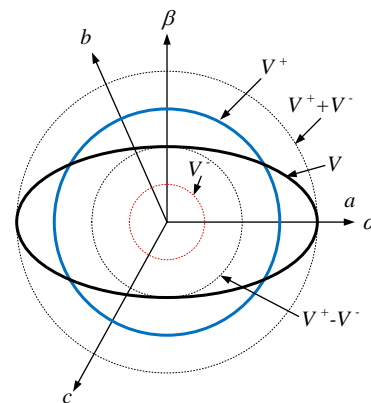
3.1 Tách thành phần thứ tự nghịch

Phương pháp đề xuất sử dụng nghịch lưu nối lưới 3 pha 3 dây. Do đó, trong hệ thống 3 pha 3 dây sẽ không có thành phần thứ tự không. Tuy nhiên, khi có sự mất cân bằng điện áp thì vẫn xuất hiện thành phần vector điện áp thứ tự nghịch V^- như (6). Điều này làm cho biên độ vector điện áp V dao động theo hình elip với bán trục lớn $V^+ + V^-$ và bán trục nhỏ $V^+ - V^-$ trên hình 6.

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha}^+ \\ V_{\alpha}^- \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{\beta}^- \\ V_{\beta}^+ \end{bmatrix} \quad (6)$$

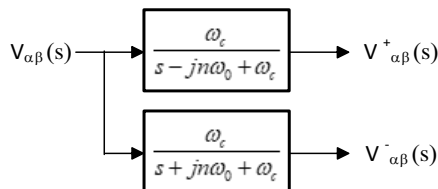
Với V_{α}^+ và V_{α}^- là các điện áp thứ tự thuận và thứ tự nghịch theo trục thực α , V_{β}^+ và V_{β}^- là các điện áp thứ tự thuận và thứ tự nghịch theo trục ảo β .

Việc tách thành phần thứ tự thuận và thứ tự nghịch sử dụng bộ lọc phức [17] sẽ giúp cho việc xác định lại công suất định mức của bộ biến đổi để giảm dòng điện đặt của nghịch lưu.



Hình 6. Điện áp lưới khi có thành phần thứ tự nghịch

Thành phần thứ tự thuận và thứ tự nghịch được xác định thông qua bộ lọc phức như hình 7. Trong đó, ω_c là tần số cắt, ω_0 là tần số góc ước lượng được và n là bậc hài cần tách.



Hình 7. Bộ lọc tách các thành phần điện áp

3.2 Xác định công suất định mức

Trong điều kiện mất cân bằng, biên độ điện áp thật sự bị suy giảm nên công suất cũng bị suy giảm và nên được xác định lại như sau:

$$S_{new} = S \frac{\sqrt{(V_{\alpha}^{+2} + V_{\beta}^{+2}) - (V_{\alpha}^{-2} + V_{\beta}^{-2})}}{V_{maxn}} \quad (7)$$

Trong đó: S_{new} là công suất định mức mới khi có thành phần thứ tự nghịch.

$$\Delta V_{new} (\%) = \frac{V_{maxn} - \left| \sqrt{V_{\alpha}^{+2} + V_{\beta}^{+2}} - \sqrt{V_{\alpha}^{-2} + V_{\beta}^{-2}} \right|}{V_{maxn}} \quad (8)$$

Với ΔV_{new} là độ sụt áp có xem xét đến ảnh hưởng của thành phần thứ tự nghịch.

Công suất phản kháng đặt cần được xác định lại như (9).

$$Q_{ref} = \begin{cases} 0 & \text{if } \Delta V_{new} (\%) \leq 10\% \\ \sqrt{2} S_{new} & \text{if } \Delta V_{new} (\%) > 10\% \end{cases} \quad (9)$$

Công suất tác dụng đặt cũng được xác định lại như (10).

$$P_{ref} \leq \sqrt{S_{new}^2 - Q_{ref}^2} \quad (10)$$

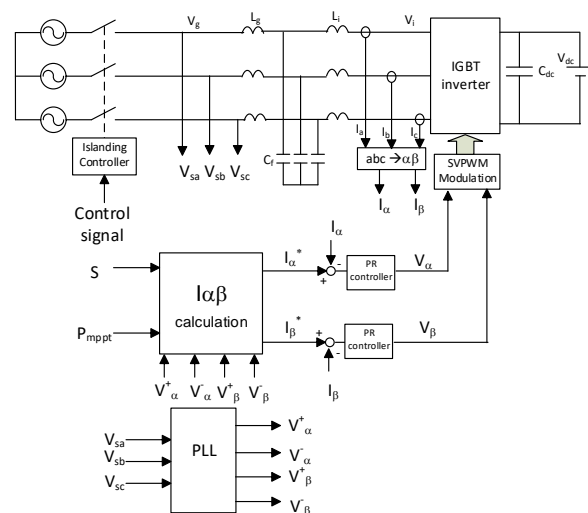
Khi đó, dòng điện đặt mới được xác định lại như sau:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha_refn} \\ i_{\beta_refn} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha}^{+2} + V_{\beta}^{+2}} \begin{bmatrix} P_{ref} & Q_{ref} \\ -Q_{ref} & P_{ref} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\beta}^+ \\ V_{\alpha}^+ \end{bmatrix} \quad (11)$$

Do định mức của công suất được điều chỉnh theo độ sụt áp nên dòng điện cũng

được điều chỉnh lại để đảm bảo không bị quá dòng.

Sơ đồ khối nguyên lý điều khiển của phương pháp đề xuất cũng được thể hiện trên hình 8.

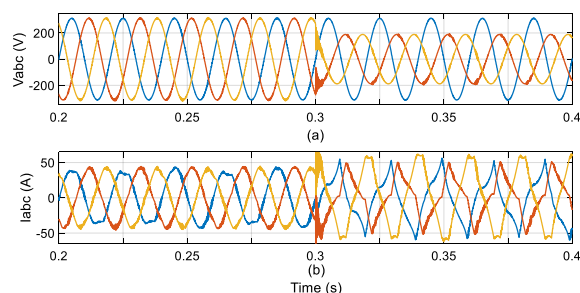


Hình 8. Sơ đồ khối nguyên lý điều khiển

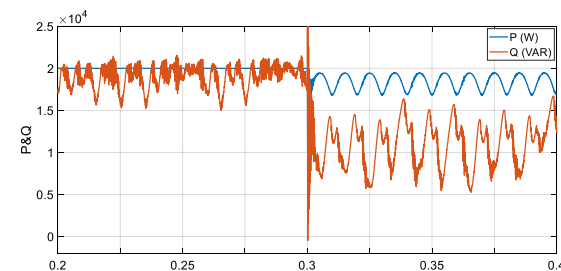
4. KẾT QUẢ KHẢO SÁT

4.1 Phương pháp thông thường

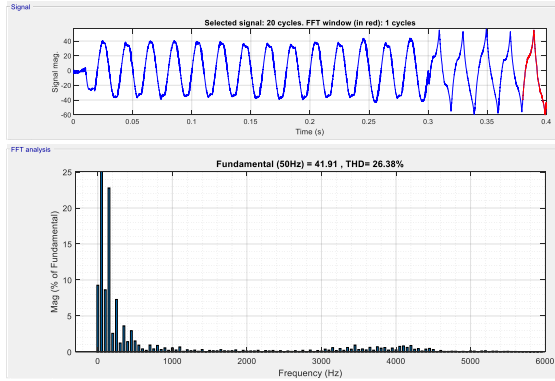
Kết quả khảo sát của phương pháp thông thường khi chưa xem xét đến thành phần thứ tự nghịch được thể hiện trên hình 9 đến hình 12.



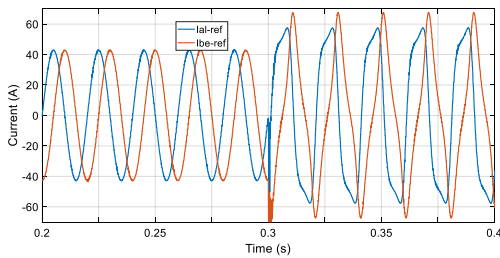
Hình 9. Điện áp và dòng điện 3 pha ngõ ra nghịch lưu khi không tách thành phần thứ tự nghịch



Hình 10. Công suất phát vào lưới

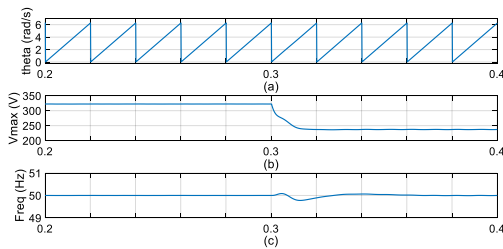


Hình 11. Sóng hài dòng điện

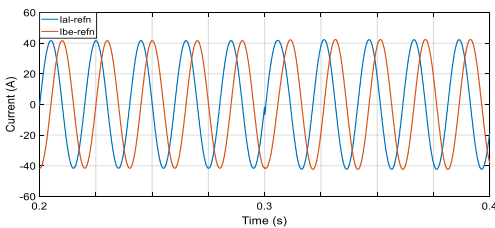


Hình 12. Dòng điện đặt của phương pháp thông thường

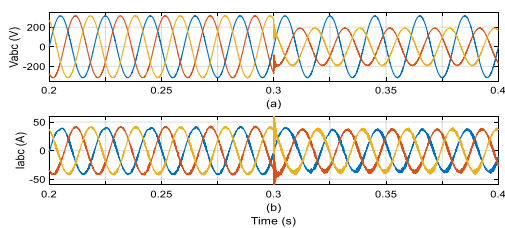
4.2 Phương pháp đề xuất



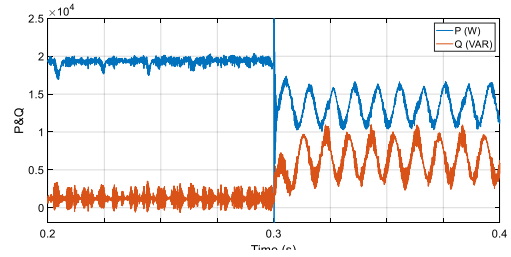
Hình 13. Các tham số ước lượng khi tách thành phần thứ tự nghịch



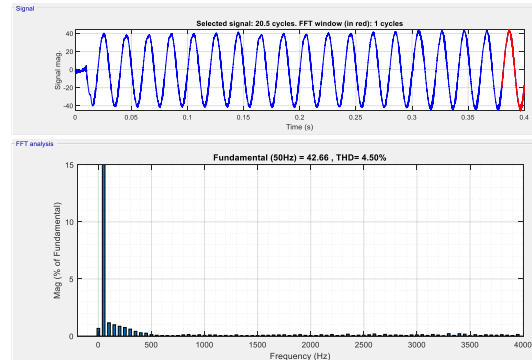
Hình 14. Dòng đặt của phương pháp đề xuất



Hình 15. Điện áp và dòng điện ngõ ra nghịch lưu của phương pháp đề xuất



Hình 16. Công suất của phương pháp đề xuất



Hình 17. Sóng hài dòng điện

4.3 Nhận xét

Công suất định mức S của bộ nghịch lưu được cài đặt trong bài báo này bằng 20kVA tương ứng với dòng điện định mức mỗi pha bằng 41A.

Khi xảy ra sự cố mất cân bằng điện áp tại thời điểm 0.3s, trong phương pháp truyền thống, vì xuất hiện thành phần thứ tự nghịch nên các đại lượng ước lượng được ở hình 3 chứa thành phần dao động đáng kể. Điều này làm cho việc tính toán dòng điện chuẩn ở hình 12 có đỉnh bị vượt quá định mức lên đến 70A nên sẽ làm hỏng linh kiện của nghịch lưu. Thêm vào đó, dòng điện ngõ ra của nghịch lưu nối lưới ở hình 9(b) sau thời điểm 0.3s bị méo dạng đáng kể có THD lên tới 26.38% ở hình 11, mặc dù có thể phát công suất tác dụng ở mức cao như hình 10. Điều này thật sự không cần thiết, vì sự cố điện áp mất cân bằng thường chỉ diễn ra trong ngắn hạn.

Trong khi đó, kết quả khảo sát của phương pháp đề xuất ở hình 13 đến 17 cho thấy dòng điện của nghịch lưu nối lưới không vượt quá giá trị định mức nên đảm bảo các linh kiện bán dẫn công suất không bị hư hỏng. Điều này có được là nhờ vào việc tách các thành phần điện áp thứ tự thuận và nghịch

của phương pháp đề xuất giúp cho các tham số ước lượng được của vòng khóa pha ở hình 13 có độ chính xác cao do không chứa các thành phần dao động. Hơn nữa, phương pháp tính lại công suất định mức đề xuất đã giảm theo biên độ điện áp ước lượng được khi có sự cố mất cân bằng. Việc này làm cho dòng điện đặt ở hình 14 có độ cân bằng và không vượt quá định mức. Vì vậy, dòng điện đỉnh 3 pha ngõ ra của bộ nghịch lưu ở hình 15(b) sau thời điểm 0.3s chỉ xấp xỉ định mức, giúp đảm bảo an toàn cho linh kiện bán dẫn công suất bền bỉ trong vận hành.

Ngoài ra, công suất phát vào lưới cũng được thể hiện ở hình 16 và THD dòng điện ở hình 17 cho thấy độ méo dạng rất thấp ở mức 4.5% và nhỏ hơn tiêu chuẩn nối lưới qui định của quốc tế (thường bằng 5%).

5. KẾT LUẬN

Trong vận hành nghịch lưu nối lưới, khi có sự cố mất cân bằng điện áp xảy ra, các phương pháp điều khiển truyền thống không

nhận biết sự xuất hiện của thành phần điện áp thứ tự nghịch làm cho các tham số ước lượng được của vòng khóa pha bị sai lệch do có chứa các thành phần dao động.

Bài báo này đã đề xuất một phương pháp xác định công suất định mức của các bộ nghịch lưu nối lưới vận hành trong điều kiện mất cân bằng điện áp lưới sử dụng kỹ thuật tách thành phần thứ tự nghịch bằng bộ lọc hệ số phức. Điều này giúp cho dòng điện của các linh kiện bán dẫn công suất của nghịch lưu không vượt quá giới hạn dòng điện định mức để linh kiện không bị hư hỏng.

Kết quả khảo sát đã khẳng định tính hiệu quả của phương pháp đề xuất so với phương pháp thông thường hiện nay.

LỜI CẢM ƠN

Tác giả xin cảm ơn sự hỗ trợ thiết bị của phòng Thí nghiệm năng lượng tái tạo và hệ thống điện C201 của trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. Hồ Chí Minh - Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Z. Chen, J. M. Guerrero, F. Blaabjerg, and S. Member, "A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 8, pp. 1859–1875, 2009.
- [2] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. 2011.
- [3] M. L. and P. C. L. R. Teodorescu, F. Blaabjerg, "Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters," in *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, 2006, vol. 153, no. 5, pp. 750–762.
- [4] G. De Donato, G. Scelba, G. Borocci, F. Giulii Capponi, and G. Scarcella, "Fault-Decoupled Instantaneous Frequency and Phase Angle Estimation for Three-Phase Grid-Connected Inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 4, pp. 2880–2889, 2016.
- [5] IEEE, "IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems," *IEEE Std 929-2000*. 2000.
- [6] IEEE Standard, "IEEE P1547 . 2TM / D 7 Draft Application Guide for IEEE Std 1547 , Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems," no. March. 2007.
- [7] IEEE Standard, "IEEE Application Guide for IEEE Std 1547(TM), IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems," *IEEE Std 1547.2-2008*, no. April, pp. 1–217, 2009.
- [8] Z. Rymarski, K. Bernacki, and L. Dyga, "A Control for an Unbalanced 3-Phase Load in UPS Systems," *Elektron. ir Elektrotechnika*, vol. 24, no. 4, 2018.
- [9] P. Rodríguez, R. Teodorescu, I. Candela, A. V. Timbus, M. Liserre, and F. Blaabjerg, "New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters

- under faulty grid conditions,” in *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2006, pp. 1–7.
- [10] P. Ç. Rodríguez, A. Ç. Luna, M. E. Ciobotaru, R. E. Teodorescu, and F. E. Blaabjerg, “Advanced Grid Synchronization System for Power Converters under Unbalanced and Distorted Operating Conditions,” in *Proc. 32nd Ann. Conf. IEEE Ind. Elect., (IECON)*, 2006, no. 2, pp. 5173–5178.
- [11] R. Zeng, L. Xu, L. Yao, and S. J. Finney, “Analysis and control of modular multilevel converters under asymmetric arm impedance conditions,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 1, pp. 71–81, 2016.
- [12] X. Guo, W. Liu, X. Zhang, X. Sun, Z. Lu, and J. M. Guerrero, “Flexible control strategy for grid-connected inverter under unbalanced grid faults without PLL,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 4, pp. 1773–1774, 2015.
- [13] Y. Zhang and C. Qu, “Table-Based Direct Power Control for Three-Phase AC/DC Converters under Unbalanced Grid Voltages,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 12, pp. 7090–7099, 2015.
- [14] M. P. Kazmierkowski, “A Review of Power Theory,” *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. Fall, pp. 2007–2007, 2007.
- [15] L. Tang and B. T. Ooi, “Managing zero sequence in voltage source converter,” *Conf. Rec. Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.)*, vol. 2, pp. 795–802, 2002.
- [16] A. A. Montanari and A. M. Gole, “Enhanced Instantaneous Power Theory for Control of Grid Connected Voltage Sourced Converters under Unbalanced Conditions,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 8, pp. 6652–6660, 2017.
- [17] M. A. Shuvra, S. Member, and U. N. C. Charlotte, “Selective Harmonic Compensation by Smart Inverters using Multiple-Complex-Coefficient-Filter (MCCF) during Unbalanced Fault Condition,” in *2017 North American Power Symposium (NAPS)*, 2017.

Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:

TS. Trần Quang Thọ

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM.

Email: thotq@hcmute.edu.vn