

ƯỚC LƯỢNG ĐIỆN ÁP MỘT CHIỀU TRONG NGHỊCH LƯU NỐI LƯỚI 3 PHA

DC VOLTAGE ESTIMATION IN THREE-PHASE GRID-CONNECTED INVERTERS

Trần Quang Thọ

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. Hồ Chí Minh; thotq@hcmute.edu.vn

Tóm tắt - Các nguồn năng lượng tái tạo như gió và Mặt trời hiện nay được sử dụng rất phổ biến với công suất ngày càng lớn thông qua các bộ nghịch lưu nối lưới. Nguồn điện ngõ vào của các bộ nghịch lưu nối lưới thường có dạng một chiều và thường thay đổi theo điều kiện thời tiết. Giá trị điện áp một chiều này cần phải được xác định một cách chính xác vì nó ảnh hưởng đến sóng hài dòng điện ngõ ra thông qua chỉ số điều chế. Để đo giá trị điện áp này, các phương pháp hiện nay chủ yếu sử dụng các cảm biến điện áp cách ly. Bài báo này đề xuất một phương pháp xác định điện áp một chiều mà không sử dụng cảm biến để điều khiển bộ nghịch lưu nối lưới. Phương pháp này góp phần giảm chi phí và giá thành của nghịch lưu trong khi vẫn đảm bảo chất lượng điện năng của dòng điện ngõ ra nghịch lưu. Các kết quả khảo sát trên Matlab/ Simulink đã cho thấy tính hiệu quả của phương pháp đề xuất.

Từ khóa - Nghịch lưu nối lưới; sóng hài dòng điện; dò điểm công suất cực đại; điều khiển điện áp một chiều

Abstract - Renewable energies such as wind and photovoltaic powers are adopted very popularly with increasing capacity via grid-connected inverters. The input power source of the inverters is usually in the form of direct current and varies according to weather conditions. The value of the input voltage needs to be determined exactly because it affects the output current harmonics of inverters by modulation index. In order to measure this value, the existing methods usually use isolated voltage sensors based on Hall effect sensor. This paper proposes a method for estimating the direct-current voltage value of inverters without using sensors in order to decrease cost and space for grid-connected inverters. The presented strategy contributes to reducing the costs of inverters while ensuring the power quality of inverter outputs. The simulated results on Matlab/ Simulink have validated the performance of the proposed method.

Key words - Grid-connected inverters; current harmonics; maximum power point tracking; DC voltage controllers

1. Giới thiệu

Năng lượng tái tạo như điện gió và điện Mặt trời được sử dụng ngày càng phổ biến do tính bền vững và thân thiện với môi trường. Do phụ thuộc nhiều vào điều kiện thời tiết nên nguồn điện năng lượng tái tạo này có đặc điểm không ổn định. Do đó, để có một nguồn điện hiệu quả có chất lượng cao, các nguồn năng lượng này cần được nối với lưới điện thông qua các bộ nghịch lưu nối lưới bán dẫn công suất [1]–[3]. Khi vận hành, các bộ nghịch lưu nối lưới phải đảm bảo các tiêu chuẩn chất lượng điện năng theo qui định [4], [5]. Do ngõ ra của các tấm pin mặt trời hay của các máy phát tua bin gió thông thường ở dạng một chiều DC (direct-current). Nguồn điện một chiều này có công suất và điện áp thay đổi theo điều kiện thời tiết. Do đó, trong các bộ nghịch lưu nối lưới hai giai đoạn hoặc một giai đoạn, các bộ biến đổi có chức năng dò điểm công suất cực đại thường phải sử dụng cảm biến điện áp liên kết một chiều (DC-link) để cố định giá trị này [6], [7]. Việc sử dụng cảm biến Hall để cách ly điện áp DC có giá trị khoảng 700V trở lên nhằm đảm bảo an toàn cho các vi mạch điều khiển đã làm tăng giá thành và không gian của thiết bị.

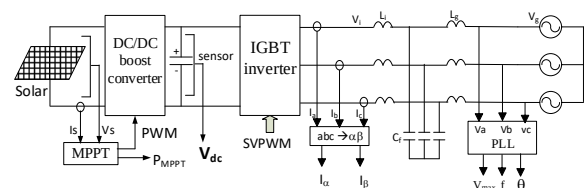
Việc nghiên cứu loại bỏ bớt cảm biến này sẽ góp phần làm giảm không gian và chi phí phần cứng nên sẽ giảm giá thành thiết bị. Tuy nhiên, điều này gây khó khăn cho việc kiểm soát chất lượng điện năng ở ngõ ra, do sóng hài dòng điện ngõ ra phụ thuộc vào chỉ số điều chế mà chỉ số điều chế lại phụ thuộc vào giá trị điện áp DC. Do đó, việc ước lượng chính xác giá trị điện áp DC để không sử dụng cảm biến đã trở thành một thách thức.

Việc điều khiển điện áp liên kết DC trong các bộ nghịch lưu nối lưới có vai trò quan trọng trong vấn đề ổn định hệ thống [8]–[10]. Đã có những giải pháp được giới thiệu để giải quyết vấn đề này. Công bố trong [11] đã giới thiệu một phương pháp điều khiển không sử dụng cảm biến điện áp DC thông qua việc ước lượng giá trị này và áp dụng cho bộ

chỉnh lưu 3 pha. Phương pháp trong [12] sử dụng dòng điện ngõ ra và điện áp lưới để ước lượng điện áp liên kết DC lại được áp dụng cho nghịch lưu có nguồn áp DC cố định. Một công bố khác trong [13] đề xuất sơ đồ không sử dụng cảm biến điện áp DC và loại bỏ vòng điều khiển điện áp. Tuy nhiên, các tác giả trong công bố này lại sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo thay cho bộ điều khiển điện áp và chỉ mới áp dụng cho nghịch lưu nối lưới một pha. Điều này gây khó khăn đối với các ứng dụng công suất lớn. Phương pháp không sử dụng cảm biến điện áp DC trong [14] lại sử dụng điện áp lưới để ước lượng điện áp DC cần đặt. Điều này có thể không phù hợp khi điện áp lưới thay đổi dẫn đến điện áp DC ước lượng thay đổi. Trong khi đó, điện áp ngõ ra mạch DC-DC không đổi do giữ nguyên độ rộng xung D (Duty).

Bài báo này nghiên cứu một phương pháp điều khiển điện áp liên kết DC mà không sử dụng cảm biến điện áp nhằm giảm chi phí và không gian cho thiết bị. Giá trị dòng điện đặt cho nghịch lưu được ước lượng dựa vào điện áp và công suất cực đại của dàn pin mặt trời.

2. Điều khiển điện áp liên kết một chiều



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống nghịch lưu nối lưới

Cấu trúc của một hệ thống nghịch lưu nối lưới 3 pha hai giai đoạn sử dụng pin mặt trời được trình bày trên Hình 1. Trong đó, khối MPPT có nhiệm vụ dò điểm công suất cực đại sử dụng giải thuật gia tăng điện dẫn [15], [16]. Ngõ ra của khối này là độ rộng xung kích PWM cho bộ tăng áp DC-DC và công suất cực đại P_{MPPT} . Giá trị công suất cực đại

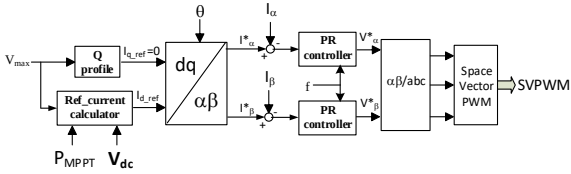
này được sử dụng để tính toán dòng điện đặt I_{d_ref} , dòng điện này sẽ quyết định giá trị công suất tác dụng bơm vào lưới.

Trong Hình 1, vòng khóa pha PLL (phase-locked loop) có nhiệm vụ xác định biên độ V_{max} , tần số f và góc pha θ của điện áp nguồn lưới nhằm phục vụ tính toán công suất phát vào lưới để hòa đồng bộ nghịch lưu với nguồn điện lưới.

Nguyên lý điều khiển nghịch lưu được thể hiện ở Hình 2. Trong điều kiện vận hành bình thường, nghịch lưu không yêu cầu phát công suất phản kháng Q vào lưới nên dòng điện đặt $I_{q_ref} = 0$. Điện áp liên kết DC đặt V_{ref} phụ thuộc vào điện áp lưới V_{max} được ước lượng bởi PLL và được xác định như sau:

$$V_{ref} = \frac{2 * V_{max}}{m} \quad (1)$$

Trong đó, m là chỉ số điều chế của nghịch lưu.



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý điều khiển nghịch lưu nối lưới

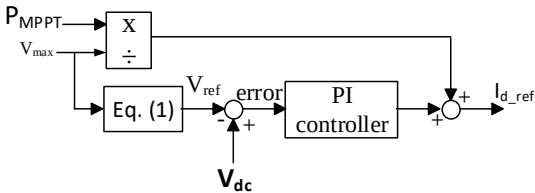
Khối tính dòng điện đặt I_{d_ref} được thể hiện ở Hình 3 và được tính như (2). Dòng điện này sẽ quyết định giá trị công suất tác dụng phát vào lưới.

$$I_{d_ref} = \frac{P_{MPPT}}{V_{max}} + \Delta I_{d_ref} \quad (2)$$

Với ΔI_{d_ref} phụ thuộc vào việc điều chỉnh điện áp liên kết DC thông qua bộ điều khiển PI.

$$\begin{aligned} \Delta I_{d_ref} &= (V_{dc} - V_{ref}) * \left(K_{p-PI} + \frac{K_{i-PI}}{s} \right) \\ &= error * \left(K_{p-PI} + \frac{K_{i-PI}}{s} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Trong đó, $error$ là độ sai lệch giữa điện áp DC đặt mong muốn với giá trị hiện tại. Ngõ vào của bộ điều khiển PI luôn tồn tại một giá trị khác không, cho dù có thể rất nhỏ. Như vậy, luôn cần một cảm biến để đo điện áp liên kết DC để phục vụ cho việc điều khiển phía DC của nghịch lưu.



Hình 3. Khối tính dòng điện sử dụng cảm biến điện áp DC

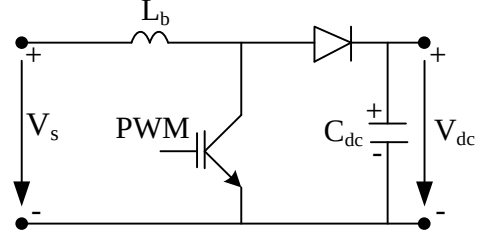
3. Phương pháp đề xuất

Từ nguyên lý điều khiển bên trên cho thấy, cần phải biết giá trị điện áp một chiều của nghịch lưu. Phương pháp đề xuất không sử dụng cảm biến để đo điện áp liên kết DC mà ước lượng giá trị này phục vụ cho việc điều khiển.

Dựa vào điện áp của dàn pin và độ rộng xung kích cho mạch boost ở Hình 4 để ước lượng điện áp DC như sau:

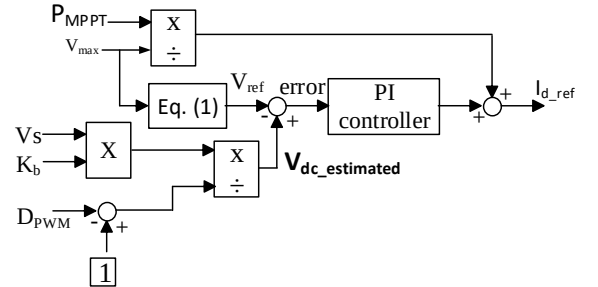
$$V_{dc-estimated} = \frac{V_s * K_b}{1 - D_{PWM}} \quad (4)$$

Trong đó, V_s là điện áp của dàn pin mặt trời tại điểm công suất cực đại. K_b là hệ số đặc trưng cho độ sụt áp trên linh kiện chuyển mạch và điện cảm của mạch boost (thông thường khoảng vài phần trăm). D_{PWM} là độ rộng xung kích mạch boost tăng áp. Giá trị này được xác định từ khối đo điểm công suất cực đại MPPT.



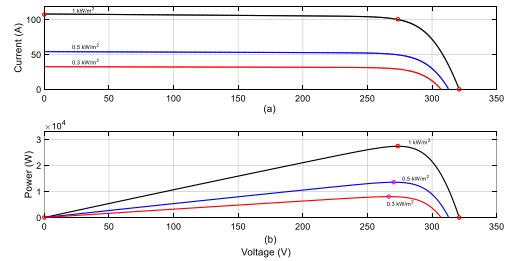
Hình 4. Sơ đồ nguyên lý mạch boost

Phương pháp ước lượng điện áp liên kết DC ở công thức (4) được trình bày trên Hình 5. Trong đó, $V_{dc-estimated}$ là giá trị ước lượng được.



Hình 5. Khối tính dòng điện đặt của phương pháp đề xuất

4. Kết quả khảo sát



Hình 6. Đặc tính V - A và V - W của dàn pin mặt trời

Hệ thống khảo sát trong bài báo này sử dụng 90 tấm pin mặt trời của hãng SUNPOWER có ký hiệu: SPR-305E-WHT-D, mỗi tấm có công suất 305,226 Wp và được ghép thành 18 nhánh, mỗi nhánh gồm 5 tấm ghép nối tiếp cho tổng công suất 27470,3Wp. Để khảo sát ảnh hưởng của điều kiện thời tiết đến công suất của dàn pin, các đặc tính của dàn pin với các mức bức xạ khác nhau được thể hiện ở trên Hình 6 đã cho thấy, điện áp tại điểm cực đại khoảng 270V. Khi đó, mạch boost ở Hình 4 có nhiệm vụ tăng áp đến khoảng trên 700V với độ rộng xung kích D_{PWM} .

Có 3 khoảng thời gian được chọn để khảo sát tương ứng với các điều kiện bức xạ khác nhau với cùng điều kiện nhiệt độ 25 độ C. Trong khoảng thời gian 0-0,4s có mức bức xạ 1000W/m² (1pu), trong khoảng 0,4-0,7s có mức bức xạ 500W/m² (0,5pu), và trong khoảng thời gian 0,7-1s có mức

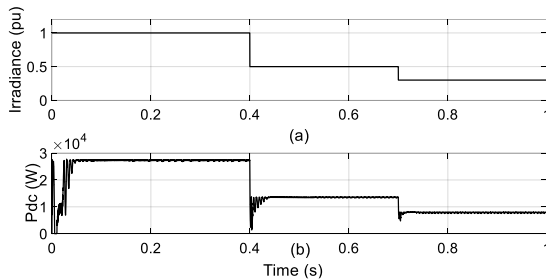
bức xạ 300W/m^2 (0,3pu). Thông số khảo sát của hệ thống được trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1. Tham số hệ thống khảo sát

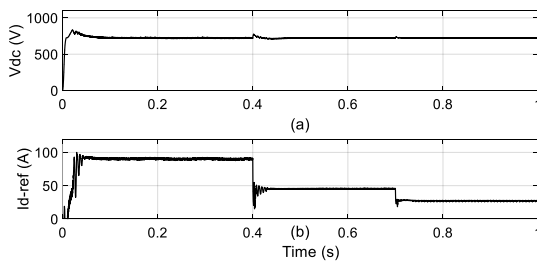
Mô tả	Ký hiệu	Giá trị
Công suất dân pin	Solar	27470,3 Wp
Điện áp lưới	V_g	$3 \times 380\text{ V}$
Tần số nguồn	f	50 Hz
Tụ phía DC	C_{dc}	1000 μF
Điện cảm lọc	L_i	7,5 mH
Tụ lọc	C_f	7,5 μF
Chỉ số điều chế	m	0,8
Hệ số tổn thất điện áp boost	K_b	1,013
Hệ số bộ điều khiển áp DC	$K_p\text{-PI}$	0,2
	$K_i\text{-PI}$	2,5
Hệ số bộ điều khiển dòng	$K_p\text{-PR}$	110,37
	$K_i\text{-PR}$	304,2
Tần số chuyển mạch mạch boost	PWM	2 kHz
Tần số chuyển mạch nghịch lưu	SVPWM	5 kHz

4.1. Phương pháp sử dụng cảm biến

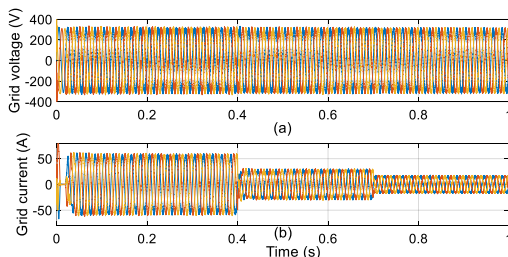
Các kết quả khảo sát của phương pháp sử dụng cảm biến được trình bày trên Hình 7 đến Hình 13. Dạng sóng dòng điện đo bằng Am-pe và độ méo dạng hài THD (total harmonic distortion) đo bằng phần trăm ở Hình 11-13 nhờ sử dụng tính năng đo FFT của Simulink trong Matlab.



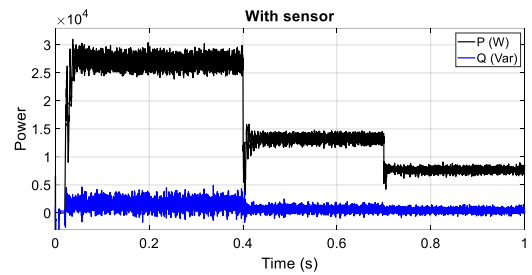
Hình 7. Công suất cực đại của dân pin ứng với các mức bức xạ khác nhau



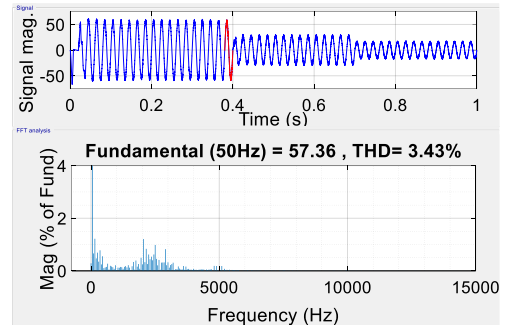
Hình 8. Điện áp DC và dòng điện đặt I_{d_ref}



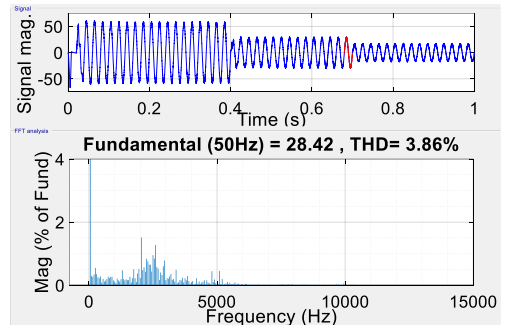
Hình 9. Điện áp và dòng điện 3 pha



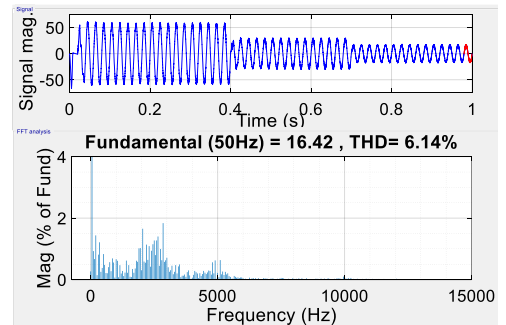
Hình 10. Công suất phát vào lưới điện



Hình 11. THD dòng pha A đo tại 0,38 giây



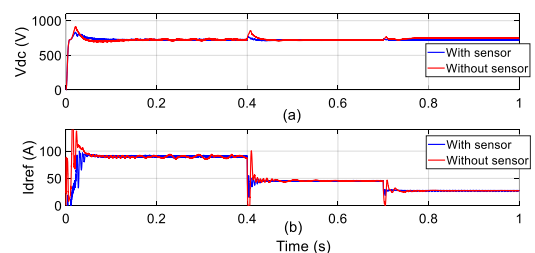
Hình 12. THD dòng pha A đo tại 0,68 giây



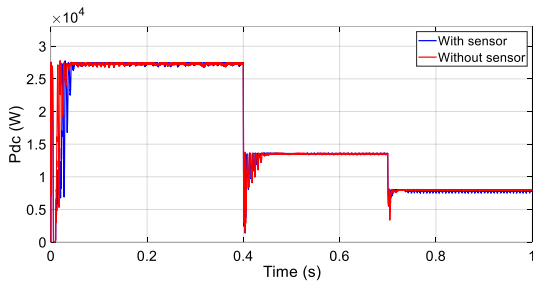
Hình 13. THD dòng pha A đo tại 0,98 giây

4.2. Kết quả khảo sát khi không có cảm biến

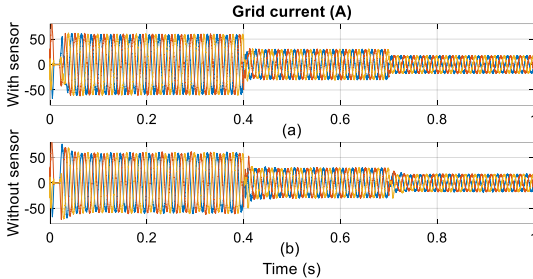
Các kết quả khảo sát của phương pháp đề nghị được trình bày ở Hình 14 đến Hình 21.



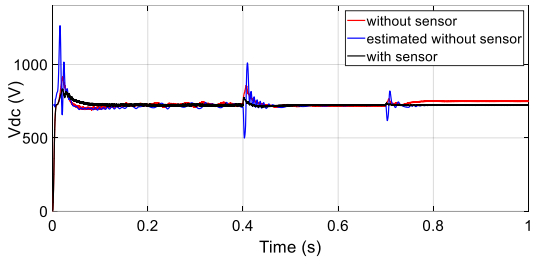
Hình 14. Đáp ứng của điện áp DC ước lượng được và dòng điện đặt



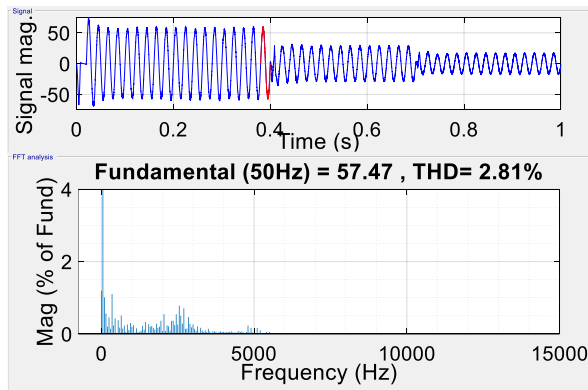
Hình 15. Đáp ứng công suất cực đại



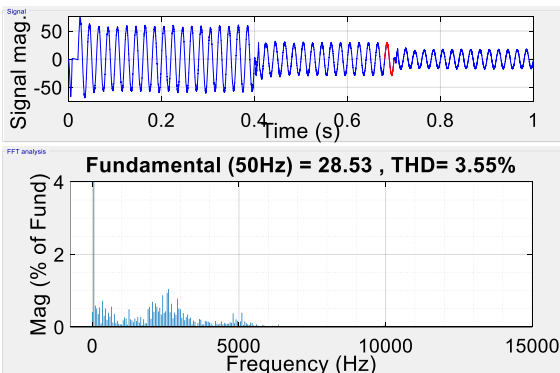
Hình 16. Dòng điện ngõ ra nghịch lưu khi có cảm biến và khi không cảm biến



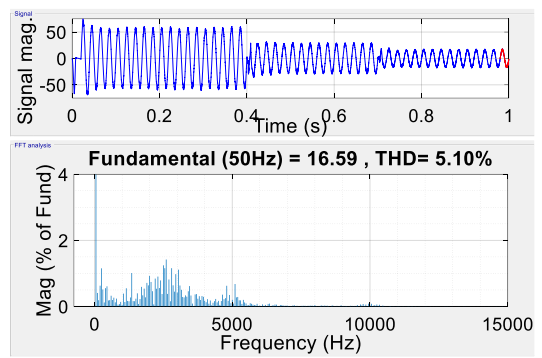
Hình 17. Đáp ứng điện áp DC của hai trường hợp khảo sát



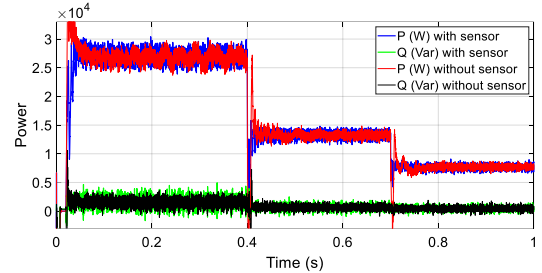
Hình 18. Sóng hài dòng pha A đo tại 0,38 giây



Hình 19. Sóng hài dòng pha A đo tại 0,68 giây



Hình 20. Sóng hài dòng pha A đo tại 0,98 giây



Hình 21. Đáp ứng công suất phát vào lưới

4.3. Thảo luận

Các kết quả khảo sát ở Hình 7 đến 13 cho thấy, điện áp V_{dc} của phương pháp truyền thống sử dụng cảm biến có độ vọt lố và sai số xác lập nhỏ. Tuy nhiên, do có độ méo hài toàn phần THD của dòng điện ngõ ra hơi cao hơn phương pháp đề xuất nên đáp ứng công suất ngõ ra ở Hình 10 có sai số xác lập hơi lớn hơn của phương pháp đề xuất và được thể hiện ở Hình 21. Độ méo dạng sóng hài toàn phần THD của dòng điện ngõ ra của nghịch lưu đối với phương pháp sử dụng cảm biến được thể hiện ở Hình 11 đến 13, và được đo tại các thời điểm 0,38 giây; 0,68 giây và 0,98 giây tương ứng với các mức công suất khác nhau. Kết quả đo THD của cả hai phương pháp khảo sát cũng được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Biên độ của dòng điện lưới cơ bản và sóng hài trong các khoảng khảo sát

Khoảng thời gian (giây)		0-0,4	0,4-0,7	0,7-1
Phương pháp cảm biến	Dòng điện đỉnh (A)	57,36	28,42	16,42
	THD (%)	3,43	3,86	6,14
Phương pháp đề xuất	Dòng điện đỉnh (A)	57,47	28,53	16,59
	THD (%)	2,81	3,55	5,1

Đối với phương pháp không sử dụng cảm biến cho thấy, điện áp liên kết DC trong các khoảng thời gian khảo sát ở Hình 14(a) có sai số xác lập và độ vọt lố lớn hơn so với phương pháp có cảm biến. Điều này làm cho dòng điện đặt ở Hình 14(b) và công suất DC ở Hình 15 cũng có độ vọt lố và sai số xác lập lớn hơn. Tuy nhiên, các độ sai lệch này không gây quá dòng điện ngõ ra như ở Hình 16(b).

Đáp ứng điện áp liên kết DC của hai trường hợp khảo sát được thể hiện trên Hình 17. Tín hiệu màu xanh dương là giá trị ước lượng có độ vọt lố lớn. Tuy nhiên, điều này không gây nguy hiểm cho thiết bị vì đó là giá trị ảo. Giá trị điện áp có ý nghĩa vật lý thực sự là tín hiệu màu đỏ có độ vọt lố rất nhỏ $((855-725)/725=17,9\%)$. Giá trị thực sự này cho thấy, hơi lớn hơn (dù rất ít) so với phương pháp sử

dùng cảm biến. Điều này cũng làm cho biên độ dòng điện bơm vào lưới hơi lớn hơn so với khi dùng cảm biến nên sóng hài dòng điện cũng hơi thấp hơn. Dạng sóng dòng điện (Am-pe) và THD (%) của dòng điện pha A ở Hình 18-20 sử dụng tính năng đo FFT của Simulink. Các giá trị này hơi nhỏ hơn so với phương pháp có cảm biến ở Hình 11 đến 13 và được thể hiện ở Bảng 2. Sóng hài dòng điện giảm nhỏ cũng góp phần giảm sai số xác lập của công suất phát vào lưới được thể hiện ở Hình 21. Trong khoảng thời gian 0,7-1s, điện áp DC thực sự hơi cao hơn giá trị ước lượng là vì có độ sụt áp ở bộ lọc nhỏ hơn do có dòng bơm vào lưới nhỏ hơn. Tuy nhiên, kết quả khảo sát của hai phương pháp không có sự khác biệt nhiều về chất lượng điện năng ở ngõ ra. Hình 21 cũng cho thấy, công suất phát điện của hai phương pháp là tương đương nhau.

5. Kết luận

Việc nghiên cứu giảm phần cứng và chi phí cho các thiết bị nghịch lưu nối lưới đã và đang được các hãng sản xuất thiết bị thực hiện mạnh mẽ nhằm tăng tính cạnh tranh trên thị trường.

Bài báo này đã đề xuất một phương pháp xác định điện áp liên kết DC của nghịch lưu nối lưới nhằm loại bỏ cảm biến điện áp để góp phần tiết kiệm chi phí và không gian của thiết bị. Giá trị điện áp DC ước lượng của phương pháp đề xuất dựa vào công suất cực đại và độ rộng xung kích mạch boost DC-DC.

Bài báo đã so sánh phương pháp không cảm biến điện áp đề xuất với phương pháp sử dụng cảm biến điện áp thông thường. Các kết quả khảo sát cho thấy, sóng hài dòng điện ngõ ra nghịch lưu của 2 phương pháp tương đương nhau. Điều này đã khẳng định tính hiệu quả của phương pháp đề xuất so với phương pháp sử dụng cảm biến.

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] K. Zeb *et al.*, "A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system", vol. 94, no. June, pp. 1120–1141, 2018.
- [4] 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.
- [5] A. Anzalchi and A. Sarwat, "Overview of technical specifications for grid-connected photovoltaic systems", *Energy Convers. Manag.*, vol. 152, no. September, pp. 312–327, 2017.
- [6] A. Rajashekar and S. Swathi, "Grid Interconnection of Renewable Energy Sources with Power- Quality Improvement Features at the Distribution Level", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 1, pp. 307–315, 2011.
- [7] H. D. Tafti, A. I. Maswood, G. Konstantinou, J. Pou, and F. Blaabjerg, "A general constant power generation algorithm for photovoltaic systems", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 5, pp. 4088–4101, 2018.
- [8] A. M. A. Haidar and N. Julai, "Energy for Sustainable Development An improved scheme for enhancing the ride-through capability of grid-connected photovoltaic systems towards meeting the recent grid codes requirements", *Energy Sustain. Dev.*, vol. 50, pp. 38–49, 2019.
- [9] A. Q. Al-Shetwi, M. Z. Sujod, and F. Blaabjerg, "Low voltage ride-through capability control for single-stage inverter-based grid-connected photovoltaic power plant", *Sol. Energy*, vol. 159, pp. 665–681, 2018.
- [10] A. Turksoy, Y. Hames, A. Teke, and M. Barghi, "A novel adaptive switching method to reduce DC-Link capacitor ripple in PV based grid-connected inverter", *Sol. Energy*, vol. 173, no. February, pp. 702–714, 2018.
- [11] A. Mallik, S. Member, A. Khaligh, and S. Member, "DC Link Voltage Sensorless Control of a Three-Phase Boost Power Factor Correction Rectifier", in *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2016, pp. 1–6.
- [12] Z. Wang, L. Chang, and M. Mao, "Dc voltage sensorless control method for three-phase grid-connected inverters", *IET Power Electron.*, vol. 3, no. 4, pp. 552–558, 2010.
- [13] N. E. Zakzouk, A. K. Abdelsalam, and A. A. Helal, "PV Single Phase Grid Connected Converter: DC - link Voltage Sensorless Prospective", *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 5, no. 1, pp. 526–546, 2017.
- [14] V. Kumar and M. Singh, "Sensorless DC-link control approach for three-phase grid integrated PV system", *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 112, pp. 309–318, 2019.
- [15] O. Wasynczuk, "Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems", *IEEE Power Eng. Rev.*, no. September, pp. 36–37, 1983.
- [16] Nguyễn Văn Tấn, Dương Minh Quân, Trần Anh Tuấn, Phạm Văn Kiên, Lê Hồng Lâm, Hà Hải Long, "So sánh các thuật toán bắt điểm công suất cực đại bằng phương pháp mô phỏng và thực nghiệm", *Tạp chí KH&CN Đại học Đà Nẵng*, Số 11, Quyển 2, 2018, trang 64-68.

(BBT nhận bài: 21/11/2019, hoàn tất thủ tục phản biện: 27/02/2020)