



Nghiên cứu, thiết kế bộ nghịch lưu nối lưới 1 pha 400 Hz

sử dụng điều khiển cộng hưởng tỷ lệ PR

ThS. Phạm Thu Hiếu^{1*}, ThS. Trần Ích Bảo²

^{1, 2}, Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Công nghệ Đông Á

*Email: hieupt@eaut.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo trình bày mô hình hóa và thiết kế bộ điều khiển cộng hưởng tỉ lệ (PR) cho bộ nghịch lưu nối lưới một pha 400Hz ứng dụng trong hệ thống điện hàng không. Với yêu cầu cao về khối lượng, hiệu suất và chất lượng điện năng, bộ nghịch lưu 400Hz cần đảm bảo đáp ứng nhanh và dòng đầu ra ít méo. Bộ điều khiển PR được sử dụng để loại bỏ sai số xác lập và cải thiện khả năng bám dòng tham chiếu. Kết quả mô phỏng trong MATLAB/Simulink cho thấy bộ điều khiển PR, đặc biệt khi kết hợp với bộ bù hài giảm đáng kể THD và nâng cao công suất ra so với điều khiển PI truyền thống. Nguồn lưới đạt điện áp 115V, tần số 400Hz và công suất yêu cầu, với tổng độ méo hài (THD) nhỏ hơn 5%, đáp ứng tốt các yêu cầu nghiêm ngặt theo tiêu chuẩn của lưới điện hàng không.

Từ khóa: Bộ nghịch lưu nối lưới 1 pha, cộng hưởng tỉ lệ (PR), điều chế độ rộng xung hình sin (SPWM), tổng méo hài (THD)

Abstract

This paper presents the modeling and design of a proportional-resonant (PR) controller for a 400Hz single-phase grid-connected inverter, targeting aerospace power systems. Due to strict requirements on weight, efficiency, and power quality, 400Hz inverters must deliver fast dynamic response with low output distortion. The PR controller is implemented to eliminate steady-state error and enhance current reference tracking. Simulation results in MATLAB/Simulink show that the PR controller, especially when combined with harmonic compensation, provides superior transient response and significantly reduced total harmonic distortion (THD) compared to conventional PI control. The grid source achieves an output voltage of 115V at a frequency of 400Hz with the required power capacity, and maintains a total harmonic distortion (THD) of less than 5%, effectively meeting the stringent standards of aerospace power systems.

Keywords: Single-phase grid-connected inverter, Proportional resonant (PR), Sin Pulse Width Modulation (SPWM), Total harmonic distortion (THD)

I. GIỚI THIỆU



Hệ thống điện hàng không hiện đại sử dụng tần số 400Hz thay vì 50/60Hz truyền thống nhằm giảm khối lượng và kích thước của các thiết bị điện như máy biến áp và động cơ. Theo tiêu chuẩn quân sự MIL-STD-704 và DO-160 của ngành hàng không, bộ nghịch lưu cần cung cấp điện áp đầu ra ổn định. Điện áp xoay chiều 115/200VAC có tần số 400Hz, tổng méo hài thấp (THD < 5%) và khả năng đáp ứng nhanh với sự thay đổi tải. [5]

Trong các hệ thống nghịch lưu nối lưới, việc điều khiển dòng điện là một yêu cầu quan trọng để đảm bảo chất lượng điện năng. Bộ điều khiển PI truyền thống thường được sử dụng do cấu trúc đơn giản và dễ hiện thực hóa [5,6]. Tuy nhiên, bộ điều khiển tích phân tỷ lệ PI (Proportional–Integral Controller) truyền thống không thể đạt được hiệu quả tối ưu trong việc theo dõi dòng điện tham chiếu hình sin vì thời gian quá độ và sai số xác lập tương đối lớn.

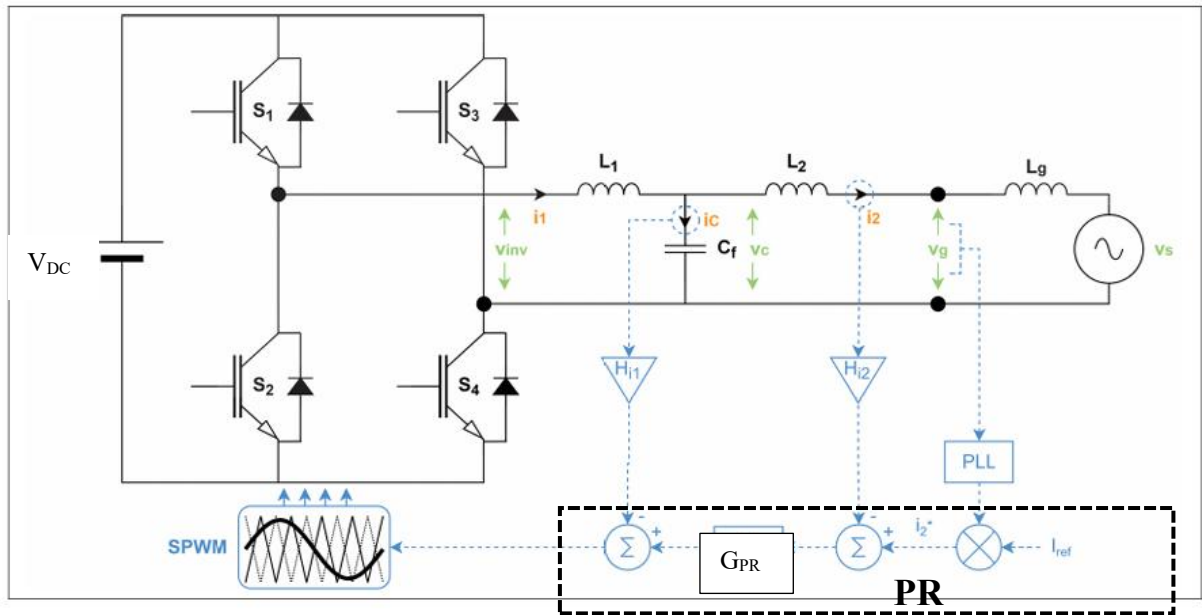
Để khắc phục vấn đề này, có thể sử dụng bộ điều khiển PR thay thế cho bộ PI. Bộ điều khiển PR cho phép đạt độ lợi lý tưởng tại tần số lưới, giúp loại bỏ sai số xác lập và tăng khả năng bám dòng. Hơn nữa, có khả năng mở rộng để bù hài, từ đó giảm đáng kể tổng méo hài (THD) và tăng công suất đầu ra.

Bài báo thực hiện nghiên cứu, thiết kế và mô phỏng bộ nghịch lưu nối lưới 1 pha có điện áp đầu ra 115VAC, tần số 400Hz sử dụng mạch điều khiển cộng hưởng tỉ lệ PR. Theo kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab, bộ nghịch lưu 400Hz sử dụng điều khiển cộng hưởng tỉ lệ đã đáp ứng tốt các yêu cầu khắt khe của tiêu chuẩn ngành hàng không như THD<5% và công suất đầu ra lớn.

II. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

1. Bộ nghịch lưu nối lưới 1 pha

Hình 1 dưới đây mô tả sơ đồ mạch của một bộ nghịch lưu cầu H một pha nối lưới. Bộ nghịch lưu cầu H thực hiện để biến đổi từ điện áp DC thành điện áp AC để hòa lưới. Sơ đồ nguyên lý của bộ nghịch lưu một pha nối lưới như hình 1. [6]



Hình 1. Sơ đồ mạch bộ nghịch lưu một pha nối lưới

Cấu trúc bộ nghịch lưu nối lưới 1 pha bao gồm điện áp một chiều V_{DC} , 4 van bán dẫn IGBT, bộ lọc LCL và tải:

- Bộ lọc LCL để lọc các thành phần sóng hài sau bộ nghịch lưu, giúp điện áp đầu ra chuẩn dạng hình sin và giảm tổng méo hài của mạch
- Nguồn DC được lấy từ bộ nâng áp 1 chiều - **DC boost**
- Bộ nghịch lưu sử dụng 4 IGBT để đạt được tần số chuyển mạch cao với tổn hao chuyển mạch thấp. Do IGBT kết hợp được tính năng chuyển mạch nhanh của MOSFET và tổn hao thấp của BJT.

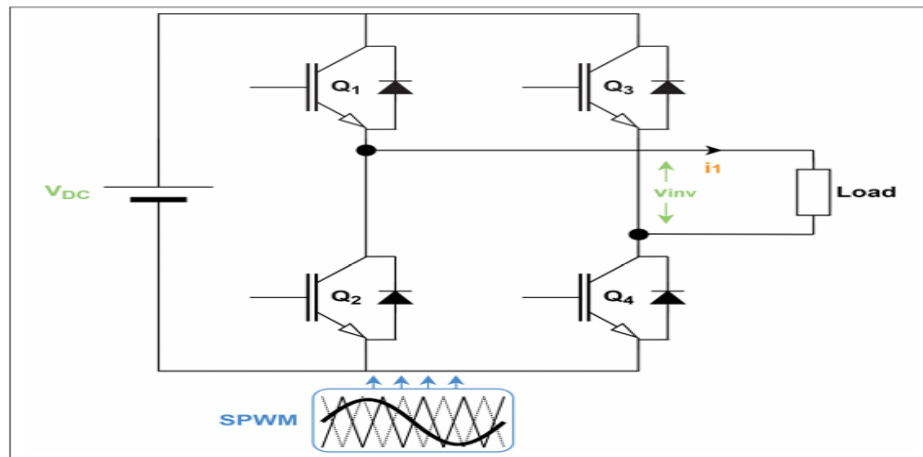
Cấu trúc sử dụng kỹ thuật điều chế độ rộng xung hình sin (SPWM) tạo ra các xung chuyển mạch cho bộ nghịch lưu. Bằng cách chọn cấu hình cầu toàn phần, điện áp DC-link tối thiểu cho phép có thể được thiết lập bằng với giá trị đỉnh của điện áp lưới AC.

1.1. Điều chế độ rộng xung hình sin SPWM

Để tạo ra logic đóng/ngắt cho các khóa nghịch lưu, kỹ thuật điều chế độ rộng xung hình sin (SPWM) được sử dụng. Trong kỹ thuật SPWM, sóng điều chế hình sin được so sánh với sóng mang tần số cao có biên độ đã biết. Khi biên độ của sóng điều chế hình

sin lớn hơn biên độ của sóng mang tam giác, S_1 và S_4 sẽ dẫn, đầu ra sẽ là điện áp DC dương. Tương tự như vậy, khi biên độ của sóng điều chế hình sin nhỏ hơn biên độ của sóng mang tam giác, S_2 và S_3 sẽ dẫn, đầu ra sẽ là điện áp DC âm. Do sự so sánh giữa sóng tần số cao với sóng tần số thấp, một số thành phần của sóng tần số cao bị chèn vào, tạo ra các thành phần hài trong mạng điện.[6]

SPWM là một kỹ thuật điều chế thường được sử dụng trong các bộ nghịch lưu để tạo ra điện áp xoay chiều (AC) có dạng sóng gần giống với sóng hình sin từ nguồn điện một chiều (DC). SPWM lưỡng cực chỉ cho phép hai mức điện áp tại đầu ra bộ nghịch lưu: $-V_{dc}$ và $+V_{dc}$. Trong trường hợp này, như minh họa trong Hình 2, tín hiệu điều chế được so sánh với một sóng mang hình tam giác duy nhất.[1]



Hình 2. Bộ nghịch lưu 1 pha sử dụng điều chế SPWM

Kỹ thuật SPWM lưỡng cực tạo ra các thành phần sóng hài chiếm ưu thế trong điện áp đầu ra xung quanh tần số sóng mang. Điện áp đầu ra của bộ nghịch lưu là chuỗi các xung với hàm lượng sóng hài cao. Vì vậy cần phải sử dụng một bộ lọc thông thấp để giới hạn mức sóng hài này ở một mức chấp nhận được trong dòng điện được bơm vào lưới.

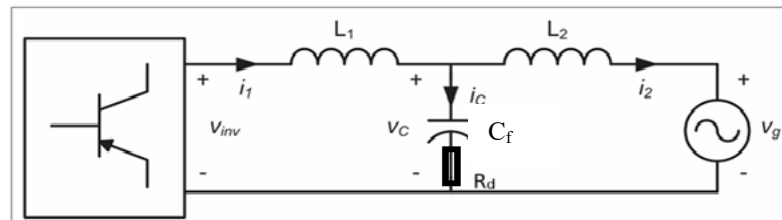
Để loại bỏ các biến dạng không mong muốn này, tín hiệu được đưa qua bộ lọc LCL. Bộ lọc này được thiết kế dựa trên các tiêu chí như độ gọn dòng, kích thước bộ lọc và khả năng suy giảm nhiễu do tần số chuyển mạch, nhằm giảm thành phần hài. Với

nguồn một chiều (DC) là pin mặt trời (PV) thì **bộ lọc LCL** hoạt động như một giao diện giữa hệ thống quang điện (PV) và lưới điện, giúp giảm hài và cải thiện chất lượng điện năng được đưa vào lưới.

1.2. Bộ lọc thông thấp LCL

Một bộ lọc thông thấp LCL bậc ba [2] được sử dụng để giảm sóng hài và đạt được mục tiêu giảm méo hài. Bộ lọc LCL giúp dòng điện từ nghịch lưu đáp ứng các tiêu chuẩn về tổng độ méo hài dòng (THD). Bộ lọc LCL có đặc tính suy giảm nhanh (steep attenuation) tại dải tần cao (tần số chuyển mạch), hiệu quả hơn nhiều so với lọc LC truyền thống. Điều này cho phép nghịch lưu hoạt động ở tần số chuyển mạch cao mà không gây ảnh hưởng đến lưới. Như vậy bộ lọc LCL còn tăng khả năng cách ly giữa bộ nghịch lưu và lưới. Hình 3 mô tả cách kết nối bộ lọc LCL giữa nghịch lưu và lưới [3].

Quy trình thiết kế bộ lọc LCL đã được trình bày trong các tài liệu [2], [4] và cùng quy trình này được sử dụng ở đây để tính toán các giá trị định mức của bộ lọc LCL. Bộ lọc LCL gồm các thành phần L_1 , C_f và L_2



Hình 3. Sơ đồ kết nối bộ lọc LCL

Trong đó:

V_{inv} : điện áp đầu ra của nghịch lưu – điện áp đầu vào của bộ lọc

v_g : điện áp lưới

i_g : dòng điện lưới

Khi phân tích bộ lọc trong miền s , ta có các hàm truyền sau:

$$\text{Trường hợp } v_g=0: \quad \frac{i_g}{v_{inv}} = \frac{sCR_d + 1}{s^3 L_1 L_2 C + s^2 CR_d (L_1 + L_2) + s(L_1 + L_2)} \quad (1)$$



Trường hợp $v_{inv}=0$
$$\frac{i_g}{v_g} = \frac{s^2 L_1 C + s C R_d + 1}{s^3 L_1 L_2 C + s^2 C R_d (L_1 + L_2) + s(L_1 + L_2)} \quad (2)$$

Từ phương trình (1), ta có thể tính được tần số cộng hưởng của bộ lọc, được ký hiệu là ω_r như sau:

$$\omega_r = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \quad (3)$$

1.3. Tính toán các giá trị được thiết kế trong bộ nghịch lưu

Yêu cầu: Tính toán thiết kế bộ nghịch lưu nối lưới 1 pha có điện áp lưới 115VAC, tần số 400Hz, tổng méo hài thấp (THD < 5%). Ta có điện áp nguồn 1 chiều DC là 400V, giả sử công suất vào là 500W

❖ **Giá trị điện áp đầu ra của bộ nghịch lưu V_{inv} và dòng điện đầu ra I_i là:**

$$V_{inv} = m_A \frac{V_{DC}}{2} = 120V$$

m_A : Hệ số điều chế, chọn $m_A = 0.6$

$$I_i = \frac{90\% \cdot P}{V_{inv}} = 3.75A$$

Giá trị của dòng điện cực đại I_m là: $I_m = \sqrt{2} \cdot I_i = 5.3 A$

❖ **Tính toán giá trị các linh kiện trong mạch lọc LCL**

Giá trị của cuộn cảm phía nghịch lưu L_1 được tính theo công thức (4), trong đó m_A là hệ số điều chế của bộ nghịch lưu SPWM, f_{sw} là tần số sóng mang chọn $f_{sw} = 20kHz$, ΔI_m là độ gợn sóng theo yêu cầu là $2\% \div 10\% I_m$ và V_{inv} là điện áp đầu ra của bộ nghịch lưu:

$$L_1 = \frac{2V_{inv}}{3I_m} (1 - m_A) \cdot m_A \cdot T_{sw} \quad (4)$$

Độ gợn dòng cực đại xảy ra tại dòng đỉnh-đỉnh lớn nhất, được tính theo công thức (5), khi hệ số điều chế bằng 0.5 – 0.6:

$$\Delta I_m = \frac{V_{DC}}{6f_{sw} I_m} \quad (5)$$

Trong đó, ΔI_m là độ gợn dòng tối đa đi qua cuộn cảm

$$L_1 = \frac{V_{inv}}{6f_{sw} \Delta I_m} \quad (6)$$

$$L_1 = 0.189\text{mH} \div 1\text{mH}, \text{ chọn } L_1 = 1\text{mH}$$

$$\text{Tổng trở cơ bản: } Z_b = \frac{V_i^2}{P} = 51.2 \Omega \quad (7)$$

$$\text{Giá trị tụ lọc } C_f = 0.05 C_b = \frac{1}{2\pi * f * Z_b} \quad (8)$$

$$L_2 = \frac{\sqrt{\frac{1}{k_a^2} + 1}}{C * \omega_{sw}^2} \quad (9)$$

Trong đó k_a : hệ số suy giảm mong muốn

Từ các công thức trên, giá trị thành phần của bộ lọc LCL được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Giá trị các thành phần trong mạch nghịch lưu nối lưới 1 pha

Tên linh kiện/ thông số	Giá trị tính toán và lựa chọn
Tần số lưới f_g , điện áp lưới V_g	400Hz, 115V
Công suất vào P (W)	500W
Điện áp DC	400V
Giá trị cuộn cảm L_1	1mH
Giá trị tụ lọc C_f	1pF
Giá trị tụ lọc L_2	1nH

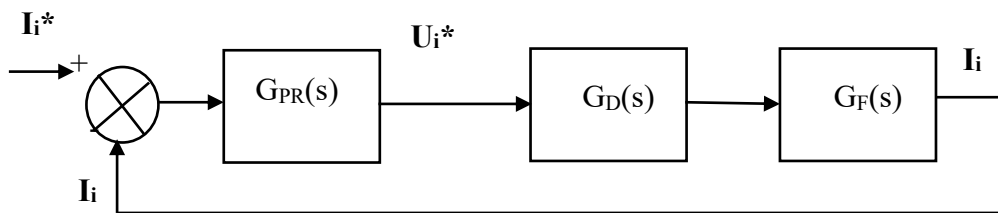
2. Bộ điều khiển cộng hưởng tỷ lệ

2.1. Bộ điều khiển cộng hưởng tỷ lệ PR (Proportional Resonant)

Bộ điều khiển dòng điện có thể ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng dòng điện được cấp cho lưới bởi bộ nghịch lưu năng lượng mặt trời (PV inverter), do đó việc đảm bảo

bộ điều khiển cung cấp đầu ra hình sin chất lượng cao với độ méo tối thiểu là rất quan trọng để tránh tạo ra các thành phần hài.

Một vòng hồi tiếp dòng điện một pha được sử dụng để điều chỉnh dòng điện lưới. Chiến lược điều khiển cộng hưởng tỷ lệ (PR) được sử dụng như một bộ bù để bám theo khung tham chiếu dòng điện hình sin. Sơ đồ vòng điều khiển cơ bản [4] với điều khiển PR được thể hiện trong Hình 4.



Hình 4. Sơ đồ bộ điều khiển cộng hưởng tỷ lệ

Ta có: $G_D(s)$ - Là hàm truyền của bộ nghịch lưu

$G_F(s)$ – Là Hàm truyền của bộ lọc

Hàm truyền của bộ điều khiển PR : $G_{PR}(s)$ lý tưởng như sau

$$G_{PR}(s) = K_p + K_r \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (10)$$

Trong đó:

- K_p : độ lợi tỉ lệ của bộ điều khiển
- K_r : độ lợi cộng hưởng của bộ điều khiển
- ω_0 : tần số cộng hưởng của bộ điều khiển PR, thường là tần số của lưới điện

Bộ điều chỉnh cộng hưởng $G_{PR}(s)$ được tích hợp bởi thành phần tỷ lệ P và thành phần cộng hưởng R nên còn được gọi là bộ điều khiển cộng hưởng PR. Từ công thức (10) cho thấy rằng thành phần tích phân bộ điều khiển trong hệ tọa độ quay tương đương trong hệ tọa độ tĩnh chính là một bộ lọc cộng hưởng bậc hai có tần số cộng hưởng chính xác bằng ω_0 và điều đáng chú ý là bộ lọc cộng hưởng này có hệ số tắt dần bằng không.

Tuy nhiên, bộ điều khiển PR lý tưởng hoạt động như một mạng có hệ số chất lượng vô hạn, điều này gây khó khăn trong việc hiện thực hóa bộ điều khiển PR trong thực tế.

Thứ nhất, độ lợi vô hạn được tạo ra bởi bộ điều khiển PR dẫn đến hệ số chất lượng vô hạn, điều này không thể đạt được trong cả hệ thống tương tự (analog) lẫn hệ thống số (digital).

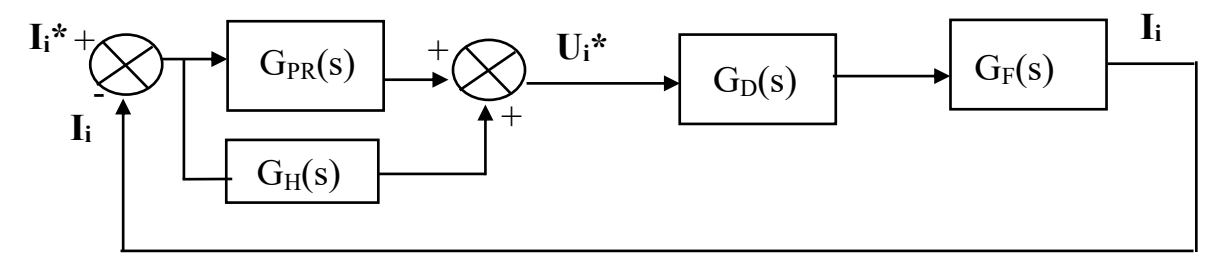
Thứ hai, độ lợi của bộ điều khiển PR bị suy giảm đáng kể ở các tần số khác, điều này là không đủ để loại bỏ ảnh hưởng của các thành phần hài gây ra bởi điện áp lưới. Vì vậy, một bộ điều khiển PR xấp xỉ lý tưởng (phi lý tưởng) được đề xuất như sau:

$$G_{PR}(s) = K_p + K_r \frac{2 \omega_c s}{s^2 + 2 \omega_c s + \omega_0^2} \quad (11)$$

ω_c là băng thông xung quanh tần số xoay chiều ω_0

2.2. Bộ điều khiển PR có bù hài

Nhằm giảm các thành phần hài phát sinh do biến động tải trong khoảng thời gian ngắn, bộ bù hài PR [4] được sử dụng kết hợp với bộ điều khiển PR. Sơ đồ vòng điều khiển cơ bản của PR kết hợp với bộ bù được thể hiện trong Hình 5.



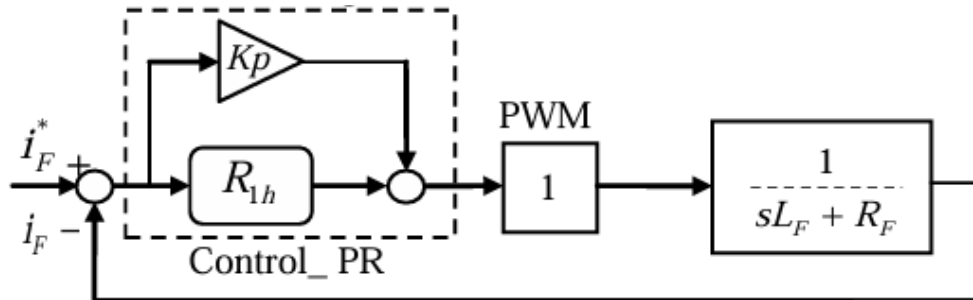
Hình 5. Sơ đồ vòng điều khiển của bộ điều khiển PR có tích hợp bộ bù hài

Bộ bù hài $G_H(s)$ được biểu diễn dưới dạng không lý tưởng bởi:

$$G_H(s) = \sum_{h=3,5,7...} K_{Ih} \frac{2 \omega_c s}{s^2 + 2 \omega_c s + \omega_0^2} \quad (12)$$

Từ các đáp ứng tần số bên dưới, ta có thể quan sát được sự thay đổi trong hiệu suất và độ ổn định của bộ điều khiển PR khi các tham số và độ lợi của bộ điều khiển thay đổi.

2.3. Lựa chọn bộ điều khiển PR



Hình 6. Sơ đồ vòng điều khiển của bộ điều khiển PR

Hàm truyền tổng hợp của bộ điều chỉnh cộng hưởng như sau:

$$G_{PR}(s) = K_{Ph} + K_{Ih} \frac{s}{s^2 + h^2 \omega_0^2} \quad (13)$$

$$\text{Ta có } R_{Ih} = \frac{s}{s^2 + h^2 \omega_0^2}$$

Vai trò của hệ số tích phân K_{Ih} không thể thiếu là xác định khả năng chọn lọc của bộ lọc. Như vậy bộ điều chỉnh cộng hưởng có khả năng điều chỉnh sai lệch dòng điện ở chế độ ổn định bằng không tại tần số hài bậc h.

Tải của bộ biến đổi có thể được mô hình hóa bởi hàm truyền:

$$G_L(s) = \frac{1}{sL_F + R_F} \quad (14)$$

Trong đó R_F và L_F là điện trở, điện kháng tải

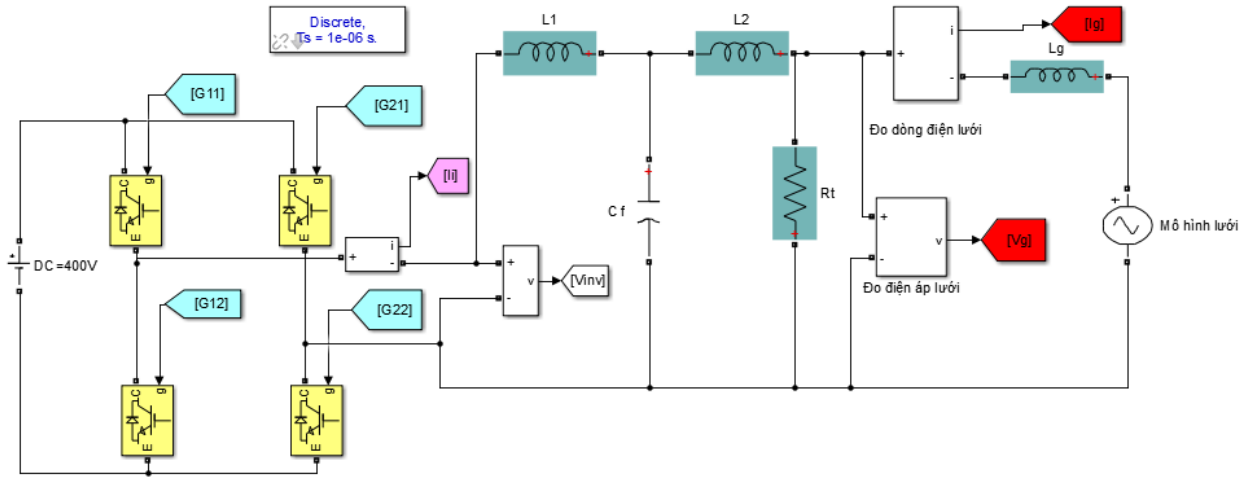
Dựa trên phân tích lý thuyết, trong bài báo này, các hệ số của bộ điều khiển PR được chọn là:

$K_p=2, K_R=2000$

3. Mô phỏng hệ thống

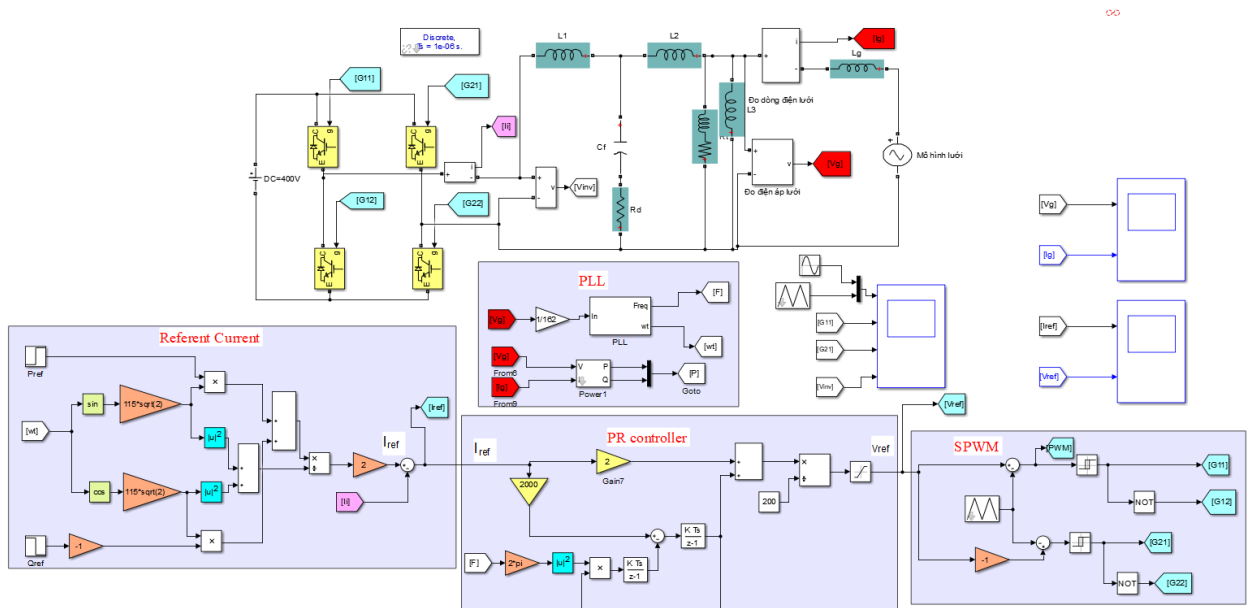
Bộ nghịch lưu nguồn dòng 1 pha 400Hz sử dụng bộ điều khiển PR được mô phỏng bằng phần mềm Matlab. Hình 7 dưới đây mô tả mô hình Simulink cơ bản của bộ nghịch lưu một pha nối lưới được triển khai, kèm theo bộ điều khiển.

Các thông số được xét đến để mô phỏng kết nối với lưới điện được liệt kê trong Bảng 1.



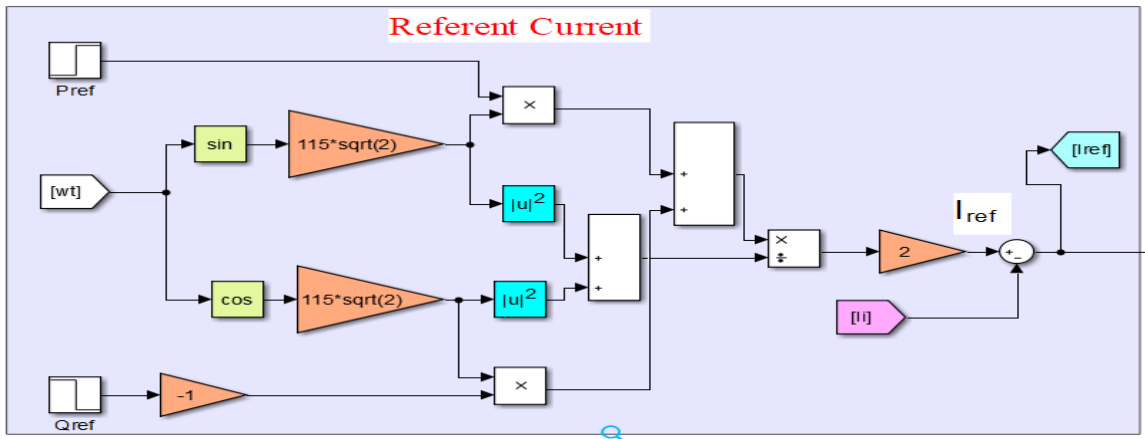
Hình 7. Sơ đồ mô phỏng mạch nghịch lưu nối lưới 1 pha

Sơ đồ mạch mô phỏng có 2 phần: mạch nghịch lưu và mạch điều khiển sử dụng phương pháp điều khiển cộng hưởng tỷ lệ PR hình 8:



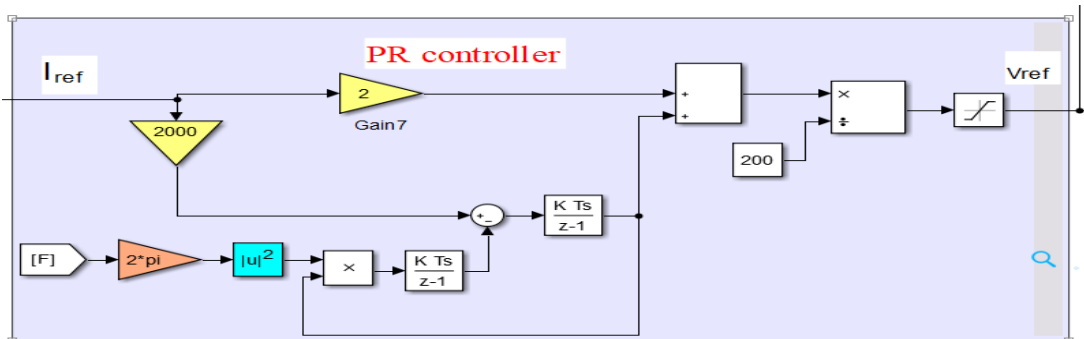
Hình 8. Mạch nghịch lưu nối lưới 1 pha

Dòng điện tham chiếu trong mạch điều khiển được tạo ra từ mạch tạo dòng tham chiếu như hình 9



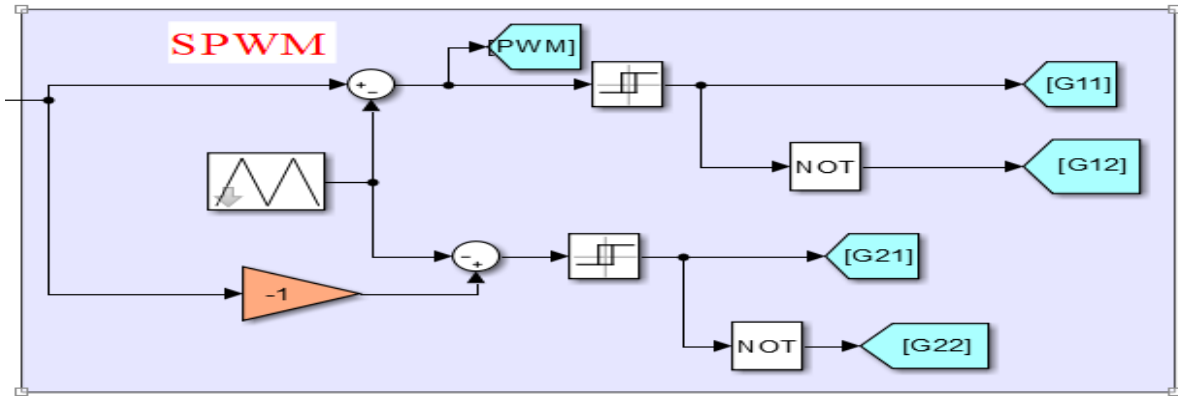
Hình 9. Sơ đồ mạch điều khiển tạo dòng tham chiếu

Dòng điện tham chiếu I_{ref} được đưa tới mạch điều khiển cộng hưởng tỷ lệ PR và tạo ra V_{ref} như hình 10



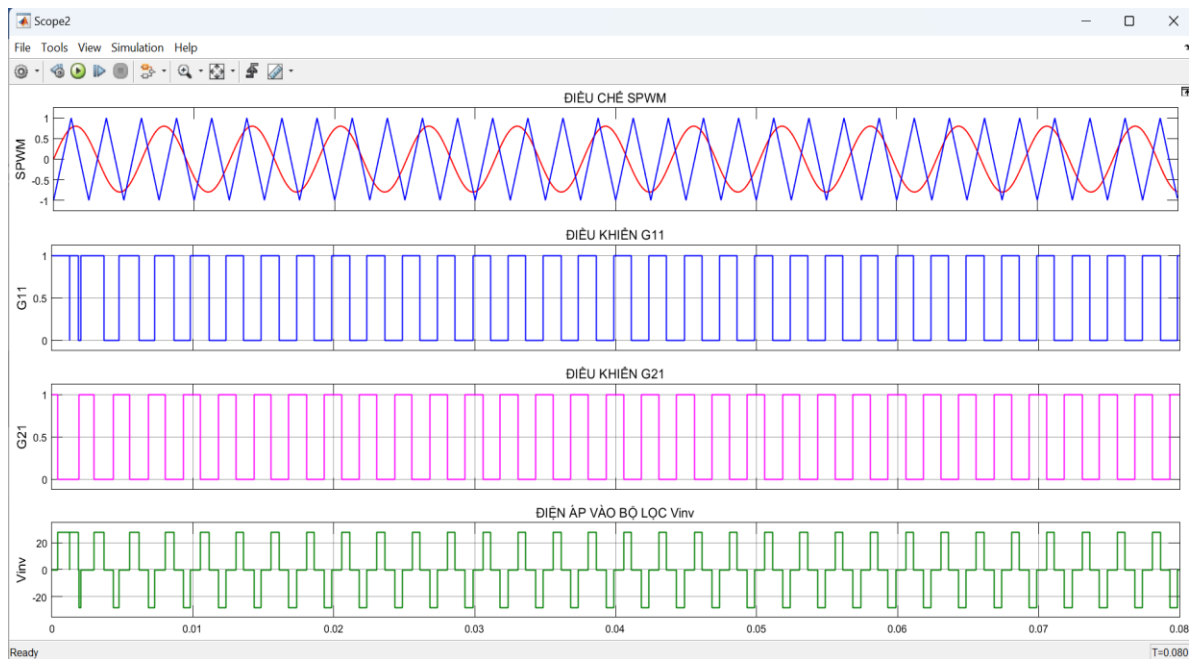
Hình 10. Mạch điều khiển cộng hưởng tỷ lệ PR

Các tín hiệu điều khiển các IGBT được tạo ra từ quá trình điều chế độ rộng xung hình sin SPWM như sơ đồ hình 11



Hình 11. Sơ đồ mạch điều chế SPWM

Các tín hiệu điều khiển SPWM, G11, G21 và điện áp ra bộ chỉnh lưu có dạng sóng như hình 9:

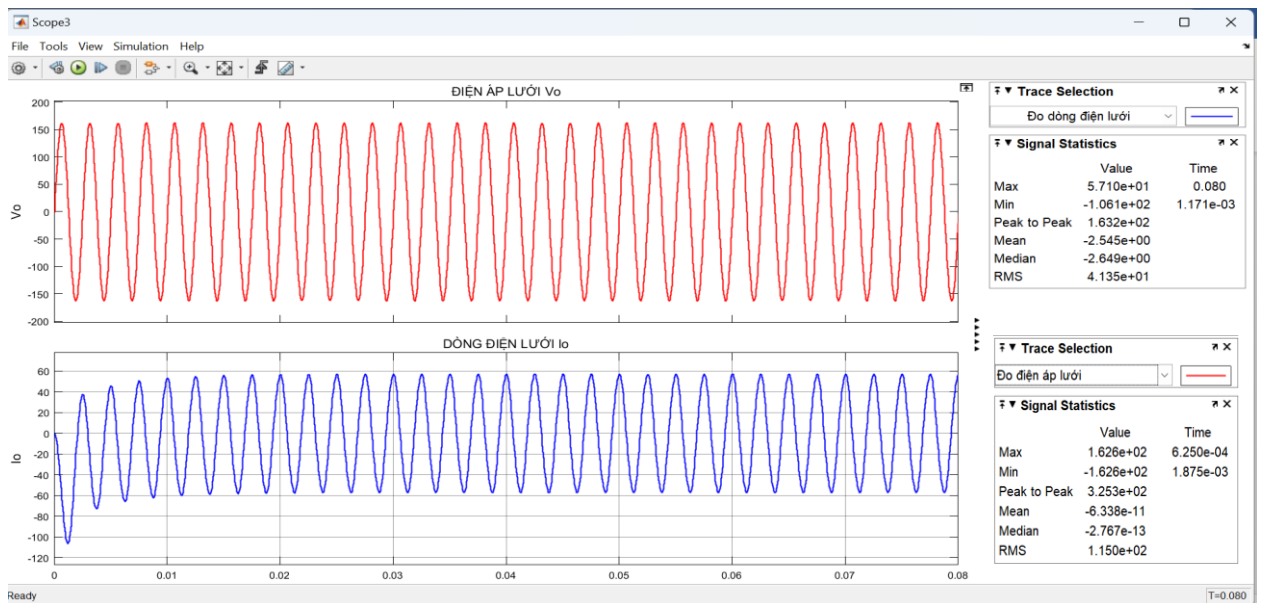


Hình 9. Dạng sóng điều chế SPWM và các tín hiệu điều khiển

4. Kết quả mô phỏng

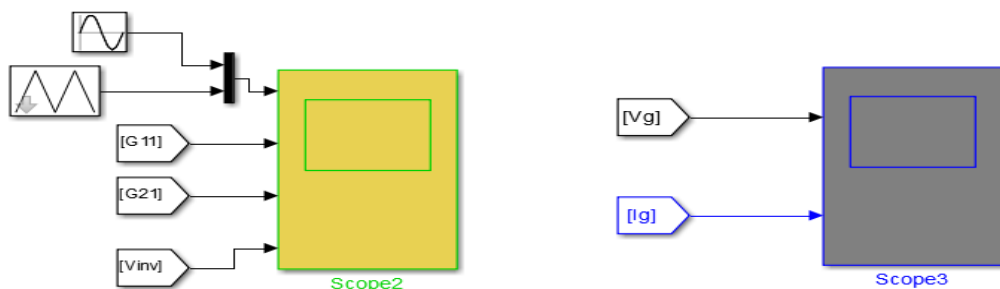
Bộ nghịch lưu nối lưới 1 pha 400 Hz, 115 V RMS đã được mô phỏng bằng phần mềm Matlab.

Khi mạch được xây dựng thực tế sẽ có tổn thất do các linh kiện và đường dây truyền tải của mạch. Thực hiện chọn tải điện trở $R = 100\Omega$, $L_g = 1\mu\text{H}$, thu được các giá trị hiệu dụng của điện áp lưới $V_{\text{rms}} = 115\text{V}$ và dòng điện lưới $I_{\text{rms}} = 4.135\text{A}$ (Hình 10)

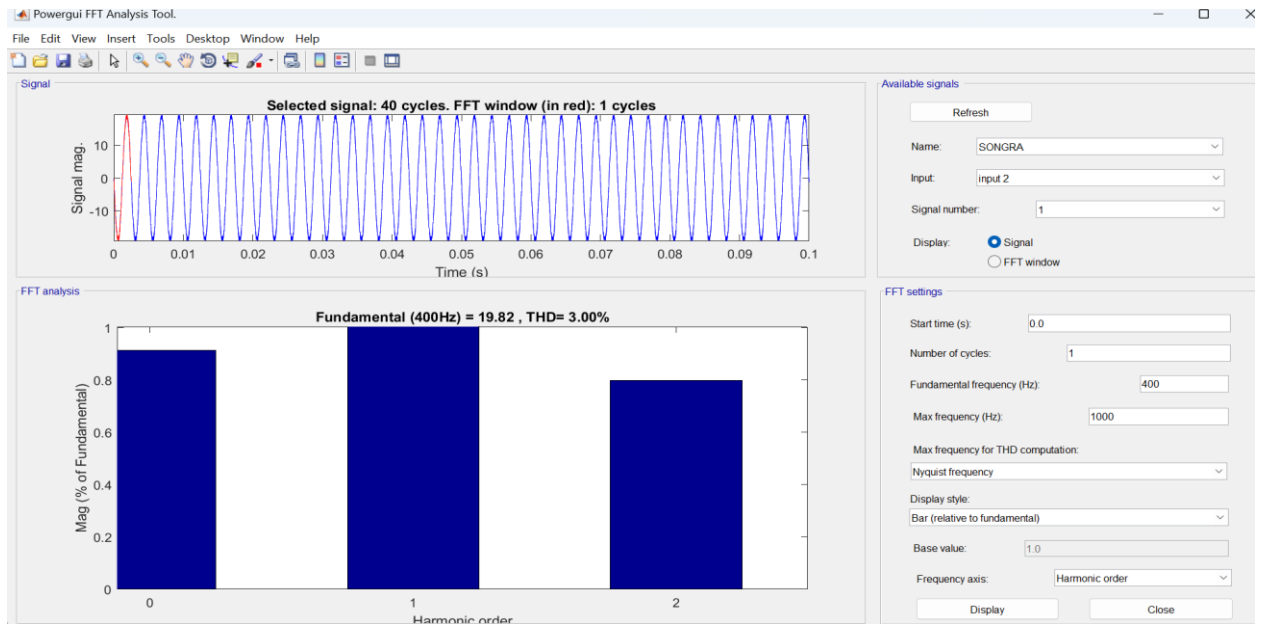


Hình 10. Dạng sóng và giá trị hiệu dụng của điện áp lưới

Để đánh giá chất lượng dòng điện, điện áp nối lưới ta sử dụng máy hiện sóng (Hình 11) và công cụ FFT ở khối Powergui. Để đo độ méo sóng hài ta cài đặt thời gian bắt đầu là 0,2, tần số $f = 400\text{Hz}$, tần số lớn nhất $f_{\text{max}} = 1\text{kHz}$. Hệ số của dòng điện lưới là 3% (Hình 12)



Hình 11. Khối hiển thị sử dụng máy hiện sóng Scope



Hình 12. Đo THD của dòng điện lưới

Các kết quả được phân tích bằng phần mềm MATLAB như trong bảng 2

Bảng 2. Các thông số mô hình của bộ nghịch lưu nối lưới 1 pha

Biến số	Giá trị hiệu dụng
Điện áp đầu ra (V)	115
Dòng điện đầu ra (A)	4.135
Công suất đầu ra (W)	475.5
Tần số (Hz)	400
Tổng méo hài (THD) (%)	3

III. KẾT LUẬN

Việc mô hình hóa bộ điều khiển cộng hưởng tỉ lệ (PR) cho bộ nghịch lưu một pha nối lưới và đánh giá hiệu suất của nó trong điều kiện dao động tải đã được thực hiện bằng phần mềm MATLAB/Simulink. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển PR được thiết kế mang lại đáp ứng quá độ tốt hơn so với bộ điều khiển PI truyền thống khi



hệ thống chịu tác động của nhiễu tải. Hiệu suất hoạt động được cải thiện hơn nữa khi kết hợp thêm bộ bù hài với bộ điều khiển PR.

Từ kết quả mô phỏng của bộ nghịch lưu nối lưới 1 pha sử dụng bộ điều khiển PR cho thấy rằng hệ thống này phù hợp với các ứng dụng trong lĩnh vực hàng không. Công suất đầu ra lớn đạt hiệu suất 95% và tổng méo hài <5% theo tiêu chuẩn.[5]

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] B. N. Alajmi, K. H. Ahmed, G. P. Adam and B. W. Williams, “Single phase single-stage transformer less grid-connected PV system,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, pp. 2664-2676, Jun. 2013.
- [2] L. Mihalache, “DSP control of 400 Hz inverters for aircraft applications,” *Proc. IEEE IAS Conf.*, Pittsburgh, PA, USA, Oct. 2002, pp. 1564-1571.
- [3] Liu, C., Ma, W., Sun, C., & Hu, W. (2009, May). “Research on digital control design of high power middle frequency 400Hz inverter power,” *Proceeding of Power Electronics and Motion Control Conference*, China, May 2009.
- [4] N. Zhang, H. Tang, and C. Yao, “A systematic method for designing a PR controller and active damping of the LCL filter for single-phase grid-connected PV inverters,” *Energies*, vol. 7, no. 6, pp. 3934–3954, Jun.2014.
- [5] Sener, E., Ertasgin, G. and Zuber, “Design of a 400 Hz current-source single-phase converter for avionic systems”, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, IEEE, 2017.
- [6] S. M. Cherati¹, N. A. Azli², S. M. Ayob and A. Mortezaei “Design of a Current Mode PI Controller for a Single-phase PWM Inverter” *IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC)*, 2011.
- [7]. Jean-Philippe BÉRARD “Design and simulation of a single-phase inverter with grid support functions” *MONTREAL, MAY31, 2023*.