

XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CHO HỆ BIẾN TẦN NỔI LƯỚI KẾT HỢP BỘ LỌC LCL THỤ ĐỘNG DESIGN OF SLIDING CONTROLLER FOR GRID INVERTER SYSTEM COMBINED WITH PASSIVE LCL FILTER

Nguyễn Thị Thu Hiền*, Phạm Thị Thanh Đàm, Phùng Thị Thanh Mai, Nguyễn Đức Duy

Trường Đại học Điện Lực

Ngày nhận bài: 10/03/2024, Ngày chấp nhận đăng: 29/08/2024, Phản biện: TS. Ngô Mạnh Tiến

Tóm tắt:

Bài báo trình bày kết quả tổng hợp bộ điều khiển trượt cho vòng dòng điện của hệ biến tần nổi lưới, kết hợp sử dụng bộ lọc thụ động LCL được đưa vào nhánh tụ điện để lọc bỏ các đỉnh cộng hưởng và đơn giản hóa bộ điều khiển theo phương pháp giảm bậc. Phương pháp đề xuất đã giúp giảm ảnh hưởng của tải phi tuyến và hiện tượng sóng hài đến tính ổn định của lưới điện. Kết quả của bài báo được đánh giá thông qua mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink cho thấy bộ điều khiển đã đạt được các yêu cầu chất lượng.

Từ khóa: Biến tần nổi lưới, điều khiển trượt, bộ lọc LCL, phụ tải phi tuyến

Abstract: This article presents the results of synthesizing a sliding controller for the current loop of a grid-connected inverter system, combined with the use of a passive LCL filter inserted into the capacitor branch to filter out resonance peaks and simplify controller using the step-down method. The proposed method has helped reduce the influence of nonlinear loads and harmonic phenomena on the stability of the power grid. The results of the article are evaluated through simulation on Matlab-Simulink software, showing that the controller has achieved the quality requirements.

Keywords: Grid-connected inverter, Sliding mode control, LCL filter, non-linear load.

1. MỞ ĐẦU

Trong lĩnh vực năng lượng tái tạo, năng lượng gió đóng vai trò quan trọng vì đây là một trong những nguồn năng lượng dễ tiếp cận, linh hoạt và hiệu quả nhất và có khả năng giải quyết nhiều vấn đề về năng lượng và môi trường toàn cầu [1]. Bên cạnh đó, một số vấn đề kỹ thuật cũng xuất hiện và cần giải quyết như vấn đề điều khiển biến tần trong quá trình nổi lưới. Dòng điện đầu ra của biến tần nổi lưới thường bị trộn với sóng hài tần số cao sau khi điều chế, điều này có thể ảnh hưởng nghiêm trọng đến chất lượng điện năng. Bộ lọc LCL, với những ưu điểm rõ ràng như chi phí thấp và hiệu

suất lọc tốt hơn, thường được sử dụng để triệt tiêu các sóng hài tần số cao. Tuy nhiên, bộ lọc LCL thuộc hệ thống bậc ba, có thể tạo ra các đỉnh cộng hưởng, dẫn đến mất ổn định của hệ thống [2, 6]. Do đó, cần có phương pháp điều khiển và bộ lọc phù hợp để đảm bảo hệ thống ổn định và hiệu suất cao để chất lượng dòng điện lưới có thể đáp ứng các yêu cầu cụ thể.

Một số phương pháp điều khiển mới được đề xuất thông qua cải tiến phương pháp truyền thống như: Phương pháp điều khiển cộng hưởng tỷ lệ đã được áp dụng cho biến tần nổi lưới trong [3]. Phương pháp điều khiển phản hồi trạng thái phi tuyến tính

đã được đề xuất trong [4]. Tuy nhiên, các phương pháp này vẫn có nhược điểm đó là độ ổn định của hệ thống cũng như độ chính xác của điều khiển chưa bền vững. Bộ điều khiển trượt có sự hội tụ nhanh, bền vững đối với các nhiễu loạn bên ngoài và ổn định tốt; do đó phù hợp để điều khiển các hệ thống cấu trúc biến đổi như biến tần [5].

Trong bài báo, tác giả đề xuất một bộ lọc LCL thụ động kết hợp bộ điều khiển SMC nhằm cải thiện hiệu quả của bộ lọc, ổn định điện áp nối lưới. Bộ lọc LCL được đưa vào nhánh tụ điện để lọc bỏ các đỉnh cộng hưởng và đơn giản hóa bộ điều khiển theo phương pháp giảm bậc. Mô hình toán học xây dựng theo hệ tọa độ $\alpha\beta$ nên có thể bỏ qua vòng khóa pha. Bộ điều khiển trượt được thiết kế cho vòng dòng điện bên trong. Hiệu quả điều khiển được kiểm chứng thông qua mô phỏng bằng phần mềm Matlab-Simulink.

2. MÔ HÌNH TOÁN

Xét một mô hình hệ thống hệ thống biến tần nối lưới LCL ba pha như Hình 1.

Sau máy phát điện gió, nguồn điện trước tiên được chuyển đổi thành điện áp một chiều DC qua bộ chỉnh lưu phía máy. Sau đó, biến tần nối lưới sẽ chuyển đổi điện áp DC thành điện áp xoay chiều AC bằng cách dùng IGBT, điều này sẽ tạo ra sóng hài trong quá trình điều chế. Điện áp AC được đưa

vào lưới điện sau khi qua bộ lọc. Trong Hình 1, L_1, L_2 là độ tự cảm của bộ lọc phía biến tần và phía lưới tương ứng. C là tụ lọc và R_c là điện trở giảm áp của bộ lọc.

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{1k}}{dt} = u_{ik} - u_{ck} - R_c (i_{1k} - i_{2k}) \\ L_2 \frac{di_{2k}}{dt} = u_{ck} - u_{gk} - R_c (i_{1k} - i_{2k}), k = a, b, c \\ C \frac{du_{ck}}{dt} = i_{1k} - i_{2k} \end{cases} \quad (1)$$

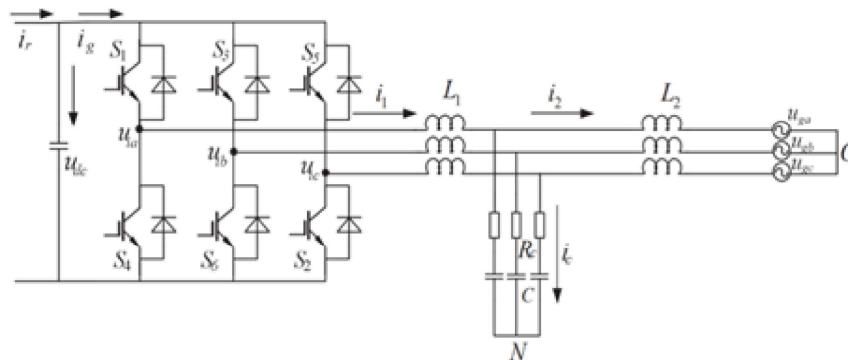
Trong đó i_{1k}, i_{2k} là dòng điện đầu ra của biến tần và dòng điện nối lưới. u_{ik}, u_{ck}, u_{gk} lần lượt là điện áp đầu ra của biến tần, điện áp tụ điện và điện áp lưới.

Theo phép biến đổi Clark có:

$$\mathbf{T} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Hệ phương trình trạng thái của biến tần sau phép biến đổi Clark là:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{1\alpha}}{dt} \\ \frac{di_{1\beta}}{dt} \\ \frac{du_{c\alpha}}{dt} \\ \frac{du_{c\beta}}{dt} \\ \frac{di_{2\alpha}}{dt} \\ \frac{di_{2\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_{1\alpha} - u_{c\alpha} - R_c (i_{1\alpha} - i_{2\alpha})}{L_1} \\ \frac{u_{1\beta} - u_{c\beta} - R_c (i_{1\beta} - i_{2\beta})}{L_1} \\ \frac{i_{1\alpha} - i_{2\alpha}}{C} \\ \frac{i_{1\beta} - i_{2\beta}}{C} \\ \frac{u_{c\alpha} - u_{g\alpha} - R_c (i_{1\alpha} - i_{2\alpha})}{L_2} \\ \frac{u_{c\beta} - u_{g\beta} - R_c (i_{1\beta} - i_{2\beta})}{L_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} u_{1\alpha} \\ \frac{1}{L_1} u_{1\beta} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$



Hình 1. Hệ thống hệ thống biến tần nối lưới LCL ba pha

Theo Hình 2, khi sai số điện áp đi qua vòng PI, sẽ thu được giá trị tham chiếu của dòng điện đầu vào biến tần. Ở phía đầu vào của biến tần có:

$$\dot{x} = f(x) + gu \quad (4)$$

Biến là biến điều khiển đầu vào. Biến trạng thái $x = [i_{1\alpha} \ i_{1\beta} \ u_{c\alpha} \ u_{c\beta} \ i_{2\alpha} \ i_{2\beta}]$; biến đầu ra $y = [i_{2\alpha} \ i_{2\beta}]^T$; hàm $f(x)$ có dạng:

$$f(x) = \left[\frac{u_{i\alpha} - u_{c\alpha} - R_c (i_{1\alpha} - i_{2\alpha})}{L_1} \right. \\ \frac{u_{i\beta} - u_{c\beta} - R_c (i_{1\beta} - i_{2\beta})}{L_1} \\ \frac{i_{1\alpha} - i_{2\alpha}}{C} \\ \frac{i_{1\beta} - i_{2\beta}}{C} \\ \left. \frac{u_{c\alpha} - u_{g\alpha} - R_c (i_{1\alpha} - i_{2\alpha})}{L_2} \right. \\ \left. \frac{u_{c\beta} - u_{g\beta} - R_c (i_{1\beta} - i_{2\beta})}{L_2} \right]$$

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} 1/L_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

Hình 2. Sơ đồ điều khiển

$$C_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = i_r - i_g \quad (5)$$

Trong đó C_{dc} điện dung của bus DC, i_r, i_g là dòng đầu ra bộ chỉnh lưu và đầu vào biến tần. Nhân cả hai vế của (5) với u_{dc} có:

$$C_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} u_{dc} = p_r - p_g \quad (6)$$

Trong đó p_r là công suất đầu ra bộ chỉnh lưu, p_g là công suất đầu vào của biến tần.

Trong hệ tọa độ $\alpha\beta$, công suất tác dụng và công suất phản kháng của hệ có thể được viết như sau:

$$\begin{bmatrix} p_g \\ q_g \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{g\alpha} & u_{g\beta} \\ -u_{g\beta} & u_{g\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{2\alpha} \\ i_{2\beta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Khi đó biểu thức của tham chiếu hiện tại như sau:

$$\begin{bmatrix} i_{2aref} \\ i_{2bref} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{g\alpha} & u_{g\beta} \\ -u_{g\beta} & u_{g\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_{gref} \\ g_{gref} \end{bmatrix} \quad (8)$$

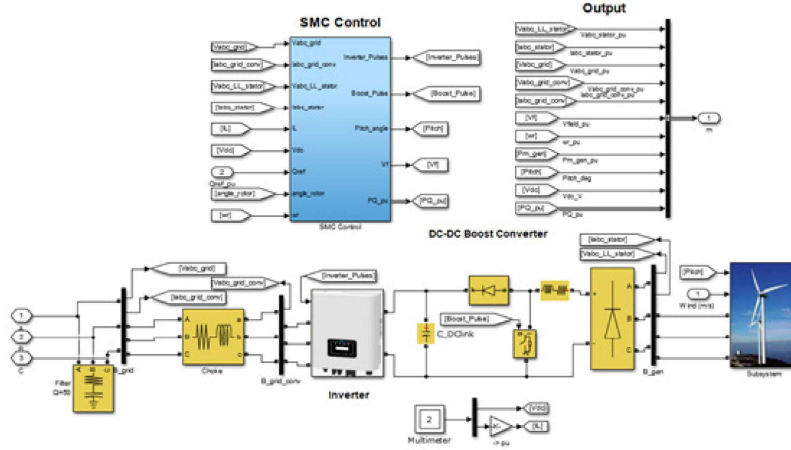
Để đảm bảo nối lưới thì công suất phản được đặt bằng 0 và công suất tác dụng phụ thuộc bộ điều khiển điện áp.

3. XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN

Sơ đồ điều khiển được hiển thị trong Hình 2. Phương pháp điều khiển vòng kín kép được áp dụng. Vòng điện áp bên ngoài được thiết kế bằng cách áp dụng phương pháp điều khiển công suất gần như trực tiếp. Vòng dòng bên trong được thiết kế bằng cách sử dụng bộ điều khiển trượt.

* Xây dựng bộ điều khiển điện áp:

* Xây dựng bộ điều khiển dòng điện



Hình 3. Mô hình mô phỏng hệ thống phát điện gió

Mục tiêu thiết kế của bộ điều khiển dòng điện là để điều chỉnh dòng điện lưới $i_{2\alpha}, i_{2\beta}$ bám theo giá trị đặt. Có sai số điều khiển:

$$e_1 = i_{2\alpha} - i_{2\alpha ref}, e_2 = i_{2\beta} - i_{2\beta ref} \quad (9)$$

Đạo hàm hai vế (9) có:

$$\dot{e}_1 = \dot{i}_{2\alpha} - \dot{i}_{2\alpha ref}, \dot{e}_2 = \dot{i}_{2\beta} - \dot{i}_{2\beta ref} \quad (10)$$

Thay (3) vào (10) có:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \left(\frac{1}{L_2 C} - \frac{R_c^2}{L_1 L_2} - \frac{R_c^2}{L_2^2} \right) i_{1\alpha} - \left(\frac{1}{L_2 C} - \frac{R_c^2}{L_1 L_2} - \frac{R_c^2}{L_2^2} \right) i_{2\alpha} - \left(\frac{R_c}{L_1 L_2} + \frac{R_c}{L_2^2} \right) u_{c\alpha} + \frac{R_c}{L_2^2} u_{g\alpha} - \frac{1}{L_2} \dot{u}_{g\alpha} - \dot{i}_{2\alpha ref} + \frac{R_c}{L_1 L_2} u_{1\alpha} \\ \dot{e}_2 = \left(\frac{1}{L_2 C} - \frac{R_c^2}{L_1 L_2} - \frac{R_c^2}{L_2^2} \right) i_{1\beta} - \left(\frac{1}{L_2 C} - \frac{R_c^2}{L_1 L_2} - \frac{R_c^2}{L_2^2} \right) i_{2\beta} - \left(\frac{R_c}{L_1 L_2} + \frac{R_c}{L_2^2} \right) u_{c\beta} + \frac{R_c}{L_2^2} u_{g\beta} - \frac{1}{L_2} \dot{u}_{g\beta} - \dot{i}_{2\beta ref} + \frac{R_c}{L_1 L_2} u_{1\beta} \end{cases} \quad (11)$$

Chọn mặt trượt có dạng:

$$\begin{cases} s_1 = b_1 e_1 + \dot{e}_1 \\ s_2 = b_2 e_2 + \dot{e}_2 \end{cases} \quad (12)$$

Trong đó, b_1, b_2 là các hằng số dương. Để hệ ổn định chọn luật điều khiển:

$$\begin{cases} u_{i\alpha} = \frac{L_1 L_2}{R_c} (u_{\alpha eq} + u_{an}) \\ u_{i\beta} = \frac{L_1 L_2}{R_c} (u_{\beta eq} + u_{\beta n}) \end{cases} \quad (13)$$

Hệ sẽ hội tụ về 0 do đó $s = 0$ ta có:

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = b_1 \dot{e}_1 + \ddot{e}_1 = 0 \\ \dot{s}_2 = b_2 \dot{e}_2 + \ddot{e}_2 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Từ (11) và (14) có:

$$\begin{aligned} u_{\alpha eq} &= - \left(\frac{1}{L_2 C} - \frac{R_c^2}{L_1 L_2} - \frac{R_c^2}{L_2^2} \right) i_{1\alpha} + \left(\frac{1}{L_2 C} - \frac{R_c^2}{L_1 L_2} - \frac{R_c^2}{L_2^2} \right) i_{2\alpha} \\ &+ \left(\frac{R_c}{L_1 L_2} + \frac{R_c}{L_2^2} \right) u_{c\alpha} - \frac{R_c}{L_2^2} u_{g\alpha} + \frac{1}{L_2} \dot{u}_{g\alpha} + \dot{i}_{2\alpha ref} - b_1 \dot{e}_1 \\ u_{\beta eq} &= - \left(\frac{1}{L_2 C} - \frac{R_c^2}{L_1 L_2} - \frac{R_c^2}{L_2^2} \right) i_{1\beta} + \left(\frac{1}{L_2 C} - \frac{R_c^2}{L_1 L_2} - \frac{R_c^2}{L_2^2} \right) i_{2\beta} \\ &+ \left(\frac{R_c}{L_1 L_2} + \frac{R_c}{L_2^2} \right) u_{c\beta} - \frac{R_c}{L_2^2} u_{g\beta} + \frac{1}{L_2} \dot{u}_{g\beta} + \dot{i}_{2\beta ref} - b_2 \dot{e}_2 \end{aligned} \quad (15)$$

Thành phần $u_{an}, u_{\beta n}$ được xác định:

$$\begin{cases} u_{an} = -\varepsilon_1 \operatorname{sgn}(s_1) - k_1 s_1 \\ u_{\beta n} = -\varepsilon_2 \operatorname{sgn}(s_2) - k_2 s_2 \end{cases} \quad (16)$$

Kết hợp (13), (15), (16) có:

$$\begin{cases} u_{1a} = \left(\frac{L_1 R_c}{L_2} - \frac{L_1}{R_c C} + R_c \right) i_{1a} + \left(\frac{L_1}{R_c C} - R_c - \frac{L_1 R_c}{L_2} \right) i_{2a} + \frac{L_1 L_2}{R_c} \ddot{i}_{2ref} \\ + \left(1 + \frac{L_1}{L_2} \right) u_{1a} - \frac{L_1}{L_2} u_{2a} + \frac{L_1}{R_c} \dot{u}_{2a} - \frac{L_1 L_2}{R_c} [\epsilon_1 \operatorname{sgn}(s_1) + k_1 \dot{s}_1 + b_1 \ddot{s}_1] \\ u_{1\beta} = \left(\frac{L_1 R_c}{L_2} - \frac{L_1}{R_c C} + R_c \right) i_{1\beta} + \left(\frac{L_1}{R_c C} - R_c - \frac{L_1 R_c}{L_2} \right) i_{2\beta} + \frac{L_1 L_2}{R_c} \ddot{i}_{2\beta ref} \\ + \left(1 + \frac{L_1}{L_2} \right) u_{1\beta} - \frac{L_1}{L_2} u_{2\beta} + \frac{L_1}{R_c} \dot{u}_{2\beta} - \frac{L_1 L_2}{R_c} [\epsilon_2 \operatorname{sgn}(s_2) + k_2 \dot{s}_2 + b_2 \ddot{s}_2] \end{cases} \quad (17)$$

Chứng minh hệ ổn định:

Chọn hàm Lyapunov:

$$\dot{V}_1 = \frac{1}{2} S_1^T S_1 \quad (18)$$

Đạo hàm hai vế (18) có:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s_1 \dot{s}_1 = s_1 (b_1 \dot{e}_1 + \ddot{e}_1) \\ &= s_1 [b_1 \dot{e}_1 + f(u_{aeq}) + u_n] \end{aligned} \quad (19)$$

Với:

$$\begin{aligned} f(u_{aeq}) &= \left(\frac{1}{L_2 C} - \frac{R_c^2}{L_1 L_2} - \frac{R_c^2}{L_2} \right) i_{1a} - \left(\frac{1}{L_2 C} - \frac{R_c^2}{L_1 L_2} - \frac{R_c^2}{L_2} \right) i_{2a} - \\ &\left(\frac{R_c}{L_1 L_2} + \frac{R_c}{L_2^2} \right) u_{1a} + \frac{R_c}{L_2^2} u_{2a} - \frac{1}{L_2} \dot{u}_{2a} - \ddot{i}_{2ref} + u_{aeq} \end{aligned}$$

Theo (14) có: $b_1 \dot{e}_1 + f(u_{aeq}) = 0$

Khi đó (19) được viết lại:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s_1 u_{an} = s_1 (-\epsilon_1 \operatorname{sgn}(s_1) + k_1 s_1) \\ &= -\epsilon_1 |s_1| - k_1 s_1^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

Như vậy theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov hệ ổn định tiệm cận. Tiến hành chứng minh tương tự cho mặt trượt s_2 . Hiệu quả điều khiển và chống nhiễu của bộ điều khiển sẽ được khẳng định qua mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink.

4. MÔ PHỎNG

Tiến hành mô phỏng với một máy phát điện gió 1,5 MW được kết nối với hệ thống phân phối 25

kV xuất điện cho lưới 120 kV thông qua một trung chuyển 30 km, 25 kV. Tuabin gió sử dụng máy phát điện cảm ứng được cấp nguồn kép (DFIG) bao gồm máy phát điện cảm ứng rôto dây quấn và bộ biến tần nối lưới được thiết kế trong phần 3. Bộ điều khiển trượt kết hợp bộ lọc LCL giúp ổn định điện áp nối lưới. Thông số mô phỏng:

$L_1, L_2 = 2,5 \text{mH}; C = 30 \mu\text{F}; C_{dc} = 6 \mu\text{F}; R_c = 10 \Omega;$

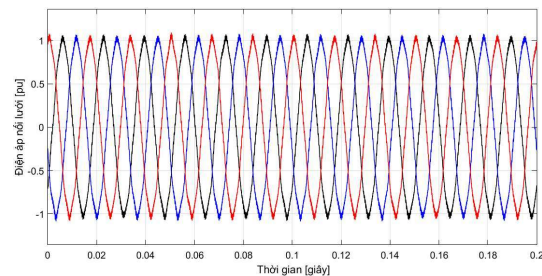
$f_c = 5000 \text{Hz}; u_{dc} = 700 \text{V}; u_{gk} = 380 \text{V};$

$p_r = 20 \text{kW}; b_1, b_2 = 2000; k_1, k_2 = 5000; K_p = 5; T_i = 0.03;$

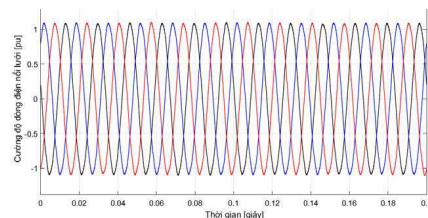
Trường hợp 1: Tiến hành mô phỏng cho trường hợp tốc độ gió ổn định 15m/s.

Trong trường hợp này hệ làm việc ổn định, điện áp và dòng điện nối lưới là sóng hình sin, ổn định ở tần số 50Hz, thể hiện biến tần làm việc tốt.

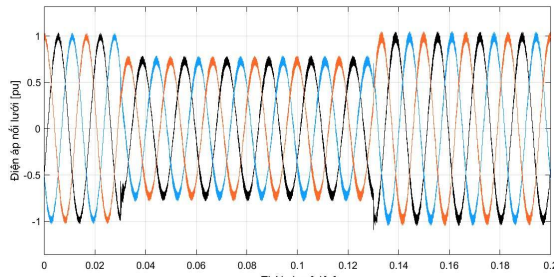
Trường hợp 2: Trong khoảng thời gian từ 0,03 đến 0,13 giây tốc độ gió giảm từ 15m/s xuống 5m/s. Khi đó điện áp phát giảm xuống 0,75pu, tuy nhiên tần số của điện áp và dòng điện vẫn ổn định.



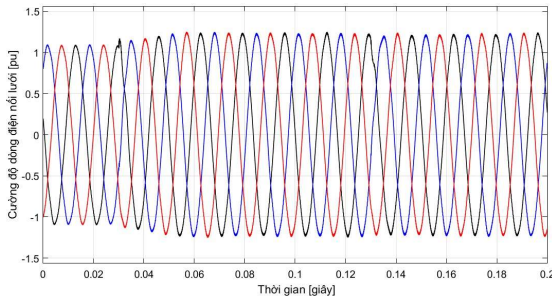
Hình 4. Điện áp nối lưới



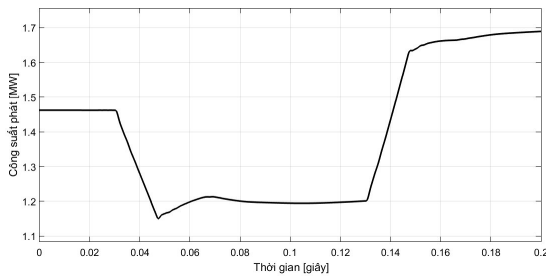
Hình 5. Cường độ dòng điện nối lưới



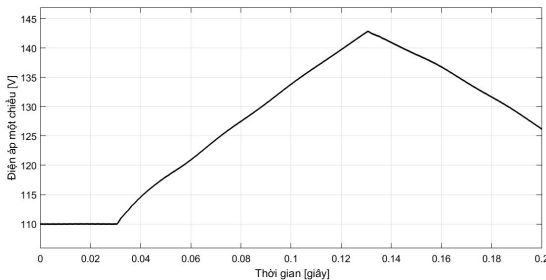
Hình 6. Điện áp khi nối lưới



Hình 7. Cường độ dòng điện nối lưới



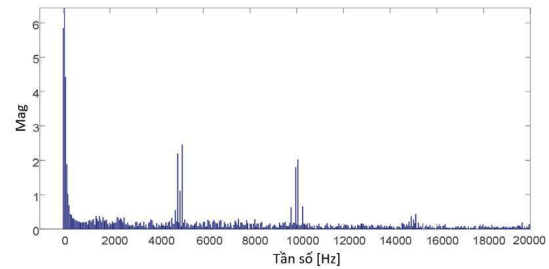
Hình 8. Công suất phát



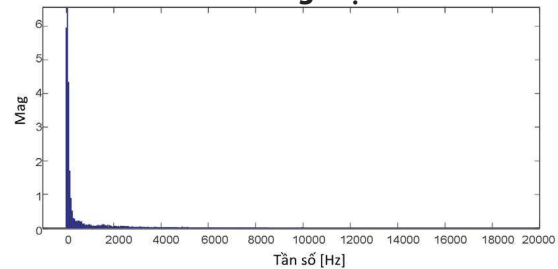
Hình 9. Điện áp một chiều

Có thể thấy dòng điện và điện áp nối lưới nằm trong cùng một pha. Khi tốc độ gió giảm, công suất phát giảm thấp nhất là 1,17MW, khi này điện áp một chiều được điều chỉnh tăng từ 110VDC lên 143VDC, công suất phản kháng tăng để kéo công suất phát ổn định trở lại.

Cho nhiều tác động, hệ thống phản ứng nhanh và trở lại trạng thái ổn định sau thời gian điều chỉnh ngắn. Hình 10 và Hình 11 so sánh tổng độ méo sóng hài trước và sau khi lọc. Dòng điện đầu ra biến tần bị lẫn số lượng lớn sóng hài tần số cao, đặc biệt là xung quanh tần số chuyển đổi và bội số của nó trước khi được lọc. Sau khi sử dụng phương pháp điều khiển kết hợp bộ lọc được đề xuất, các sóng hài được loại bỏ một cách hiệu quả, đạt 94%.



Hình 10. Phổ tần số dòng điện đầu ra biến tần



Hình 11. Phổ tần số dòng điện đầu ra bộ lọc

Nhận xét:

Từ các kết quả mô phỏng thấy rằng bộ điều khiển trượt kết hợp bộ lọc thụ động LCL cho chất lượng điều khiển và lọc tốt. Trong điều kiện turbine gió chịu ảnh hưởng của các yếu tố phi tuyến hệ thống vẫn đảm bảo được độ ổn định điện áp và dòng điện khi nối lưới. Tần số dòng điện nối lưới ổn định, tỉ lệ sóng hài thấp.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả xây dựng bộ điều khiển trượt tuyến tính kết hợp bộ lọc LCL cho biến tần kết nối lưới, nhằm mục đích triệt tiêu sóng hài và đơn giản hóa việc thiết kế bộ điều khiển. Từ việc xây dựng mô hình toán học của hệ thống biến

tần, qua đó xây dựng luật điều khiển, xây dựng mô hình mô phỏng, kiểm nghiệm bằng phần mềm Matlab-Simulink. Qua kiểm tra và so sánh với các kết quả của các công bố trước đây [3-6] cho thấy bộ điều khiển đã nâng cao được chất lượng của hệ biến tần nối lưới, làm giảm đáng kể tần số cao của sóng hài, đảm bảo khả năng ổn định tần số, điện áp, dòng điện khi nối lưới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. G. Shen, D. Xu, L. Cao, and X. Zhu, An improved control strategy for grid-connected voltage source inverters with a LCL filter, IEEE Trans.Power Electron., vol. 43, no. 5, pp. 1899–1906, Jul. 2008.
- [2]. Baoquan Liu, Hua Guo et al, Analysis and Design of a Passively Damping LCL Filter in Three-Phase Converters, Transactions of China Electrotechnical Society, vol. 32, no.2, pp. 195-205, 2017.
- [3]. Jianxing Liu, Wensheng Luo, liding mode control of grid-connected power converters for microgrid applications, Distributed Control Methods and Cyber Security Issues in Microgrids, , vol. 153, no. 5, pp. 3-27, Sep. 2020
- [4]. M. A. Chowdhury, N. Hosseinzadeh and W. Shen, Effects of wind speed variations and machine inertia constants on variable speed wind turbine dynamics, Journal of Electrical Engineering, 2011.
- [5]. Jiabing Hu, Z.Q. Zhu. Heng Nian, et al. Sliding mode current control of grid-connected voltage source converter, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, 2010, pp.912-919.
- [6]. Qiubo Peng, Hongbin Pan, Yong Liu, Design of dual-loop decoupling controller in LCL three-phase grid-connected inverter, Transactions of China Electrotechnical Society, vol. 29, no.4, pp. 103-110, 2014.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Nguyễn Thị Thu Hiền nhận bằng tốt nghiệp đại học chuyên ngành kỹ sư điện – Kỹ thuật Điện tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2001, nhận bằng Tiến sĩ tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2020. Tác giả hiện là giảng viên Khoa Kỹ thuật điện- Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: Nghiên cứu cấu tạo và vận hành Máy điện. Nghiên cứu ứng dụng các giải pháp điều khiển hiện đại trong hệ thống điện.



Tác giả Phạm Thị Thanh Đàm, tốt nghiệp đại học chuyên ngành Hệ thống điện tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2007, nhận bằng Thạc sĩ tại Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2020. Tác giả hiện là giảng viên Khoa Kỹ thuật điện – Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: Kỹ thuật điện cao áp, các giải pháp vật liệu điện mới ứng dụng trong ngành điện...



Tác giả Phùng Thị Thanh Mai, tốt nghiệp đại học chuyên ngành Hệ thống điện tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2002, nhận bằng Thạc sĩ tại Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2006. Tác giả hiện là giảng viên Khoa Kỹ thuật điện – Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: Ứng dụng các giải pháp điều khiển hiện đại trong vận hành máy điện, nhà máy điện, phân tích chế độ và tính toán ổn định hệ thống điện.



Tác giả Nguyễn Đức Duy nhận bằng tốt nghiệp đại học chuyên ngành Tự động hóa hệ thống điện tại Trường Đại học Điện lực năm 2024. Tác giả hiện là sinh viên Khoa Kỹ thuật điện - Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: Ứng dụng các giải pháp điều khiển hiện đại trong hệ thống điện.