

# MÔ HÌNH ĐIỀU KHIỂN NỐI LƯỚI CHO MICROTURBINE SỬ DỤNG MÁY PHÁT ĐIỆN ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU

## Grid connection control model for microturbine with permanent magnet synchronous generator

Lê Kim Anh<sup>1</sup>

### Tóm tắt

Nghiên cứu sử dụng và khai thác hiệu quả các nguồn năng lượng có công suất nhỏ và phát điện phân tán (Distributed generation – DG) có ý nghĩa thiết thực đến việc giảm biến đổi khí hậu và giảm sự phụ thuộc vào các nguồn nhiên liệu hóa thạch có nguy cơ cạn kiệt, gây ô nhiễm môi trường. Mô hình điều khiển nối lưới cho microturbine sử dụng máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSG) với những ưu điểm như: Microturbine sử dụng turbine khí kết hợp máy phát điện PMSG luôn làm việc đạt tốc độ định mức, khả năng truyền năng lượng theo cả hai hướng nhờ sử dụng các bộ biến đổi chỉnh lưu (AC/DC) và nghịch lưu (DC/AC). Kết hợp với mạch lọc nhằm loại trừ các sóng hài bậc cao, điều này có ý nghĩa lớn đến việc cải thiện chất lượng điện năng. Bài báo đã xây dựng được mô hình và đưa ra kết quả mô phỏng điều khiển nối lưới cho microturbine sử dụng máy phát điện PMSG, nhằm duy trì công suất phát tối đa của hệ thống.

Từ khóa: bộ chỉnh lưu; nghịch lưu; PMSG; microturbine nối lưới; nguồn phân tán.

### Abstract

The research on effectively using and exploiting small and scattered energy sources is meaningful to reduce the climate change and the energy dependence on fossil energy sources which are at risk of both exhausting and causing environmental pollution. Grid connection control model for micro-turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) has some advantages such as combination of microturbine using fuel gas and PMSG always operating at maximum velocity. The system also has capability of power transferring in both directions thanks to using rectifier (AC/DC) and inverter (DC/AC). The combination of harmonic filter circuits to filter out high order harmonics on the grid will also have a significant effect on power quality improvement. The article builds the grid connection control model for microturbine with PMSG and shows simulation results in order to maintain the maximum capacity of the systems.

Key words: rectifier; inverter; PMSG; grid connected microturbine; distributed generation.

## 1. Đặt vấn đề

Ngày nay, cùng với sự phát triển mạnh mẽ của thế giới, nhu cầu sử dụng năng lượng của con người ngày càng tăng. Nguồn năng lượng tái tạo (Renewable Energy sources – RES) nói chung, các nguồn điện phân tán (Distributed generation – DG) nói riêng như: nguồn năng lượng gió, nguồn microturbine sử dụng các turbine khí, pin mặt trời, pin nhiên liệu...v.v. là dạng nguồn năng lượng sạch, không gây ô nhiễm môi trường, đồng thời tiềm năng về trữ lượng của các nguồn điện phân tán ở nước ta rất lớn. Theo (Lê Kim Anh 2012), để khai thác và sử dụng các DG này sao cho hiệu quả, giảm phát thải các chất gây ô nhiễm môi trường, như nitrogen oxit (NO<sub>x</sub>), sunfua oxit (SO<sub>x</sub>), và đặc biệt là carbon dioxit (CO<sub>2</sub>) đang là mục tiêu nghiên cứu của nhiều quốc gia. Hệ thống điều khiển nối lưới cho microturbine sử dụng máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu (Permanent Magnetic

Synchronous Generator – PMSG), ở đây các bộ biến đổi điện tử công suất giữ vai trò rất quan trọng trong hệ thống điều khiển như: bộ chỉnh lưu (AC/DC) phía máy phát điện PMSG dùng điều chỉnh hòa đồng bộ cho máy phát điện cũng như tách máy phát điện ra khỏi lưới khi cần thiết. Bộ nghịch lưu (DC/AC) phía lưới nhằm giữ ổn định điện áp mạch một chiều trung gian, đồng thời đưa ra điện áp (AC) nối lưới. Mô hình điều khiển nối lưới cho microturbine sử dụng máy phát điện PMSG, nhằm hướng đến phát triển lưới điện thông minh và điều khiển linh hoạt các nguồn năng lượng tái tạo.

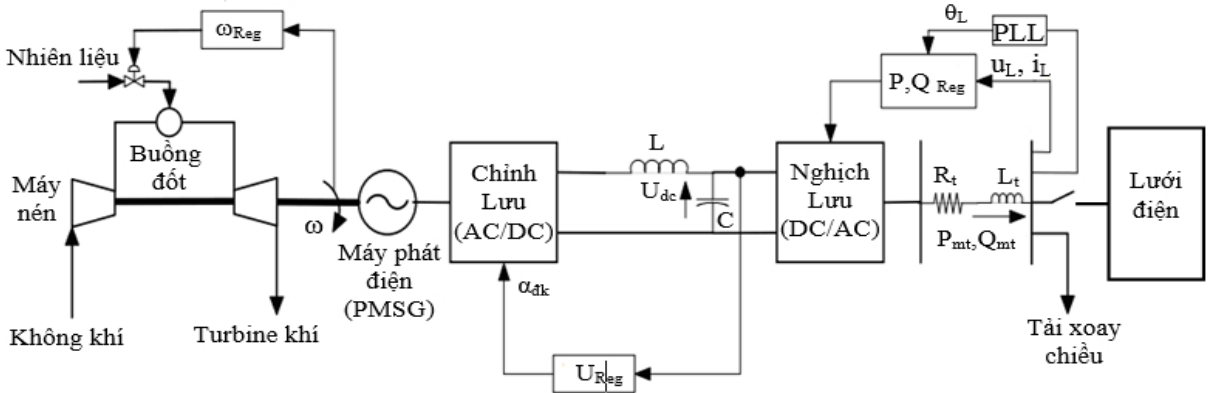
## 2. Mô hình điều khiển nối lưới cho microturbine

Hệ thống điều khiển nối lưới cho microturbine theo (A. Bertani, C. Bossi, F. Fornari 2004), bao gồm các thành phần cơ bản như hình 1. Mô hình microturbine sử dụng turbine khí kết hợp với máy phát điện PMSG, tạo ra điện áp xoay chiều (AC). Điện áp AC này qua bộ chỉnh lưu (AC/DC) phía máy phát điện PMSG dùng để hòa đồng bộ với

<sup>1</sup> Trường Cao đẳng Công nghiệp Tuy Hòa

lưới và cũng như tách máy phát điện ra khỏi lưới khi cần thiết, nghịch lưu phía lưới (DC/AC) nhằm giữ ổn định điện áp mạch một chiều trung gian ( $U_{dc}$ ).  $R_f, L_f$ : điện trở và điện cảm của đường dây;

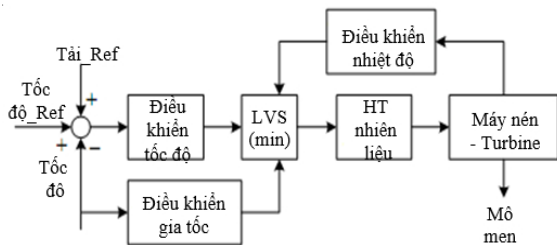
$\theta_L$ : góc điện áp lưới;  $P_{mt}, Q_{mt}$ : Công suất tác dụng và công suất phản kháng của microturbine;  $\alpha_{dk}$ : góc điều khiển,  $\omega$ : tốc độ quay máy phát điện..v.v.



Hình 1. Sơ đồ điều khiển nối lưới cho microturbine sử dụng máy phát điện PMSG

2.1. Mô hình microturbine (MT)

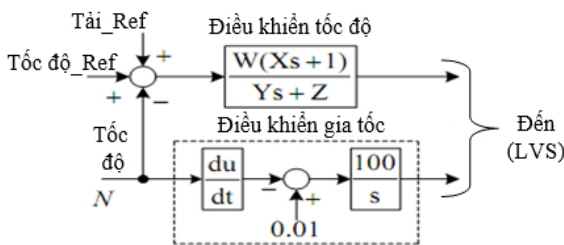
Mô hình MT sử dụng turbine khí theo (Zhou Yunhai, Jürgen Stenzel 2009) bao gồm các khối điều khiển như hình 2. Các ngõ ra của điều khiển tốc độ, điều khiển gia tốc, điều khiển nhiệt độ là ngõ vào của khối chọn giá trị thấp (Low Value Select – LVS), ngõ ra của khối LVS là ngõ vào của hệ thống nhiên liệu.



Hình 2. Mô hình điều khiển microturbine

2.1.1. Điều khiển tốc độ và gia tốc

Khối điều khiển tốc độ và gia tốc theo (Noroozian R, Abedi M, Gharehpetian G. B, et al 2009) có hàm truyền điều khiển như hình 3. Ở đây điều khiển tốc độ là một hàm có cấu trúc biến đổi (Lead/Lag) với Z: là hằng số; X(Y): là các biến đổi (Lead/Lag) theo hằng số của thời gian; W: là giá trị điều khiển mong muốn. Điều khiển gia tốc

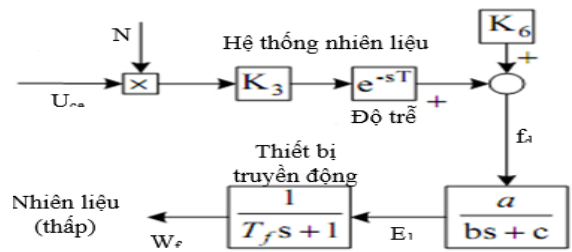


Hình 3. Sơ đồ điều khiển tốc độ và gia tốc

được sử dụng trong quá trình khởi động turbine, nhằm hạn chế tốc độ gia tốc của rotor. Nếu như tốc độ hoạt động của hệ thống gần với tốc độ đánh giá của nó, thì hệ thống điều khiển gia tốc có thể được loại bỏ.

2.1.2. Hệ thống nhiên liệu

Hệ thống nhiên liệu theo (S.Selvakumar, S.Manoharan, Dr.K.Ganambal 2012) có sơ đồ cấu trúc và các hàm truyền điều khiển như hình 4.



Hình 4. Sơ đồ điều khiển hệ thống nhiên liệu

Từ sơ đồ hình 4, ta có:

Ngõ ra của định vị van là:

$$E_1 = \frac{a}{bs + c} f_a \tag{1}$$

Tín hiệu của nhiên liệu trong mỗi đơn vị là:

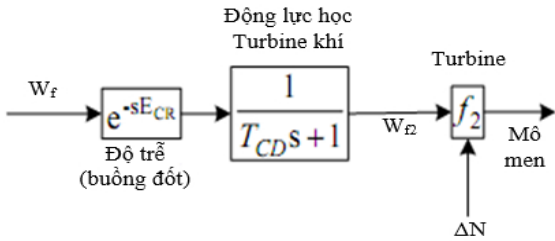
$$W_f = \frac{1}{T_f s + 1} E_1 \tag{2}$$

Trong đó: a: định vị van đạt được; b và  $T_f$ : định vị van và hằng số thời gian của hệ thống nhiên liệu; c : là hằng số;  $f_a$  : là ngõ vào của định vị van.

Trong đó: a: định vị van đạt được; b và  $T_f$ : định vị van và hằng số thời gian của hệ thống nhiên liệu; c : là hằng số;  $f_d$  : là ngõ vào của định vị van.

2.1.3. Máy nén – Turbine

Tín hiệu ngõ vào turbine khí là  $W_f$ , tín hiệu này được nhận từ hệ thống nhiên liệu và độ lệch tốc độ  $\Delta N$ . Tín hiệu ngõ ra là mômen của turbine khí. Theo (Ashwani Kumar, S. P. Jain, K. S. Sandhu, et al 2008) máy nén – turbine có các hàm truyền điều khiển như hình 5.



Hình 5. Sơ đồ điều khiển máy nén – turbine

Phương trình động học của turbine khí tính như sau :

$$W_{f2} = \frac{1}{T_{CD}s + 1} W_f \quad (3)$$

Với  $T_{CD}$  : là hằng số thời gian động học của turbine khí. Đặc tính mômen của microturbine là ngõ vào của nhiên liệu thấp ( $W_f$ ) và tốc độ của turbine được xác định như sau :

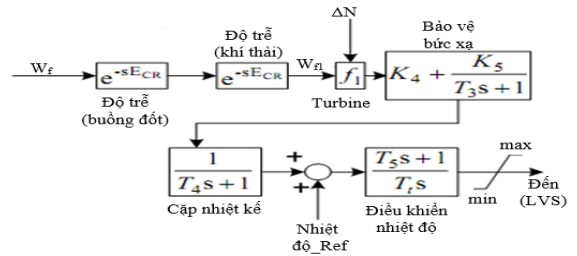
$$f_2 = a_{f2} + b_{f2}.W_{f2} + c_{f2}.\Delta N \quad (4)$$

2.1.4. Điều khiển nhiệt độ

Tín hiệu ngõ vào điều khiển nhiệt độ là nhiên liệu thấp ( $W_f$ ) và tốc độ turbine, tín hiệu ngõ ra đưa đến khối (LVS). Theo (Sreedhar R. Guda, C.

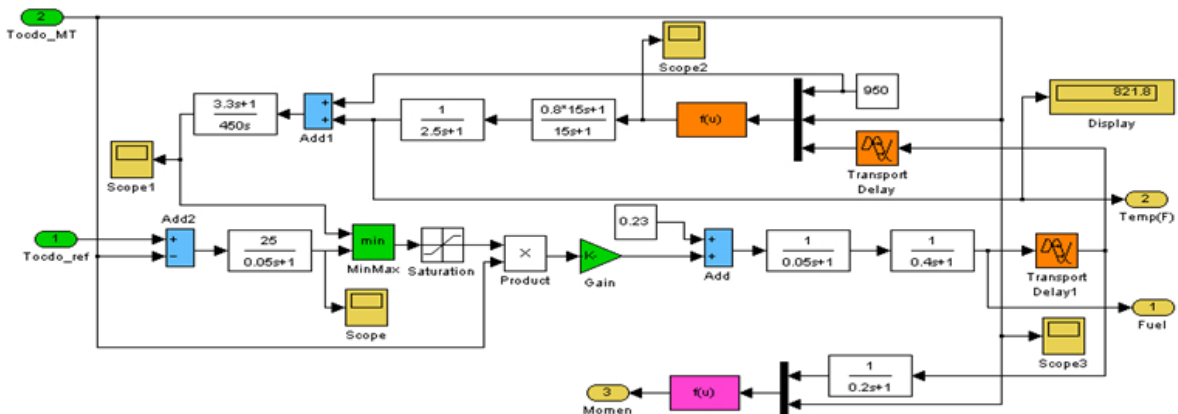
Wang 2005) điều khiển nhiệt độ có các hàm truyền điều khiển như hình 6. Nhiên liệu được đốt cháy trong buồng đốt tạo ra mômen turbine và nhiệt độ của khí thải. Phương trình nhiệt độ khí thải của microturbine là ngõ vào nhiên liệu thấp ( $W_f$ ) và tốc độ của turbine được xác định như sau:

$$f_1 = T_R - a_{f1}(1 - W_{f1}) + b_{f2}.\Delta N \quad (5)$$



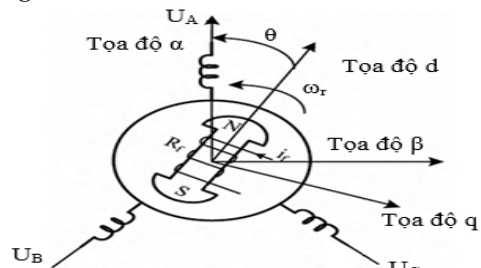
Hình 6. Sơ đồ điều khiển nhiệt độ

Ngõ ra của cấp nhiệt kế được so sánh với các giá trị đặt, ở đây  $K_4, K_5$ : là các hằng số của hàm bảo vệ bức xạ;  $T_3, T_4$ : là hằng số thời gian của hàm bảo vệ bức xạ và cấp nhiệt kế;  $T_2, T_1$ : là hằng số thời gian của hàm điều khiển nhiệt độ. Khi tín hiệu ngõ ra của điều khiển nhiệt độ thấp hơn ngõ ra của tốc độ điều khiển thì khối (LVS) sẽ hạn chế ngõ ra của turbine, lúc này turbine hoạt động trong chế độ điều khiển của nhiệt độ. Từ các công thức (1), (2), (3), (4) và (5) mô hình microturbine được xây dựng trên matlab/simulink với ngõ vào là tốc độ và ngõ ra là mômen, như hình 7.



Hình 7. Mô hình microturbine xây dựng trên matlab/simulink

Mô hình máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSG) có hai loại hệ trục tọa độ được sử dụng: hệ trục tọa độ  $\alpha\beta$  gắn cố định với stator và hệ trục tọa độ  $dq$  còn gọi là hệ trục tọa độ tựa theo hướng từ thông rotor, như hình 8.



Hình 8. Hệ trục tọa độ  $\alpha\beta$  và  $dq$

Theo (Ashwani Kumar, K. S. Sandhu, S. P. Jain, et al 2009) phương trình điện áp của PMSG biểu diễn trên hệ trục tọa độ dq như sau:

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q p \omega_r i_q \quad (6)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - L_d p \omega_r i_d + \lambda p \omega_r \quad (7)$$

Phương trình mômen được tính như sau:

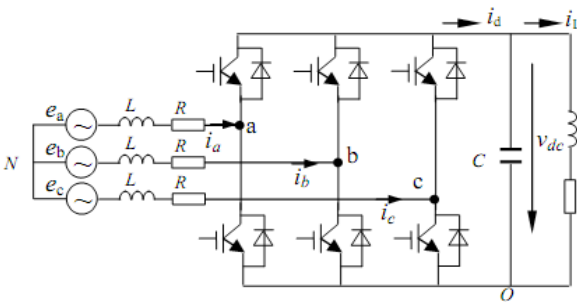
$$T_e = \frac{3}{2} p [\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (8)$$

Trong đó:  $L_d, L_q$ : là điện cảm ở hệ tọa độ dq;  $R_s$ : điện trở stator;  $i_d, i_q$ : dòng điện ở tọa độ dq;  $u_d, u_q$ : điện áp ở tọa độ dq;  $p$ : số đôi cực từ;  $T_e$ : mômen điện từ;  $\lambda$ : từ thông liên kết.

### 3. Các bộ biến đổi

#### 3.1. Bộ chỉnh lưu và mạch một chiều trung gian

Sơ đồ bộ chỉnh lưu (AC/DC) điều chế theo phương pháp độ rộng xung PWM, như hình 9. Theo (Haoran Bai, Fengxiang Wang, Junqiang Xing 2007) để đạt được mục tiêu là điều khiển các thành phần công suất phát vào lưới từ microturbine sử dụng turbine khí, thì hiện nay có nhiều phương pháp để điều khiển cho bộ chỉnh lưu điều chế theo phương pháp độ rộng xung PWM. Dựa vào sơ đồ hình 9, ta xây dựng biểu thức điện áp của bộ chỉnh lưu PWM như sau:



Hình 9. Sơ đồ dòng điện và điện áp của bộ chỉnh lưu

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + R i_a = e_a - (S_a u_{dc} + u_{N0}) \\ L \frac{di_b}{dt} + R i_b = e_b - (S_b u_{dc} + u_{N0}) \\ L \frac{di_c}{dt} + R i_c = e_c - (S_c u_{dc} + u_{N0}) \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_d - i_L \end{cases} \quad (9)$$

Biểu thức (9) từ hệ tọa độ tĩnh (a-b-c) chuyển sang hệ tọa độ quay d-q (trong đó d theo trục hoành, q theo trục tung) được viết lại như sau:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = e_d - R i_d - S_d u_{dc} + \omega L i_q \\ L \frac{di_q}{dt} = e_q - R i_q - S_q u_{dc} - \omega L i_d \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3 S_d}{2} i_d + \frac{3 S_q}{2} i_q - i_L \end{cases} \quad (10)$$

Mạch một chiều trung gian (DC) theo (Sanjeev K nayak, D N Gaonkar 2012) phương trình điện áp  $U_{dc}$  được tính bằng biểu thức:

$$U_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{AC} \cos \alpha_{dk} - \frac{3X_c}{\pi} I_{dc} \quad (11)$$

Trong đó:  $U_{AC}$ : điện áp dây của bộ chỉnh lưu;  $X_c$ : điện kháng của bộ chỉnh lưu;  $I_{dc}$ : dòng điện một chiều;  $\alpha_{dk}$ : góc điều khiển.

#### 3.2. Bộ nghịch lưu và đồng bộ nối lưới

Theo (M. Z. C. Wanik, I. Erlich 2009) để đồng bộ nối lưới thông qua bộ nghịch lưu (DC/AC) sơ đồ cấu trúc như hình 1, mục 2. Đồng bộ nối lưới sử dụng bộ nghịch lưu để điều khiển công suất tác dụng ( $P_{mt}$ ) và công suất phản kháng ( $Q_{mt}$ ) của microturbine vào lưới. Ở đây bộ nghịch lưu điều khiển theo V/F, phương trình đồng bộ nối lưới được tính như sau:

$$u_{Lk}(t) = u_{ik}(t) - \left[ R_t i_{Lk} + L_t \frac{di_{Lk}(t)}{dt} \right] \quad (12)$$

với  $k = a, b, c$  là các thứ tự pha.

Phương trình (12) chuyển sang hệ tọa độ dq được viết lại như sau:

$$\begin{cases} u_{Ld}(t) = u_{id}(t) - \left[ R_t i_{Ld}(t) + L_t \frac{di_{Ld}(t)}{dt} - \omega_n L_t i_{Lq}(t) \right] \\ u_{Lq}(t) = u_{iq}(t) - \left[ R_t i_{Lq}(t) + L_t \frac{di_{Lq}(t)}{dt} + \omega_n L_t i_{Ld}(t) \right] \end{cases} \quad (13)$$

Trong đó:  $\omega_n$ : tần số góc danh định của hệ thống. Trong hệ tọa độ quy chiếu đồng bộ với điện áp lưới thì:  $u_{Lq} = 0$  và  $P_{mt} = u_{Ld} i_{Ld}$ ;  $Q_{mt} = -u_{Ld} i_{Lq}$ . Như vậy từ giá trị điện áp lưới đo được ta có thể tính toán giá trị đặt của dòng điện như sau:

$$\begin{cases} i_{Ld,ref} = \frac{P_{mt,ref}}{u_{Ld}} \\ i_{Lq,ref} = \frac{-Q_{mt,ref}}{u_{Ld}} \end{cases} \quad (14)$$

Từ đó, ta tính được các đại lượng:

$$\begin{cases} u'_{id}(s) = u_{id} - u_{Ld} + \omega_n L_t i_{Lq} \\ u'_{iq}(s) = u_{iq} - \omega_n L_t i_{Ld} \end{cases} \quad (15)$$

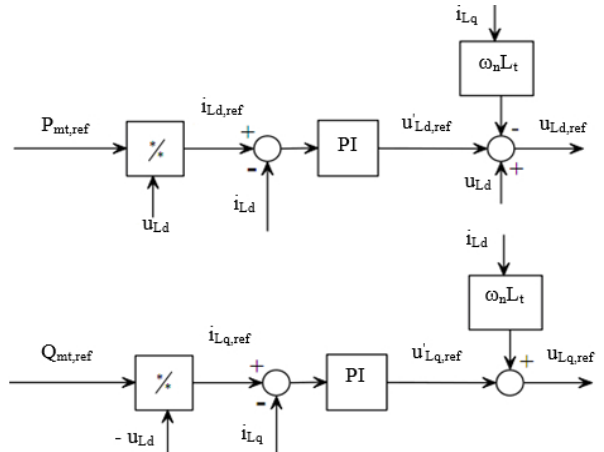
Hệ thống điều khiển cơ bản được mô tả theo biểu thức sau:

$$\begin{cases} u'_{id} = R_t i_{Ld} + L_t \frac{di_{Ld}}{dt} \\ u'_{iq} = R_t i_{Lq} + L_t \frac{di_{Lq}}{dt} \end{cases} \quad (16)$$

\*. Tổng hợp cấu trúc điều khiển P,Q:

Để điều khiển đồng bộ nối lưới cho công suất ( $P_{mt,ref}, Q_{mt,ref}$ ) thông qua bộ nghịch lưu, ở đây sử dụng 2 bộ điều khiển PI và tổng hợp theo mạch vòng dòng điện, với các ngõ ra của hệ thống điều khiển là tín hiệu điều khiển cho PWM, phương trình tổng hợp  $u_{Ld,ref}, u_{Lq,ref}$  được tính như sau:

$$\begin{cases} u_{Ld,ref} = u'_{Ld,ref} + u_{Ld} - \omega_n L_t i_{Lq} \\ u_{Lq,ref} = u'_{Lq,ref} + \omega_n L_t i_{Ld} \end{cases} \quad (17)$$

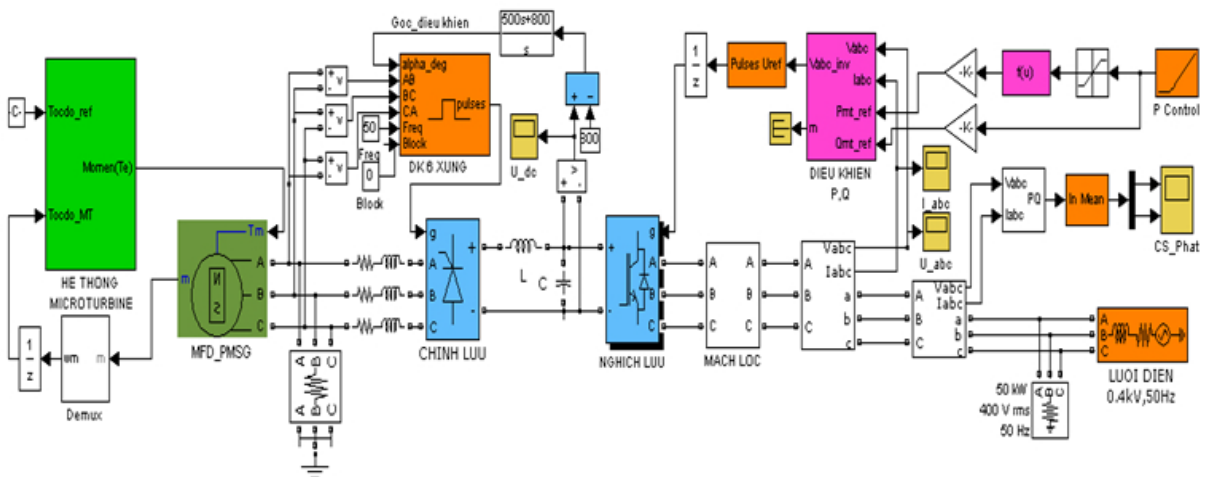


Hình 10. Tổng hợp điều khiển P,Q của bộ nghịch lưu

#### 4. Xây dựng mô hình và mô phỏng trên matlab/simulink

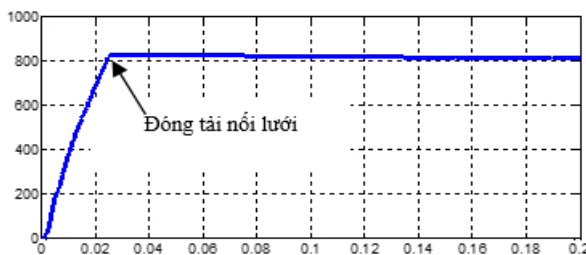
##### 4.1. Xây dựng mô hình

Từ cơ sở các biểu thức đã phân tích ở trên, kết hợp với sơ đồ cấu trúc điều khiển nối lưới hình 1, mục 2. Ta xây dựng mô hình điều khiển nối lưới cho microturbine sử dụng turbine khí và máy phát điện PMSG, như hình 11.

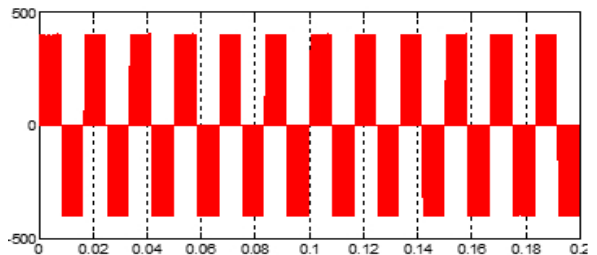


Hình 11. Sơ đồ hệ thống điều khiển nối lưới cho microturbine sử dụng máy phát điện PMSG

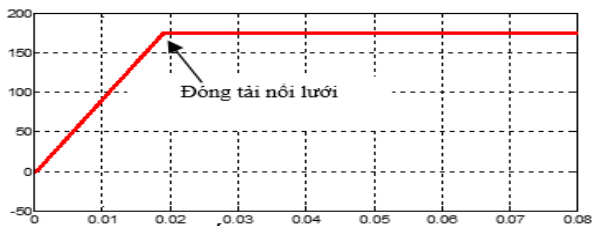
##### 4.2. Kết quả mô phỏng



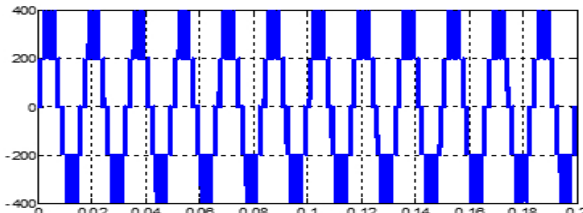
Hình 12. Điện áp điều khiển  $U_{dc}$  (V)



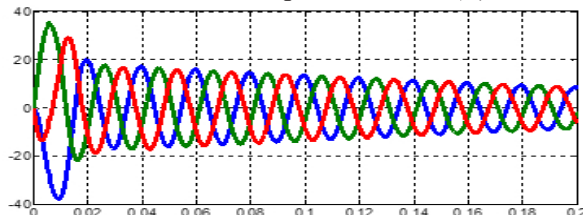
Hình 16. Điện áp bộ nghịch lưu (V)



Hình 13. Tốc độ máy phát điện (rad/s)



Hình 14. Điện áp bộ chỉnh lưu (V)

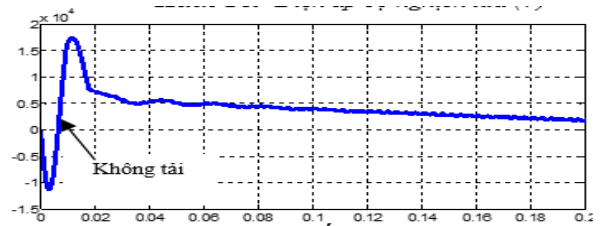


Hình 15. Dòng điện nối lưới Iabc (A)

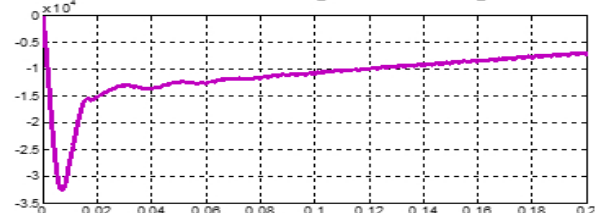
Nhận xét: Qua kết quả mô phỏng ta thấy, ở thời điểm  $t < 0.02s$ , mô hình hệ thống điều khiển nối lưới cho microturbine làm việc ở trạng thái không tải. Tại thời điểm  $t \geq 0.02s$ , các giá trị dòng điện, điện áp và công suất luôn đạt giá trị đặt và hệ thống điều khiển bắt đầu làm việc ở trạng thái ổn định, lúc này đồng bộ nối lưới.

## 5. Kết luận

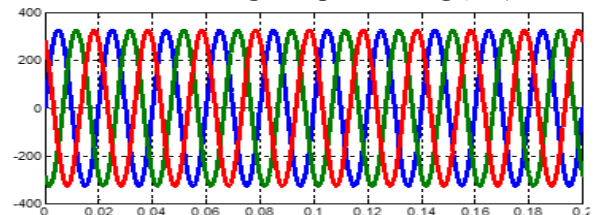
Mô hình điều khiển nối lưới cho microturbine sử dụng máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSG) đã phát huy tối đa công suất phát ra của



Hình 17. Công suất tác dụng (W)



Hình 18. Công suất phản kháng (Var)



Hình 19. Điện áp nối lưới Uabc (V)

hệ thống, bất chấp tải nối với hệ thống. Mô hình điều khiển nối lưới thông qua bộ biến đổi AC/DC và DC/AC với ưu điểm là khả năng truyền năng lượng theo cả 2 hướng với góc điều khiển thay đổi được, mặc khác dung lượng sóng hài thấp, điều này có ý nghĩa lớn đến việc cải thiện chất lượng điện năng. Mô hình điều khiển nối lưới cho microturbine sử dụng máy phát điện PMSG nhằm hướng đến việc phát triển lưới điện thông minh và điều khiển nối lưới linh hoạt cho các nguồn phát điện phân tán.

## Tài liệu tham khảo

- Lê, Kim Anh. 2012. "Xây dựng mô hình điều khiển nối lưới sử dụng nguồn pin nhiên liệu". *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*. Đại Học Công nghiệp Hà Nội, số (12).
- Bertani, A., Bossi, C. & Fornari, F. 2004. *A Microturbine Generation System for Grid Connected and Islanding Operation*. Accepted for presentation at IEEE PSCE. New York. October 10 -13.
- Zhou Yunhai & Jürgen Stenzel. 2009. *Simulation of a Microturbine Generation System for Grid Connected and Islanding Operations*. IEEE.
- Noroozian R, Abedi M & Gharehpetian G. B, et al. 2009. *Modelling and Simulation of Microturbine Generation System for on-grid and off-grid Operation Modes*. Valencia (Spain). 15th to 17th April.
- Selvakumar, S. & Manoharan, S. & Ganambal, K. 2012. "Modelling and simulation of micro turbine based smart grid system". *International Journal of Communications and Engineering*, Volume 05 – No.5.
- Kumar, A., Jain, S.P. & Sandhu, K.S., et al. 2008. "New Converter Controller Model for Modeling of Microturbine Based Distributed Generation System". *International Conference on renewable energy sources*.
- Sreedhar R. Guda & Wang, C. 2005. *A Simulink-Based Microturbine Model for Distributed Generation Studies*. IEEE.
- Kumar, A., Sandhu, K.S. & Jain, S.P., et al. 2009. "Modeling and Control of Micro-Turbine Based Distributed Generation System". *International journal of circuits, systems and signal processing*, Issue 2. Volume 3.
- Haoran Bai, Fengxiang Wang & Junqiang Xing. 2007. *Control Strategy of Combined PWM Rectifier/ Inverter for a High Speed Generator Power System*. IEEE.
- Sanjeev K Nayak & Gaonkar, DN. 2012. "Modeling and Performance Analysis of Microturbine Generation System in Grid Connected/Islanding Operation". *International journal of renewable energy research*, Sanjeev K Nayak et al, Vol.2. No.4.
- Wanik, M. Z. C. & Erlich, I. 2009. *Simulation of Microturbine Generation System Performance during Grid Faults under new Grid Code Requirements*. IEEE.