

MÔ HÌNH PHÂN TẦNG TRONG ĐIỀU KHIỂN NÓI LƯỚI CHO TUABIN GIÓ

Lê Kim Anh¹

TÓM TẮT

Nghiên cứu nguồn năng lượng gió để phát điện có ý nghĩa thiết thực đến việc giảm sự phụ thuộc vào các nguồn nhiên liệu hóa thạch. Để tuabin gió vận hành tối ưu với vận tốc gió nhất định thì hệ thống rotor phải có chức năng tự điều chỉnh theo sự thay đổi của vận tốc và hướng gió. Loại máy phát điện PMSG hoàn toàn đáp ứng được những thay đổi này. Bài báo đã đưa ra được kết quả mô phỏng ứng dụng mô hình phân tầng trong điều khiển nói lưới cho tuabin gió sử dụng máy phát điện loại PMSG. Ưu điểm của mô hình điều khiển phân tầng là tần số, biên độ và độ lệch điện áp luôn đạt giá trị ổn định. Bên cạnh đó, phương pháp điều khiển theo độ trượt (Droop control method) cũng được sử dụng nhằm duy trì công suất phát tối đa bất chấp tải nối với hệ thống. Hơn nữa, việc giảm sóng hài bậc cao cũng có ý nghĩa lớn trong việc nâng cao chất lượng điện năng.

Từ khóa: Năng lượng tái tạo, tuabin gió, tuabin gió nói lưới, mô hình phân tầng, phương pháp điều khiển theo độ trượt

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 nói chung, nguồn năng lượng gió nói riêng là dạng nguồn năng lượng sạch, không gây ô nhiễm môi trường, đồng thời tiềm năng về trữ lượng năng lượng ở nước ta rất lớn. Theo số liệu của Ngân hàng thế giới, tiềm năng gió của Việt Nam (ở độ cao 65m) rất khả quan, ước đạt 513.360MW, lớn hơn 200 lần công suất nhà máy thủy điện Sơn La và hơn 10 lần tổng công suất dự báo của ngành điện đến năm 2020. Tuy nhiên, để khai thác, sử dụng nguồn năng lượng gió sao cho hiệu quả, thay thế dần các nguồn nhiên liệu hóa thạch, nhằm giảm phát thải các chất gây ô nhiễm môi trường, đặc biệt là khí (CO₂) đang là mục tiêu nghiên cứu của các nhà quản lý. Mô

hình điều khiển phân tầng, bao gồm 3 tầng điều khiển: Tầng điều khiển thứ 1, dùng để điều khiển giữa tải với bộ nghịch lưu, sử dụng phương pháp điều khiển theo độ trượt (độ dốc). Tầng điều khiển thứ 2, dùng để đồng bộ với lưới và đưa tín hiệu độ lệch tần số, độ lệch điện áp đến tầng điều khiển thứ 1. Tầng điều khiển thứ 3, dùng để trao đổi giữa công suất của tuabin gió sử dụng máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu (Permanent magnetic synchronous generator, PMSG) với công suất của lưới, đồng thời đưa tín hiệu biên độ tần số và biên độ điện áp đến tầng điều khiển thứ 2. Ứng dụng mô hình phân tầng trong điều khiển nói lưới cho tuabin gió sử dụng máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu, nhằm hướng đến phát triển lưới điện thông minh và điều khiển nói lưới linh hoạt.

¹ Trường Cao đẳng Công Thương Miền Trung
Email: tdhlekimanh@gmail.com

2. Mô hình tuabin gió và máy phát điện PMSG

2.1. Mô hình tuabin gió

Theo [1], công suất của tuabin gió được tính theo biểu thức:

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} v^3 \quad (1)$$

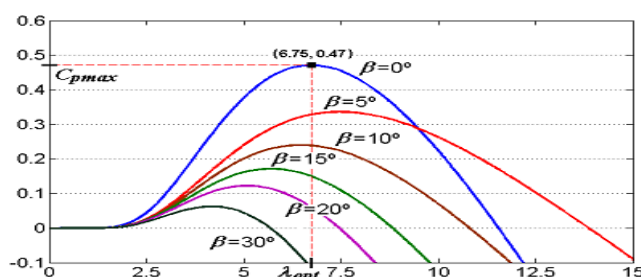
Trong đó: P_m : Công suất đầu ra của tuabin (W); $C_p(\lambda, \beta)$: Hệ số biến đổi năng lượng (là tỷ số giữa tốc độ đầu cánh λ và góc cánh β); A : Tiết diện vòng quay của

cánh quạt (m^2); ρ : Mật độ của không khí, $\rho = 1.255 \text{ (kg/m}^3\text{)}$; Từ biểu thức (1) ta thấy vận tốc gió là yếu tố quan trọng nhất của công suất; công suất đầu ra tăng theo lũy thừa 3 của vận tốc.

Hệ số biến đổi năng lượng $C_p(\lambda, \beta)$ của biểu thức (1) được tính như sau:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (2)$$

với
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (3)$$

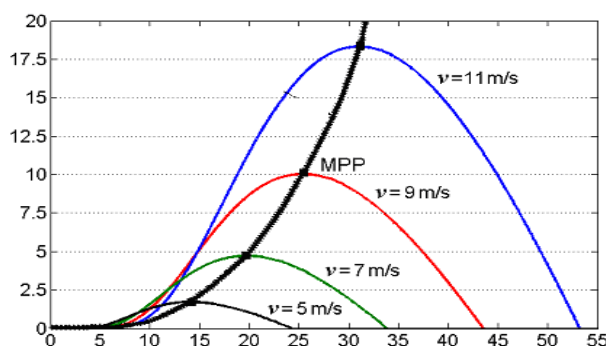


Hình 1: Đường cong biểu diễn mối quan hệ giữa C_p và λ

Như ta đã biết tỷ số tốc độ đầu cánh tuabin gió và tốc độ là: $\lambda = \frac{R\omega}{v}$ trong đó ω tốc độ quay của tuabin, R bán kính của tuabin, v vận tốc của gió. Do vậy mômen của tuabin gió được tính như sau:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega} = \frac{1}{2} \pi \rho R^5 C_p \frac{\omega^3}{\lambda^3} \quad (4)$$

Mặt khác, tuabin gió có thể vận hành theo các quy tắc điều khiển khác nhau tùy thuộc vào tốc độ của gió. Đường cong biểu diễn mối quan hệ giữa P_m và tốc độ gió như hình 2.



Hình 2: Đường cong biểu diễn mối quan hệ giữa P_m và tốc độ gió

2.2. Mô hình máy phát điện PMSG

Theo [2], phương trình dòng điện và điện áp của PMSG biểu diễn trên hệ tọa độ dq như sau:

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{T_{sd}} i_{sd} + \omega_s \frac{L_{sq}}{L_{sd}} i_{sq} + \frac{1}{L_{sd}} u_{sd} \quad (5)$$

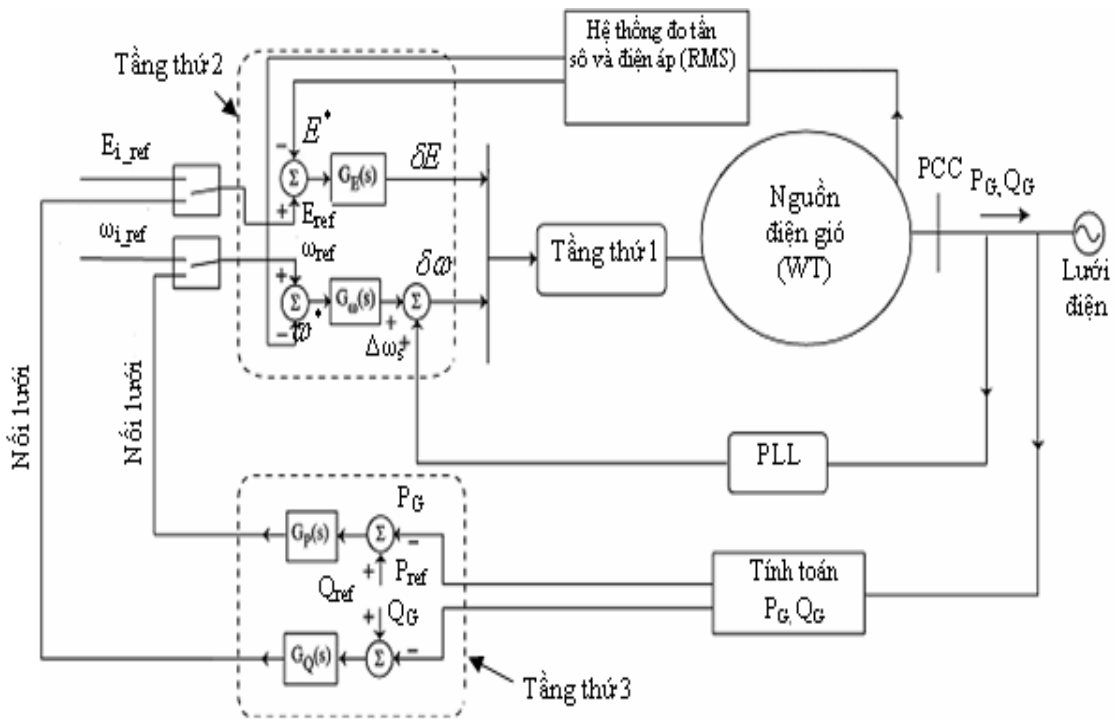
$$\frac{di_{sq}}{dt} = -\omega_s \frac{L_{sd}}{L_{sq}} i_{sd} - \frac{1}{T_{sq}} i_{sq} + \frac{1}{L_{sq}} u_{sq} - \omega_s \frac{\psi_p}{L_{sq}} \quad (6)$$

Trong đó: L_{sd} điện cảm Stator đo ở vị trí đỉnh cực; L_{sq} điện cảm Stator đo ở vị trí ngang cực; ψ_p từ thông cực (vĩnh cửu); T_{sd}, T_{sq} là hằng số thời gian Stator tại vị trí đỉnh cực. Phương trình mômen tính như sau:

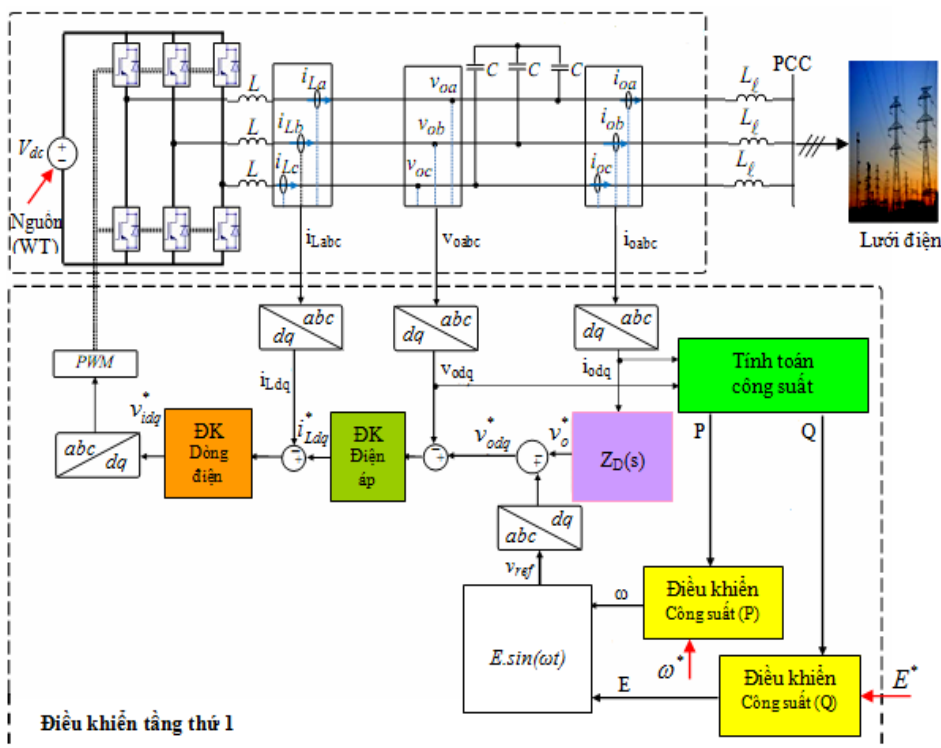
$$m_M = \frac{3}{2} P_c [\psi_p i_{sq} + i_{sd} i_{sq} (L_{sd} - L_{sq})] \quad (7)$$

3. Ứng dụng mô hình phân tầng trong điều khiển nối lưới

Xây dựng mô hình điều khiển phân tầng bao gồm 3 tầng điều khiển cơ bản sau: Tầng điều khiển thứ 1 (Primary Control), dùng để điều khiển dòng điện, điện áp và công suất giữa tải với bộ nghịch lưu. Tầng điều khiển thứ 2 (Secondary Control), dùng để đồng bộ với lưới. Tầng điều khiển thứ 3 (Tertiary Control), dùng để trao đổi công suất giữa tuabin gió sử dụng máy phát điện loại PMSG (gọi chung nguồn điện gió) với lưới. Hệ thống điều khiển nối lưới cho tuabin gió sử dụng máy phát điện loại PMSG theo mô hình phân tầng, như hình 3 và 4.



Hình 3: Sơ đồ điều khiển nối lưới nguồn điện gió theo mô hình phân tầng



Hình 4: Sơ đồ điều khiển tầng thứ 1

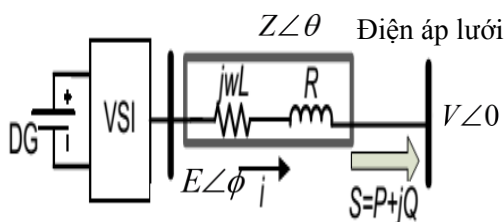
3.1. Điều khiển tầng thứ 1

3.1.1. Điều khiển P,Q theo phương pháp độ trượt (độ dốc)

Phương pháp điều khiển theo độ trượt (Droop control method, DCM) thường sử dụng trong điều khiển các nguồn phân tán nói chung và nguồn điện gió nói riêng như: điều khiển giữa tải với các bộ biến đổi thông qua bộ nghịch lưu (biến tần), ở đây sử dụng bộ nghịch lưu nguồn áp (Voltage source inverter, VSI). Trong phương pháp điều khiển này công suất tác dụng được điều

khiển theo độ trượt của tần số và công suất phản kháng điều khiển theo độ trượt của biên độ điện áp. Ưu điểm của phương pháp DCM là giảm các sóng hài bậc cao, điều này có ý nghĩa lớn đến việc nâng cao chất lượng điện năng.

Theo [3], sơ đồ mạch điện tương đương của bộ nghịch lưu, như hình 5. Ở đây: i và $E\angle\phi$: dòng điện và điện áp ra của bộ nghịch lưu, $V\angle 0$: điện áp lưới và $Z\angle\theta$: trở kháng của đường dây và bộ nghịch lưu.



Hình 5: Sơ đồ mạch điện tương đương của bộ nghịch lưu

Từ sơ đồ hình 5, phương trình cho công suất được tính như sau:

$$S = V.I^* = \frac{V.E \angle \theta - \phi}{Z} - \frac{V^2 \angle \theta}{Z} \quad (8)$$

Từ biểu thức (8) công suất tác dụng và công suất phản kháng được tính như sau:

$$\begin{cases} P = \frac{V.E}{Z} \cos(\theta - \phi) - \frac{V^2}{Z} \cos \theta \\ Q = \frac{V.E}{Z} \sin(\theta - \phi) - \frac{V^2}{Z} \sin \theta \end{cases} \quad (9)$$

Giả sử trở kháng trên đường dây $Z \angle \theta$ là thuần cảm thì $\theta = 90^\circ$, biểu thức (9) được viết lại như sau:

$$\begin{cases} P = \frac{V.E}{Z} \sin \phi \\ Q = \frac{V.E \cos \phi - V^2}{Z} \end{cases} \quad (10)$$

Nếu sự khác biệt giữa điện áp ra của bộ nghịch lưu với điện áp lưới không đủ lớn thì $\sin \phi \approx \phi$ và $\cos \phi \approx 1$,

biểu thức (10) viết lại là:

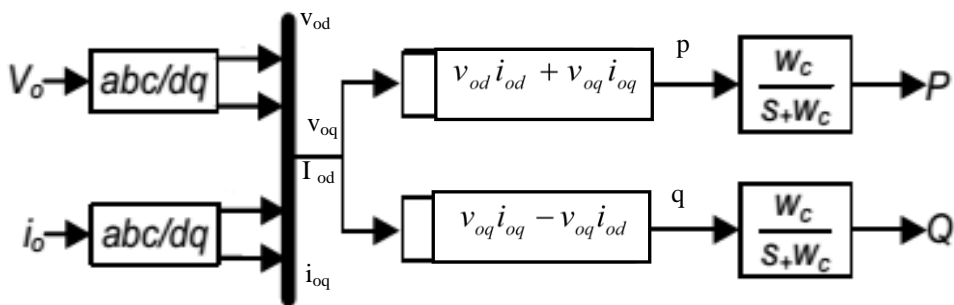
$$\begin{cases} P = \frac{V.E}{Z} \phi \\ Q = \frac{V.E - V^2}{Z} \end{cases} \quad (11)$$

Từ biểu thức (11) khi chuyển sang hệ tọa độ dq tính toán cho công suất tác dụng, công suất phản kháng và kết hợp với mạch lọc thông thấp được tính như sau:

$$\begin{cases} P = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (v_{od} i_{od} + v_{oq} i_{oq}) \\ Q = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} (v_{oq} i_{od} - v_{od} i_{oq}) \end{cases} \quad (12)$$

Trong đó: ω_c : tần số cắt của bộ lọc thông thấp; v_{od}, v_{oq} : là điện áp của v_{odq} ở hệ trục tọa độ dq; i_{od}, i_{oq} : là dòng điện của i_{odq} ở hệ trục tọa độ dq.

Hình 6 là mô hình tính toán công suất tác dụng và công suất phản kháng kết hợp với mạch lọc thông thấp.

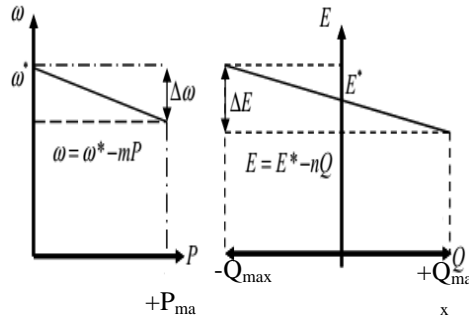


Hình 6: Mô hình tính toán công suất P, Q

Tần số và điện áp ra theo [4], điều khiển sử dụng phương pháp DCM được tính như sau:

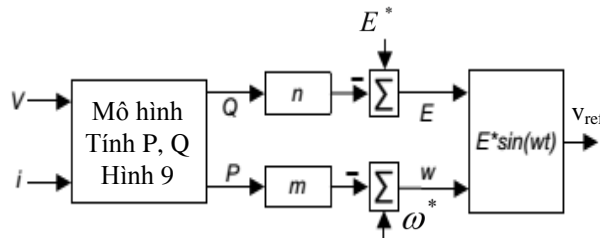
$$\begin{cases} \omega = \omega^* - m.P \\ E = E^* - n.Q \end{cases} \quad (13)$$

Trong đó: ω^*, E^* là các giá trị hằng số của tần số và điện áp từ hệ thống đo tần số và điện áp (RMS); $m = \Delta\omega / P_{\max}$, $n = \Delta E / 2Q_{\max}$: là hệ số của tần số và biên độ điện áp khi điều khiển theo phương pháp điều khiển DCM, như hình 7.



Hình 7: Điều khiển P, Q theo độ trượt của tần số và điện áp

Từ biểu thức (12) và (13) xây dựng sơ đồ mô hình điều khiển công suất P, Q theo phương pháp DCM, như hình 8.



Hình 8: Mô hình điều khiển công suất P, Q theo phương pháp DCM

3.1.2. Điều khiển điện áp và dòng điện

Theo [5], phương trình của điện áp và dòng điện điều khiển theo mạch vòng khi chuyển sang hệ tọa độ dq được tính như sau:

* Phương trình điều khiển mạch vòng ngoài của điện áp sử dụng bộ điều khiển PI:

$$\begin{cases} i_{Ld}^* = i_{od} - \omega C v_{oq} + (v_{od}^* - v_{od})(k_{vp} + k_{vi} / s) \\ i_{Lq}^* = i_{oq} + \omega C v_{od} + (v_{oq}^* - v_{oq})(k_{vp} + k_{vi} / s) \end{cases} \quad (14)$$

Trong đó: i_{Ld}^*, i_{Lq}^* : là dòng điện của i_{Ldq}^* ở hệ trục tọa độ dp; v_{od}^*, v_{oq}^* : là điện áp của v_{odq}^* ở hệ trục tọa độ dp; ω : tần số góc; k_{vp}, k_{vi} : các thông số của bộ điều

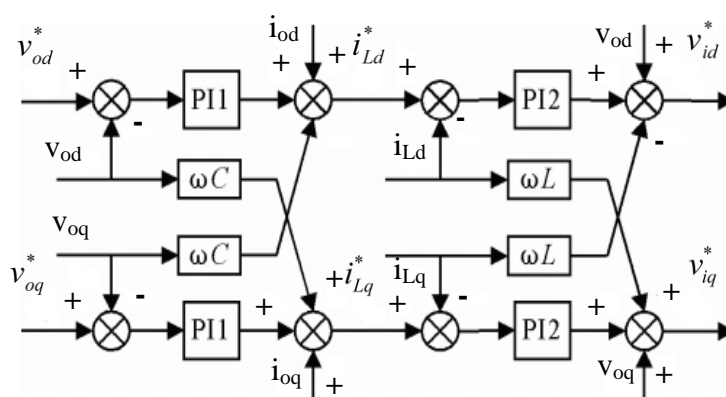
khiển; s : toán tử Laplace; C : điện dung mạch lọc.

* Phương trình điều khiển mạch vòng trong của dòng điện sử dụng bộ điều khiển PI:

$$\begin{cases} v_{id}^* = v_{od} - \omega L i_{Lq} + (i_{Ld}^* - i_{Ld})(k_{ip} + k_{ii} / s) \\ v_{iq}^* = v_{oq} + \omega L i_{Ld} + (i_{Lq}^* - i_{Lq})(k_{ip} + k_{ii} / s) \end{cases} \quad (15)$$

Trong đó: v_{id}^*, v_{iq}^* : là điện áp của v_{idq}^* ở hệ trục tọa độ dp; i_{Ld}, i_{Lq} : là dòng điện của i_{Ldq} ở hệ trục tọa độ dp.

k_{ip}, k_{ii} : các thông số của bộ điều khiển; L : điện cảm mạch lọc. Sơ đồ điều khiển mạch vòng của điện áp và dòng điện, như hình 9.

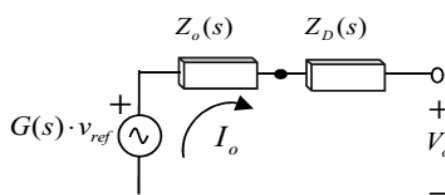


Hình 9: Điều khiển mạch vòng của điện áp và dòng điện

3.1.3. Điều khiển điện áp ra mạch trở kháng $Z_D(s)$

Trong mô hình điều khiển tầng thứ 1, sử dụng phương pháp điều khiển DCM đối với các nguồn phát điện phân tán có công suất lớn, theo [6], trở kháng đầu ra của các nguồn phát điện phân tán cũng như trở kháng trên đường dây chủ yếu là cảm kháng. Tuy nhiên khi sử dụng các bộ biến đổi điện tử công suất như: AC/DC và DC/AC thì trở kháng đầu ra phụ thuộc vào các bộ điều khiển dòng điện, điện áp. Đối với điều khiển điện áp thấp như nguồn điện gió thì trở kháng trên đường dây xem như thuần trở, điện áp đầu ra của mạch trở kháng được tính như sau:

$$v_o^* = v_{ref} - Z_D(s).i_o \tag{16}$$



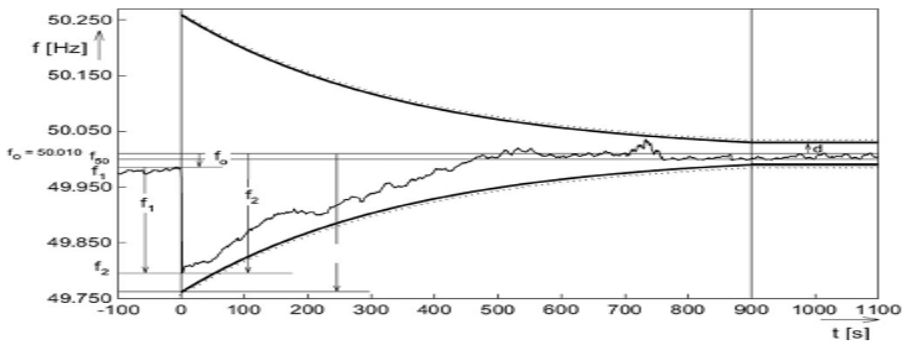
Hình 10: Sơ đồ điện áp đầu ra của mạch trở kháng

3.2. Điều khiển tầng thứ 2

Theo [7], điều khiển tầng thứ 2 dùng để điều khiển tần số và biên độ, cũng như độ lệch điện áp khi tải nối với lưới thay đổi. Đồng thời thực hiện đồng bộ với lưới, như hình 4. Phương trình giới hạn độ lệch tần số và điện áp được tính như sau:

$$\begin{cases} \delta\omega = k_{p\omega}(\omega_{ref} - \omega^*) + k_{i\omega} \int (\omega_{ref} - \omega^*) dt + \Delta\omega_s \\ \delta E = k_{pE}(E_{ref} - E^*) + k_{iE} \int (E_{ref} - E^*) dt \end{cases} \tag{17}$$

Trong đó: $k_{p\omega}$, $k_{i\omega}$, k_{pE} và k_{iE} : là các thông số của bộ điều khiển tầng thứ 2; $\Delta\omega_s$: hệ số đồng bộ lưới theo tần số lấy từ tín hiệu PLL; $\delta\omega$ và δE : là tín hiệu điều khiển tầng 1.



Hình 11: Giới hạn và khả năng phục hồi của tần số

3.3. Điều khiển tầng thứ 3

Điều khiển tầng thứ 3 dùng để điều khiển công suất giữa nguồn điện gió với công suất của lưới theo [7], bằng cách ta điều chỉnh tần số (hoặc độ lệch pha) và biên độ điện áp, như hình 3. Phương trình tần số và biên độ điện áp được tính như sau:

$$\begin{cases} \omega_{ref} = k_{pP}(P_{ref} - P_G) + k_{iP} \int (P_{ref} - P_G) dt \\ E_{ref} = k_{pQ}(Q_{ref} - Q_G) + k_{iQ} \int (Q_{ref} - Q_G) dt \end{cases} \quad (18)$$

Trong đó: k_{pP} , k_{iP} , k_{pQ} và k_{iQ} : là các thông số của bộ điều khiển tầng thứ 3;

P_G và Q_G : công suất tác dụng và công suất phản kháng của lưới; P_{ref} và Q_{ref} : công suất đặt; ω_{ref} và E_{ref} : là tín hiệu điều khiển tầng thứ 2.

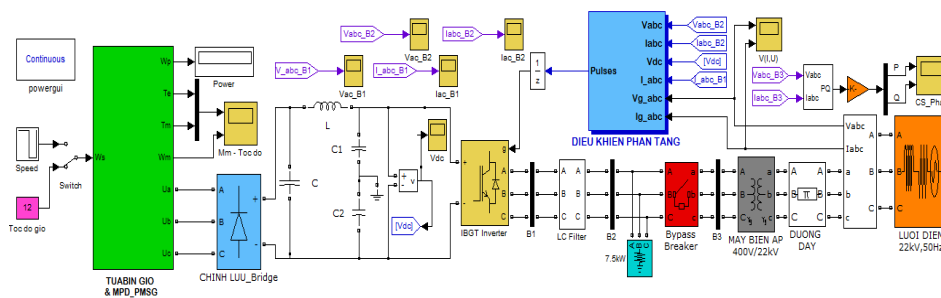
4. Xây dựng mô hình và mô phỏng trên matlab/simulink

4.1. Xây dựng mô hình trên matlab/simulink

Mô hình được xây dựng dựa trên sơ đồ mô hình điều khiển nối lưới hình 3, mục 3. Hệ thống điều khiển nối lưới cho nguồn điện gió ứng dụng mô hình phân tầng được xây dựng trên matlab/simulink, như hình 12.

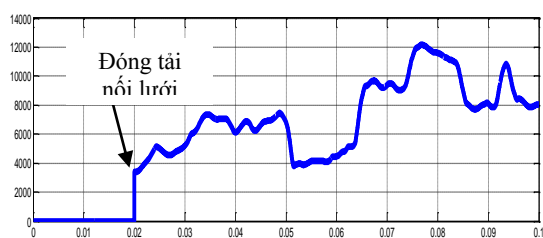
Bảng 1: Các thông số cơ bản của PMSG

Công suất máy phát	12kW
Số cực (p)	2
Tốc độ rotor (ω)	175 rad/s
Điện trở stator (R_s)	0.425Ω
Điện cảm stator (L_s)	8.4mH
Mô men	40Nm
Từ thông	0.433Wb

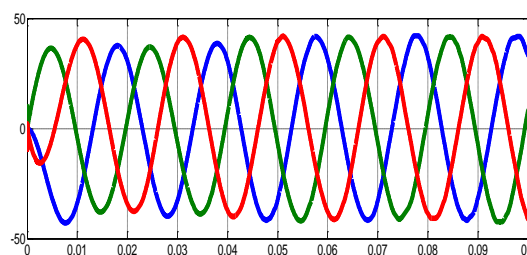


Hình 12: Hệ thống điều khiển nối lưới cho nguồn điện gió ứng dụng mô hình phân tầng

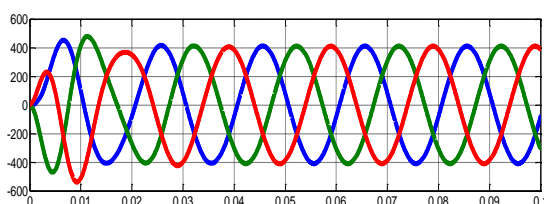
4.2. Kết quả mô phỏng trên matlab/simulink



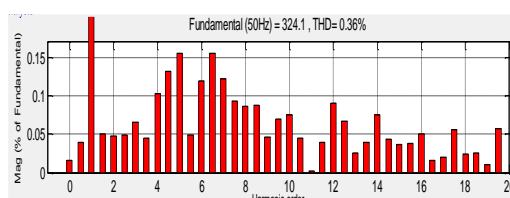
Hình 13: Công suất tuabin gió(W)



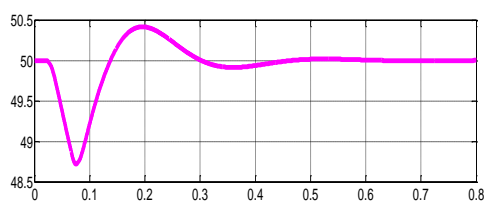
Hình 14: Dòng điện ngõ ra $I_{abc}(A)$



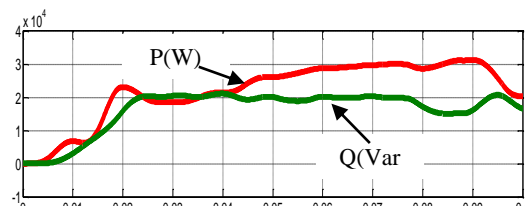
Hình 15: Điện áp ngõ ra $U_{abc}(V)$



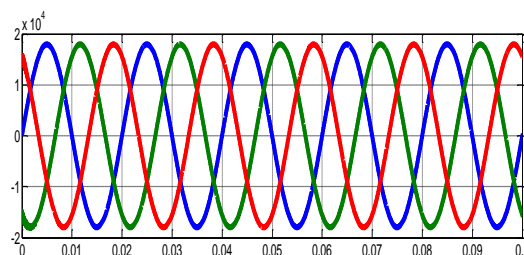
Hình 16: Đặc tính sóng hài điện áp



Hình 17: Đáp ứng của tần số



Hình 18: Công suất nối lưới



Hình 19: Điện áp nối lưới $U_{abc}(V)$

5. Kết luận

Ứng dụng mô hình phân tầng trong điều khiển nối lưới cho tuabin gió sử dụng máy phát điện loại PMSG đã phát huy đối đa công suất phát ra của hệ thống. Tại thời điểm $t = 0.02s$ đóng tải thực hiện nối lưới, dòng điện và điện áp cũng như công suất đầu ra luôn bằng giá trị đặt. Biên độ và độ lệch của tần số tại thời điểm này dao động nhưng nằm

trong phạm vi cho phép. Đặc tính sóng hài của điện áp ($THD < 5\%$), khi $t > 0.02s$ hệ thống nối lưới ở trạng thái làm việc ổn định. Điều khiển nối lưới cho tuabin gió sử dụng máy phát điện loại PMSG theo mô hình phân tầng nhằm hướng đến việc phát triển lưới điện thông minh và điều khiển nối lưới linh hoạt cho các nguồn năng lượng tái tạo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Đặng Ngọc Huy, Lê Kim Anh (2012), “Nghiên cứu mô hình tuabin gió sử dụng máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu”, *Tạp san Khoa học và công nghệ*, Đại học Công nghiệp Quảng Ninh
2. Nguyễn Phùng Quang (2006), *Matlab & Simulink dành cho kỹ sư điều khiển tự động*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội
3. Xiaochun Mou, Xue Zhao, Xin Zhao (2012), “Study on the Control Strategies of Low Voltage Microgrid”, International Conference on Future Electrical Power and Energy Systems
4. Yasser Abdel-Rady I. Mohamed, Amr A. Radwan (2011), *Hierarchical Control System for Robust Microgrid Operation and Seamless Mode Transfer in Active Distribution Systems*, IEEE
5. K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen and R. Belmans (2004), *A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters*, IEEE
6. Junping He, Ning Wu, Liang Liang (2013), *Dynamic Virtual Resistance Droop Control Scheme for Distributed Generation System*, TELKOMNIKA, Vol.11, No.3, March
7. Josep M. Guerrero, Juan C. Vásquez, Remus Teodorescu (2009), *Hierarchical Control of Droop-Controlled DC and AC Microgrids – A General Approach Towards Standardization*, IEEE

**HIERARCHIAL MODEL IN CONTROLLING
OF GRID-CONNECTED WIND TURBINES****ABSTRACT**

The research of using effectively wind energy sources to generate electricity is meaningful to reduce the dependance on fossil energy sources. The rotor system of wind turbine must have a function of self-adjustment to the change of wind speed and direction so that the wind turbine could operate efficiently at a certain wind velocity. The Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) is really suitable for these requirements. The article gives simulation results of applying hierarchical model in controlling grid-connected PMSG wind turbines. This control model has advantages of stable operating frequency, voltage magnitude and voltage deviation. Besides, the droop control method has also been used to maintain maximum generating capacity of the system, irrespective of connected power loads. Furthermore, the elimination of high order harmonics will also have a significant effect on power quality improvement.

Keywords: *Renewable energy, wind turbines, grid connected wind turbines, hierarchical, droop control method*

(Received: 16/8/2018, Revised: 18/11/2018, Accepted for publication: 11/9/2019)