

DOI:10.22144/ctu.jvn.2020.001

MÔ PHỎNG MÁY PHÁT ĐIỆN TUABIN GIÓ PMSG SỬ DỤNG PHẦN MỀM PSIM

Phạm Đại Thắng*, Trần Anh Nguyễn, Đào Minh Trung và Quách Ngọc Thịnh

Khoa Công nghệ, Trường Đại học Cần Thơ

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Phạm Đại Thắng (email: phamdaithang28@gmail.com)

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 25/08/2019

Ngày nhận bài sửa: 14/11/2019

Ngày duyệt đăng: 28/02/2020

Title:

Simulation of PMSG wind turbine using PSIM software

Từ khóa:

Bộ chuyển đổi AC-DC-AC, bộ điều khiển, máy phát điện tuabin gió PMSG, mô phỏng

Keywords:

AC-DC-AC converter, controller, permanent magnet synchronous generator wind turbine, simulation

ABSTRACT

Nowadays, wind turbine generators are being developed and widely used in many countries around the world. However, there is not much research about wind turbine in Vietnam, specifically the direct-drive permanent magnet synchronous generator (PMSG). Therefore, this paper is to demonstrate the operation of a 2 MW direct-drive wind turbine using a permanent magnet synchronous generator to assist other researchers to gain more knowledge about this type of generator. First of all, the structure and operating principle of a PMSG wind turbine are presented. The controllers will be then designed. The simulation results based on PSIM software with different wind conditions will demonstrate the operation of the PMSG wind turbine and the performance of the designed controllers.

TÓM TẮT

Ngày nay, máy phát điện tuabin gió đã được phát triển và sử dụng ở nhiều nước trên thế giới. Tuy nhiên, ở Việt Nam hiện nay chưa có nhiều nghiên cứu về loại máy phát điện này, đặc biệt là máy phát điện tuabin gió không hộp số sử dụng máy phát điện nam châm vĩnh cửu (PMSG). Do đó, bài báo này sẽ mô phỏng hoạt động của máy phát điện tuabin gió PMSG công suất 2 MW nhằm giúp cho các nhà nghiên cứu có thêm kiến thức về loại máy phát điện này. Trước tiên, bài báo sẽ trình bày về cấu tạo và nguyên lý hoạt động của máy phát điện tuabin gió PMSG. Việc thiết kế các bộ điều khiển sẽ được thực hiện sau đó. Kết quả mô phỏng trên phần mềm PSIM với các trường hợp vận hành khác nhau sẽ minh họa hoạt động của máy phát điện tuabin gió PMSG cũng như hiệu quả của bộ điều khiển vừa thiết kế.

Trích dẫn: Phạm Đại Thắng, Trần Anh Nguyễn, Đào Minh Trung và Quách Ngọc Thịnh, 2020. Mô phỏng máy phát điện tuabin gió PMSG sử dụng phần mềm PSIM. Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ. 56(1A): 1-10.

1 GIỚI THIỆU

Máy phát tuabin điện gió đã có nhiều bước tiến lớn về công nghệ sau hơn 100 năm ra đời. Khởi đầu là máy phát điện DC công suất 12 kW và 144 cánh gỗ vào năm 1888. Đến giữa thế kỷ 20, máy phát điện tuabin gió được phát triển đạt đến mức công suất 1 MW, sử dụng hộp số tăng tốc và máy phát không đồng bộ rôto lồng sóc do cấu tạo đơn giản và giá

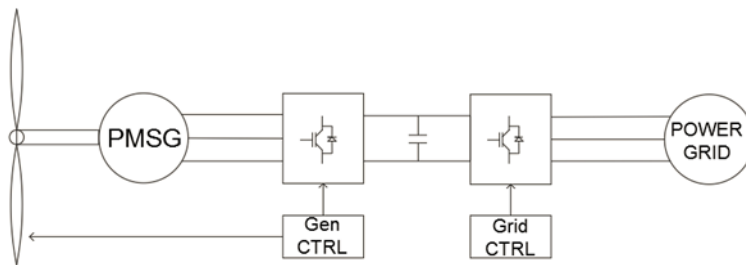
thành thấp. Tuy nhiên, máy phát rôto lồng sóc có khoảng tốc độ quay rất hẹp nên tốc độ tuabin gần như không đổi, gây ảnh hưởng tới hiệu suất nhận công suất gió và khi tốc độ gió thay đổi sẽ gây ra các áp lực cơ khí lên các bộ phận và dao động trên lưới điện (Babu and Divya, 2017). Để khắc phục các điểm yếu nêu trên của máy phát rôto lồng sóc, máy phát không đồng bộ rôto dây quấn nối với biến trở được

sử dụng. Tuy nhiên, loại máy phát này vẫn còn có các hạn chế như phải dùng bộ khởi động mềm và tụ điện bù công suất phản kháng. Cuối thập niên 1990, các nhà sản xuất bắt đầu dùng máy phát điện gió tốc độ thay đổi, máy phát điện không đồng bộ 2 nguồn cấp (DFIG) được sử dụng do nhiều ưu điểm phù hợp với việc phát điện gió như khả năng thay đổi tốc độ quay, tăng lượng điện năng thu được, đáp ứng chất lượng điện năng và độ ồn (Polinder *et al.*, 2006). Máy phát DFIG trở thành máy phát điện thông dụng nhất trong các tuabin gió hiện nay. Trong những năm gần đây, máy phát điện gió nam châm vĩnh cửu (PMSG) là một xu hướng mới trong công nghiệp điện gió do có nhiều ưu điểm vượt trội như có thể chế tạo với số cực từ lớn nên không cần hộp số, khoảng tốc độ quay rộng, hiệu suất và độ bền cao, không cần dòng kích từ và ít yêu cầu bảo trì thường xuyên (Mellah and Hemsas, 2013). Tương tự với các loại máy phát điện gió khác, việc thiết kế bộ điều khiển là không thể thiếu trong hệ thống máy phát điện tuabin gió PMSG không sử dụng hộp số. Bộ điều khiển và bộ chuyển đổi điện phải được tối ưu để nâng cao hiệu suất và độ bền của hệ thống (Wang *et al.*, 2014). Bên cạnh đó, bộ tìm điểm công suất cực đại cũng được kết hợp với bộ điều khiển để điều chỉnh công suất và giữ tốc độ quay tuabin ở giá trị tối ưu (Wu *et al.*, 2011). Ngoài ra, bộ điều chỉnh góc lệch cánh cũng là một phần không thể thiếu để điều chỉnh tốc độ quay của tuabin (Popa and Groza, 2010). Tuy nhiên, ở Việt Nam hiện nay vẫn chưa có nhiều nghiên cứu về điều khiển và mô phỏng hoạt động của máy phát điện gió PMSG. Do đó, bài báo này sẽ thiết kế bộ điều khiển và mô phỏng hoạt động của máy phát điện tuabin gió PMSG 2 MW nhằm giúp cho các nhà nghiên cứu và vận hành có thêm những kiến thức về nguyên lý cơ bản cũng như quá trình điều khiển của máy phát điện tuabin gió PMSG.

2 HỆ THỐNG MÁY PHÁT ĐIỆN TUABIN GIÓ PMSG

2.1 Cấu tạo

Sơ đồ khối của hệ thống máy phát điện tuabin gió PMSG được thể hiện trong Hình 1. Tuabin gió được cấu tạo từ rất nhiều bộ phận với độ chính xác cao để đảm bảo độ an toàn cũng như khả năng chuyển hóa năng lượng gió sang điện năng được hiệu quả nhất. Cấu tạo của các tuabin gió hiện đại thường bao gồm: ba cánh quạt được gắn trên trục rôto và trục rôto được nối trực tiếp với trục chính; bên trong trục rôto là bộ phận điều chỉnh góc lệch cánh; trong hệ thống máy phát điện gió không hộp số, trục chính sẽ được nối trực tiếp với máy phát điện PMSG. Máy phát điện PMSG thông thường được chia thành hai dạng chính là đặt nam châm trong lòng rôto và đặt nam châm lên bề mặt rôto. Dạng đặt nam châm trong lòng rôto có giá thành chế tạo cao hơn do cấu tạo phức tạp, nhưng có ưu điểm là khả năng chịu lực ly tâm lớn (do chênh lệch độ từ thẩm của nam châm và vật liệu lõi từ nên cảm kháng trục d và q không bằng nhau) nên có thể dùng cho các ứng dụng cần tốc độ quay cao (Wu *et al.*, 2011). Ngược lại, rôto dạng đặt nam châm lên bề mặt có cấu tạo đơn giản, cảm kháng trục d và q gần như nhau và được gọi là rôto cực từ ẩn (Keshavarz, 2011). Đối với kiểu rôto này, nam châm được sử dụng phải có mật độ từ thông lớn ví dụ như nam châm đất hiếm Nd-Fe-B (Akhatov *et al.*, 2003). Công suất phát ra từ máy phát qua bộ chuyển đổi AC-DC-AC để truyền tải công suất lên lưới. Ngoài ra, còn có những bộ phận khác không trực tiếp tham gia vào quá trình chuyển đổi năng lượng như cột đỡ, hệ thống điều chỉnh góc lệch cánh, góc đón gió, cảm biến gió, phanh rôto,...



Hình 1: Sơ đồ khối máy phát điện tuabin gió PMSG

2.2 Nguyên lý hoạt động

Tuabin gió hoạt động theo nguyên lý chuyển động năng của gió thành cơ năng để quay tuabin gió. Biểu thức công suất cơ mà tuabin nhận được từ luồng gió (Elbeji *et al.*, 2014):

$$P_M = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 C_p \quad (1)$$

Trong đó,

P_M là công suất cơ;

ρ là tỷ trọng không khí;

A là diện tích mặt đón gió;

v_w là tốc độ gió.

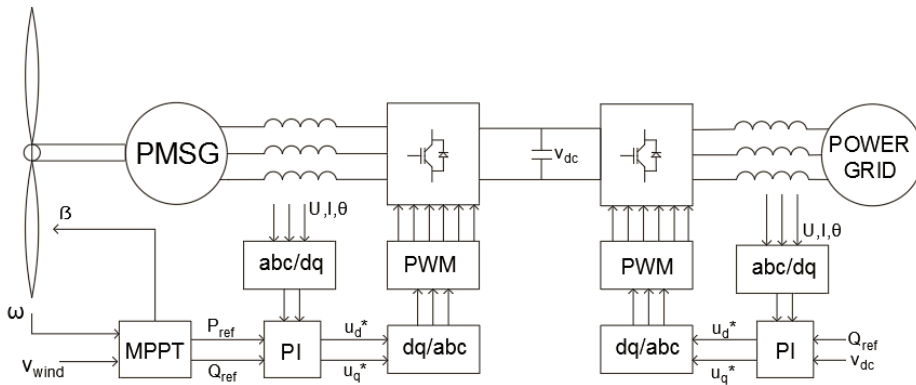
Tuabin không thể thu nhận hoàn toàn công suất từ gió mà chỉ nhận được một phần công suất từ gió với hệ số thu nhận C_p . Hệ số C_p tối đa mà tuabin đạt được trên lý thuyết theo hệ số Betz là $16/27 \approx 0,593$. Trục tuabin sẽ được nối trực tiếp với trục máy phát điện PMSG không thông qua hộp số để truyền động năng từ tuabin làm quay máy phát điện PMSG và phát ra công suất điện xoay chiều. Sự chênh lệch giữa momen cơ của tuabin và momen điện từ của máy phát sẽ quyết định việc tăng tốc, giảm tốc hay giữ tốc độ quay của tuabin (Wang *et al.*, 2014). Bộ chuyển đổi AC-DC-AC có chức năng chuyển điện áp với biên độ và tần số không ổn định từ máy phát sang điện áp DC ổn định, từ đó nghịch lưu thành các giá trị với biên độ và tần số phù hợp để truyền công suất lên lưới điện. Bộ chuyển đổi AC-DC-AC bao gồm hai phần: bộ chuyển đổi phía máy phát sẽ điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng máy phát, bộ chuyển đổi phía lưới có nhiệm vụ điều khiển điện áp liên kết DC và công suất phát lên lưới (Raducu, 2008).

2.3 Bộ điều khiển góc cánh tuabin gió

Bộ điều khiển góc cánh có nhiệm vụ điều chỉnh góc quay của cánh tuabin phù hợp với các cấp tốc độ gió khác nhau. Khi tốc độ gió thấp hơn tốc độ định mức thì góc quay của cánh phải cho phép thu nhận tối đa năng lượng từ luồng gió. Ngược lại, khi tốc độ gió cao hơn định mức, góc cánh phải thay đổi để giảm lượng công suất tuabin nhận vào để đảm bảo an toàn cho các cơ cấu cơ khí, bảo vệ máy phát và giữ tốc độ quay ở định mức (Popa and Groza, 2010). Khi tốc độ gió quá cao, vượt qua giới hạn hoạt động của tuabin, góc cánh sẽ được điều chỉnh để dừng nhận năng lượng từ gió, hỗ trợ việc dừng và khóa tuabin. Mỗi loại kiểu hình cánh sẽ có một góc đón gió mà ở đó lực nâng cánh là tối đa, khi tăng hoặc giảm góc cánh ngoài góc tối ưu thì lực nâng cánh sẽ giảm. Nguyên lý này được vận dụng cho việc thay đổi góc lệch cánh của tuabin gió.

3 BỘ ĐIỀU KHIỂN CỦA MÁY PHÁT ĐIỆN TUABIN GIÓ PMSG

Sơ đồ điều khiển tổng thể của hệ thống máy phát điện gió PMSG được thể hiện như Hình 2. Hệ thống điều khiển gồm ba khối chính: khối điều khiển tìm điểm công suất cực đại, các khối điều khiển cho bộ chuyển đổi phía máy phát và các khối điều khiển cho bộ chuyển đổi phía lưới.



Hình 2: Sơ đồ điều khiển tổng thể của hệ thống máy phát điện gió PMSG

3.1 Bộ điều khiển tìm điểm công suất cực đại

Đối với tuabin gió trục ngang tốc độ thay đổi, để thu nhận được tối đa công suất từ gió, hệ số C_p được tối ưu bằng góc lệch cánh β và hệ số tốc độ đầu cánh λ của tuabin (Elbeji *et al.*, 2014).

Phương trình thử nghiệm của C_p như sau:

$$C_p = \frac{1}{2} (116. \lambda' - 0,4. \beta - 5) e^{-21. \lambda'} + 0,01 \lambda \quad (2)$$

Hệ số tốc độ đầu cánh được tính theo phương trình:

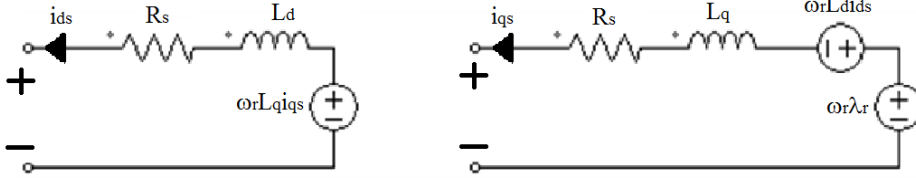
$$\lambda = \frac{\omega_M \cdot r}{v_w} \quad (3)$$

Với ω_M là tốc độ quay của tuabin; r là chiều dài cánh.

λ' là hệ số và được tính theo phương trình:

$$\lambda' = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

Biểu thức của C_p thay đổi phụ thuộc vào từng loại cánh khác nhau. Khi tốc độ gió vượt qua giá trị định mức, góc lệch cánh và hệ số đầu cánh thay đổi



Hình 3: Sơ đồ tương đương của máy phát điện PMSG

Thành phần điện áp v_{ds} và v_{qs} được tính:

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} + \omega_r L_q i_{qs} - L_d \frac{di_{ds}}{dt} \quad (5)$$

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} - \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \lambda_r - L_q \frac{di_{qs}}{dt} \quad (6)$$

Điện trở stato của máy phát, R_s , rất nhỏ nên có thể bỏ qua trong tính toán. Từ đó, bộ điều khiển dòng điện máy phát sẽ được thiết kế như sau:

$$v_{d,sg}^* = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot (i_{d,sg}^* - i_{d,sg}) + \omega_r L_q i_{q,sg} \quad (7)$$

để giảm hệ số C_p nhằm đảm bảo an toàn cho tuabin và máy phát.

3.2 Bộ điều khiển phía máy phát

3.2.1 Bộ điều khiển dòng điện phía máy phát

Mạch tương đương của máy phát điện PMSG trong khung tham chiếu quay đồng bộ d-q được thể hiện như trong Hình 3 (Wu et al., 2011):

$$v_{q,sg}^* = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot (i_{d,sg}^* - i_{q,sg}) - \omega_r L_d i_{d,sg} + \omega_r \lambda_r \quad (8)$$

Trong đó,

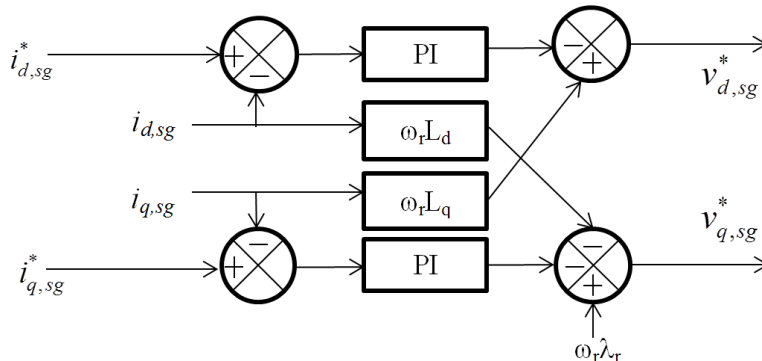
$v_{d,sg}^*$ và $v_{q,sg}^*$ là các giá trị điện áp tham khảo cho bộ chỉnh lưu;

$i_{d,sg}^*$ và $i_{q,sg}^*$ là giá trị dòng điện tham khảo cho bộ chỉnh lưu;

ω_r là tốc độ góc điện áp xoay chiều máy phát;

λ_r là từ thông liên kết rôto.

Dựa vào phương trình 7 và phương trình 8, ta được sơ đồ bộ điều khiển dòng điện phía máy phát như Hình 4.



Hình 4: Sơ đồ bộ điều khiển dòng điện phía máy phát

3.2.2 Bộ điều khiển công suất phía máy phát

Công suất tác dụng P_{sg} và công suất phản kháng Q_{sg} của máy phát tính theo khung tham chiếu d-q (Wu et al., 2011):

$$P_{sg} = 1,5 \left(v_{d,sg} i_{d,sg} + v_{q,sg} i_{q,sg} \right) \quad (9)$$

$$Q_{sg} = 1,5 \left(v_{d,sg} i_{q,sg} - v_{q,sg} i_{d,sg} \right) \quad (10)$$

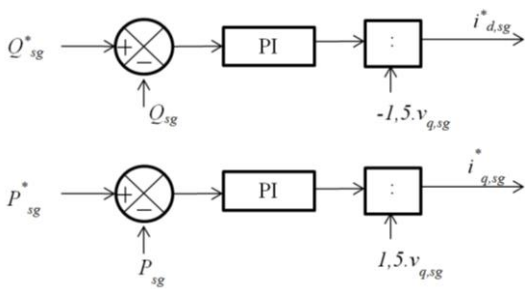
Do thành phần điện áp trục d, $v_{d,sg} = 0$, sắp xếp lại phương trình trên ta được bộ điều khiển công suất máy phát như sau:

$$i_{d,sg}^* = -\frac{2}{3v_{q,sg}} \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (Q_{sg}^* - Q_{sg}) \quad (11)$$

$$i_{q,sg}^* = \frac{2}{3v_{q,sg}} \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (P_{sg}^* - P_{sg}) \quad (12)$$

Với P_{sg}^* và Q_{sg}^* là công suất tác dụng và công suất phản kháng tham khảo phía máy phát.

Từ phương trình 11 và phương trình 12, ta được sơ đồ điều khiển công suất phía máy phát như Hình 5.



Hình 5: Sơ đồ điều khiển P, Q phía máy phát

3.3 Bộ điều khiển phía lưới

3.3.1 Bộ điều khiển dòng điện phía lưới

Điện áp xoay chiều ngõ ra bộ nghịch lưu:

$$v_{i,c,eg} = Ri_{i,eg} + L \frac{di_{i,eg}}{dt} + v_{i,eg} \quad (13)$$

Trong đó:

$i = a, b, c$: Thể hiện cho 3 pha;

$v_{i,eg}$ là điện áp 3 pha phía lưới;

$v_{i,c,eg}$ là điện áp 3 pha ngõ ra của bộ nghịch lưu;

$i_{i,eg}$ là dòng điện xoay chiều phía lưới;

R và L là giá trị điện trở và cuộn cảm nối lưới.

Chuyển phương trình (13) sang khung tham chiếu d-q:

$$v_{d,ceg} = v_{d,eg} + Ri_{d,eg} + L \frac{di_{d,eg}}{dt} - \omega Li_{q,eg} \quad (14)$$

$$v_{q,ceg} = v_{q,eg} + Ri_{q,eg} + L \frac{di_{q,eg}}{dt} + \omega Li_{d,eg} \quad (15)$$

Bỏ qua điện trở R , ta được bộ điều khiển dòng điện phía lưới:

$$v_{d,ceg}^* = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_{d,eg}^* - i_{d,eg}) + v_{d,eg} - \omega Li_{q,eg} \quad (16)$$

$$v_{q,ceg}^* = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_{q,eg}^* - i_{q,eg}) + v_{q,eg} + \omega Li_{d,eg} \quad (17)$$

Trong đó,

$v_{d,ceg}^*$ và $v_{q,ceg}^*$ là điện áp tham chiếu đầu ra của bộ chỉnh lưu theo khung tham chiếu d-q;

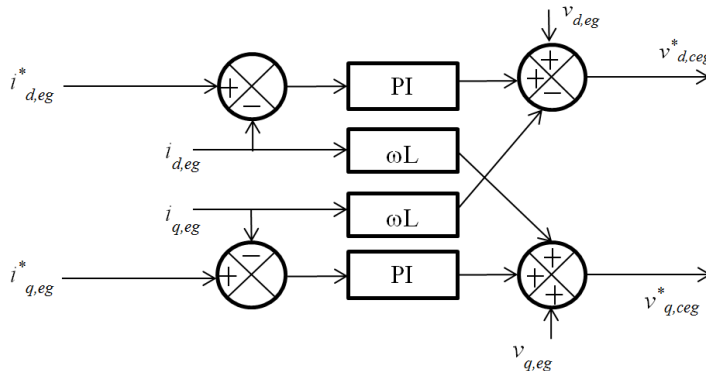
$i_{d,eg}^*$ và $i_{q,eg}^*$ là giá trị dòng điện tham khảo theo khung tham chiếu d-q phía lưới;

$v_{d,eg}$ và $v_{q,eg}$ là giá trị điện áp lưới theo khung tham chiếu d-q;

$i_{d,eg}$ và $i_{q,eg}$ là giá trị dòng điện tính toán theo khung tham chiếu d-q;

ω là tốc độ góc điện áp lưới.

Dựa vào phương trình 16 và phương trình 17, ta được sơ đồ bộ điều khiển dòng điện phía lưới như trong Hình 6.



Hình 6: Bộ điều khiển dòng điện phía nghịch lưu

3.3.2 Bộ điều khiển điện áp liên kết DC

Giả sử bỏ qua tổn hao công suất, ta được:

$$P_{dc} = P_{ac} \tag{18}$$

Với v_{dc} là điện áp liên kết DC, i_0 là dòng điện DC ngõ ra của bộ chỉnh lưu, $v_{d, eg} = 0$, ta có:

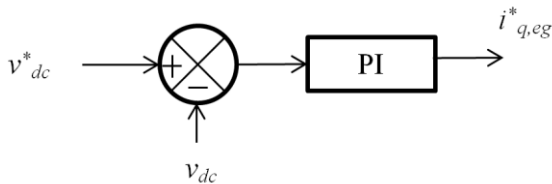
$$-v_{dc} \cdot C \frac{dv_{dc}}{dt} + v_{dc} \cdot i_0 = \frac{3}{2} v_{q, eg} \cdot i_{q, eg}$$

$$\Leftrightarrow i_{q, eg} = -\frac{2}{3} \frac{v_{dc}}{v_{q, eg}} \cdot C \frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{2}{3} \frac{v_{dc}}{v_{q, eg}} i_0 \tag{19}$$

Bộ điều khiển điện áp liên kết DC được thể hiện như sau:

$$i_{q, eg}^* = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \cdot (v_{dc}^* - v_{dc}) \tag{20}$$

Từ phương trình trên, ta được bộ điều khiển điện áp liên kết DC như trong Hình 7.



Hình 7: Bộ điều khiển điện áp liên kết DC

3.3.3 Bộ điều khiển công suất phản kháng phía lưới

Công suất phản kháng phía lưới tính theo khung tham chiếu d-q:

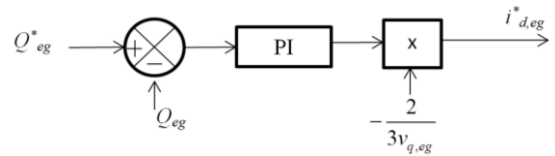
$$Q = 1,5(v_{d, eg} \cdot i_{q, eg} - v_{q, eg} \cdot i_{d, eg}) \tag{21}$$

Do điện áp $v_{d, eg} = 0$, sắp xếp lại phương trình trên ta được bộ điều khiển công suất phản kháng:

$$i_{d, eg}^* = -\frac{2}{3v_{q, eg}} \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (Q_{eg}^* - Q_{eg}) \tag{22}$$

Với Q_{eg}^* là công suất phản kháng tham khảo phía lưới.

Vậy, bộ điều khiển công suất phản kháng phía nghịch lưu được thể hiện như sau:



Hình 8: Bộ điều khiển công suất phía nghịch lưu

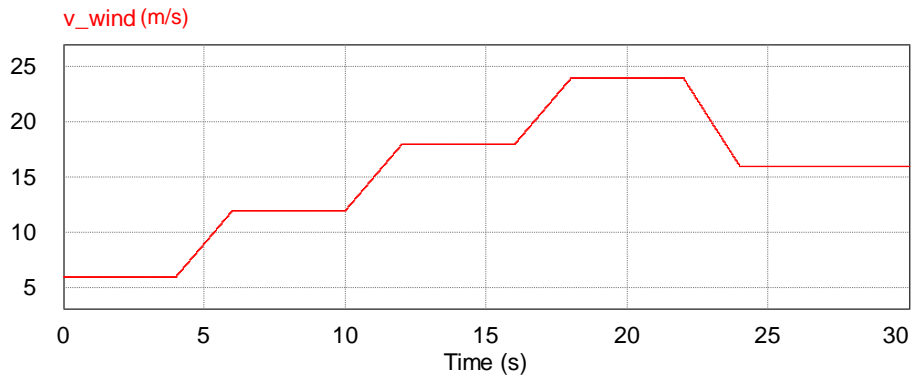
4 KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Để đánh giá hoạt động của hệ thống trong các điều kiện gió khác nhau và kiểm tra hiệu quả của các bộ điều khiển vừa thiết kế, hệ thống máy phát điện tuabin gió PMSG được mô phỏng bằng phần mềm mô phỏng PSIM trong trường hợp tốc độ gió thay đổi từ dưới định mức đến trên định mức tương ứng với tình huống hoạt động trong thực tế. Tốc độ gió định mức của tuabin gió là 12 m/s, giới hạn trên của tốc độ gió là 25 m/s và công suất định mức là 2 MW. Máy phát sử dụng cho hệ thống là máy phát điện nam châm vĩnh cửu với công suất 2 MW truyền động trực tiếp, thông số kỹ thuật của máy phát và tuabin gió được thể hiện trong Bảng 1.

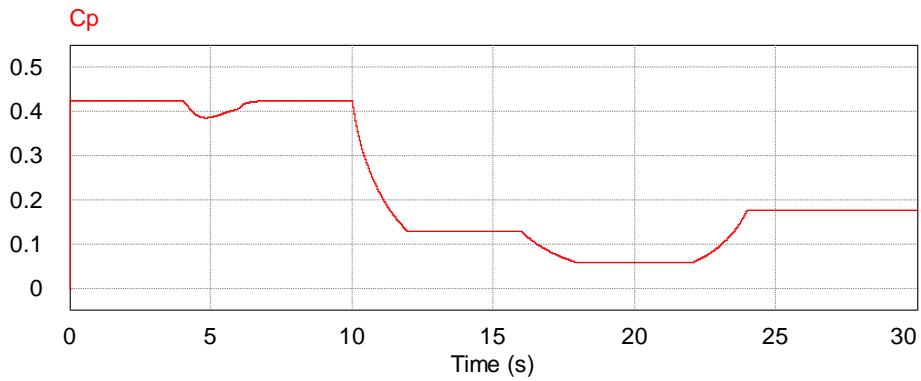
Bảng 1: Thông số máy phát và tuabin gió (Wu et al., 2011)

Công suất định mức	2,0 MW
Công suất biểu kiến định mức	2,2419 MVA
Điện áp dây định mức	690 V
Dòng điện stato định mức	1867,76 A
Tần số định mức	9,75 Hz
Hệ số công suất định mức	0,8921
Tốc độ quay định mức	22,5 vòng/phút
Số cặp cực	26
Mômen định mức	848826 Nm
Từ thông rôto liên kết	5,8264 Wb
Điện trở stato	0,821 mΩ
Điện cảm đồng bộ trục d, q	1,5731 mH
Bán kính cánh tuabin	40 m
Tỷ số tốc độ đầu cánh tối ưu	7,854
Tốc độ gió định mức	12 m/s
Giới hạn dưới của tốc độ gió	4 m/s
Giới hạn trên của tốc độ gió	25 m/s

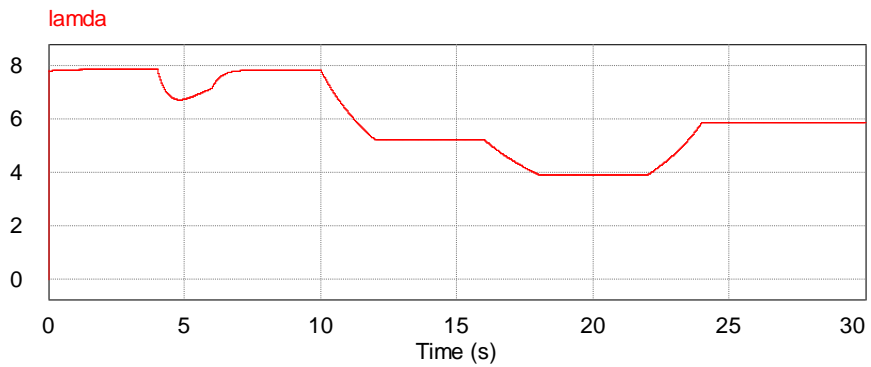
Mô phỏng hệ thống được thực hiện ở 5 tốc độ gió theo trình tự: 6 - 12 - 18 - 24 - 16 m/s và thời gian chuyển đổi giữa các tốc độ là 2 s (Hình 9) để đánh giá khả năng đáp ứng của hệ thống khi tốc độ gió thay đổi. Kết quả mô phỏng hoạt động của tuabin gió và máy phát điện PMSG được thể hiện như trong Hình 10 đến Hình 15.



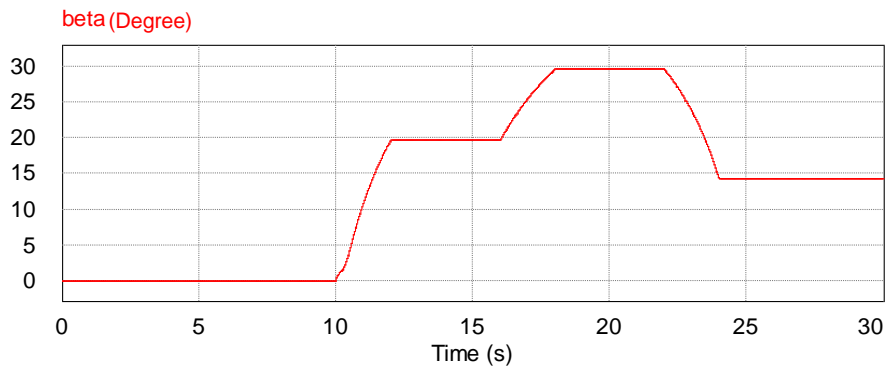
Hình 9: Tốc độ gió mô phỏng



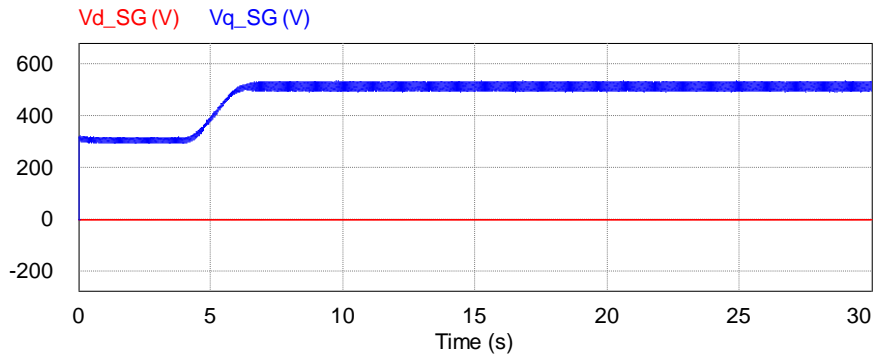
Hình 10: Hệ số công suất C_p



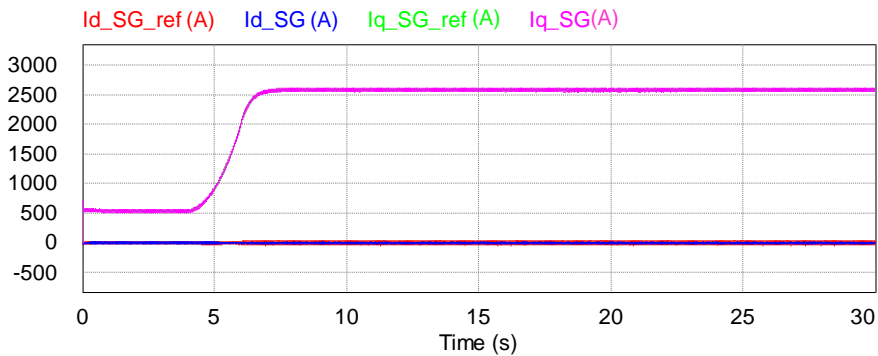
Hình 11: Tỷ số tốc độ đầu cánh



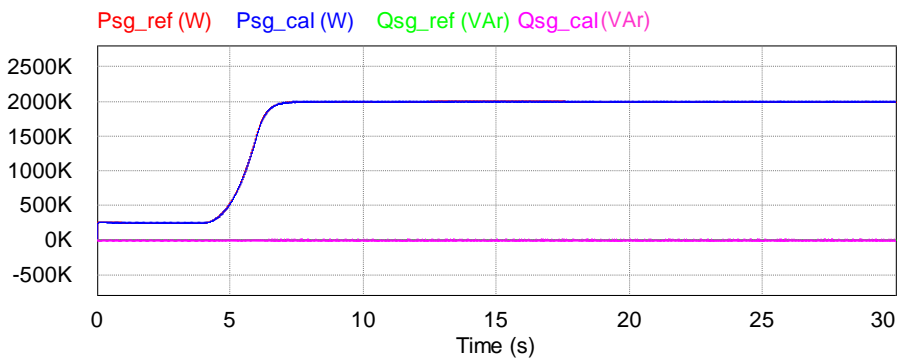
Hình 12: Góc lệch cánh



Hình 13: Điện áp máy phát trong khung tham chiếu d-q0917200116



Hình 14: Dòng điện tham khảo và dòng điện máy phát trong khung tham chiếu d-q



Hình 15: Công suất P, Q tham khảo và công suất máy phát

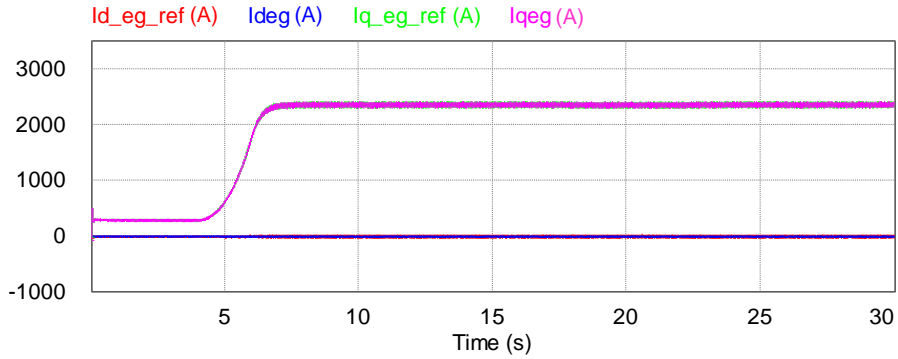
Theo Hình 10, khi tốc độ gió dưới 12 m/s, hệ số C_p điều chỉnh ở giá trị cực đại khi tốc độ gió ổn định. Trong quá trình thay đổi tốc độ gió từ 6 m/s lên 12 m/s, hệ số C_p bị giảm nhẹ do quán tính cánh tuabin nên tốc độ quay tăng chậm hơn tốc độ gió, sau khoảng 2,5 s, quay trở lại giá trị tối ưu. Khi tốc độ gió vượt qua tốc độ định mức 12 m/s, C_p giảm để đảm bảo tốc độ quay tuabin luôn là 22,5 vòng/phút. Tương tự như vậy, do tốc độ quay tuabin không đổi nên hệ số tốc độ đầu cánh giảm khi tốc độ gió tăng (Hình 11). Hình 12 cho thấy, khi tốc độ gió thấp, góc lệch cánh bằng 0° để nhận tối đa năng lượng từ gió. Khi tốc độ gió tăng dần, góc cánh tăng để giữ công suất cơ bằng định mức. Điện áp máy phát tăng khi

tốc độ quay tăng, cả 2 giá trị điện áp trong khung tham chiếu d-q đều ổn định khi tốc độ quay tuabin không đổi cho thấy điện áp đầu ra ổn định, điện áp v_d luôn bằng 0 (Hình 13). Dòng điện máy phát được thể hiện trong Hình 14, cả 2 giá trị dòng điện đều ổn định và bám theo dòng điện tham khảo. Tương tự như vậy, công suất đầu ra ổn định và bằng với công suất tham khảo, công suất P khởi đầu với 250 kW khi tốc độ gió ở 6 m/s và tăng đến cực đại là 2 MW khi tốc độ gió đạt từ 12 m/s trở lên, công suất Q được giữ bằng 0 trong suốt quá trình hoạt động (Hình 15).

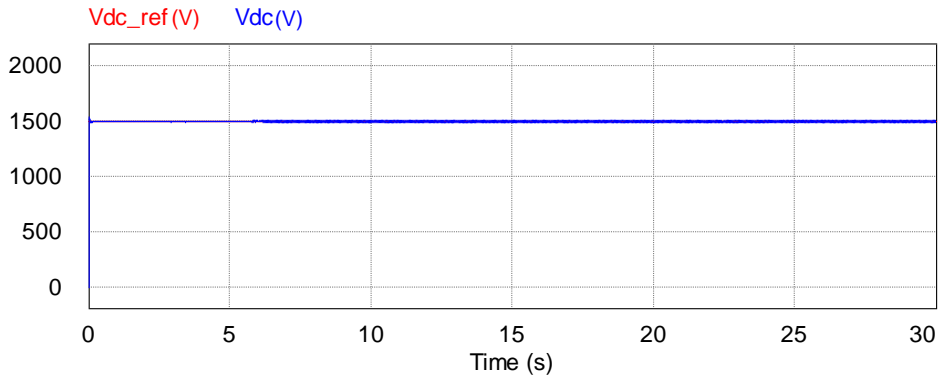
Hoạt động của bộ chuyển đổi phía lưới được thể hiện như trong Hình 16 đến Hình 18. Hình 16 cho

thấy dòng điện phía lưới trong hệ quy chiếu d-q có i_d thay đổi tương ứng công suất tác dụng phát lên lưới, i_d luôn giữ bằng 0 và cả 2 giá trị đều bám theo dòng điện tham khảo. Điện áp liên kết DC tham khảo được đặt ở 1500 V và giá trị đáp ứng luôn bằng giá trị tham khảo trong suốt quá trình hoạt động

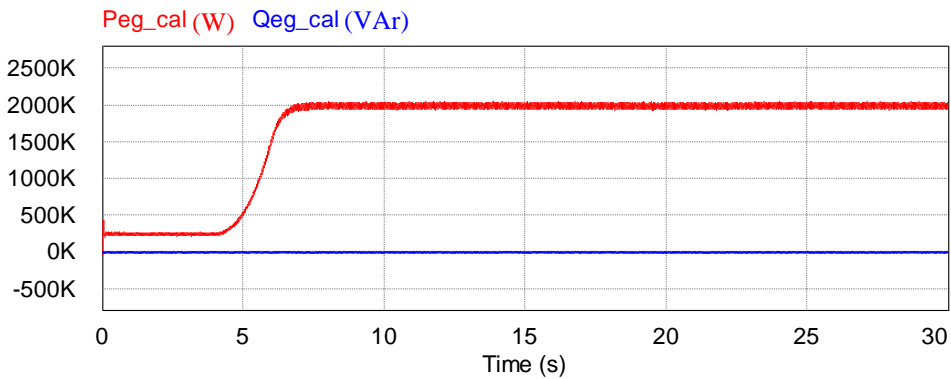
(Hình 17). Theo Hình 18, công suất P phát lên lưới ổn định ở 250 kW khi tốc độ gió 6 m/s, công suất tăng lên cực đại ở 2 MW tương ứng với công suất P phía máy phát do toàn bộ công suất máy phát đều được truyền lên lưới, công suất Q luôn bằng 0.



Hình 16: Dòng điện tham khảo và dòng điện phía lưới trong khung tham chiếu d-q



Hình 17: Điện áp liên kết DC



Hình 18: Công suất P, Q phát lên lưới

5 KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày được cấu tạo cơ bản và nguyên lý hoạt động của hệ thống máy phát điện tuabin gió PMSG. Để thu được công suất cực đại từ một tốc độ gió cố định, bộ điều khiển tìm điểm công suất cực đại đã được thiết kế. Bên cạnh đó, bài báo cũng đã thiết kế được các bộ điều khiển dòng điện, bộ điều khiển công suất và bộ điều khiển điện áp liên

kết DC cho bộ chuyển đổi AC-DC-AC. Nhằm kiểm tra hoạt động của hệ thống máy phát điện tuabin gió PMSG, kết quả mô phỏng trên phần mềm PSIM được thực hiện trong trường hợp tốc độ gió thay đổi tương ứng với điều kiện vận hành trong thực tế. Kết quả mô phỏng đã cho thấy rằng hệ thống điều khiển của máy phát điện tuabin gió PMSG hoạt động tốt và ổn định trong điều kiện tốc độ gió thay đổi. Đáp

ứng của dòng điện, điện áp liên kết DC và công suất luôn bám theo giá trị tham chiếu của chúng. Điều này chứng minh được hiệu quả của hệ thống điều khiển máy phát điện tuabin gió PMSG được thiết kế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Akhmatov, V., Nielsen, A.H., Pedersen, J.K., and Nymann, O., 2003. Variable-speed wind turbines with multi-pole synchronous permanent magnet generators. Part I: Modelling in dynamic simulation tools. *Wind Engineering*. 27(6): 531-548.
- Babu, B. and Divya, S., 2017. Comparative study of different types of generators used in wind turbine and reactive power compensation. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*. 2: 95-99.
- Elbeji, O., Hamed, M.B., and Sbita, L., 2014. PMSG wind energy conversion system: modeling and control. *International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application*. 3(3): 88-97.
- Keshavarz, S., 2011. Design and evaluation of an active rectifier for a 4.1 MW off-shore wind turbine. Master thesis. Chalmers University of Technology Göteborg. Sweden.
- Mellah, H. and Hemsas, K.E., 2013. Comparative performances analysis of different rotor types for PMSG used in wind turbine application. *International Journal of Advances in Power Systems (IJAPS)*. 1(1): 1-5.
- Polinder, H., Van der Pijl, F.F.A., De Vilder, G.J., and Tavner, P.J., 2006. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 21(3): 725-733.
- Popa, L.M. and Groza, V., 2010. Dynamic modeling, simulation and control strategies for 2 MW wind generating systems. *International Review on Modelling and Simulations*. 3(6): 1410-1418.
- Raducu, G.A., 2008. Control of grid side inverter in a B2B configuration for WT applications. Master Thesis. Aalborg University. Denmark.
- Wang, C.N., Lin, W.C., and Khoa, L.X., 2014. Modelling of a PMSG wind turbine with autonomous control. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014: 1-9. (<https://www.hindawi.com/journals/mpe/2014/856173/>)
- Wu, B., Lang, Y.Q., Zargari, N., and Kouro, S., 2011. Power conversion and control of wind energy systems. John Wiley & Sons, Inc.. Hoboken, New Jersey, 480 pages.