

ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ THUẬT TOÁN INC TRONG VIỆC BẮM ĐIỂM CÔNG SUẤT CỰC ĐẠI CỦA MÁY PHÁT ĐIỆN GIÓ PMSG

ASSESSMENT OF EFFECTIVENESS OF THE INC ALGORITHM IN MAXIMUM POWER POINT TRACKING OF PMSG WIND GENERATOR

Trịnh Thị Minh Thu^{1,*}, Vũ Văn Thùy¹,
Vũ Minh Hiếu¹, Nguyễn Minh Quân¹,
Đào Thị Lan Phương¹, Nguyễn Văn Hùng¹

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.360>

TÓM TẮT

Tối đa hóa công suất phát vào lưới điện là bài toán quan trọng đối với các nguồn điện phân tán. Nguồn điện gió với tốc độ gió thay đổi ngẫu nhiên và công nghệ khác nhau với mỗi phát điện khiến việc tìm điểm công suất cực đại trở nên phức tạp hơn. Thuật toán INC được sử dụng rộng rãi nhằm thiết kế bộ điều khiển bám điểm công suất cực đại trong các nguồn điện gió. Bài báo tiến hành đánh giá hiệu quả thuật toán INC trong việc xây dựng bộ điều khiển bám điểm công suất cực đại nguồn điện gió sử dụng máy phát PMSG. Bài báo cũng đã tiến hành mô phỏng và đánh giá hiệu quả của thuật toán trên công cụ Matlab/Simulink.

Từ khóa: Nguồn điện gió, PMSG, MPPT, INC.

ABSTRACT

Maximizing power generation into the grid is an important issue for distributed power sources. Wind power sources with randomly varying wind speeds and different technologies with each generator make it more complicated to find the maximum power point. The INC algorithm is widely used to design the maximum power tracking controller in wind power sources. The article evaluates the efficiency of the INC algorithm in building a tracking controller for maximum power of wind power using PMSG generator. The article also simulated and evaluated the efficiency of the algorithm on Matlab/Simulink tool.

Keywords: Wind Generator, PMSG, MPPT, INC

¹Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: tminhthu946@gmail.com

Ngày nhận bài: 30/6/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 07/9/2024

Ngày chấp nhận đăng: 28/11/2024

1. GIỚI THIỆU

Năng lượng gió ngày càng đóng vai trò quan trọng trong hệ thống năng lượng đặc biệt với các lưới điện nhỏ có chế độ làm việc độc lập. Đa dạng hệ thống máy phát gắn với tuabin gió giúp việc phát triển nhanh chóng các trang trại gió phù hợp với điều kiện tự nhiên tại mỗi khu vực [1].

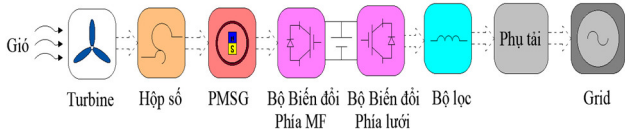
Máy phát điện đồng bộ sử dụng nam châm vĩnh cửu PMSG cung cấp một giải pháp tối ưu cho các tuabin gió hoạt động với tốc độ gió thay đổi vì tính ổn định và an toàn của nó trong quá trình hoạt động, đồng thời không cần nguồn điện một chiều để kích từ. Do không có cuộn dây kích thích nên trọng lượng nhẹ hơn, mức độ phát nóng thấp hơn, không có tổn hao trên cuộn dây kích thích cho nên có hiệu suất cao hơn; đặc biệt là không có hệ thống chổi than vành trượt nên làm việc tin cậy hơn. Điều khiển đơn giản nên dễ bảo đảm ổn định ngắn hạn và dài hạn. Đây là ưu điểm mang tính quyết định khi vận hành với lưới công suất nhỏ [2].

Do đặc tính ngẫu nhiên của gió, hệ thống nguồn điện gió sử dụng PMSG cần được nối với lưới thông qua hệ thống bộ biến đổi công suất. Hệ thống bộ biến đổi công suất giúp hệ thống nguồn điện gió hoạt động đồng bộ cùng lưới điện [3].

Tuy nhiên, khi mà vận tốc gió luôn thay đổi, công suất tác dụng của máy phát PMSG thay đổi và không đảm bảo đạt được công suất phát cực đại của máy phát với từng trường hợp vận tốc gió khác nhau gây lãng phí và không tối ưu giá trị kinh tế có thể mang lại. Để bám điểm công suất cực đại trong hệ thống, thuật toán INC (*Incremental Conductance*) được sử dụng trong bài báo.

2. MÔ HÌNH NGUỒN ĐIỆN GIÓ SỬ DỤNG PMSG

2.1. Sơ đồ khối



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc của hệ thống điện gió PMSG

Năng lượng gió tác động và làm cánh quạt tuabin quay, trục của cánh quạt tuabin được nối với trục chính và tốc độ quay được tăng tốc thông qua hộp số, tốc độ quay sau khi được chuyển đổi được đưa vào một máy phát điện có tốc độ tiêu chuẩn và ổn định thông qua trục truyền. Sơ đồ khối tổng thể của hệ thống tuabin gió PMSG được trình bày trong hình 1, hệ thống điều khiển gồm ba khối chính (i) khối điều khiển cho bộ chuyển đổi phía máy phát, (ii) khối tìm điểm công suất cực đại, (iii) khối điều khiển cho bộ chuyển đổi phía nối lưới.

2.2. Mô hình toán học tuabin gió

Tuabin gió hoạt động theo nguyên lý chuyển động năng của gió thành cơ năng làm quay trục roto của máy phát. Biểu thức công suất cơ mà tuabin nhận được từ luồng gió:

$$P_{wind} = \rho A_r V_w^3 \quad (1)$$

Trong đó: P_{wind} là công suất của luồng gió (W), ρ là mật độ không khí (kg/m^3) ($\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$), A_r là diện tích quét ngang của cánh tuabin (m^2), V_w tốc độ gió (m/s).

Trong các trường hợp thực tế, tuabin gió sẽ luôn có một hiệu suất công suất nhỏ hơn hiệu suất Betz. Công suất thu được từ gió cho mục đích mô phỏng được đưa ra:

$$P_m = 0,5\rho A_r V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2)$$

Trong đó: P_m là công suất cơ, A_r là diện tích che phủ bởi cánh quạt, với R bán kính cánh quạt tuabin, $C_p(\lambda, \beta)$ là hệ số công suất của tuabin, λ là tỷ lệ tốc độ đầu cánh, β là góc lật cánh.

Tỷ lệ tốc độ đầu cánh được tính theo công thức:

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{V_w} \quad (3)$$

Với ω_m là vận tốc góc của tuabin.

Do tốc độ gió luôn thay đổi, để thu nhận được tối đa công suất từ gió, hệ số C_p được tối ưu bằng kiểm soát hệ số tốc độ đầu cánh λ ($\beta = 0$) của tuabin. Hệ số công suất của tuabin (C_p) được thể hiện như sau:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (4)$$

Với $c_1 = 0,5176$; $c_2 = 116$; $c_3 = 0,4$; $c_4 = 5$; $c_5 = 21$; $c_6 = 0,0068$

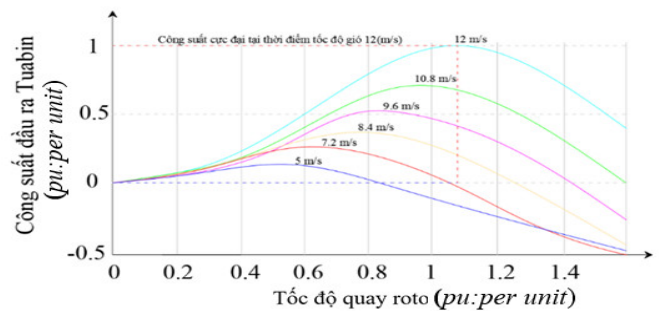
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} + \frac{0,035}{1 + \beta^3} \quad (5)$$

Mối quan hệ giữa moment cơ T_m và công suất cơ P_m được cho bởi biểu thức:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (6)$$

Trong đó: T_m là momen cơ sinh ra bởi tuabin (N.m)

Như đã đề cập ở trên, do sự phụ thuộc vào λ ($\beta = 0$), giá trị của C_p có thể được đạt đến cực đại thông qua việc điều chỉnh vận tốc roto tại một cột mốc mà tốc độ gió xác định. Đây chính là một trong những yêu cầu của hệ thống MPPT [4]. Một nhóm các đường cong $P_m - V_w$ điển hình ứng với các giá trị tốc độ gió khác nhau được trình bày như hình dưới đây, cho thấy rằng luôn tồn tại giá trị cực đại P_m xét trên đơn vị tương đối như hình 2.



Hình 2. Đặc tính công suất tải

2.3. Mô hình máy phát PMSG

Để thuận lợi trong quá trình mô hình hóa và xây dựng các mô hình điều khiển, hệ trục tọa độ dq được sử dụng thay thế cho hệ trục tọa độ abc. Việc chuyển đổi các đại lượng trên trục tọa độ abc sang hệ trục tọa độ vuông góc quay dq được dựa trên công thức biến đổi [5].

Ma trận chuyển đổi từ hệ tọa độ abc sang hệ tọa độ dq được biểu diễn như sau:

$$\begin{pmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Trong biểu thức (7) các đại lượng điện áp stato, dòng điện stato, từ thông liên kết tương ứng. Theo điều kiện

cân bằng $U_0 = 0$, điện áp trong máy phát điện có thể được mô tả trong hệ tọa độ dq như sau:

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} + L_d \cdot \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_e \cdot L_d \cdot i_{qs} \\ v_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + L_q \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_e \cdot L_d \cdot i_{ds} + \omega_e \cdot \psi_r \end{aligned} \quad (8)$$

Trong đó:

v_{ds}, v_{qs} là điện áp stator tức thời trong hệ tọa độ dq.

i_{ds}, i_{qs} là dòng stator tức thời trong hệ tọa độ dq.

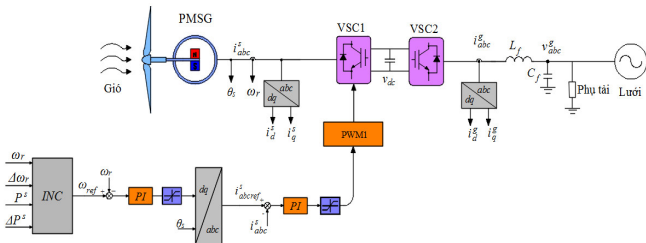
L_d, L_q là điện cảm theo trục d và trục q.

ω_e là tốc độ góc của roto.

ψ_r là từ thông (đỉnh) tạo ra do nam châm vĩnh cửu gắn trên roto.

2.4. Mô hình hệ thống biến đổi

2.4.1. Bộ biến đổi phía máy phát



Hình 3. Khối điều khiển công suất phía máy phát

Trong hệ thống tuabin gió PMSG, ba thông số của hệ thống cần phải được kiểm soát một cách chặt chẽ:

- Tối ưu hóa công suất tạo ra bởi PMSG ở các tốc độ gió khác nhau.
- Công suất tác dụng và công suất phản kháng khi kết nối với lưới điện.
- Điện áp DC của bộ biến đổi lưỡng đối lưỡng.

Bộ biến đổi phía máy phát điều chỉnh giá trị mômen thông qua điều chỉnh tốc độ quay của roto của máy phát PMSG để thực hiện bám điểm công suất cực đại. Đồng thời, bộ biến đổi kết nối lưới kiểm soát điện áp V_{dc} của bộ biến đổi lưỡng đối lưỡng và kiểm soát công suất tác dụng và công suất phản kháng đưa vào lưới.

Hệ thống tuabin gió PMSG hoạt động phụ thuộc vào tốc độ gió. Cụ thể, khi tốc độ gió thấp hơn giá trị 4m/s, công suất được tạo bởi hệ thống PMSG không đủ để bù lại tổn hao khi hệ thống làm việc, do vậy tuabin gió sẽ không hoạt động do được hãm bằng hệ thống cơ khí.

Khi tốc độ gió lớn hơn giá trị 4m/s và nằm trong giá trị định mức, hệ thống tuabin gió PMSG hoạt động và tạo ra điện, đồng thời bộ biến đổi phía máy phát làm việc ở chế

độ theo dõi điểm công suất cực đại, cần chú ý kiểm soát MPPT để đảm bảo công suất thu được là tối đa ứng khi mà giá trị vận tốc gió luôn thay đổi. Chế độ MPPT kết thúc khi tốc độ gió lớn hơn giá trị định mức.

Giá trị công suất sẽ được giữ ở giá trị công suất định mức khi tốc độ gió lớn hơn giá trị tốc độ gió định mức, tuy nhiên khi mà công suất tạo ra bởi hệ thống lớn hơn công suất định mức, nếu ở chế độ này MPPT vẫn hoạt động, điều này sẽ gây hư hỏng thiết bị. Trong trường hợp này, góc cánh quạt tuabin cần được kiểm soát để giữ cho công suất không vượt quá giá trị định mức và được duy trì nằm trong ngưỡng giá trị định mức

Giá trị mômen của một máy phát PMSG được thể hiện như sau:

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{\rho}{2} \right) (\psi_r i_{qs} + (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}) \quad (9)$$

Điện cảm theo trục d và trục q là bằng nhau nên biểu thức được đơn giản hóa lại như sau:

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{\rho}{2} \right) \psi_r i_{qs} \quad (10)$$

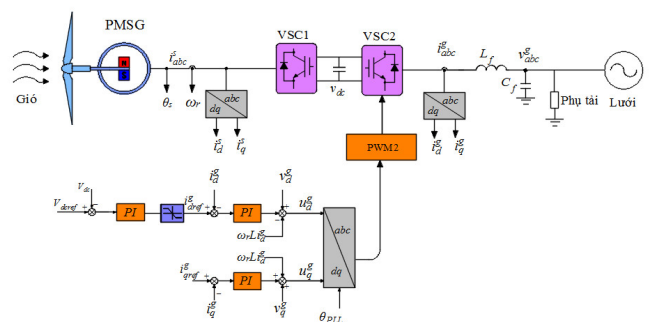
Nhận thấy mômen điện từ có thể được kiểm soát thông qua kiểm soát dòng điện trục q bởi mối quan hệ giữa mômen điện từ và dòng điện trục q là mối quan hệ tuyến tính và từ thông liên kết tạo ra bởi nam châm vĩnh cửu là một hằng số.

Bộ biến đổi phía máy phát được điều khiển chính bởi vòng lặp điều khiển dòng điện được thể hiện trên hình 3. Với các tín hiệu đầu vào là các sai lệch dòng điện đo được so với dòng tham chiếu, tín hiệu đầu ra là các tín hiệu điện áp được đưa vào bộ tạo xung điều khiển PWM được tính toán như sau:

$$u_d^s = v_d^s + k_p (i_{dref}^s - i_d^s) + k_i \int (i_{dref}^s - i_d^s) \quad (11)$$

$$u_q^s = v_q^s + k_p (i_{qref}^s - i_q^s) + k_i \int (i_{qref}^s - i_q^s) \quad (12)$$

2.4.2. Bộ biến đổi phía lưới



Hình 4. Khối điều khiển công suất phía lưới

Khác với các máy phát đồng bộ truyền thống nối lưới trực tiếp, đa phần các nguồn năng lượng tái tạo như điện gió, điện mặt trời hay các bộ lưu điện được kết nối với lưới điện thông qua các bộ biến đổi AC-DC và DC-AC. Vòng lặp điều khiển bộ biến đổi nối lưới được hình thành dựa trên vòng lặp điều khiển điện áp ở phía ngoài và vòng lặp điều khiển dòng điện ở phía bên trong.

Vòng lặp điều khiển điện áp với biến trạng thái là điện áp trên điện dung đầu ra bộ biến đổi và biến đầu ra là dòng điện tham chiếu đưa vào vòng lặp điều khiển dòng điện.

$$i_d = k_{pv}(v_{dref} - v_d^g) + k_{iv} \int (v_{dref} - v_d^g) \quad (13)$$

$$i_q = k_{pv}(v_{qref} - v_q^g) + k_{iv} \int (v_{qref} - v_q^g) \quad (14)$$

Giả thiết quá trình động học của vòng lặp điều khiển dòng điện phía trong diễn ra nhanh hơn rất nhiều lần quá trình động học vòng lặp điện áp phía ngoài, do đó với vòng lặp điện áp có thể chấp nhận $i_d \approx i_{dref}^g$ và $i_q \approx i_{qref}^g$.

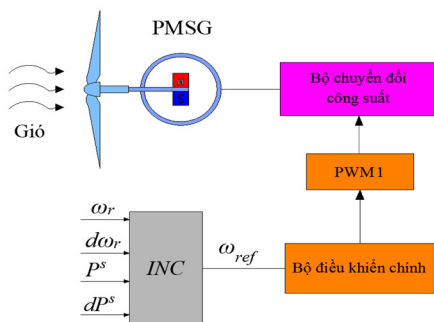
Vòng lặp điều khiển dòng điện với biến trạng thái là dòng trên điện kháng đầu ra bộ biến đổi:

$$u_d^g = k_{pc}(i_{dref}^g - i_d^g - \omega_r C v_q^g) + k_{ic} \int (i_{dref}^g - i_d^g - \omega_r C v_q^g) + v_d^g - \omega_r L i_q^g \quad (15)$$

$$u_q^g = k_{pc}(i_{qref}^g - i_q^g + \omega_r C v_d^g) + k_{ic} \int (i_{qref}^g - i_q^g + \omega_r C v_d^g) + v_q^g + \omega_r L i_d^g \quad (16)$$

3. MÔ HÌNH ĐỐI TƯỢNG CẦN ĐÁNH GIÁ

Cách dò tìm vị trí MPP bằng cách sử dụng thuật toán INC là phương pháp được đề xuất bằng cách sử dụng chiến lược tối ưu hóa toán học. Phương pháp này là theo dõi sự nhiễu loạn của các biến điều khiển là tốc độ của rôto và sự thay đổi của công suất ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ thống nguồn điện gió.

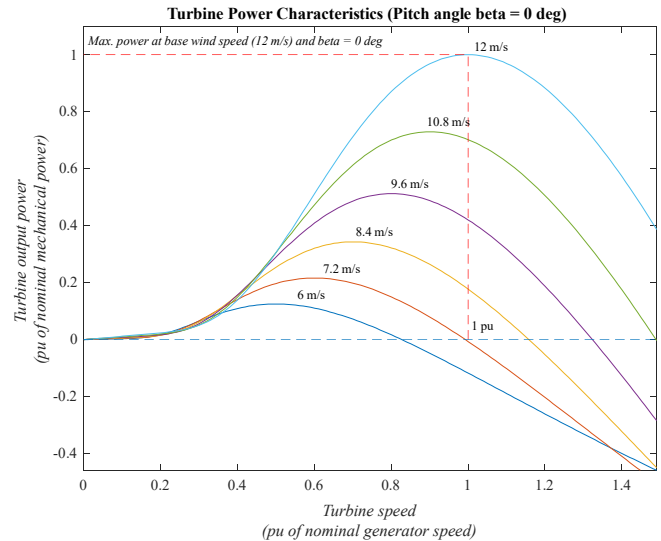


Hình 5. Mô hình bộ điều khiển sử dụng thuật toán INC

Sự cần thiết của cảm biến như máy đo gió và kiến thức về các tham số WT được loại bỏ bằng cách sử dụng thuật

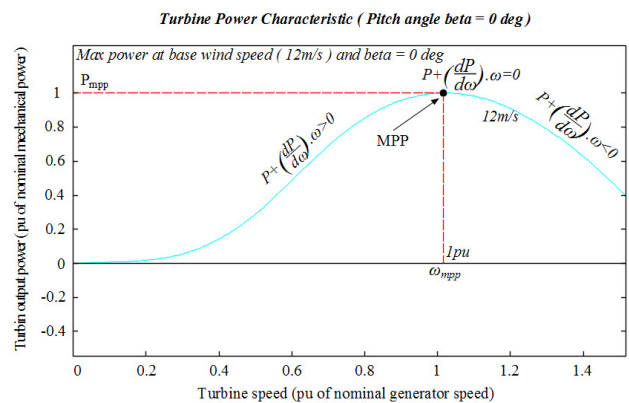
toán INC, kết quả là tăng độ tin cậy và hiệu quả [6, 7]. Những thay đổi trong tốc độ rôto và công suất được sử dụng để xác định ω_{ref} . Sơ đồ điều khiển được thể hiện trong hình 5.

Trong thuật toán INC, công suất thu được được điều chỉnh cùng với tốc độ của máy phát để có được độ dốc bằng không cho đường cong P - ω .



Hình 6. Đường cong đặc tính công suất P - ω

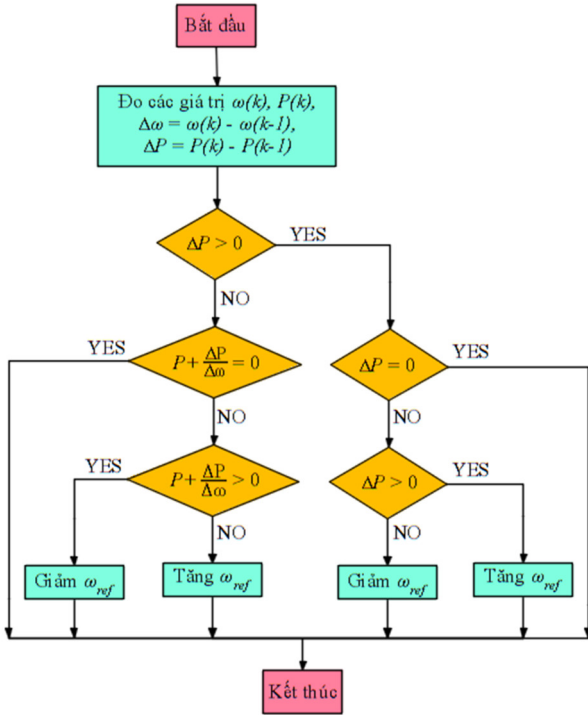
Phương pháp INC dựa trên tính chất $P + (dP/d\omega) \cdot \omega$ của đặc tính P - ω của tuabin, $P + (dP/d\omega) \cdot \omega$ dương khi ở phía bên trái MPP và âm khi ở phía bên phải MPP. Hình 7 thể hiện đường cong đặc tính của P - ω .



Hình 7. Đường cong đặc tính P - ω hiển thị điểm MPP

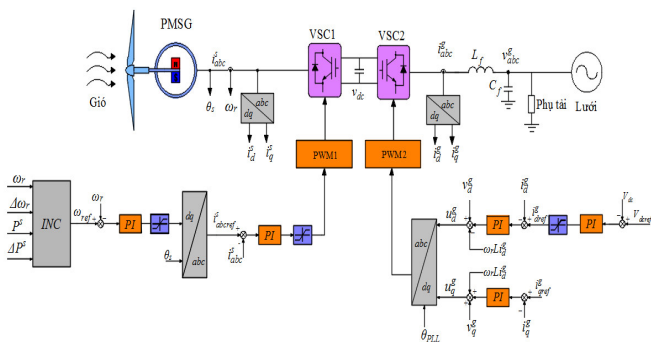
INC là một phương pháp tương đối đơn giản và được sử dụng khá thông dụng. Thuật toán này xem xét sự tăng, giảm tốc độ rôto và công suất theo chu kỳ để tìm được điểm làm việc có công suất lớn nhất (P_{mpp}) và ω_{mpp} . Nếu sự biến thiên của tốc độ rôto làm công suất tăng lên thì sự biến thiên tiếp theo sẽ giữ nguyên chiều hướng biến thiên của rôto. Ngược lại, nếu sự biến thiên làm công suất giảm xuống thì sự biến thiên tiếp theo sẽ có chiều hướng thay đổi ngược lại. Khi điểm làm việc có công suất lớn

nhất được xác định trên đường cong đặc tính P - ω thì sự biến thiên tốc độ roto sẽ dao động xung quanh điểm làm việc có công suất lớn nhất đó. Việc xác định điểm MPPT bằng INC được thực hiện như trên hình 8, bằng cách điều chỉnh tín hiệu tham chiếu ω_{ref} dựa trên dấu của biểu thức P + (dP/dω).ω.



Hình 8. Thuật toán INC

Hệ thống điều khiển hai tầng tuabin nối lưới ba pha bao gồm bộ điều khiển dòng điện, điện áp, bộ bám điểm công suất cực đại được ghép nối tích hợp trong hình 9 bằng phần mềm Matlab/Simulink. Phía điện áp xoay chiều sau bộ biến đổi công suất được kết nối mạch lọc LCL trước khi nối lưới.

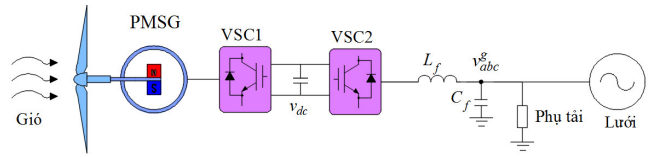


Hình 9. Sơ đồ điều khiển hệ thống tuabin lưới

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Nhằm đánh giá tính hiệu quả của xây dựng mô hình máy phát điện gió PMSG có bộ bám điểm công suất cực đại. Trong điều kiện vận tốc gió thay đổi. Lưới điện nghiên

cứu trong hình 10 được xây dựng bởi phần mềm Matlab/Simulink.



Hình 10. Sơ đồ hệ thống lưới điện nghiên cứu

Thông số các phần tử của hệ thống được thể hiện trong bảng 1 và 2.

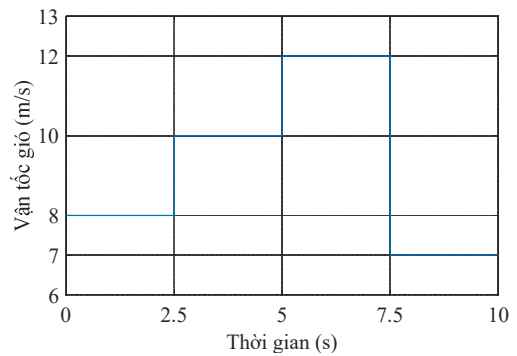
Bảng 1. Phụ tải

S _{tải} = 300kVA					
L	0,84mH	R _L	2,2mΩ	C _{f1}	2mF
k _{pc}	2,5	k _p	4	k _i	10
k _{ic}	625	k _q	125	k _{iv}	100

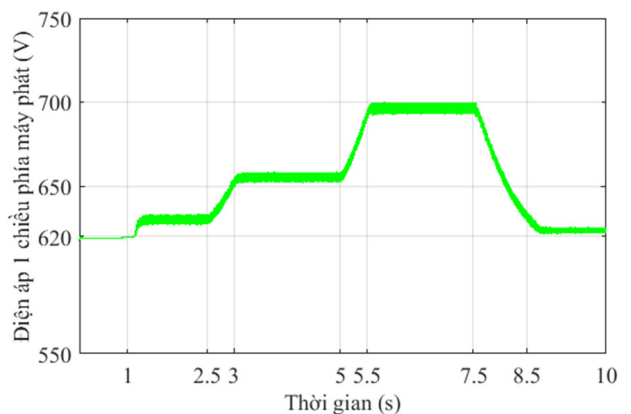
Bảng 2. Tuabin và động cơ PMSG

Tuabin		PMSG			
P _{đm} (W)	300.10 ³	R _s (Ω)	0,17	J (kg.m ²)	110
S _{đm} (VA)	330.10 ³	L _a (H)	8,35.10 ⁻⁴	T _f (Nm)	18

Trong quá trình vận hành tuabin gió có thể nhận thấy vận tốc gió khác nhau song bộ điều khiển MPPT giúp ổn định điện áp một chiều phía tuabin. Điều này được thể hiện trong kết quả mô phỏng trong hình 12.

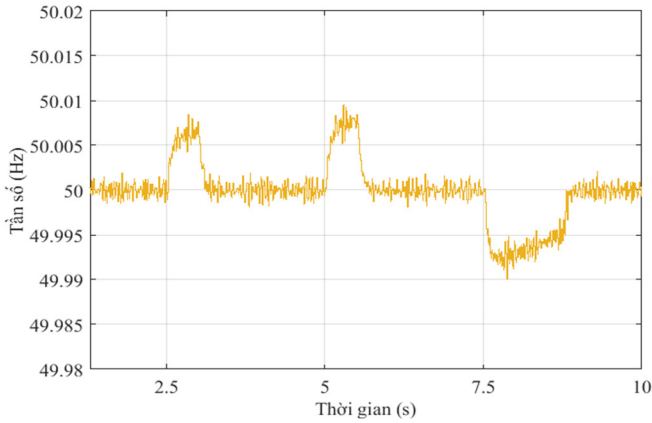


Hình 11. Vận tốc gió



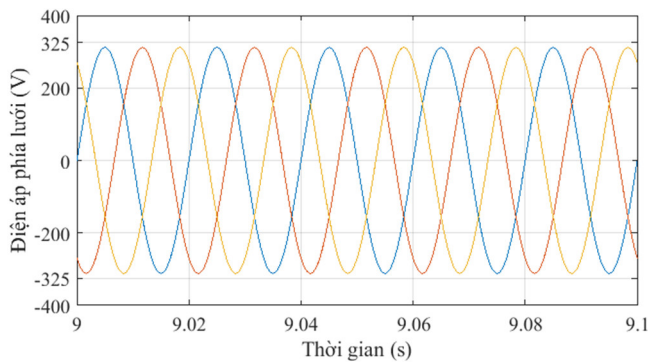
Hình 12. Điện áp một chiều V_{dc}

Tại thời điểm ban đầu tốc độ gió là 8m/s và tải hoạt động với công suất $P = 300\text{kW}$, $Q = 2\text{kVAr}$. Thời điểm 2,5s hệ thống hoạt động với tốc độ gió là 10 m/s, xét tiếp tại các thời điểm 5s, 7,5s. Quan sát sự đáp ứng của công suất khi gió thay đổi sử dụng bộ bám điểm công suất cực đại.

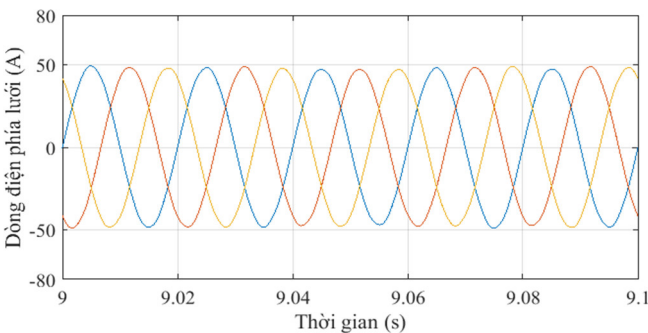


Hình 13. Tần số phía lưới

Kết quả mô phỏng sự thay đổi công suất tác dụng của máy phát PMSG cho ra kết quả như hình 16. Giá trị điện áp và dòng điện không đổi khi vận tốc gió là 7m/s được thể hiện trong các hình 14, 15 lần lượt với điện áp V_{abc} , I_{abc} .



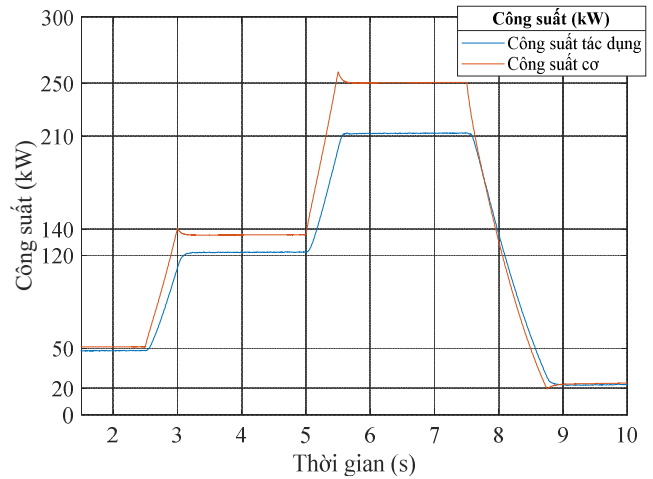
Hình 14. Điện áp xoay chiều 3 pha phía lưới



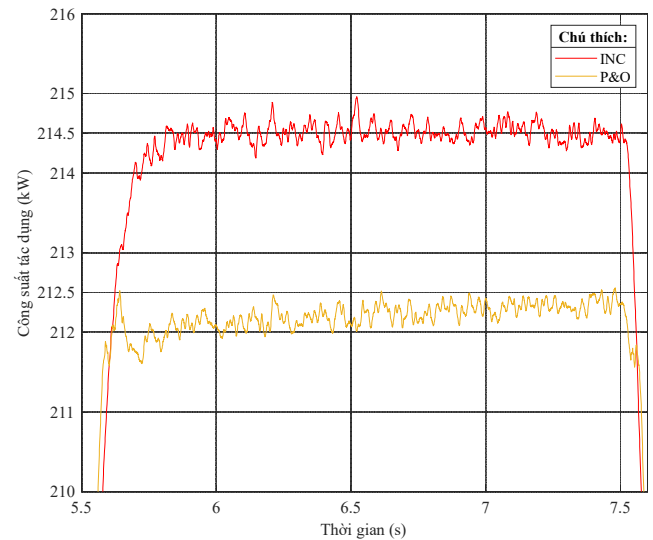
Hình 15. Dòng điện xoay chiều 3 pha phía lưới

Kết quả thể hiện trong hình 16 cho thấy, thuật toán INC đáp ứng tốt trong các điều kiện tốc độ gió thay đổi. Cần xét đến hiệu suất khi chuyển đổi từ cơ năng sang điện năng do tổn hao điện trở, cuộn cảm trên máy phát ảnh hưởng đến công suất tác dụng thu được. Khi tốc độ gió

thay đổi trong khoảng 8m/s lên 12m/s và khi tốc độ gió xuống dưới tốc độ định mức, công suất tác dụng máy phát điện PMSG phát ra bám sát công suất cơ trên tuabin gió. Khi tốc độ gió đạt 7m/s hay 8m/s chênh lệch công suất phát của máy phát thu hẹp với công suất tuabin, trong khi tốc độ gió tăng đến 12m/s sự chênh lệch công suất bị nới rộng hơn.



Hình 16. Đối chiếu giá trị công suất tác dụng và công suất cơ thu được



Hình 17. Đối chiếu giá trị công suất tác dụng giữa hai thuật toán P&O và INC

Hình 17 mô phỏng và so sánh công suất tác dụng khi dùng thuật toán INC và khi dùng thuật toán P&O, để thấy thuật toán INC đáp ứng tốt hơn, công suất tác dụng nhận được nhiều hơn so với thuật toán P&O. Thuật toán INC yêu cầu sự tính toán phức tạp hơn trong bộ điều khiển, nhưng có thể theo dõi các điều kiện thay đổi và đáp ứng công suất tốt hơn thuật toán P&O.

5. KẾT LUẬN

Trong các điều kiện tốc độ gió thay đổi, máy phát đồng bộ nam châm vĩnh cửu được sử dụng nhờ đặc tính

hoạt động ổn định, không cần hệ thống chổi than, vành trượt và hệ thống kích từ một chiều. Máy phát được kết nối với lưới thông qua hai bộ biến đổi công suất phía máy phát và phía lưới. Tuy nhiên, do sự thiếu ổn định của tốc độ gió dẫn đến công suất gió nhận được chưa phải là tối ưu. Sử dụng bộ bám điểm công suất cực đại nhằm giúp giá trị momen của máy phát PMSG là tối ưu qua đó cải thiện công suất gió nhận được. Bài báo đã tiến hành xây dựng mô hình hệ thống máy phát điện gió PMSG có kết hợp với bộ bám điểm công suất cực đại INC và phân tích sự đáp ứng công suất của hệ thống máy phát gió sử dụng nam châm vĩnh cửu PMSG khi có các yếu tố gây mất cân bằng công suất tác dụng. Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình điều khiển sử dụng bộ bám điểm công suất cực đại cho đáp ứng công suất tốt.

LỜI CẢM ƠN

Nội dung nghiên cứu là kết quả thuộc đề tài nghiên cứu khoa học sinh viên năm 2022 - 2023 của Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội. Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội đã hỗ trợ kinh phí thực hiện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Blaabjerg Frede, Ionel Dan M., *Renewable Energy Devices and Systems with Simulations in MATLAB[®] and ANSYS[®]*. CRC Press, 2016.
- [2]. J. Xi, H. Geng, G. Yang, S. Ma, "Inertial response analysis of PMSG-based WECS with VSG control," *The Journal of Engineering*, 2017, 13, 897-901, 2017.
- [3]. H. S. Hlaing, J. Liu, H. Bevrani, T. Ise, "PMSG control for a stand-alone gas engine generator using active rectifier and VSG-controlled inverter," *Energies (Basel)*, 13, 1, 2020.
- [4]. A. M. Eid, M. Abdel-Salam, M. Tharwat Abdel-Rahman, "Vertical-axis wind turbine modeling and performance with axial-flux permanent magnet synchronous generator for battery charging applications," in *2006 Eleventh International Middle East Power Systems Conference*, IEEE, El-Minia, Egypt, 2006.
- [5]. P. Kundur, *Power system stability and control*. New York (N.Y.): McGraw-Hill, 1994.
- [6]. H. H. H. Mousa, A. R. Youssef, E. E. M. Mohamed, "Modified P&O MPPT algorithm for optimal power extraction of five-phase PMSG based wind generation system," *SN Appl Sci*, 1, 8, 838, 2019.
- [7]. I. Houssamo, F. Locment, M. Sechilariu, "Experimental analysis of impact of MPPT methods on energy efficiency for photovoltaic power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 46, 1, 98-107, 2013.

AUTHORS INFORMATION

**Trinh Thi Minh Thu, Vu Van Thuy, Vu Minh Hieu,
Nguyen Minh Quan, Dao Thi Lan Phuong, Nguyen Van Hung**

Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam