

DOI:10.22144/ctu.jvn.2023.047

NGHIÊN CỨU CÁC THUẬT TOÁN DÒ TÌM ĐIỂM CÔNG SUẤT CỰC ĐẠI P&O VÀ FLC CHO MÁY PHÁT ĐIỆN GIÓ PMSG

Nguyễn Thái Sơn^{1*}, Nguyễn Chánh Nghiệm² và Quách Ngọc Thịnh¹

¹Khoa Kỹ thuật điện, Trường Bách khoa, Trường Đại học Cần Thơ

²Khoa Tự động hóa, Trường Bách khoa, Trường Đại học Cần Thơ

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Nguyễn Thái Sơn (email: thaison@ctu.edu.vn)

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 29/10/2022

Ngày nhận bài sửa: 18/11/2022

Ngày duyệt đăng: 11/12/2022

Title:

A study on P&O and FLC maximum power point tracking algorithms based on PMSG wind turbine generator

Từ khóa:

Điểm công suất cực đại, máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu, thuật toán điều khiển mờ, tuabin gió

Keywords:

MPPT, PMSG, FLC, wind turbine

ABSTRACT

The main objective of wind energy system is to convert wind energy into electric energy via a wind turbine system. To obtain the maximum power from a wind energy conversion system, many algorithms to find the maximum power point (MPPT - Maximum Power Point Tracking) have been studied and applied. This paper will analyze and compare different algorithms to find the maximum power point from the Wind Energy Conversion System based on a PMSG (Permanent magnet synchronous generator) wind generator 200 W. These algorithms are the perturbation and observation (P&O) and fuzzy logic control (FLC). The simulation results have shown that the FLC algorithm is superior and more efficient than the P&O algorithm in terms of stability, faster tracking ability and response.

TÓM TẮT

Mục đích chính của hệ thống điện gió là chuyển đổi năng lượng gió thành điện năng thông qua hệ thống tuabin gió. Để thu được công suất lớn nhất từ hệ thống điện gió, nhiều thuật toán tìm điểm công suất cực đại (MPPT - Maximum Power Point Tracking) đã từng được nghiên cứu và áp dụng. Bài báo này sẽ phân tích và so sánh các thuật toán điều khiển khác nhau để tìm điểm công suất cực đại từ hệ thống chuyển đổi năng lượng gió dựa trên máy phát điện gió PMSG (Permanent magnet synchronous generator) 200 W. Các thuật toán được so sánh là thuật toán nhiễu loạn và quan sát (P&O) và thuật toán điều khiển mờ. Kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán điều khiển mờ vượt trội và hiệu quả hơn thuật toán P&O về tính ổn định, khả năng theo dõi điểm công suất cực đại và đáp ứng nhanh hơn.

1. GIỚI THIỆU

Sự phát triển nhanh chóng của khoa học kỹ thuật trong thời gian gần đây, con người ngày càng thấy rõ tầm quan trọng của việc khai thác và sử dụng các nguồn năng lượng một cách bền vững. Trong bối cảnh các nguồn năng lượng hóa thạch như: than, dầu mỏ, khí đốt,... đang dần cạn kiệt và trở nên khan

hiếm, sự biến đổi khí hậu, hiệu ứng nhà kính là những vấn đề nóng hổi, đây là một trong những thách thức lớn đối với toàn nhân loại vì chúng đang ảnh hưởng trực tiếp đến sinh thái, môi trường và cuộc sống của con người (Dương và ctv., 2021).

Trước tình hình đó, một yêu cầu cấp thiết được đặt ra cho các nhà khoa học cũng như các ngành

khoa học kỹ thuật là tìm ra một nguồn năng lượng mới để thay thế các nguồn năng lượng truyền thống và đáp ứng nhu cầu sử dụng đang gia tăng hằng ngày. Với sự tiến bộ về khoa học kỹ thuật như hiện nay thì con người dần biết đến và khai thác các nguồn năng lượng sạch như: năng lượng mặt trời, địa nhiệt, sinh khối,... Hệ thống máy phát điện gió trở thành nguồn năng lượng tái tạo quan trọng vì nó cung cấp nhiều lợi thế như không tốn chi phí nhiên liệu, không ô nhiễm, đòi hỏi ít bảo trì giữa các nguồn năng lượng tái tạo khác (Borkar et al., 2015).

Máy phát điện gió khá đa dạng và phong phú. Tuy nhiên, máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSG) là máy phát cung cấp một giải pháp tối ưu cho các tuabin gió tốc độ khác nhau, có nhiều ưu điểm, có thể sử dụng trong trường hợp này vì tính ổn định và an toàn của nó trong quá trình hoạt động, hiệu suất cao, chi phí bảo dưỡng thấp và dễ dàng vận hành. Để tối ưu công suất của hệ thống ở các tốc độ gió khác nhau, ta sử dụng một bộ điều khiển có khả năng thu tối đa năng lượng điện phát ra từ tuabin gió ở mọi điều kiện hoạt động (Bharanikumar et al., 2010; Haque et al., 2010; Dalala et al., 2013).

MPPT (Maximum Power Point Tracker) là phương pháp dò tìm điểm công suất cực đại trong hệ thống máy phát điện gió thông qua việc điều khiển chu kỳ đóng mở khóa điện tử dùng trong bộ tăng áp. Khi có sử dụng bộ điều khiển MPPT thì hệ thống làm việc ở điểm tối ưu, hiệu suất tăng cao, các thông số dòng điện, công suất đều được nâng cao hơn so với khi không sử dụng bộ điều khiển MPPT (Son, và ctv., 2019). MPPT có nhiều phương pháp như điều khiển tối ưu moment xoắn (OTC), điều khiển tốc độ đầu cánh (TSR), phản hồi tín hiệu công suất (PFC), thuật toán nhiễu loạn và quan sát (P&O), thuật toán điện dẫn gia tăng (INC), thuật toán điều khiển mờ (FLC),... (Kim et al., 2013; Kumar et al., 2016; Son và ctv., 2019). Trong các thuật toán nêu trên thì thuật toán điều khiển mờ (FLC) là thuật toán điều khiển thông minh được sử dụng khá rộng rãi và phổ biến cho các máy phát điện gió có công suất vài kW trở lên (Petrla et al., 2012, Belkacem et al., 2022). Vì vậy trong bài báo này, việc tìm điểm công suất cực đại của hệ thống máy phát điện gió sẽ sử dụng thuật toán FLC với công suất máy phát điện gió 200W vào việc mô phỏng và đồng thời so sánh với thuật toán P&O đang được thương mại rộng rãi trên thị trường, nhằm áp dụng cho những nơi có tốc độ gió thấp và diện tích lắp đặt nhỏ. Nó có nhiều ưu điểm như tính năng kích thước nhỏ, trọng lượng nhẹ, an toàn cao, dễ lắp đặt và tuổi thọ dài.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Hệ thống tuabin gió

Cấu trúc của hệ thống điện gió được thể hiện ở Hình 1. Hệ thống được kết nối với lưới thông qua máy biến áp T. Tốc độ gió được biểu thị bằng v_{wind} , tốc độ rôto trục máy phát là ω và bộ điều khiển bộ biến đổi lưới sử dụng điện áp lưới V_g , dòng điện xoay chiều i và điện áp tham chiếu e , để hòa công suất trên phía lưới điện. Công suất P_{wr} là công suất điện được đưa vào lưới điện (Parvin et al., 2019). Hệ thống này bao gồm máy phát điện PMSG được kết nối với một bộ chỉnh lưu không điều khiển nhằm biến đổi điện áp xoay chiều ngõ ra của máy phát thành điện áp một chiều. Bộ tăng áp được sử dụng để điều khiển và biến đổi điện áp DC đầu ra bằng phương pháp truy tìm điểm công suất cực đại ở mỗi tốc độ gió khác nhau với thuật toán FLC. Bộ nghịch lưu nguồn áp được dùng để biến đổi điện áp xoay chiều từ điện áp một chiều của bộ tăng áp.

2.2. Mô hình toán học

2.2.1. Mô hình toán học tuabin gió

Hệ thống tuabin gió chuyển đổi một phần động năng của gió thành năng lượng sử dụng được. Năng lượng động học trong không khí của một vật thể chuyển động với tốc độ v bằng:

$$K_E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Trong đó: m là tốc độ dòng chảy trong một giây và được tính theo công thức (2) khi qua tiết diện A :

$$m = \rho Av \quad (2)$$

Trong đó: ρ là mật độ không khí (kg/m^3) và $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ trong điều kiện ở nhiệt độ 150°C và áp suất $101,325 \text{ kPa}$.

Năng lượng của luồng không khí được tính như sau (Belkacem et al., 2022):

$$P = \frac{1}{2}\rho A_r v_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (3)$$

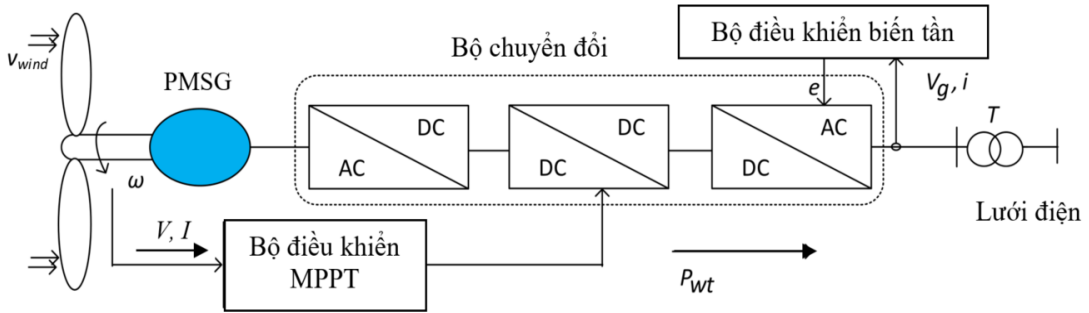
Trong đó: P là công suất cơ (W).

A_r là diện tích che phủ bởi cánh quạt.

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{v_w} \text{ là tỷ lệ tốc độ đầu cánh} \quad (4)$$

Với ω_m là vận tốc góc của tuabin (rad/s)

$C_p(\lambda, \beta)$ hệ số công suất tuabin (Hassan et al., 2017):



Hình 1. Sơ đồ khối của hệ thống máy phát điện gió

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.576 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (5)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (6)$$

Trong đó: β là góc pitch.

Mối quan hệ giữa moment cơ T_m và công suất cơ P_m được cho bởi biểu thức (7) (Ahmad et al., 2006; Omijeh et al., 2013).

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} \text{ (N.m)} \quad (7)$$

2.2.2. Mô hình toán học của máy phát điện PMSG

Máy phát PMSG được sử dụng nhiều nhất trong các loại máy phát điện gió, ba pha được hình thành thông qua ba cuộn dây stator, mô hình toán học máy phát điện gió được viết như sau (Belkacem et al., 2022):

$$V_d = -R_s I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d + \omega_e L_q I_q \quad (8)$$

$$V_q = -R_s I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q - \omega_e L_d I_d + \omega_m \Phi_f \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} I_d = -\frac{R_s}{L_d} I_d + \omega_e \frac{L_q}{L_d} I_q - \frac{V_d}{L_d} \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} I_q = -\frac{R_s}{L_d} I_q - \omega_e \left(\frac{L_q}{L_d} I_d + \frac{\Phi_f}{L_q} \right) + \frac{V_q}{L_d} \quad (11)$$

Với ω_e là vận tốc góc của máy phát PMSG (rad/s).

$$\omega_e = p\omega_m \quad (12)$$

Moment điện từ trong máy phát PMSG được mô tả bởi:

$$T_e = \frac{3}{2} \left[(L_d - L_q) I_d I_q + I_q \Phi_f \right] \text{ (N.m)} \quad (13)$$

Trong đó: L_q và L_d : độ tự cảm của máy phát trên trục d và q (H)

R_s : điện trở stator (Ω)

I_q và I_d : dòng điện trên trục d và q (A)

V_q và V_d : điện thế trên trục d và q (V)

Φ_f : từ thông của nam châm vĩnh cửu (Wb)

Phương trình động học của chuyển động là:

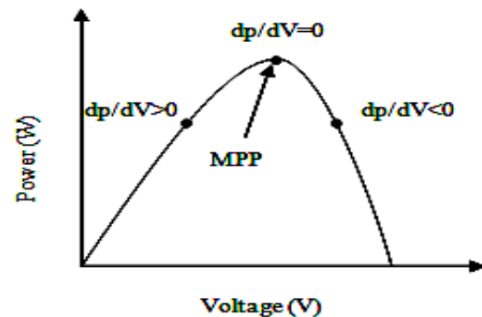
$$T_m - T_e = J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} \quad (14)$$

Trong đó: J là moment quán tính (kg.m^2).

Bộ điều khiển MPPT - FLC khai thác công suất cực đại từ gió bằng cách tăng giảm dòng điện PMSG, thay đổi dòng điện PMSG sẽ thay đổi moment xoắn PMSG, điều này sẽ thay đổi tốc độ quay của máy phát từ phương trình (7), (13), (14) (Petrla et al., 2012).

2.3. Thuật toán nhiễu loạn và quan sát

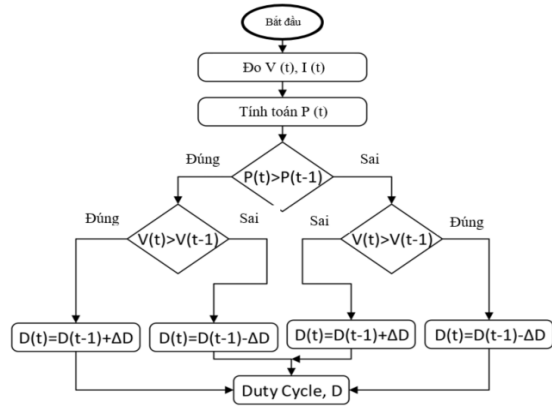
P&O là một phương pháp tương đối đơn giản và được sử dụng thông dụng nhất. Thuật toán này xem xét sự tăng, giảm điện áp theo chu kỳ để tìm được điểm làm việc có công suất lớn nhất thể hiện qua Hình 2 (Lahfaoui et al., 2015).



Hình 2. Đường đặc tính P-V

Nếu sự biến thiên của điện áp làm công suất tăng lên thì sự biến thiên tiếp theo sẽ giữ nguyên chiều hướng tăng hoặc giảm. 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-V thì sự biến thiên điện áp sẽ dao động xung quanh điểm làm việc có công suất lớn nhất đó (điểm MPP), lưu đồ thuật toán nhiễu loạn và quan sát (P&O) được thể hiện qua Hình 3 (Parvin et al., 2019) và bảng tóm tắt thuật toán (Bảng 1).



Hình 3. Lưu đồ giải thuật P&O

Bảng 1. Tóm tắt thuật toán P&O

Điện áp V(t)	Công suất P(t)	Thông số D
Tăng	Tăng	Tăng
Giảm	Tăng	Giảm
Tăng	Giảm	Giảm
Giảm	Giảm	Tăng

2.4. Thuật toán điều khiển mờ

Quá trình làm việc của bộ FLC gồm ba giai đoạn: giai đoạn đầu tiên là làm mờ (Fuzzification) các thông số đầu vào thành các biến ngôn ngữ cơ bản (Data base); giai đoạn kế tiếp là giai đoạn dựa trên các quy luật cơ bản (Rule base) để đưa ra kết quả bằng giá trị ngôn ngữ; kết thúc quá trình xử lý là giai đoạn giải mờ (Defuzzification) đưa ra giá trị số tương ứng với giá trị ngôn ngữ có được ở giai đoạn lập luận mờ như Hình 4 (Wang, 2013).

Hai biến đầu vào là Error (E_k) và Change error (CE_k) được xác định theo biểu thức:

$$E_k = \frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{P_k - P_{k-1}}{V_k - V_{k-1}} \tag{15}$$

$$CE_k = E_k - E_{k-1} \tag{16}$$

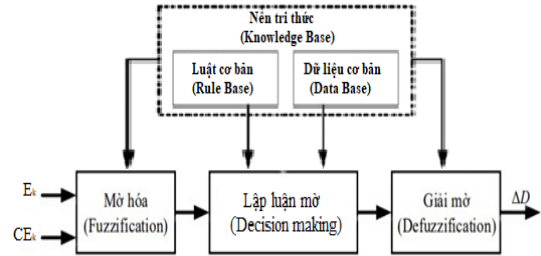
Trong đó:

P_k : Công suất tại điểm k.

P_{k-1} : Công suất tại điểm k-1.

V_k : Điện áp tại điểm k.

V_{k-1} : Điện áp tại điểm k-1.



Hình 4. Sơ đồ khối của FLC

Quy luật điều khiển (Rule base)

Mục đích của các quy luật điều khiển là tìm được điểm MPP khi tốc độ gió thay đổi. Fuzzy logic sử dụng phương pháp Mamdani và dựa vào các quy luật kết hợp với nhau. Với bài báo này, đầu vào E có 5 giá trị ngôn ngữ có giá trị từ -10 đến 10 và đầu vào CE có 7 giá trị ngôn ngữ có giá trị từ -0,5 đến 0,5 nên sẽ có tổng cộng là 35 quy luật như được thể hiện trong Bảng 2 và đầu ra là thông số D có giá trị từ 0 đến 1. Phương pháp này có thể dễ dàng xây dựng nhiều quy luật tùy ý dựa trên số giá trị ngôn ngữ như Hình 5 và Hình 6.

Bảng 2. Bảng luật mờ cơ bản

Biến đầu vào E ∈ [-10 10]	Biến đầu vào CE ∈ [-0,5 0,5]						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	ZE	ZE	ZE	PM	PB	PB	PB
NS	ZE	ZE	ZE	PS	PS	PS	PM
ZE	PS	PS	ZE	ZE	ZE	NS	NS
PS	NM	NS	NS	NS	ZE	ZE	ZE
PB	NB	NB	NB	NM	ZE	ZE	ZE

NB: Negative Big; NM: Negative Medium; NS: Negative Small; ZE: Zero; PS: Positive Big; PM: Positive Medium; PB: Positive Big.

Giá trị tức thời E_k cho ta biết điểm làm việc đang nằm bên phải hay bên trái điểm MPP:

$E_k > 0$ điểm làm việc nằm bên trái điểm MPP.

$E_k < 0$ điểm làm việc nằm bên phải điểm MPP.

Còn CE_k cho biết hướng di chuyển của điểm làm việc:

$CE_k > 0$ điểm làm việc đang có xu hướng di chuyển về điểm MPP.

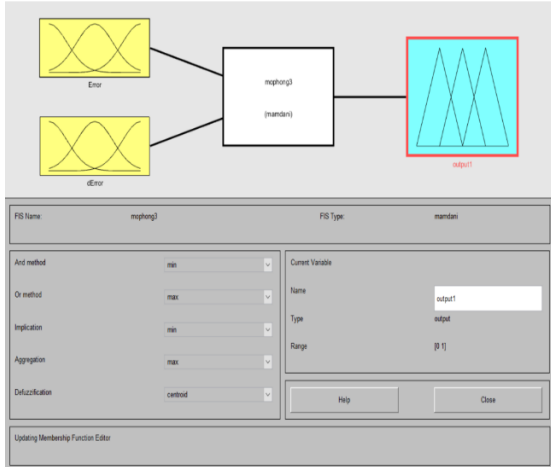
$CE_k < 0$ điểm làm việc di chuyển ra xa điểm MPP.

Biến đầu ra là giá trị thay đổi duty cycle D thành tín hiệu điều khiển khóa điện tử công suất của bộ chuyển đổi Boost.

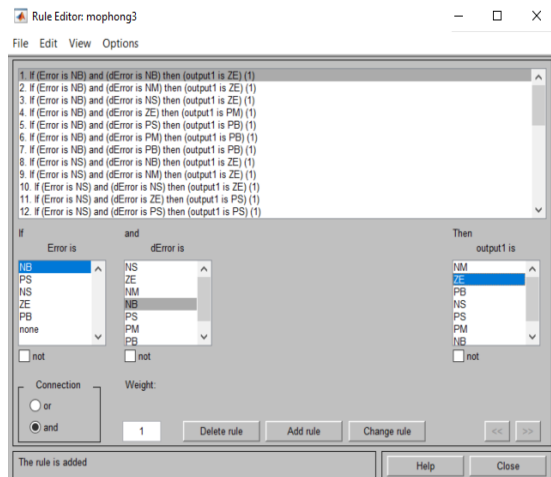
Dựa vào Bảng 1, quy luật điều khiển được tạo ra, ví dụ như:

Quy luật điều khiển 1: Nếu E là NB và CE là NB thì D là ZE.

Quy luật điều khiển 2: Nếu E là NB và CE là NM thì D là ZE.



Hình 5. Khối FLC trong MATLAB/Simulink



Hình 6. Thiết lập quy luật điều khiển của FLC

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô hình mô phỏng hệ thống máy phát điện gió PMSG 200 W

Mô hình mô phỏng tổng quan hệ thống máy phát điện gió PMSG 200 W ở Hình 7 bao gồm các khối Wind Turbine, khối Permanent Magnet Synchronous Machine, khối Rectifier – Inverter, khối Boost DC-DC, khối MPPT cùng các khối hỗ trợ tính toán, đo lường và hiển thị.

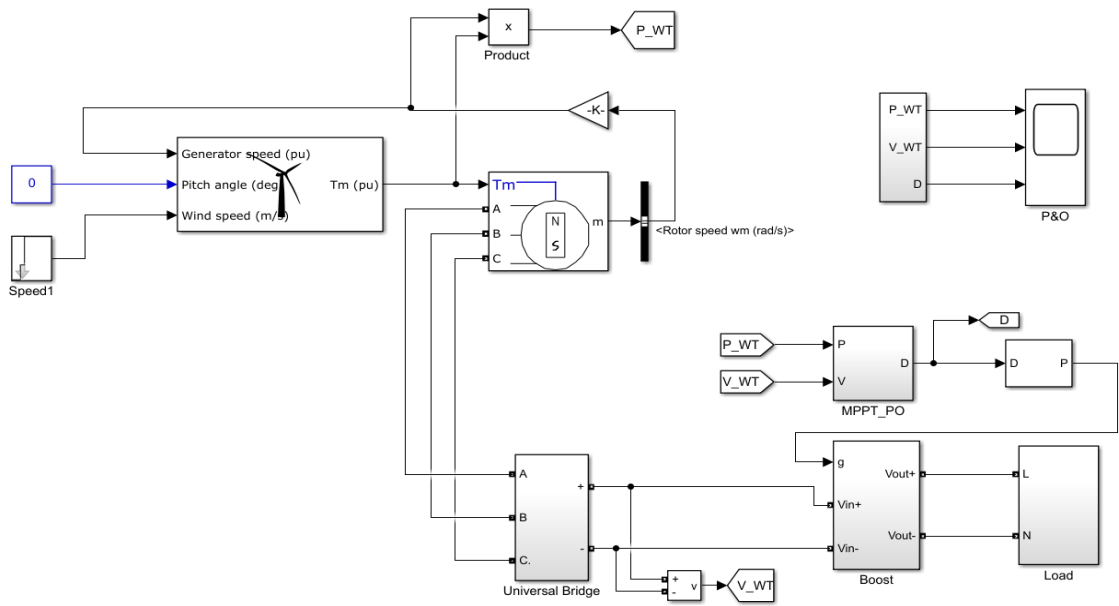
Trong sơ đồ tổng quan Hình 7, khối P_WT được xây dựng dựa vào phương trình (7). Dựa vào phương trình từ (3) đến (6) xây dựng mô hình mô phỏng khối Wind Turbine như Hình 8 có đầu vào là tốc độ gió và do đây là phương pháp tìm điểm công suất cực đại được sử dụng khi tốc độ gió dưới tốc độ định mức, góc lật cánh β chỉ hoạt động ở tốc độ gió lớn hơn định mức nên góc lật cánh β bằng 0^0 .

Mô hình mô phỏng khối máy phát điện PMSG được thể hiện ở Hình 9 dựa vào phương trình (8) đến (14) với Khối Electrical model bên trong bao gồm các khối chức năng thực hiện phép biến đổi Park dùng để tính và đưa ra dòng điện, moment điện từ. Khối Mechanical model nhận giá trị moment cơ và moment điện từ để tính toán và đưa ra giá trị tốc độ góc của điện áp ω_e và góc θ_e . Khối Measurements là khối dùng để đo lường và xuất ra các đại lượng có trong máy phát điện PMSG.

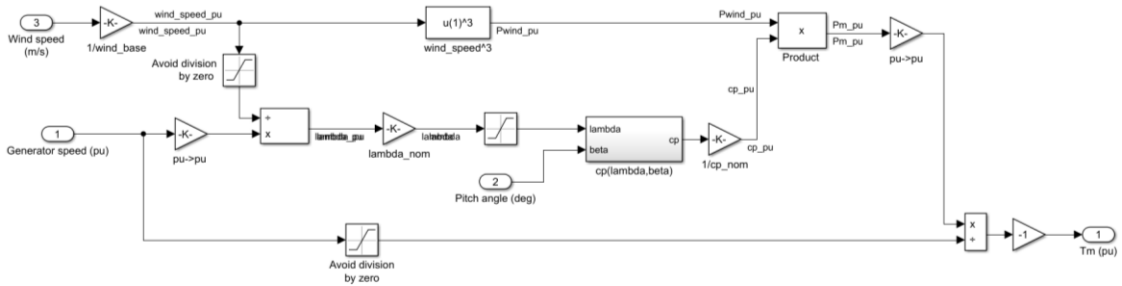
Bộ điều khiển MPPT FLC được thiết lập trong Simulink MATLAB như Hình 10 và Hình 11. Bộ MPPT FLC được thiết kế để tìm điểm MPP của hệ thống năng lượng gió có ngõ vào là công suất của tuabin gió và điện áp ra của bộ chỉnh lưu cầu ba pha không điều khiển và ngõ ra là hệ số D. Bộ giải mã hệ số D thành tín hiệu điều khiển khóa điện tử công suất của bộ chuyển đổi Boost được thể hiện như Hình 12.

3.2. Kết quả

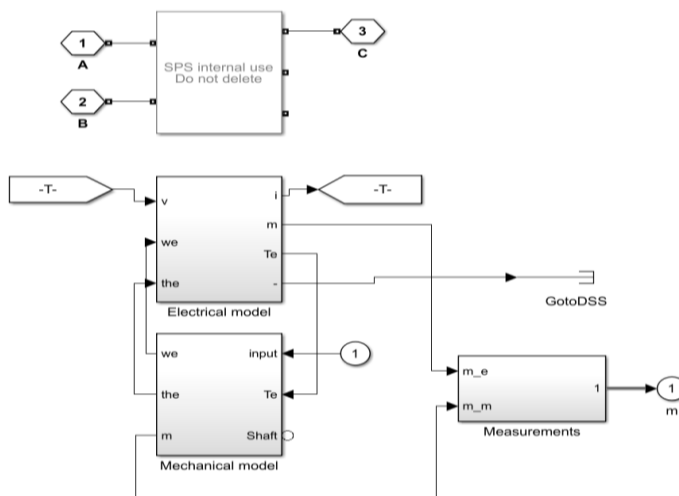
Để mô phỏng trên phần mềm MATLAB, chúng ta nhập vào các thông số tuabin gió như Bảng 3 và các thông của máy phát điện PMSG như Bảng 4.



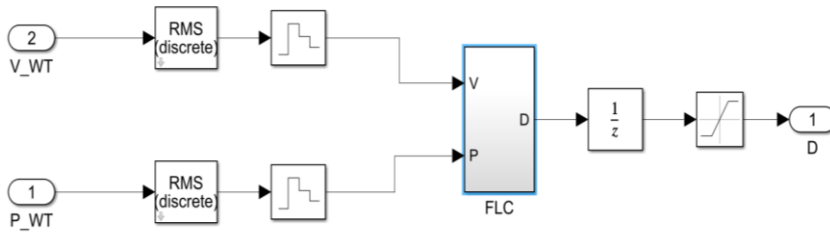
Hình 7. Sơ đồ tổng quát



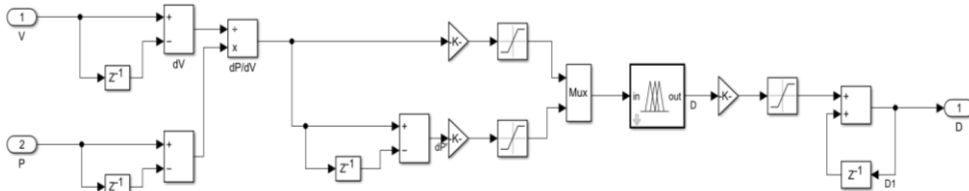
Hình 8. Sơ đồ khối Wind Turbine



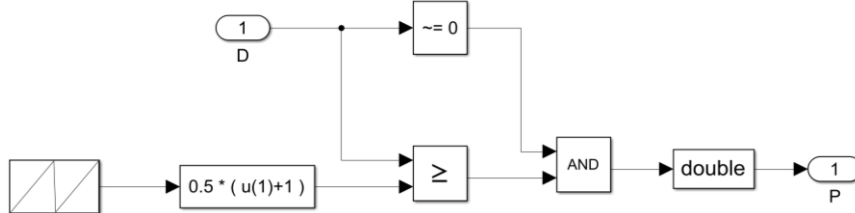
Hình 9. Sơ đồ khối máy phát điện PMSG



Hình 10. Sơ đồ khối bộ điều khiển MPPT



Hình 11. Sơ đồ khối giải thuật FLC



Hình 12. Sơ đồ khối bộ giải mã thông số D thành tín hiệu điều khiển

Bảng 3. Thông số tuabin gió

Thông số	Giá trị
Công suất định mức	200 W
Công suất cơ bản của máy phát điện	200/0,9 VA
Tốc độ gió cơ bản	12 m/s
Công suất cực đại tại tốc độ gió cơ bản (pu)	0,8
Vận tốc cơ bản của rotor (pu)	1,2
Góc lật cánh	0°

Bảng 4. Các thông của máy phát điện PMSG

Thông số	Giá trị
Điện trở Stator R_s	0,18 Ω
Cảm kháng cuộn dây Stator	8,5.10 ⁻³ H
Hằng số moment	0,3308 N.m
Moment quán tính J	0,002 kg.m ²
Hệ số ma sát F	0,002 N.m.s
Số cặp cực	6

3.2.1. Kết quả mô phỏng khi sử dụng MPPT dùng giải thuật FLC

Hệ thống điện gió sẽ được mô phỏng với tốc độ gió thay đổi khác nhau lần lượt là: 12 m/s, 11 m/s,

10 m/s, 11 m/s. Hệ thống hoạt động trong thời gian là 20 s, mỗi tốc độ gió được duy trì trong 5 s như Hình 13.

Sau khi chạy mô phỏng ta được kết quả như Hình 14. Với tốc độ gió 12 m/s, công suất tuabin gió đạt được $P = 183$ W. Khi thay đổi tốc độ gió còn 11 m/s công suất tuabin gió $P = 153$ W. Công suất tuabin gió giảm còn 125 W khi tốc độ gió giảm còn 10 m/s.

3.2.2. So sánh kết quả khi sử dụng MPPT dùng giải thuật FLC với giải thuật P&O

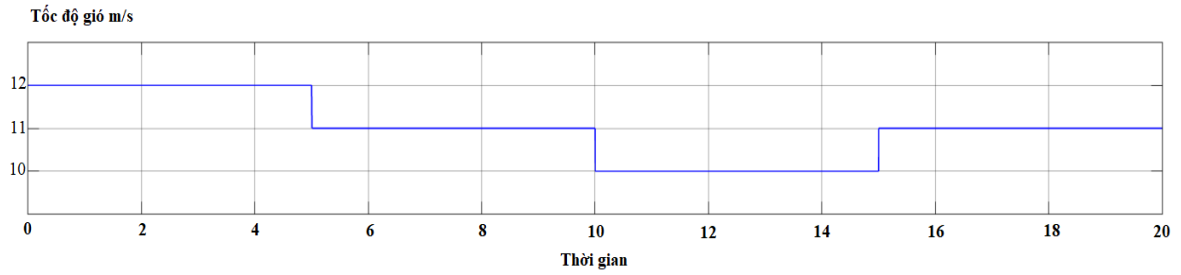
Hệ thống điện gió sẽ được mô phỏng với tốc độ gió thay đổi khác nhau giống như Hình 13.

Sau khi chạy mô phỏng, ta có kết quả như Hình 15. Những vùng hoạt động được phân tích như sau: Vùng 1 khi hệ thống tuabin gió bắt đầu hoạt động, vùng 2 tốc độ gió ổn định và vùng 3 có tốc độ gió thay đổi.

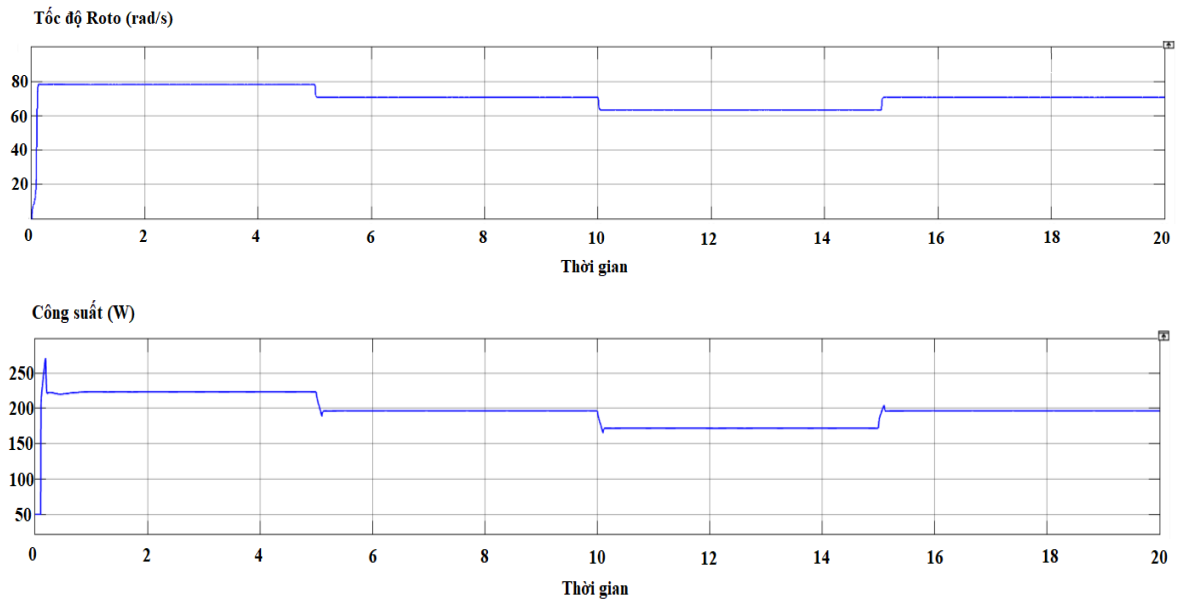
Kết quả mô phỏng ở trên cho thấy rằng thuật toán FLC bắt điểm MPP nhanh hơn thuật toán P&O trong quá trình khởi động (Hình 16); thuật toán FLC cần 1,7 s bắt đầu ổn định trong khi thuật toán P&O phải mất đến 2,2 s. Khi tốc độ gió ổn định (Hình 17),

công suất ngõ ra với thuật toán FLC ổn định với mức dao động 0,3 W còn thuật toán P&O có mức dao động là lên đến 1,7 W. Hình 18 cho thấy với thuật

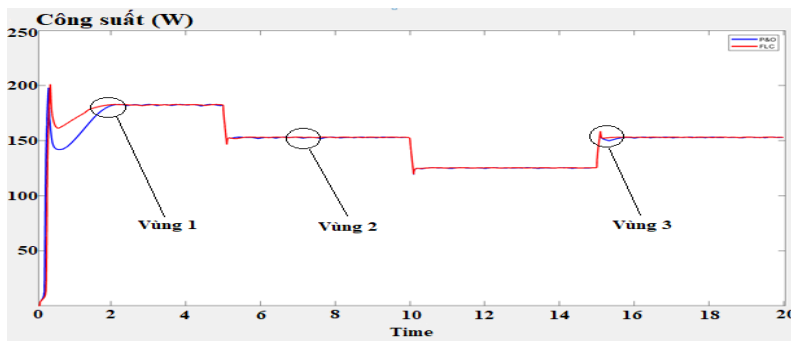
toán P&O có công suất dao động và thời gian ổn định là 8,1 W và 0,72 s trong khi thuật toán FLC tương ứng là 5,8 W và 0,12 s khi tốc độ gió thay đổi.



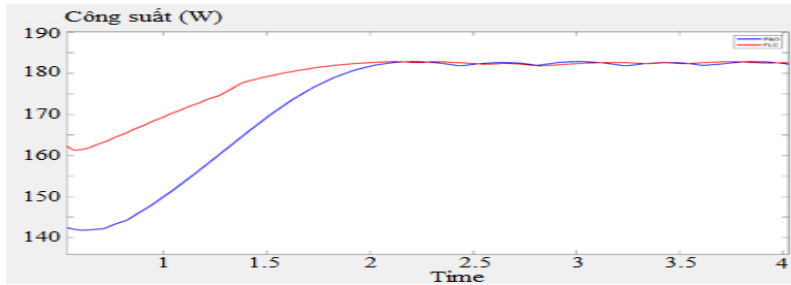
Hình 13. Tốc độ gió thay đổi



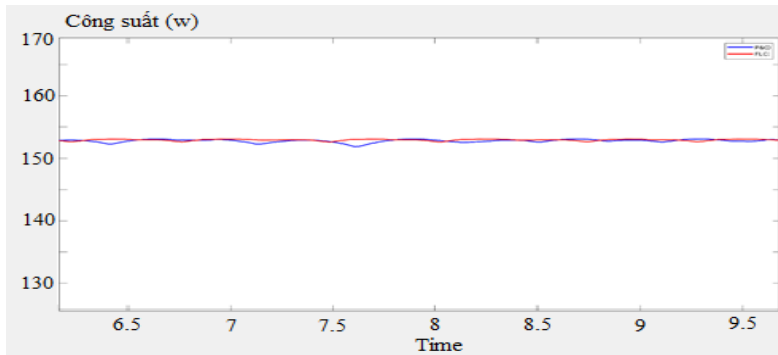
Hình 14. Tốc độ roto và công suất đầu ra tuabin gió khi sử dụng MPPT dùng giải thuật FLC



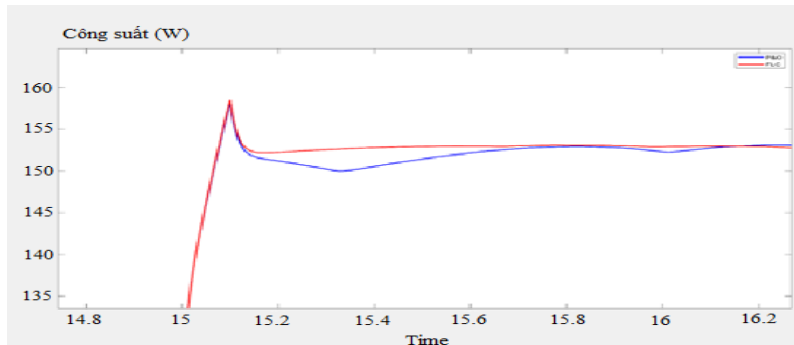
Hình 15. Công suất đầu ra tuabin gió



Hình 16. Công suất đầu ra tuabin gió (Vùng 1 của Hình 15)



Hình 17. Công suất đầu ra tuabin gió khi tốc độ gió không đổi (Vùng 2 của Hình 15)



Hình 18. Công suất đầu ra tuabin gió khi tốc độ gió thay đổi (Vùng 3 của Hình 15)

4. KẾT LUẬN

Việc tích hợp các thuật toán bắt điểm công suất cực đại MPPT vào các bộ chuyển đổi công suất DC – DC sẽ giúp hệ thống có thể thu được công suất cao hơn so với hệ thống không tích hợp chức năng dò tìm điểm công suất cực đại từ cùng một tốc độ gió. Tuy nhiên, các thuật toán tìm điểm công suất cực đại cũng cho ra những đáp ứng khác nhau. Kết quả mô phỏng bằng phần mềm mô phỏng MATLAB/

Simulink trong bài báo này chứng minh thuật toán điều khiển mờ FLC có thể hoạt động tốt và phù hợp cho các máy phát điện gió có công suất nhỏ. Đồng thời, kết quả mô phỏng cũng cho thấy được thuật toán FLC là kỹ thuật điều khiển tối ưu nhằm cải thiện hiệu suất của hệ thống điện gió và vượt trội, hiệu quả hơn thuật toán P&O về mặt sự ổn định, khả năng theo dõi điểm công suất cực đại và đáp ứng nhanh hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Ahmad M. Eid, Mazen A. & M. Tharwat (2006). Vertical axis wind turbine modeling and performance with axial flux permanent magnet synchronous generator for battery charging applications, *Eleventh International Middle East Power Systems Conference*, 162-166.
- Belkacem, B., Bouhamri, N., Koridak, L. A., & Allali, A. (2022). Fuzzy optimization strategy of the maximum power point tracking for a variable wind speed system. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 12(4), 4264-4275. DOI: 10.11591/ijece.v12i4.pp4264-4275
- Bharanikumar, R., Yazhini, A. C., & Kumar, A. N. (2010). Modeling and Simulation of Wind Turbine Driven Permanent Magnet Generator with New MPPT Algorithm. *Asian Power Electronics Journal*, 4(2), 52-58.
- Borkar, R., & Kulkarni, V. A. (2015). Modelling and Simulation of Wind Powered Permanent Magnet Direct Current (PMDC) Motor Using Matlab. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 4(4), 2975-2979.
- Dalala, Z. M., Zahid, Z. U., Yu, W., Cho, Y., & Lai, S.-J. (2013). Design and Analysis of an MPPT Technique for Small-Scale Wind Energy Conversion Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 28(3), 756-767.
- Dương, C. T., Dung, D. T., Dương, P. T., Dũng, N. T., Chúc, H. T. H., Chi, H. T. L., Chi, V. Q., Chi, N. H., Dương, N. C. Diễm, L. T. D. (2021). Biến đổi khí hậu, cạn kiệt nguồn năng lượng và hiệu ứng nhà kính. *Tạp chí Khoa học Đại học Quốc gia Hà Nội*. DOI: 10.31219/osf.io/24tqz
- Haque, M. E., Negnevitsky, M., & Muttaqi, K. M. (2010). A Novel Control Strategy for a Variable-Speed Wind Turbine With a Permanent-Magnet Synchronous Generator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(1), 331-339.
- Hassan, A. & Said, E.B., (2017). New MPPT Control for Wind conversion System based PMSG and a comparison to Conventional approaches. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 38-43.
- Kim, K. H., Tan, L. V., Lee, D. C., Song, S. H., & Kim, E. H. (2013). Maximum Output Power Tracking Control in Variable-Speed Wind Turbine Systems Considering Rotor Inertial Power. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(8), 3207-3217. DOI: 10.1109/TIE.2012.2200210
- Kumar, D., & Chatterjee, K. (2016). A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 957-970. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.013>
- Lahfaoui, B., Zouggar, S., Elhafyani, M. L., & Seddik, M. (2015). Experimental study of P&O MPPT control for wind PMSG turbine. *3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*. DOI:10.1109/irsec.2015.7455020
- Parvin, K., Kit, Y. K., Jern, K. P., Hoque, M. M., & Hannan, M. A. (2019). Particle Swarm Optimization Based Fuzzy Logic MPPT Inverter Controller for Grid Connected Wind Turbine. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9(1), 164-174
- Petrila, D., Blaabjerg, F., Muntean, N., & Lascu, C. (2012). Fuzzy logic based MPPT controller for a small wind turbine system. *13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) 2012* (993-999). DOI: 10.1109/OPTIM.2012.6231936
- Omijeh, B.O., Nmom, C.S., & Nlewem, E. (2013). Modeling of a Vertical Axis Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator for Nigeria. *International Journal of Engineering and Technology*, 3(2), 212-220.
- Son, N. T., Lợi, N. P., Thành, Q. D., Nhân, L., & Danh, T. H. (2019). Tìm kiếm Công suất cực đại của Máy phát điện gió PMSG 200 W. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 55(4), 11-20. DOI:10.22144/ctu.jvn.2019.091
- Wang, Y. J. (2013). Constant Force Feedback Controller Design Using PID-Like Fuzzy Technique for Tapping Mode Atomic Force Microscopes. *Intelligent Control and Automation*, 4(3), 263-279. DOI: 10.4236/ica.2013.43031.