

## دراسة مقارنة بين متحكمي الضبابي والعصبوني لضبط زوايا ميل شفرات التوربين الريحي

د. سحر العلي\*

م. علا الشيخ\*\*

(تاريخ الإبداع ٢٠٢٤/٥/١٥ . قبل للنشر في ٢٠٢٥/٢/٢٣)

□ ملخص □

تواجه التوربينات الريحية تحديات كبيرة بسبب التغيرات السريعة وغير المتوقعة في سرعة الرياح، مما يؤثر سلباً على استقرار الشبكة الكهربائية وكفاءة التوربينات. يهدف هذا البحث إلى تصميم وتقييم أنظمة تحكم ذكية بزوايا ميل شفرات التوربين الريحي ذات السرعة الثابتة، المعتمدة على المولد التحريضي ذي القفص السنجابي، وذلك لتحسين الاستقرار الديناميكي للشبكة الكهربائية.

تم تصميم نوعين من أنظمة التحكم باستخدام برنامج MATLAB/Simulink، تعتمد الأنظمة على الفرق بين الاستطاعة المقاسة والاستطاعة المرجعية كإشارة دخل لوحدة التحكم، في حين يتمثل الخرج في قيمة زاوية ميل الشفرات.

المتحكم الأول هو المتحكم الضبابي (Fuzzy Logic Controller (FLC) الذي يتميز بقدرته على التعامل مع البيانات غير الدقيقة أو الغامضة كمتغيرات سرعة الرياح، حيث تم تصميمه باستخدام دخلين هما: الخطأ ومعدل تغير الخطأ.

المتحكم الثاني يعتمد على الشبكة العصبونية (Neural Network (NN) التي تتميز بقدرتها على التعلم الذاتي وذلك باستخدام الأداة nstart لتوليد وتدريب الشبكات العصبونية على نتائج المتحكم الضبابي.

أظهرت نتائج المحاكاة التي أجريت عند حدوث اضطراب ريحي مفاجئ، تفوق الشبكة العصبونية في تحسين الاستقرار الديناميكي للنظام، حيث انخفضت قيمة مؤشر الأداء  $P_{smooth}$  من 9.6(p.u) مع المتحكم الضبابي إلى 8(p.u) مع المتحكم العصبوني، وهذا يشير إلى أنّ تقلبات طاقة الخرج تم تخفيضها بشكل أكبر لتحقيق أفضل استقرار ديناميكي أي تعزيز قدرة النظام الكهربائي للعودة إلى الحالة المستقرة بعد تعرضه لاضطراب ريحي.

الكلمات المفتاحية: التوربينات الريحية - السرعة الثابتة - المولد التحريضي - زوايا الميل - المتحكم الضبابي - الشبكة العصبونية - الاستقرار.

\* دكتورة في قسم الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - طرطوس - سورية.  
\*\* مهندسة في قسم الأتمتة الصناعية - حاصلة على درجة الماجستير - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - طرطوس - سورية.

# A comparative study of Fuzzy Logic and Neural Network controllers for Regulating wind turbine blade pitch angles

Dr. Sahar Alali\*  
Eng. Ola Alshikh\*\*

(Received 15/5/2024 . Accepted 23/2/2025)

□ ABSTRACT □

Wind turbines face significant challenges due to rapid and unpredictable changes in wind speed, which adversely affect the stability of the electrical grid and turbine efficiency. This research aims to design and evaluate intelligent control systems for the pitch angles of fixed-speed wind turbine blades, based on squirrel cage induction generators, to enhance the dynamic stability of the electrical grid.

Two types of control systems were designed using MATLAB/Simulink. The systems rely on the difference between the measured power and the reference power as the input signal to the controller, while the output represents the required blade pitch angle.

The first controller is a Fuzzy Logic Controller (FLC), which is characterized by its ability to handle imprecise or ambiguous data, such as variations in wind speed. It was designed with two inputs: error and rate of change of error.

The second controller is based on a Neural Network (NN), which is distinguished by its self-learning ability. The network was generated and trained using the mstart tool based on the results from the fuzzy controller.

Simulation results conducted during a sudden wind disturbance demonstrated the superiority of the neural network in improving the system's dynamic stability. The performance indicator P\_smooth decreased from 9.6 (p.u) with the fuzzy controller to 8 (p.u) with the neural network controller. This indicates that output power fluctuations were further reduced, enhancing the dynamic stability and improving the electrical system's ability to return to a stable state after being subjected to a wind disturbance.

**Keywords:** Wind Turbine - Fixed Speed - Induction Generator - Pitch Angle – Fuzzy - Neural Network – Stability.

---

\*Doctor in Department of Industrial Automation - Faculty of Technical Engineering - Tartous University – Syria.

\*\*Engineer in Department of Industrial Automation -Master Degree- Faculty of Technical Engineering - Tartous University - Syria.

**المقدمة:**

كان استثمار طاقة الرياح محدوداً في الماضي، ونتيجة لذلك، لم يتم ربط مزارع الرياح مع الشبكة، ولكن في السنوات الأخيرة بسبب الاعتبارات الاقتصادية والبيئية شهدت نمواً كبيراً، وأثرت كمية الطاقة الكبيرة التي حققتها مزارع الرياح بالفعل على نظام الطاقة، الأمر الذي استدعى تحسين جودة الطاقة التي تقدمها تلك المولدات. تستخدم في الوقت الحاضر أنظمة الطاقة الريحية الحديثة في الغالب المولدات الريحية المتغيرة السرعة المزدوجة التغذية [1]، بالمقابل مازالت المولدات الريحية التحريضية ذات السرعات الثابتة fixed-speed induction generators (FSIGs) تُستخدم بكثرة في أنظمة توليد الطاقة الكهربائية الريحية بسبب قوتها وبساطتها، وانخفاض تكلفتها وتكلفة صيانتها، مما استدعى القيام بأبحاث لدراسة جودة الطاقة التي تقدمها هذه المولدات نظراً لأن خرج التوربين الريحي يتناسب مع مكعب سرعة الرياح ذات الطبيعة العشوائية المتغيرة. إن التغيرات المستمرة في سرعة الرياح تحدث تذبذبات في الاستطاعة الفعلية التي تنتجها المولدات التحريضية والتي يحتاج إنتاجها إلى استطاعة ردية مما جعل الاستطاعة الردية أيضاً تتأثر بتغيرات سرعة الرياح، مؤثرة على الشبكة بتذبذبات تحصل على الجهد [2].

أظهرت دراسات أخرى أهمية التحكم بمعيارية زوايا الشفرات لتحسين الاستقرار بسبب تأثيرها على الاستطاعة الفعلية، لأنها تحد من الطاقة الهوائية من أجل تنعيم تقلبات طاقة المولد وتحقيق الاستقرار العابر أثناء أعطال الشبكة [3]، لذلك صُممت استراتيجيات التحكم في زاوية الميل لتحسين جودة الطاقة، وتعزيز الاستقرار العابر في وضعي التحكم في الطاقة والسرعة، على التوالي، باستخدام وحدة التحكم المنطقية الضبابية التي وفرت أداءً محسناً في تتبع المرجع مقارنةً بوحدة التحكم الأخرى [4].

كما أظهرت دراسة تأثير التحكم بزوايا ميل الشفرات على الاستقرار من خلال إجراء مقارنة بين نظام التحكم Fuzzy-PID مع نظام التحكم PID، وأظهرت نتائج الدراسة أن نظام التحكم Fuzzy-PID حسن استجابة النظام أكثر من نظام التحكم القائم على PID [5]. بدراسة أخرى استخدمت متحكم يعتمد على الشبكة العصبونية للتحكم بزوايا ميل شفرات التوربين الريحي أكدت على تأثير وحدة التحكم بالحفاظ على طاقة الخرج ضمن حدود ثابتة وأمنة وتحسين استجابة النظام لتغيرات بارامترات النظام غير الخطية [6].

إن أهمية هذا البحث تكمن في التمكن من تصميم استراتيجية تحكم بالمولد التحريضي ذو القفص السنجابي، تعتمد على نظام السرعة الثابتة مع تغير في زاوية ميل الشفرات FS-VP (Fixed speed-variable pitch)، لما يملكه هذا النظام من أداء جيد عند سرعات مختلفة للرياح، ومقارنة النتائج باستخدام وحدتي تحكم الضبابية والعصبونية وأثرهما على تنعيم تقلبات طاقة الخرج، وتنظيم الفولتية الطرفية للمولد الريحي ذو السرعة الثابتة، الذي يخضع لتغيرات عشوائية في سرعة الرياح.

**أهمية البحث وأهدافه:**

في ظل دعم مصادر الطاقة المتجددة، وتعزيز إمكانية بناء نظام ريحي عالي الوثوقية ومنخفض التكلفة والصيانة، وانطلاقاً من ذلك تكمن أهمية البحث في تطوير نظام تحكم بزوايا ميل الشفرات لزيادة وثوقية نظام القدرة الكهربائي بمساهمة الوحدات الريحية، من خلال تحسين الاستقرار الديناميكي للمولدات الريحية ذات السرعة الثابتة المتصلة مع الشبكة الكهربائية في ظل حدوث اضطراب في سرعة الرياح، والتي تؤدي إلى حدوث تذبذبات في جهد الشبكة الكهربائية.

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تحسين جودة الطاقة الناتجة عن المولدات الريحية ذات السرعة الثابتة لزيادة الاستقرار الديناميكي، من خلال تصميم حلقة تحكم بعزم الدوران الميكانيكي للتحكم بمعايرة زاوية ميل الشفرات لتنظيم الاستطاعة الفعلية باستخدام وحدتي التحكم الضبابية والعصبونية.

#### ❖ التوربينات ذات السرعة الثابتة وذات السرعة المتغيرة

**توربينات السرعة الثابتة:** تعتمد هذه التوربينات على ثبات سرعة دوران شفرة التوربين وبالتالي الجزء الدوار في المولد (أي عدد اللفات في الدقيقة)، وتستخدم هذه التوربينات المولد التحريضي، لذا يكون خرج المولد تيار ذو تردد ثابت.

**توربينات السرعة المتغيرة:** تعتمد هذه التوربينات على تغير سرعة دوران شفرات التوربين وبالتالي الجزء الدوار في المولد، مما يؤدي إلى اختلاف خرج المولد، ويتطلب ربط هذه التوربينات على الشبكة الكهربائية ضبط تردد التيار الناتج منها، وذلك باستخدام إلكترونيات القدرة [7].

#### طرائق البحث ومواده:

تم استخدام البيئة البرمجية Matlab/Simulink للقيام بمحاكاة النظام الكهربائي مع التوربين الريحي، وتصميم المتحكم الضبابي والمتحكم العصبوني وإجراء المقارنة بين أداء كلا المتحكمين على زيادة الاستقرار الديناميكي أثناء الاضطراب الريحي.

#### ١. أنواع المولدات المستخدمة في أنظمة التوليد بالطاقة الريحية

١,١ المولدات الريحية ذات السرعة الثابتة FSIG

١,٢ المولدات الريحية المتغيرة السرعة مع مقاومة الدائر المتغيرة

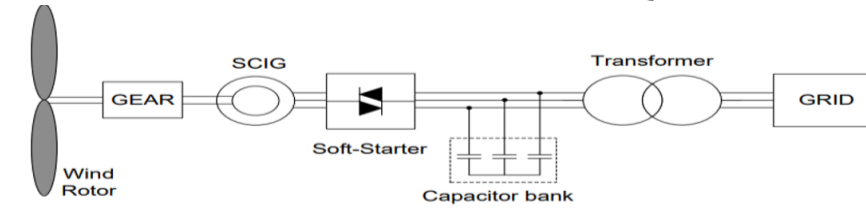
١,٣ توربينات الرياح للمولد التحريضي ذو التغذية المضاعفة

١,٤ توربينات الرياح متغيرة السرعة مع مبدل النطاق الكامل

تم في هذا البحث استخدام المولد الريحي ذات السرعة الثابتة، بسبب بساطته ووثوقيته وانخفاض تكلفته وصيانته بالإضافة إلى امكانية اتصاله بالشبكة الكهربائية مباشرة دون الحاجة إلى استخدام مبدلات القدرة. حيث يستخدم المولد التحريضي ذو القفص السنجابي ويكون التباين في سرعة دوران المولد محدوداً حوالي 1% من السرعة الاسمية عند قيم مختلفة لسرعات الرياح، لذلك يسمى هذا النوع بالمولد التحريضي ذو السرعة الثابتة. استُخدمت هذه التوربينات في أستراليا وألمانيا والدنمارك، بحوالي 87 MW و 48MW و 47,1 MW على التوالي (المصنفة 1.5 MW) [8].

يوضح الشكل (1) المولد التحريضي ذو القفص السنجابي SCIG المستخدم مع FSIG في أنظمة الطاقة الريحية الموصول مع الشبكة بدون مبدلة، ولكن يتم استخدام جهاز بدء التشغيل لتوصيل المولد بالشبكة. يكون التباين في سرعة دوران المولد محدوداً وحوالي 1% من السرعة الاسمية عند قيم مختلفة لسرعات الرياح. لذلك يسمى هذا النوع بالمولد التحريضي ذو السرعة الثابتة. عملياً، يمكن استخدام علبه التروس لمطابقة اختلاف السرعة بين التوربين والمولد. يستهلك هذا النوع من المولدات كمية لا بأس بها من الاستطاعة الرديئة من خلال الشبكة ولتعويض هذه الاستطاعة، عادةً ما يتم استخدام بنوك المكثفات ثلاثية الطور كجهاز تعويض للاستطاعة الرديئة المستهلكة لتكوين الحقل في المولد التحريضي، تتمثل ميزات هذا النظام بساطته، ووثوقيته وانخفاض تكلفته، بينما عيوبه الرئيسية تكمن بانخفاض كفاءته في تحويل الطاقة، ومن جانب آخر التغيرات في

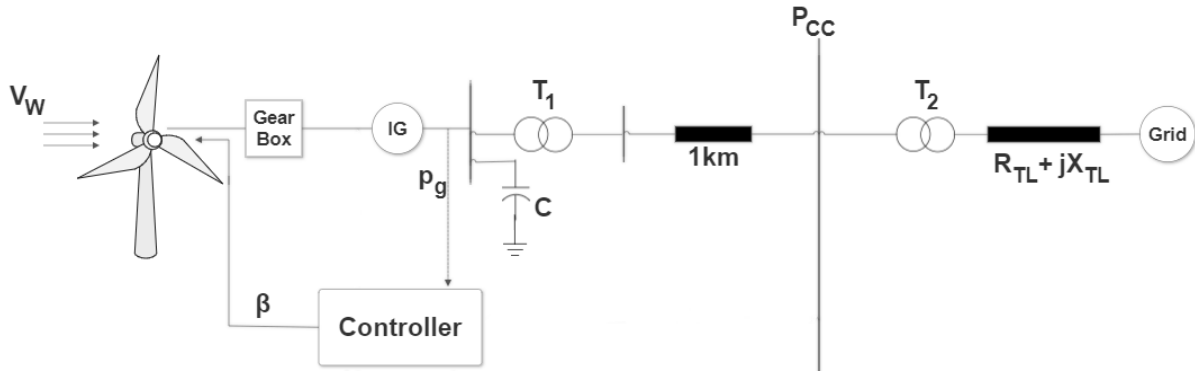
سرعة الرياح ستنتقل إلى جانب الشبكة، بالإضافة إلى أن حدوث عطل من جهة الشبكة سيسبب اضطراب كبيراً على الأجزاء الميكانيكية لتوربينات الرياح [9].



الشكل (١): المولد التحريضي ذو السرعة الثابتة.

## ٢. نظام الطاقة الريحي المتصل مع الشبكة الكهربائية:

يبين الشكل (٢) نظام الطاقة النموذجي المدروس، حيث يُربط المولد الريحي إلى نقطة الاقتران المشترك PCC point of common coupling من خلال محول رافع (25kV/575V)، والذي يصدر الطاقة إلى شبكة 25KV من خلال خط النقل. يعمل المولد تحريضي (IG) في induction generator في نقطة تشغيل محددة ويزود 1.5MW من الطاقة الفعلية.



الشكل (٢): مخطط توضيحي للنظام المقترح.

إن مكثف تصحيح مُعامل الاستطاعة (C) مرتبط بمحطة الجهد المنخفض لمولد التوربين الريحي توفر المكثفات في ظل ظروف ثابتة القدر المطلوب من الطاقة الرديئة FSICs، وتم تصميم وحدتي للتحكم بزوايا ميل الشفرات (β) FLC و NN تعمل عند تعرض النظام لاضطراب في سرعة الرياح (V<sub>w</sub>)، للحفاظ على استقرار طاقة خرج المولد (P<sub>g</sub>).

## ٢,١ نمذجة التوربين الريحي ذو السرعة الثابتة المتصل مع الشبكة الكهربائية:

الطاقة الميكانيكية التي يستخرجها التوربين الريحي تتناسب طردياً مع مكعب سرعة الرياح وتعطى

بالعلاقة:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A_r C_p(\lambda, \beta) V_w^3 = C_p(\lambda, \beta) P_w \quad (1)$$

حيث  $\rho$  ( $k_g/m^3$ ): كثافة الهواء،  $A_r = \pi R^2$  ( $m^2$ ): المساحة التي يغطيها دوائر العنفة،  $R$  (m): نصف قطر الشفرة،  $V_w$  (m/s): سرعة الرياح،  $C_p(\lambda, \beta)$ : معامل الاستطاعة أو مردود العنفة (كمية الطاقة التي يستخرجها التوربين من الهواء) حيث  $\lambda$ : سرعة طرف الشفرة وتتغير من توربين الى اخر حسب الاختلاف في تصميم التوربين،  $\beta$ : زاوية ميلان شفرة التوربين وتغيرها يؤدي الى تغير سرعة المولد الريحي.

بالنسبة لتوربينات الرياح التجارية، لا يقدم المصنعون أي معلومات عن معامل الاستطاعة، لذلك، تم وضع العديد من المعادلات الرياضية لتحديد هذه القيمة، وصفت العديد من المراجع منحني معامل الاستطاعة مع معادلات مختلفة. تم تحديد في هذا البحث، خاصية معامل الاستطاعة على النحو التالي [١٠]:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6\lambda \quad (2)$$

حيث

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.008\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3)$$

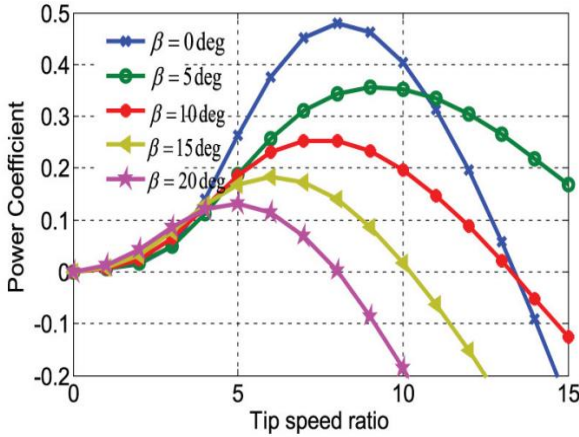
$$c_6 = 0.0068, c_5 = 21, c_4 = 5, c_3 = 0.4, c_2 = 116, c_1 = 0.5176$$

$$\lambda = \frac{\text{tip speed of the blade}}{\text{wind speed}} = \frac{WR}{V_m} \quad (4)$$

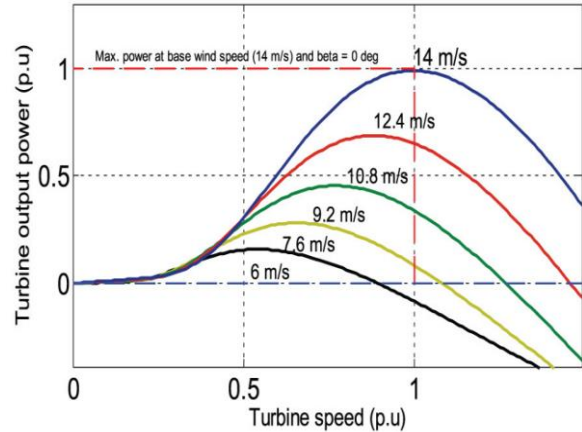
وبالتالي، يمكن اشتقاق ناتج عزم الدوران الميكانيكي للمولد التحريضي بالعلاقة التالية،

$$T_m = \frac{P_m}{w_r} = \frac{C_p(\lambda, \beta)P_w}{w_r} \quad (5)$$

حيث،  $w_r$  (rad/s): سرعة التوربين الريحي، وفقاً للمعادلات من (١) إلى (٤)، يوضح الشكل (٣) منحني معامل الاستطاعة مقابل السرعة الطرفية للشفرة  $(C_p, \lambda)$  بالنسبة لقيم مختلفة لزوايا الميل  $(\beta)$ ، كما يوضح الشكل (٤) طاقة خرج التوربين مقابل سرعة التوربين عند قيم مختلفة لسرعة الرياح  $(V_w)$ .

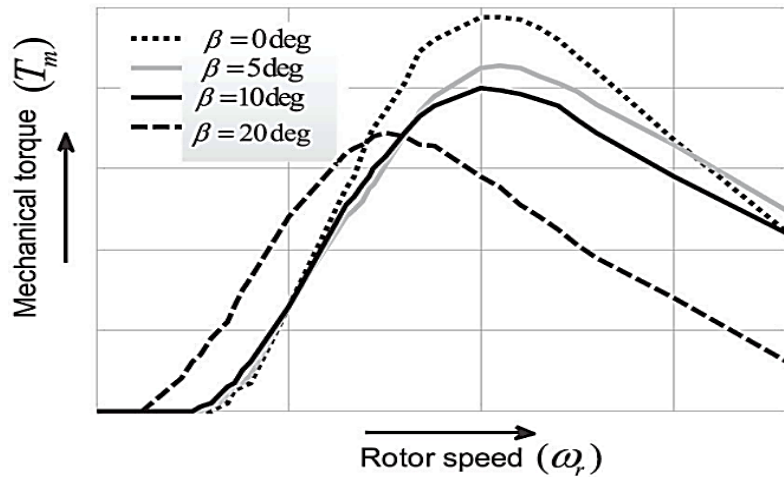


الشكل (٣): العلاقة بين معامل الاستطاعة وسرعة طرف الريشة.



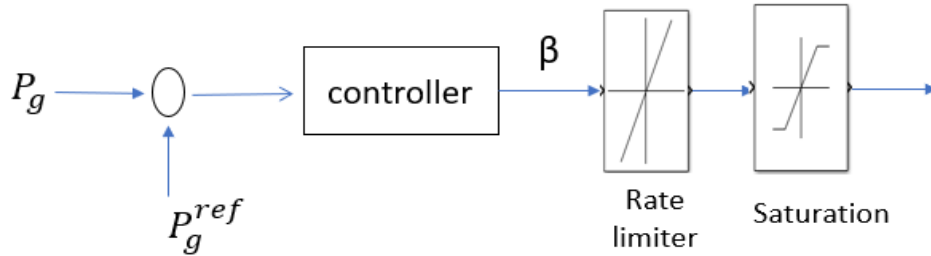
الشكل (٤): خصائص طاقة التوربين.

باستخدام الشكل (٣) والمعادلة (٥) تم الحصول على العلاقة بين عزم الدوران الميكانيكي  $(T_m)$  وزوايا الميل  $(\beta)$  وسرعة الدائر  $(w_r)$  كما هو موضح في الشكل (٥). نلاحظ من المعادلة (٥) إن الاستطاعة الميكانيكية  $(P_m)$  للتوربين الريحي تعتمد على كل من معامل الاستطاعة  $(C_p)$  و  $(w_r)$ ، ولكن تتميز مولدات القفص السنجابي ذات السرعة الثابتة بنطاق تغير  $(w_r)$  صغير جداً أقل من 1% [١١]. انطلاقاً من ذلك، نجد أن اختلاف الاستطاعة الميكانيكية يعتمد فقط على معامل الاستطاعة  $C_p(\lambda, \beta)$  الذي يتغير مع نسبة السرعة الطرفية  $(\lambda)$  وزاوية الميل  $(\beta)$ . تغير السرعة الطرفية  $(\lambda)$  صغيراً جداً [١٢] في دراسات الاستقرار العابر نتيجة لذلك نجد أن عزم الدوران الميكانيكي يعتمد بشكل أساسي على زوايا الميل  $(\beta)$ ، وانطلاقاً من ذلك يمكن أن نلاحظ من الشكل (٥) أن عزم الدوران الميكانيكي يتناقص عند نقطة معينة من سرعة الدوار مع زيادة زاوية الميل.



الشكل (٥): عزم الدوران الميكانيكي مقابل سرعة الدائر.

### ٣. تصميم وحدة التحكم في زاوية ميل الشفرات في وضع التحكم في الطاقة



الشكل (6): وحدة التحكم بزاوية الميل في وضع التحكم بالطاقة.

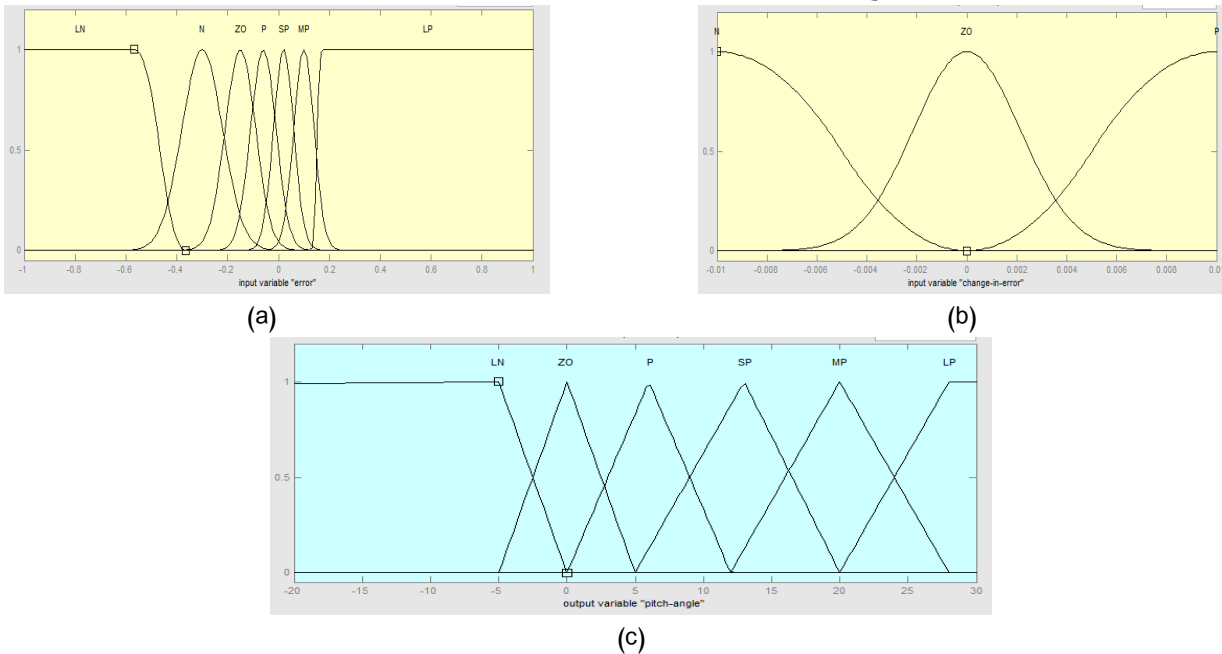
يظهر الرسم التخطيطي لنظام التحكم في زاوية الميل في الشكل (6). عندما تتجاوز سرعة الرياح القيمة المحددة، يحد جهاز التحكم في زاوية الميل من القيمة الديناميكية الهوائية للحفاظ على طاقة خرج المولد بقيمتها المحددة، يمر الفرق بين الاستطاعة المقاسة ( $P_g$ ) والاستطاعة المرجعية ( $P_g^{REF}$ ) عبر وحدة التحكم التي تنظم طاقة الخرج وفقاً للخطأ ( $\varepsilon$ ) عن طريق توليد زاوية ميل مناسبة. من أجل الحصول على استجابة واقعية من نظام التحكم في الميل، تم ضبط نطاق التنظيم لزاوية الميل ومعدل الميل على  $\pm 2^\circ/s$  و  $0^\circ$  -  $45^\circ$  على التوالي [13].

### ٣,١. تصميم وحدة تحكم بالمنطق الضبابي Fuzzy logic للتحكم بزاوية الميل للشفرات

يستخدم التحكم الضبابي بشكل فعال عندما تكون ديناميكية النظام غير معروفة بشكل جيد حيث لا تتطلب النمذجة الرياضي للنظام أو عندما يكون النظام يعتمد اللاخطية كاضطراب الرياح غير المستقر، حيث يعمل التحكم الضبابي على تقليل الحمل على الشفرات.

إن المزايا الأكبر للتحكم الضبابي عند تطبيقه على عتفة ريحية هو أنه لا داعي لوصف نظام العتفة بدقة ولا يحتاج إلى أن يكون خطياً. لنظام التحكم دخلين هما الخطأ ومعدل تغير الخطأ، بينما خرج النظام هو قيمة زاوية الميل المطلوبة، يوضح الشكل (7) توابع الانتماء للتحكم الضبابي حيث تم تصميمها بالاعتماد على التجريب على أن تشمل جميع المجالات الممكنة للدخل باستخدام طريقة مامداني Mamdani لأنها توفر

بنية واضحة وسهلة التفسير وتتميز بمرونتها مع الأنظمة غير الخطية، وبالاعتماد على طريقة مركز المساحة لفك التضبيب والحصول على الخرج.



الشكل (7): (a,b) تابعي الدخل، (c) تابع الخرج، لانتماء المتحكم الضبابي بزوايا ميل الشفرات

يوضح الجدول (1) قواعد التحكم الضبابية المصممة لضبط زوايا ميل الشفرات.

الجدول (1) قواعد التحكم للمتحكم الضبابي بزوايا ميل الشفرات.

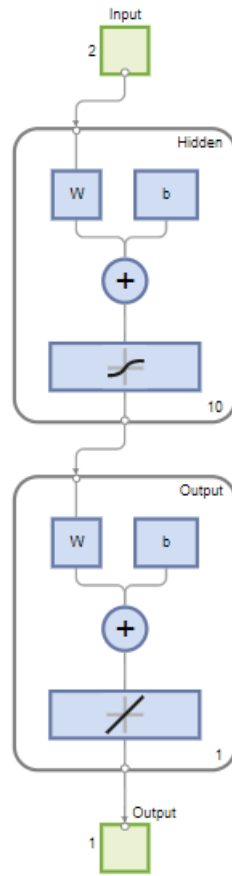
	LN	N	ZO	P	SP	MP	LP
N	LN	LN	LN	ZO	P	SP	MP
ZO	LN	LN	ZO	P	SP	SP	LP
P	LN	LN	P	SP	MP	LP	LP

N: negative; ZO: zero; P: positive; LN: large negative; SP: small positive; MP: medium

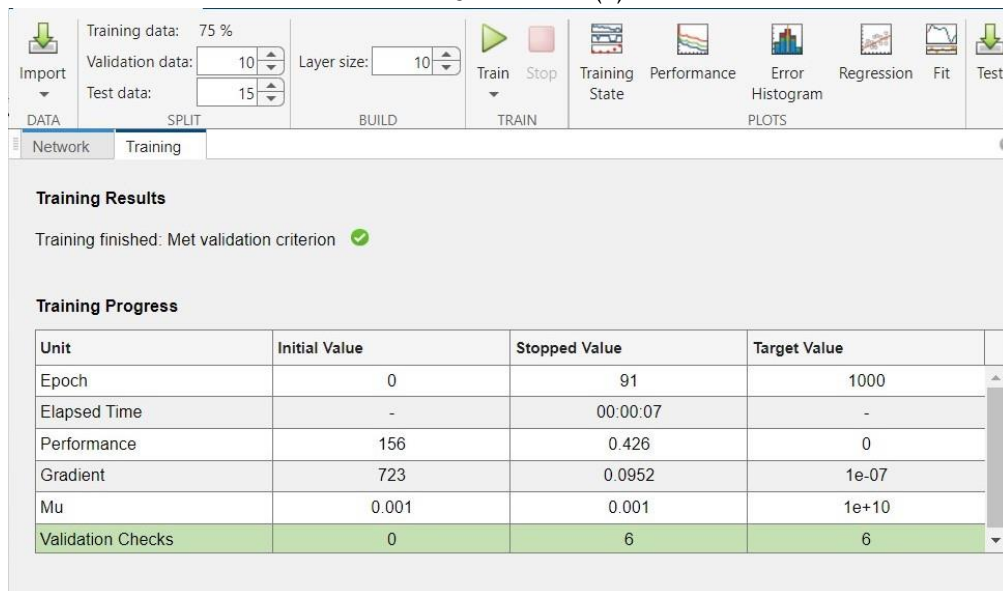
positive; LP: large positive

### ٣,٢ تصميم وحدة تحكم Neural Network للتحكم بزوايا الميل للشفرات

تم الاعتماد على الشبكة العصبونية بسبب عدم خطية النظام المدروس وقدرة الشبكة العصبونية على التدريب والتنبؤ باستجابة صحيحة مع اختلاف المدخلات، أي الاستجابة المنطقية لقيمة زوايا ميل شفرات التوربين الريحي أثناء أي تغير عشوائي لسرعة الرياح. تم استخدام الأداة nntool لتوليد وتدريب الشبكات العصبونية على نتائج المتحكم الضبابي، يوضح الشكل (٨) الشبكة المصممة، كما يوضح الشكل (٩) واجهة تدريب الشبكة العصبونية حيث تم استخدام شبكة امامية لقدرتها على التعامل مع الأنظمة غير الخطية واستجابتها السريعة للتحكم في الزمن الحقيقي، وتم تحديد عدد الطبقات من خلال التجريب حيث بدأنا بشبكة بسيطة ثم قمنا بزيادة عدد الطبقات حتى وجدنا أن الأداء الأمثل للشبكة عندما تتألف من عشر طبقات، ونسبة بيانات تدريب 75%.

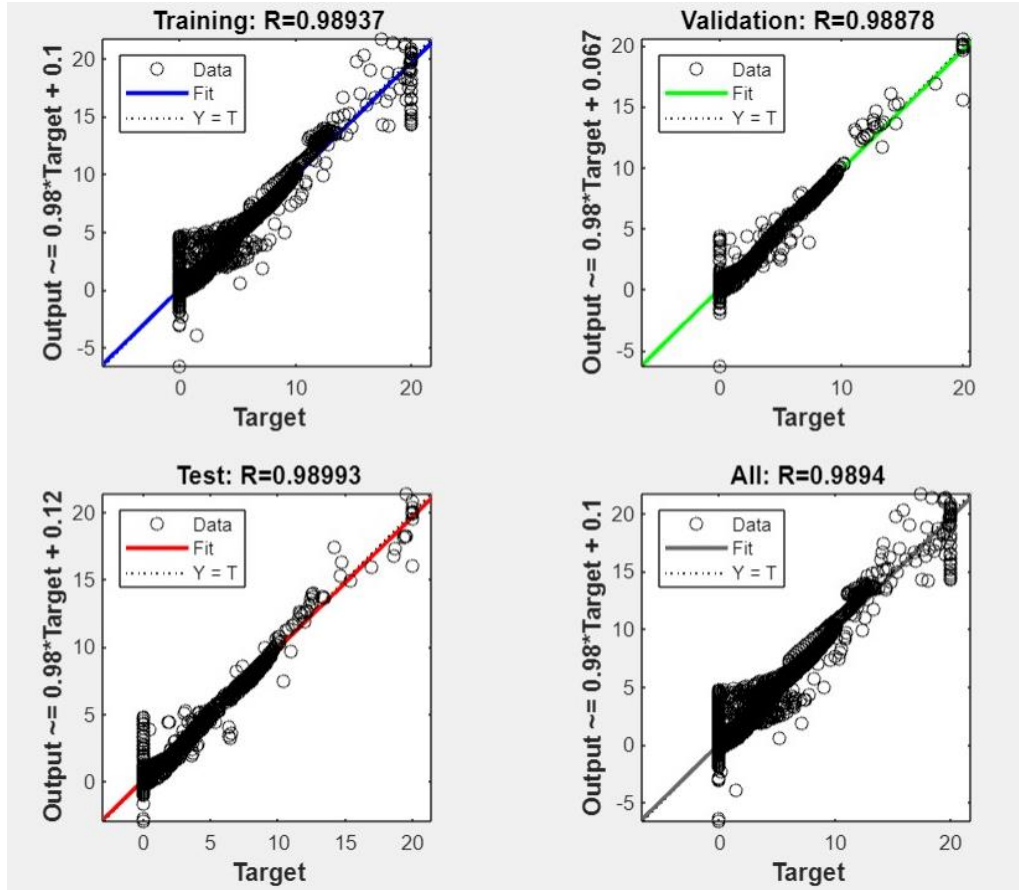


الشكل (٨): الشبكة العصبونية المصممة.



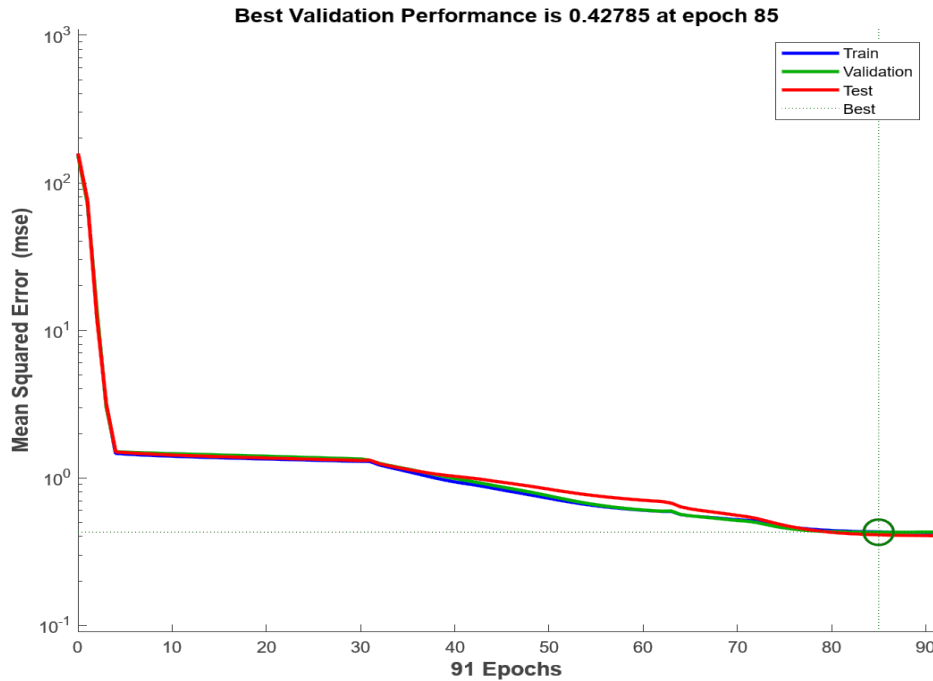
الشكل (٩): واجهة التدريب الشبكة العصبونية.

للتحقق من صحة أداء الشبكة تعرض مخططات الانحدار في الشكل (١٠) مخرجات الشبكة فيما يتعلق بأهداف التدريب والتحقق من الصحة ومجموعات الاختبار.



الشكل (10): مخططات الانحدار لمخرجات الشبكة.

توقف تدريب الشبكة عندما توقف تحسن النتائج أثناء تقييم نتائج النظام، وهو ما حدث في التكرار 91. بالنظر فوق "الأداء" في نافذة التدريب، يظهر الشكل (11) مخطط لأخطاء التدريب وأخطاء التحقق من الصحة وأخطاء الاختبار.



الشكل (11): مخطط لأخطاء التدريب وأخطاء التحقق من الصحة وأخطاء الاختبار.

## ٤. مؤشر الأداء

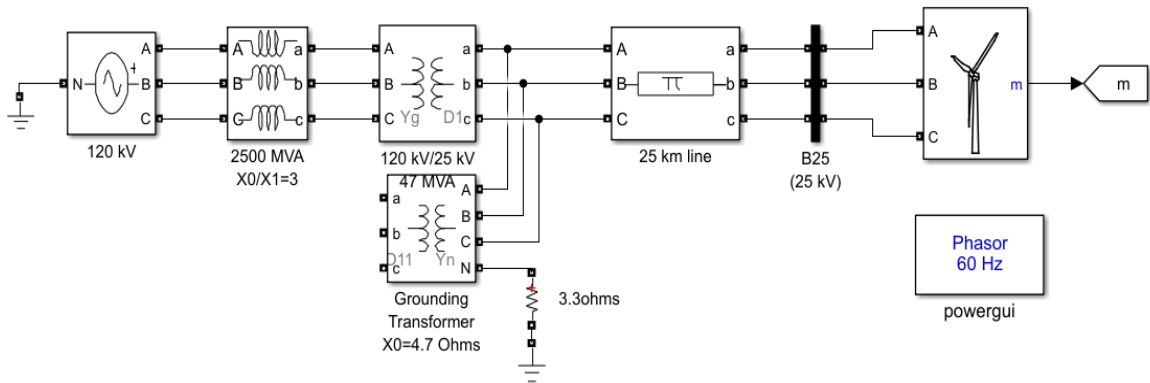
لتقييم أداء وحدة التحكم المقترحة، تم حساب وظائف تجانس طاقة الخرج  $P_{smooth}$  وفق العلاقة (٦):

$$P_{smooth} = \int_0^T \left| \frac{dp_g(t)}{d(t)} \right| dt \quad (6)$$

حيث،  $p_g$  هي طاقة الخرج المتولدة و  $T$  هي إجمالي وقت المحاكاة.  $P_{smooth}$  هو تكامل طاقة الخرج المتولدة ( $p_g$ ) بالقيمة المطلقة، بالتالي، إذا كانت قيمة  $P_{smooth}$  منخفضة، هذا يشير إلى أن تذبذبات طاقة الخرج المتولدة تم تخفيضها بشكل كبير [١٤]. تم استخدام وحدة ( $p.u$ ) لجميع البارامترات من خلال الاعتماد على تقنية التنظيم (Normalization) أي تحويل القيم الفعلية إلى نطاق موحد اثناء النمذجة لتحسين دقة النتائج.

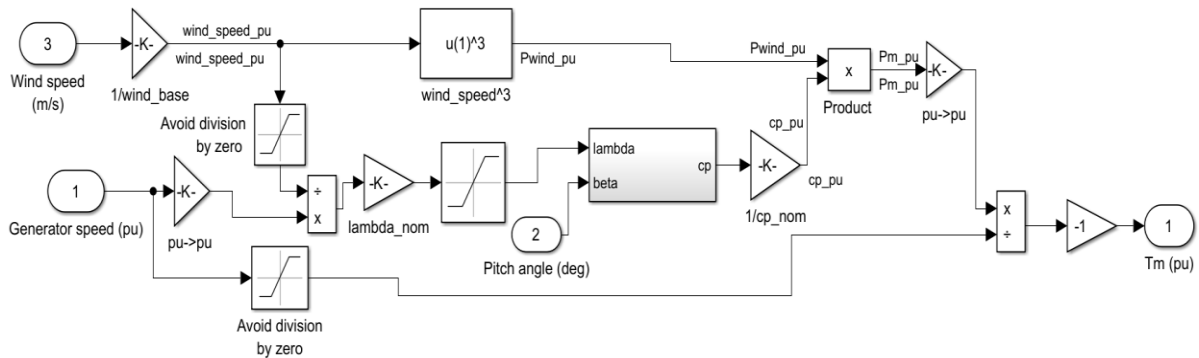
## ٥. نمذجة النظام باستخدام matlab\Simulink

يظهر الشكل (12) نمذجة النظام المقترح باستخدام Matlab\Simulink.



الشكل (12): النموذج الرئيسي الشامل للنظام المقترح باستخدام Matlab\Simulink.

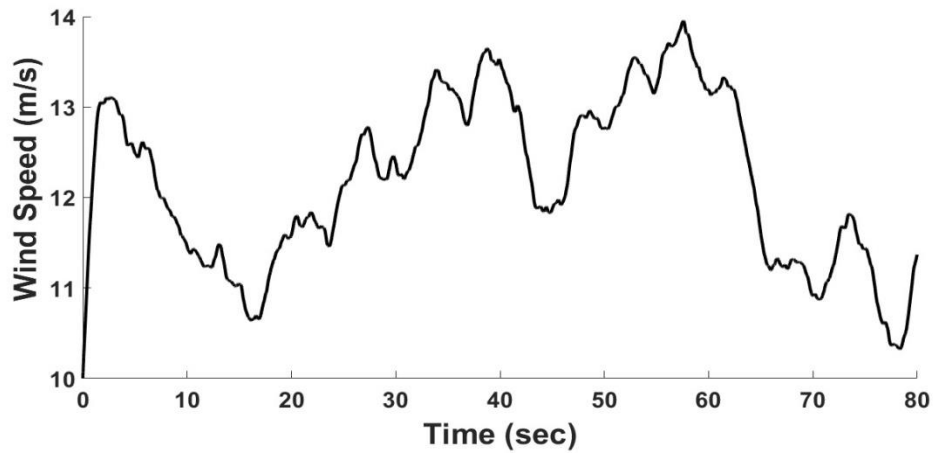
يظهر الشكل (13) نمذجة التوربين الريحي باستخدام Matlab\Simulink.



الشكل (13): نمذجة التوربين الريحي باستخدام Matlab\Simulink.

يظهر الشكل (14) نمذجة SCIG مع التوربين الريحي المتصل مع الشبكة الكهربائية باستخدام Matlab\Simulink.



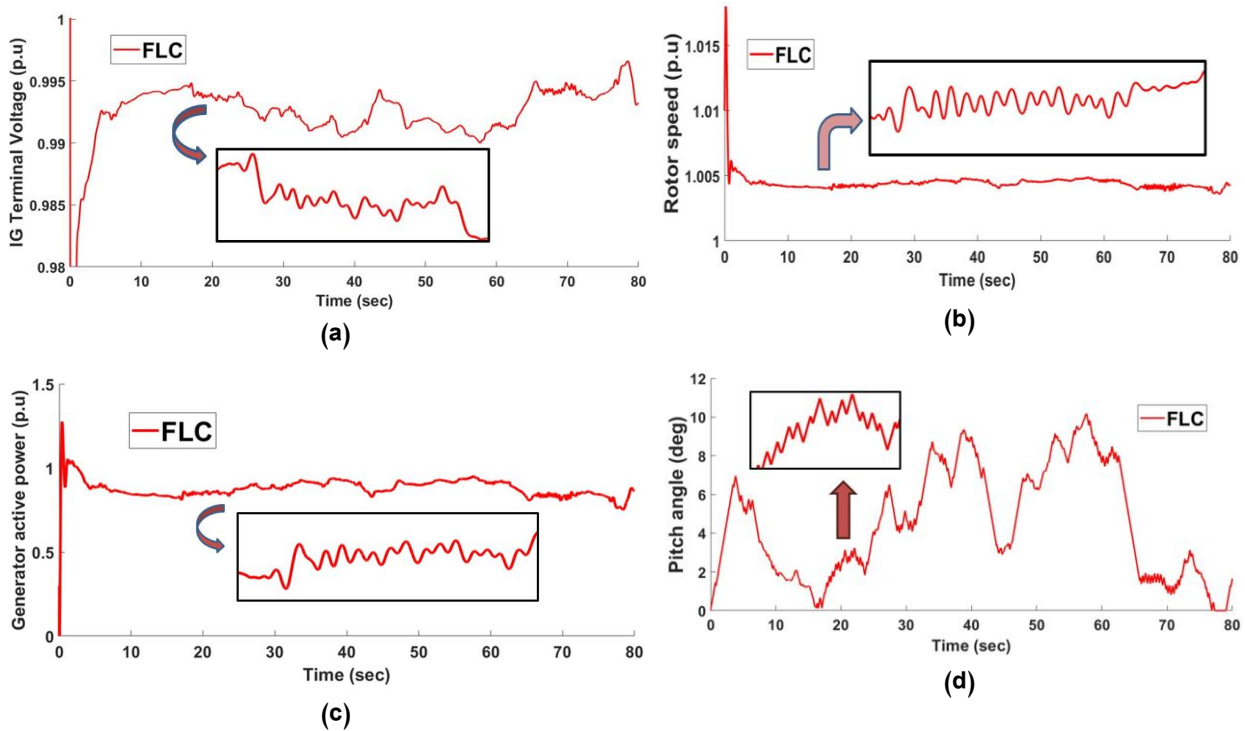


الشكل (16): تغير سرعة الرياح مع الزمن.

الحالة ١: النظام في حالة الاضطراب الديناميكي مع استخدام المتحكم الضبابي للتحكم بزوايا ميل

شفرات التوربين الريحي

تم اختبار النظام المقترح مع المتحكم الضبابي ويظهر الشكل (١٧) نتائج الاختبار.



الشكل (17): الاستجابة الديناميكية للنظام في ظل اضطراب سرعة الرياح مع تصميم مُتحكم FLC للتحكم بزوايا ميل الشفرات، (a) جهد المولد، (b) سرعة الدائر، (c) الاستطاعة الفعلية للمولد، (d) زاوية ميل الشفرات.

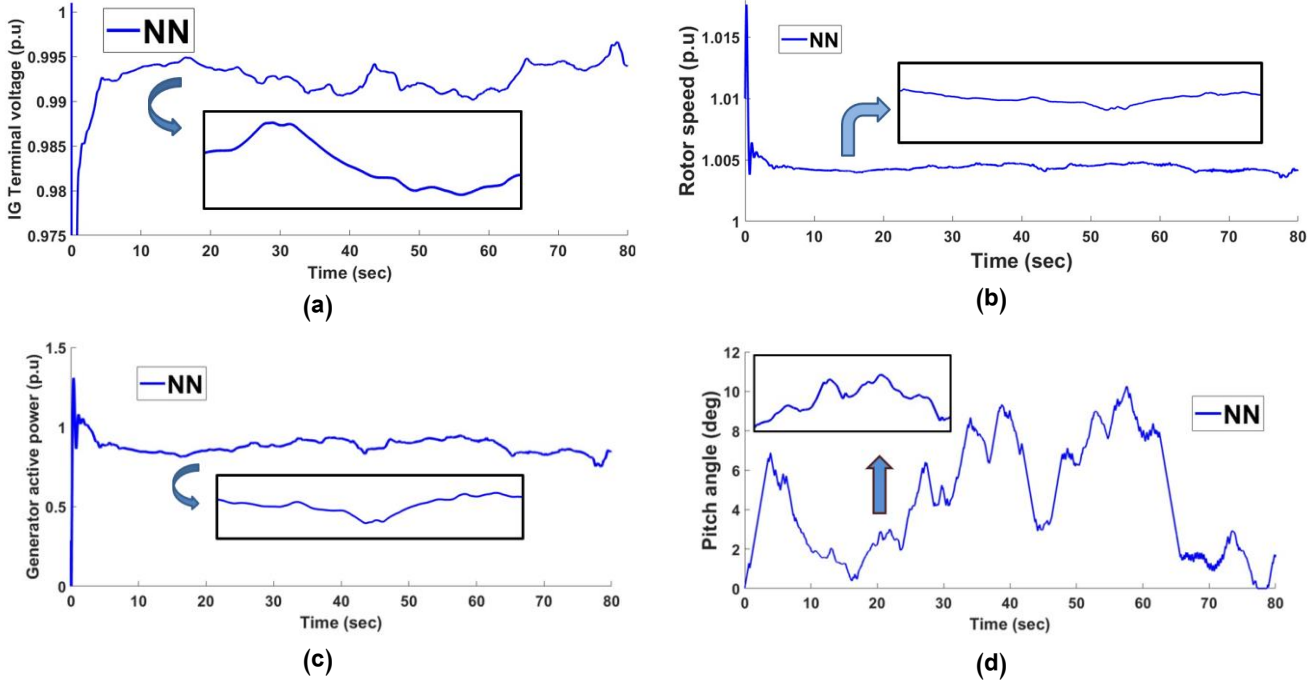
نلاحظ من الشكل (17a) تأثير وحدة FLC على استقرار الجهد ووجود تذبذب ملحوظ، كما نلاحظ من

الشكل (17b) تذبذب قيم سرعة الدائر، مما انعكس على الاستطاعة الفعلية بشكل سلبي كما هو موضح في

الشكل (17c). يوضح الشكل (17e) انحراف زاوية ميل الشفرات بشكل مستمر ومفاجئ مع الزمن.

## الحالة ٢: اختبار النظام في حالة الاضطراب الديناميكي مع استخدام متحكم الشبكة العصبونية للتحكم بزوايا ميل شفرات التوربين الريحي

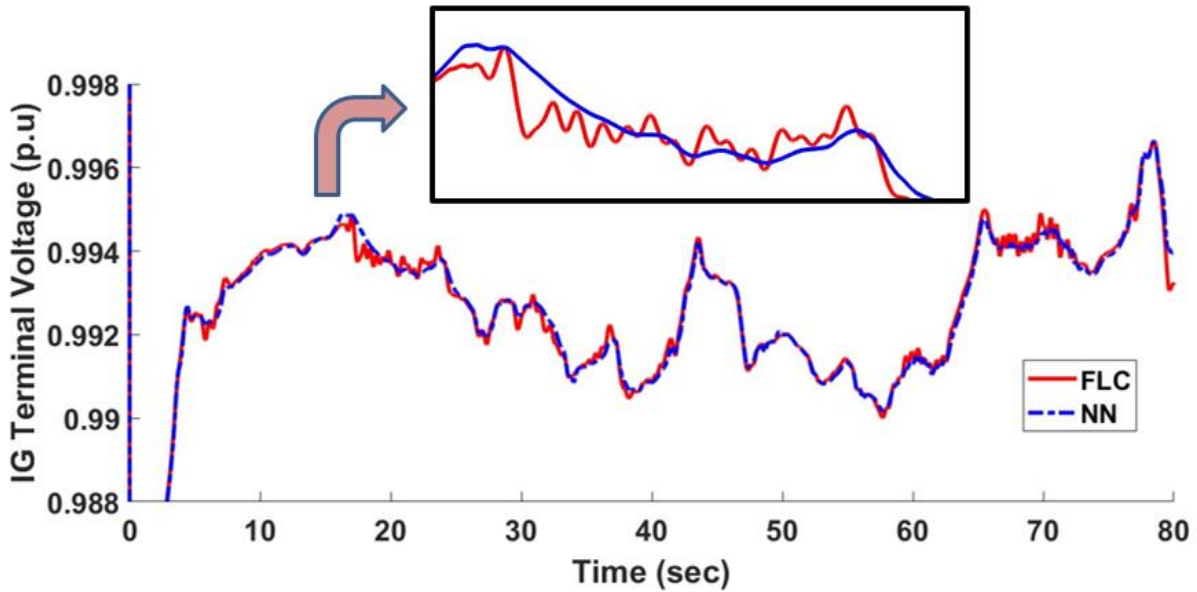
تم اختبار النظام المقترح مع متحكم الشبكة العصبونية ويوضح الشكل (١٨) نتائج الاختبار .



الشكل (18): الاستجابة الديناميكية للنظام في ظل اضطراب سرعة الرياح مع تصميم متحكم الشبكة العصبونية (NN) للتحكم بزوايا ميل الشفرات، (a) جهد المولد، (b) سرعة الدائر، (c) الاستطاعة الفعلية للمولد، (d) زاوية ميل الشفرات.

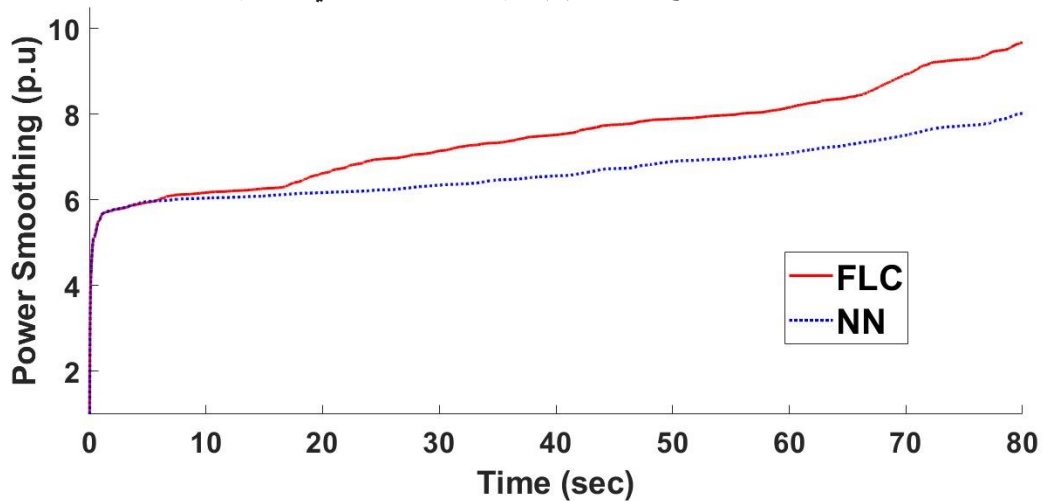
نلاحظ من الشكل (18a) تأثير وحدة التحكم المعتمدة على الشبكة العصبونية على استقرار الجهد حيث قدمت استجابة قريبة من استجابة وحدة التحكم FLC ولكن أقل تذبذباً أي أكثر استقراراً ديناميكياً، كما نلاحظ من الشكل (18b) استقرار أكبر لقيم سرعة الدائر من وحدة FLC، الشكل (18c) يوضح نعومة وانخفاض التذبذب الاستطاعة الفعلية بالمقارنة مع FLC وزيادة الاستقرار، كما يوضح الشكل (18e) انحراف زاوية ميل الشفرات الموافق لهذا المتحكم أصبح أكثر سلاسة ونعومة أي أكثر منطقية وسلامة لعمل المحرك والحصول على أفضل استقرار ديناميكي للنظام المدروس.

بعد دراسة استجابة النظام مع وحدتي التحكم بزوايا ميل الشفرات (FLC, NN) في ظل تغير سرعة الرياح الموضحة في الشكل (16)، يؤكد الشكل (19) أنّ وحدة التحكم NN قدمت أفضل استجابة حيث قللت بشكل كبير الاضطراب والتذبذبات الناتجة لتعطي أفضل استقرار ممكن للجهد مما يؤمن اتصال آمن للتوربين مع الشبكة.



الشكل (19): الجهد الناتج من المولد مع نظامي التحكم بزوايا ميل الشفرات (NN, FLC).

لتقييم أداء وحدات التحكم بزوايا ميل الشفرات في ظل تغير سرعة الرياح الموضحة في الشكل (16)، تم حساب  $P_{smooth}$  لوحديتي التحكم FLC و NN، نجد من الشكل (20) أنَّ وحدة NN حققت أقل قيمة عند نهاية زمن النمذجة وهذا يشير إلى أنَّ تقلبات طاقة الخرج تم تخفيضها بشكل أكبر لتحقيق أفضل استقرار، كما يوضح الجدول (2) قيم  $P_{smooth}$  لوحديتي التحكم عند الزمن 80sec.



الشكل (20): مؤشر الأداء للنظام المدروس مع وحدتي التحكم بزوايا ميل الشفرات (NN, FLC). الجدول (2) قيمة مؤشر الأداء لوحديتي التحكم (FLC, NN) عند الزمن 80sec.

FLC	NN
9.6 p.u	8 p.u

## الاستنتاجات والتوصيات:

### الاستنتاجات:

تم في هذا البحث دراسة الاستقرار الديناميكي للتوربينات الريحية ذات السرعة الثابتة والتي تعتمد على المولد ذو القفص السنجابي من خلال تصميم وحدتي التحكم الضبابية وأخرى تعتمد على الشبكات العصبونية للتحكم بزوايا ميل شفرات التوربين الريحي، وذلك في ظل حدوث اضطراب عشوائي في سرعة الرياح. أظهرت نتائج المقارنة لمحاكاة النظام المدروس عبر Matlab\simulink ما يلي:

◀ حَقَّق النظام مع مُتَحَكِّم الشبكة العصبونية أفضل أداء من حيث زيادة الاستقرار الديناميكي بالمقارنة مع وحدة التحكم الضبابية. حيث تم تخفيض قيمة مؤشر الأداء  $P_{smooth}$  إلى  $8p.u$  باستخدام المتحكم الذي يعتمد على الشبكة العصبونية بالمقارنة مع قيمة  $P_{smooth}$  عند استخدام المتحكم الضبابي والتي بلغت إلى  $9.6p.u$ ، وهذا يدل على أنَّ تقلبات طاقة الخرج تم تخفيضها بشكل أكبر، أي استقرار ديناميكي أفضل باستخدام متحكم الشبكة العصبونية.

### التوصيات:

◀ يوصى بدراسة أنواع أخرى من وحدات التحكم الذكية لتحسين كل من الاستقرار الديناميكي والعاير.

◀ يوصى بتعويض الاستطاعة الردية وتنظيم الجهد باستخدام أنظمة نقل التيار المتناوب المرنة FACTS كالمعوض التسلسلي المتواقت الساكن، ومتحكم سريان الاستطاعة بين الخطوط.

### الجهة المستفيدة من البحث

شركات تصنيع التوربينات الريحية، بالإضافة إلى الباحثين المهتمين بأبحاث الطاقة الريحي

## المراجع

1. Taraft, S., Rekioua, D., Aouzellag, D., & Bacha, S.. A proposed strategy for power optimization of a wind energy conversion system connected to the grid. *Energy Conversion and Management*,. 2015, pp. 101, 489-502.
2. KIM, Yeonhee, et al. Power Smoothing of a Variable-Speed Wind Turbine Generator in Association with the Rotor Speed-Dependent Gain. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2017.
٣. Duong, M. Q., Grimaccia, F., Leva, S., Mussetta, M., & Le, K. H. . Hybrid controller for transient stability in wind generators. In *2015 Clemson University Power Systems Conference (PSC)*, pp. pp. 1-7, 2015.
٤. Hagra, H., & Wagner, C. Towards the wide spread use of type-2 fuzzy logic systems in real world applications. *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2012, pp. 14-24.
٥. Q. V. C. Y. .& N. T. T. Ngo, "The fuzzy-PID based-pitch angle controller for small-scale wind turbine " *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2020.
٦. Najd, A. H., Goksu, G., & Hammood, H. F. , "Pitch angle control using neural network in wind turbines." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 928. No. 2. IOP Publishing, 2020.
٧. محمد مصطفى محمد الخياط. تكنولوجيا طاقة الرياح، مجلة الكهرباء العربية. ٢٠٠٧.
٨. Naik, K. A., Gupta, C. P., & Fernandez, E. . Advanced Type-2 fuzzy logic-based pitch-angle control strategy for wind energy system. *Wind Engineering*. 2020.
٩. M. R. .& E. M. Khadraoui ، "Comparison between optislip and fixed speed wind energy conversion systems, " *IEEE*, pp ٦-١ , July 2008.
١٠. Ackermann, T. *Wind Power in Power Systems*. 2005.
١١. Wu, B., Lang, Y., Zargari, N., & Kouro, S. . "Power conversion and control of wind energy systems", John Wiley & Sons. 2011.
1٢. Trudnowski, D. J., Gentile, A., Khan, J. M., & Petritz, E. M.. Fixed-speed wind-generator and wind-park modeling for transient stability studies. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2004, pp. 1911-1917.
1٣. Naik, Kanasottu Anil, and Chandra Prakash Gupta. "Output power smoothing and voltage regulation of a fixed speed wind generator in the partial load region using STATCOM and a pitch angle controller." *Energies* 11.1 (2017).
1٤. Senjyu, T., et al., et al. Output power leveling of wind turbine generator for all operating regions by pitch angle control. *IEEE Transactions on Energy conversion*. 2006.
1٥. The Wind Power . [http://www.thewindpower.net/windfarm\\_en\\_86\\_challicum-hills.php](http://www.thewindpower.net/windfarm_en_86_challicum-hills.php) . [Online]
1٦. HAQUE, M. H. Evaluation of power flow solutions with fixed speed wind turbine generating systems. *Energy Conversion and Management*. 2014.

## الملحق

بارامترات المولد SCIG [١٦].

Parameter	Values
$P_{rated}$ , $V_{rated}$	1.5 MW, 575 V
$R_s$ , $R_r$	0.004843pu, 0.004377 pu
$L_s$ , $L_r$	0.1248pu, 0.1791 pu
$L_m$ , H	6.77pu, 5.04 s
$C_{wf}$	200 KVAR

بارامترات التوربين الريحي [١٥].

Parameter	Values
Rated power	1.5 MW
Rotor diameter	64m
Number of blades	3
Cut-in wind speed	4m/s
Cut-out wind speed	25m/s
Rated wind speed	14m/s
Generator	SCIG