

Improving Wind Turbine Performance by Intelligent Pitch Angle Control

Dr. Salah Dawod*
Dr. Fadi Motawej**
Zeinab Hammoud***

(Received 12 / 3 / 2024. Accepted 9 / 5 / 2024)

□ ABSTRACT □

This paper presents an effective control strategy for wind turbine that it ensure the continuity of its work and its benefits by producing energy and maintaining the life of the turbine despite the changing wind speed and its turbulence. This paper discusses pitch angle control at high wind speed to reduce the corresponding loads on the turbine and preserve its parts. Yaw angle control at low wind speed to get the maximum power out of the turbine. Artificial intelligence techniques have been used (neural networks and fuzzy logic) to design a controller capable of adapting to changing wind conditions. Neural network and fuzzy logic work effectively when the nature of the system is variable and non-linear. The proposed controller was compared with pid and fuzzy pid controllers, and the results showed that the proposed controller achieved better results in term of response speed and reduce steady-state error.

Keywords: pitch angle, yaw angle, neural network, fuzzy logic.

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Professor, Department of Mechanical Engineering, faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen university, Latakia, Syria.

** Associate Professor, Department of Mechatronics Engineering, faculty of Mechanical and Engineering, ALManara university, Latakia, Syria.

***MSC Student, Department of wind power Engineering, faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen university, Latakia, Syria. Zeinabhammoud@gmail.com

تحسين أداء العنفات الريحية عبر التحكم الذكي بزوايا انحراف الشفرة

د. صلاح داوود*

د. فادي متوج**

زينب حمود***

(تاريخ الإيداع 12 / 3 / 2024. قُبِلَ للنشر في 9 / 5 / 2024)

□ ملخص □

يقدم هذا البحث إستراتيجية تحكم فعالة بالعنفات الريحية، تضمن استمرار عملها وفعاليتها بإنتاج الطاقة والحفاظ على سلامة العنفة الريحية بالرغم من تغير سرعة الرياح واتجاهاتها. يناقش البحث آلية التحكم بالعنفة pitch angle control عند السرعة العالية للرياح لتقليل الأحمال المطبقة على العنفة الريحية والحفاظ على أجزائها، وكذلك التحكم بالزاوية yaw عند السرعات المنخفضة بهدف الحصول على أقصى استطاعة ممكنة من العنفة. تمت الاستعانة بتقنيات الذكاء الصناعي (الشبكات العصبونية والمنطق الضبابي) لتصميم متحكم عصبوني ضبابي هجين (neural-fuzzy controller) قادر على التكيف مع ظروف الرياح المتغيرة حيث أن الشبكات العصبونية والمنطق الضبابي يعملان بفاعلية عندما تكون حالة النظام متغيرة من حيث قدرتهما على التعامل مع الأنظمة غير الخطية. تم مقارنة المتحكم المقترح مع متحكمات pid, fuzzy pid، وأظهرت النتائج بأن المتحكم المقترح حقق نتائج تحكم أفضل من حيث سرعة الاستجابة وتقليل خطأ الحالة الثابتة. تم بناء المتحكم المقترح واختباره في بيئة matlab/simulink.

الكلمات المفتاحية: زاوية انحراف الشفرة، زاوية ميل العنفة عن اتجاه الرياح، الشبكات العصبونية، المنطق الضبابي.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

* أستاذ - قسم الهندسة الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** أستاذ مساعد - قسم هندسة الميكاترونك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة المنارة - اللاذقية - سورية.

*** طالبة ماجستير طاقة الرياح - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Zeinabhamoud@gmail.com

مقدمة:

زاد خلال السنوات الأخيرة التوجه، نحو مصادر الطاقة المتجددة (طاقة الرياح والطاقة الشمسية....)، نتيجة النقص بموارد الوقود الأحفوري وتقليل الآثار الضارة على البيئة التي تنتجها هذه المصادر. تعتبر طاقة الرياح إحدى أهم مصادر الطاقة المتجددة. حيث تقوم العنفة الريحية بتحويل طاقة الرياح عمل (طاقة ميكانيكية) ومن ثم إلى طاقة كهربائية عبر المولدات الكهربائية. قامت العديد من الأبحاث بدراسة التحكم وتحسين أداء العنفات الريحية كالتحكم بزوايا انحراف شفرات العنفة [1]، والتحكم بزوايا ميل العنفة عن اتجاه الرياح [2]، عبر الاستعانة بخوارزميات الذكاء الصناعي كالشبكات العصبونية [3]، والتحكم الضبابي [4].

العنفات الريحية:

تعطى الاستطاعة الميكانيكية التي تولدها العنفة وفق المعادلة التالية:

$$P_m = 0.5 \{ \rho * A_r * C_p(\lambda, \beta) * V_{wind}^3 \} \quad (1)$$

P_m الاستطاعة الميكانيكية للعنفة الريحية (W)، ρ : كثافة الهواء kg/m^3 ، A : المساحة التي يشغلها دوار العنفة، C_p : معامل كفاءة العنفة، V_{wind} : سرعة الرياح (m/s)، λ : نسبة سرعة رأس الشفرة، β : زاوية ميل شفرات العنفة pitch angle هي الزاوية بين وتر الشفرة ومستوى الدوران لدوار العنفة.

يحدد أداء العنفة بناء على معامل كفاءة العنفة وهو نسبة الطاقة التي تنتجها العنفة من طاقة الرياح المتوفرة، نظرياً القيمة المحددة لمعامل كفاءة العنفة تساوي 0.59 ويدعى بحد بيتز.

يتعلق معامل كفاءة العنفة بالزاوية (β) pitch ومعدل سرعة رأس الشفرة λ وفق المعادلات التالية [1]:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 * \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda}} + 0.0068\lambda \quad (2)$$

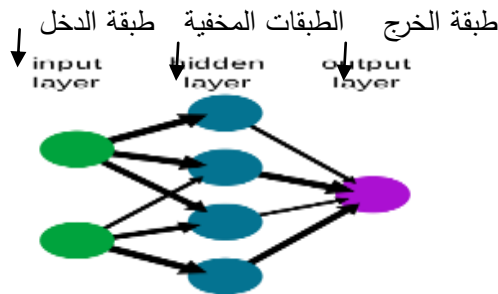
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (3)$$

حيث λ تتحدد بالعلاقة $\frac{V}{V_{wind}}$ ، حيث V سرعة رأس الشفرة.

خوارزميات الذكاء الاصطناعي**1- الشبكات العصبية الاصطناعية:**

تعد الشبكات العصبية الاصطناعية نماذجاً حسابية تهدف لمحاكاة عمل الشبكات العصبية البيولوجية في الدماغ البشري. تتألف الشبكات العصبية الاصطناعية من عناصر معالجة بسيطة متصلة فيما بينها تدعى **عصبونات**.

تتألف الشبكات العصبونية من ثلاث طبقات الشكل (1):



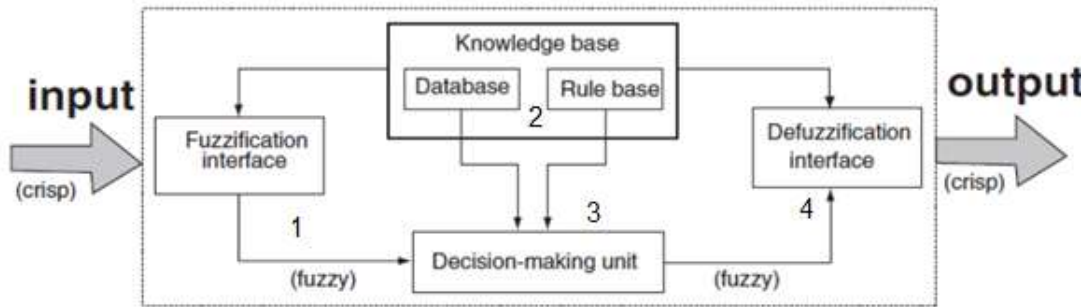
الشكل(1) الشبكة العصبية الاصطناعية

لا تقوم طبقة الدخل بأي عملية معالجة فهي ببساطة مكان تغذية الشبكة بشعاع البيانات، تقوم طبقة الدخل بعد ذلك بتغذية (نقل المعلومات) للطبقة المخفية ومن ثم تقوم الطبقة المخفية بتغذية طبقة الخرج. تتم المعالجة الفعلية للبيانات في الطبقة المخفية وطبقة الخرج. عندما يكون هناك عدد كاف من العصبونات في كل طبقة، تكون الشبكة قادرة على التدريب للقيام بأشياء مفيدة بالاستعانة بخوارزميات التدريب. ينجز كل عصبون مهمة حسابية بسيطة لكن السلوك الكلي للشبكة يتحدد من خلال الاتصال بين مختلف هذه العناصر، ترتبط العصبونات في كل طبقة مع العصبونات بالطبقات الأخرى عبر أوزان. تعمل الطبقات المخفية على ضبط أوزان المدخلات بدقة حتى يصبح هامش خطأ الشبكة العصبونية في حده الأدنى. كما تتميز الشبكة العصبونية الاصطناعية بخاصية التعميم أي يمكن تطبيق الشبكة العصبونية على معطيات جديدة لم يتم تعلمها مسبقاً [1].

2- المنطق الضبابي:

يشبه المنطق الضبابي طريقة تفكير البشر في اتخاذ القرارات، عن طريق قواعد يحددها الخبير بالمسألة المطلوب حلها. يتألف نظام التحكم الضبابي من المراحل التالية الشكل (2):

- 1- Fuzzification: التعميم تحويل المدخل الرقمية إلى قيم لغوية.
- 2- Knowledge base: قاعدة المعرفة
- 3- Decision-making unit: وحدة اتخاذ القرار
- 4- Defuzzification: إزالة التعميم تمثل مخرجات وفيها يتم تحويل القيم من قيم لفظية إلى قيم رقمية.



الشكل (2) نظام التحكم الضبابي

أهمية البحث وأهدافه:

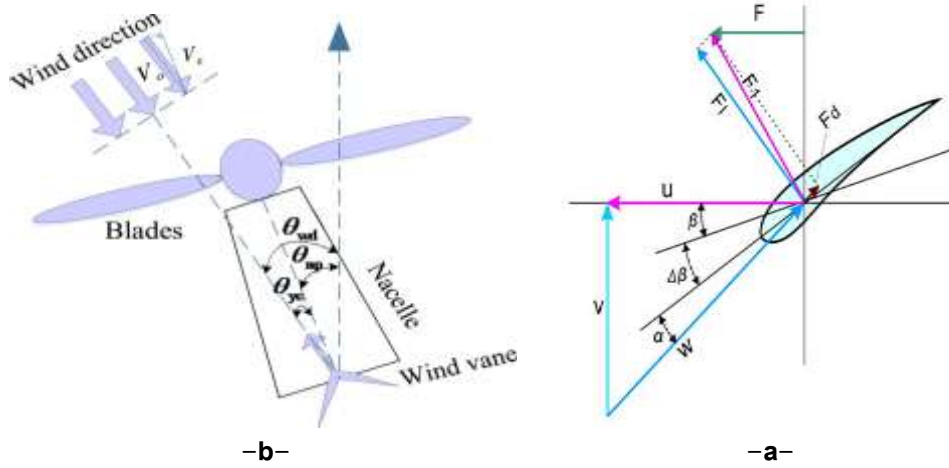
تكمن أهمية البحث بمحاولة تحسين أداء العنفات الريحية، كونها تتعلق بتغيرات سرعة الرياح واتجاهاتها وذلك للحصول على أفضل استطاعة ممكنة من العنفة بالإضافة إلى زيادة عمر معداتها نتيجة تقليل الإجهاد المطبق على العنفة. لذلك دعت الحاجة للبحث عن طرق تحكم تحقق أداء أفضل للعنفة الريحية. حيث من المتوقع أن يتحسن أداء العنفة عند التحكم بزواوية انحراف الشفرات (pitch) عند سرعات الرياح العالية، والزواوية (yaw) عند السرعات المنخفضة. يهدف البحث لإيجاد متحكم يعتمد على تقنيات الذكاء الصناعي لإجراء عملية التحكم المطلوبة والحصول على أقصى استطاعة خرج مستقرة، إذ يعد المتحكم الذكي الخيار الأمثل كونه قادر على التعامل مع طبيعة عمل نظام العنفة غير الخطي مما يمكننا من الاستغناء عن بناء نموذج رياضي معقد للمنظومة.

طرائق البحث ومواده:

ترتبط استطاعة خرج العنفة مع سرعة الرياح، حيث تبدأ العنفة بالدوران عند سرعة رياح تدعى بسرعة البدء وتزداد الاستطاعة بازدياد سرعة الرياح حتى السرعة الاسمية التي تقابل الاستطاعة الاسمية التي تقدمها العنفة الريحية. تتوقف العنفة عن العمل عند سرعة الرياح العالية، وتدعى سرعة القطع وذلك لحماية أجزاء العنفة من الضرر الذي يمكن أن تسببه الرياح الشديدة.

يمكن توضيح آلية التحكم باستطاعة العنفة خلال مرحلتي عمل كما يوضح الشكل(3):

- 1- المرحلة الأولى (yaw control): تتحدد بين سرعة البدء cut_in speed والسرعة الاسمية، للحصول على أقصى استطاعة ممكنة من الرياح عند تغيير اتجاه الرياح وذلك بجعل عامل كفاءة العنفة cp أكبر ما يمكن وزاوية ميل العنفة عن اتجاه الرياح معدومة. زاوية (yaw) هي زاوية ميل العنفة عن اتجاه الرياح.
- 2- المرحلة الثانية (pitch control): تتحدد بين السرعة الاسمية وسرعة التوقف cut_off speed، ويهدف التحكم في هذه المرحلة إلى المحافظة على استطاعة خرج العنفة ضمن حدود الاستطاعة الاسمية.

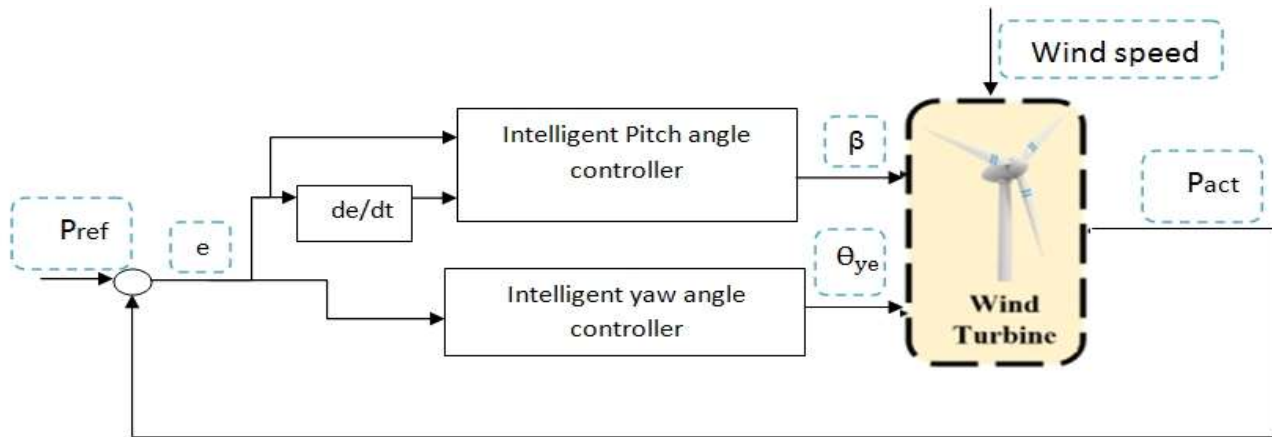


-b- زاوية yaw

-a- زاوية انحراف الشفرة

خوارزمية التحكم المقترحة

يوضح الشكل (4) آلية التحكم المقترحة، حيث يتم مقارنة الاستطاعة الاسمية مع الاستطاعة الفعلية الميكانيكية للعنفة، وتنتج إشارة خطأ تدخل على متحكم بالزاوية pitch الذي سيعطي زاوية الميل المطلوبة لشفرة العنفة الريحية. ومتحكم بالزاوية yaw الذي سيعطي الزاوية المطلوبة لتحريك العنفة باتجاه الرياح. تم الاعتماد على الشبكات العصبونية والمنطق الضبابي في تصميم متحكم يؤدي العمل المطلوب.



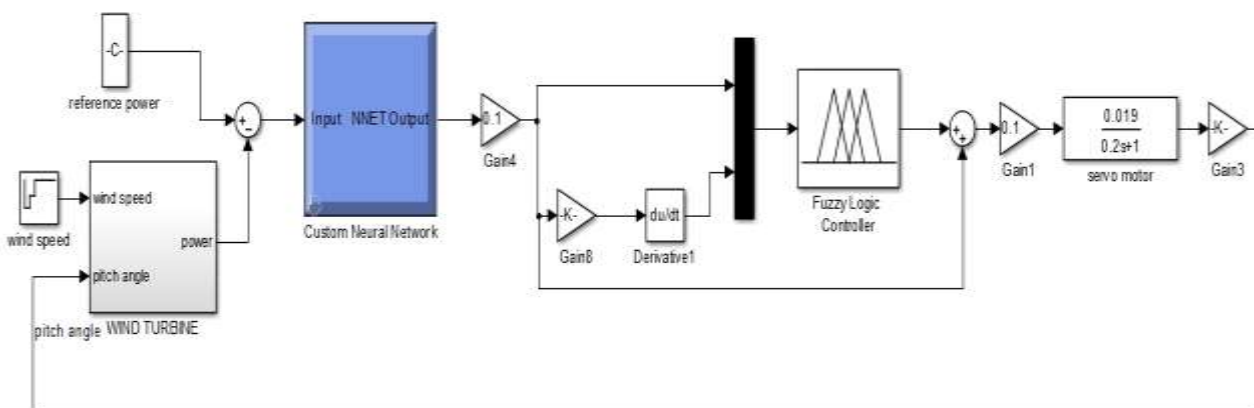
الشكل (4) آلية التحكم المقترحة

1- التحكم بزواوية انحراف شفرات العنفة (pitch control)

يهدف التحكم بزواوية انحراف شفرات العنفة في الحصول على استطاعة خرج مساوية للاستطاعة الاسمية للعنفة، أو ضمن حدودها عند سرعات الرياح أعلى من السرعة الاسمية، وأقل من سرعة التوقف للعنفة. عند سرعات الرياح العالية فإن قدرًا كبيراً من طاقة الرياح توجه على شفرات العنفة وبالتالي تتلقى أحمالاً زائدة مما يؤثر على أداء العنفة. لذا تم اللجوء إلى استراتيجيات التحكم بانحراف شفرات العنفة لتقليل القوى الناتجة عن الرياح المطبقة على الشفرات منعاً لانتهابها [5].

نلاحظ من المعادلة (2) إن العلاقة بين زاوية انحراف الشفرات β ومعامل كفاءة العنفة C_p عكسية حيث كلما زادت β تقل C_p . عندما تزداد سرعة الرياح فوق السرعة الاسمية يتم إزاحة شفرات العنفة عن اتجاه الرياح لزيادة قيمة β وبالتالي تقليل قيمة C_p بما يتناسب مع ظروف الرياح السائدة مما ينعكس هذا على قيمة استطاعة الخرج المنتجة من قبل العنفة وإنقاصها للمحافظة عليها ضمن حدود الاستطاعة الاسمية وبالتالي الحصول على $(C_p, \beta)_{optimal}$ وفقاً لظروف الرياح [6].

يوضح الشكل (5) نموذج آلية التحكم بزواوية انحراف شفرات العنفة الريحية باستخدام بيئة ماتلاب.



الشكل (5) نموذج آلية التحكم بزواوية انحراف شفرات العنفة الريحية

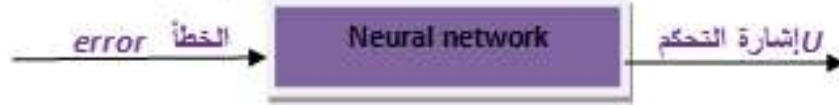
1-1 تصميم متحكم ذكي للتحكم بزواوية انحراف شفرة العنفة.

تشمل عملية تصميم المتحكم المقترح مرحلتين، يتم في المرحلة الأولى تصميم متحكم عصبوني، وفي المرحلة الثانية يتم تضمين خرج المتحكم العصبوني بالمتحكم الضبابي.

- تصميم المتحكم العصبي

تعد أول خطوة بتصميم المتحكم هي اختيار المداخل وفق متطلبات النظام. في نظام pitch control، والمدخل هو إشارة الخطأ error (الفرق بين القيمة المقاسة والقيمة المرجعية لاستطاعة خرج العنفة) التي ستدخل على الشبكة العصبونية الشكل (6). ويتم التعبير عن الخطأ وفق المعادلة:

$$e(t) = p_{mref}(t) - p_m(t) \quad (4)$$

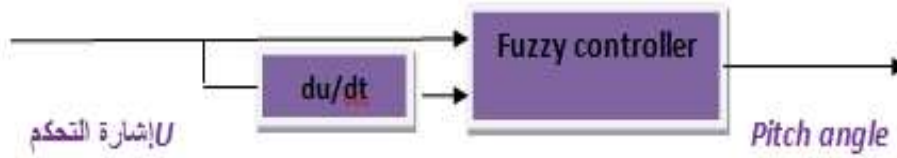


الشكل (6) المتحكم العصبي

تم تصميم شبكة عصبونية *Feed forward network* بطبقة مخفية واحدة. تحوي الطبقة الأولى على عصبون واحد، والطبقة الثانية هي عبارة عن طبقة مخفية تحتوي على ثلاث عصبونات بتابع تحويل *logsig*، بينما تحتوي طبقة الخرج على عصبون واحد بتابع تفعيل خطي *purelin* وتم استخدام تابع التدريب للشبكة *trainlm*. تم اختيار بارامترات الشبكة العصبونية بناء على تجربة عدة شبكات ببارامترات مختلفة ومقارنة دقة النتائج. إن عملية تدريب الشبكات العصبونية هي عملية تعليم لهذه الشبكات لأداء مهمة محددة، حيث تقوم على تعديل الأوزان للحصول على الوزن المثالي، الذي يقابل أقل خطأ ممكن، وخرج الشبكة العصبونية عبارة عن إشارة التحكم التي ستدخل على المتحكم الضبابي.

تصميم المتحكم الضبابي:

إن مداخل المتحكم الضبابي هي إشارة التحكم الصادرة عن الشبكة العصبونية ومشتقها وخرجها *Pitch angle* كما مبين بالشكل (7).



الشكل (7) المتحكم الضبابي

تم اختيار مجال التوابع للمدخلين: [-3,3]

حيث تم اعتماد الأسماء التالية لتوابع الانتماء:

NB: سالب كبير

NM: سالب متوسط

NS : سالب صغير

Z: صفر

PS: موجب صغير

PM : موجب صغير

PB: موجب كبير

Error and change error is [NB,NM,NS,Z,PS,PM,PB]

نوع التابع NB,PB هو gbell، بينما NM,NS,Z,PS,PM توابع triangular.

يبين الجدول (1) القواعد الضبابية التي تم اختيارها وهي عبارة عن 49 قاعدة ضبابية [7].

الجدول (1) قواعد المتحكم الضبابي

de/dt	e						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	Z
NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PM
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PM	Z	Z	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB

إن خرج المتحكم، هي زاوية انحراف الشفرة المرجعية والتي ستدخل على pitch servo للحصول على الزاوية المناسبة، التي تعطى للمحرك الموضوع في كل شفرة ليحرفها إلى الوضع المطلوب.

2- التحكم بزاوية ميل العنفة عن اتجاه الرياح (yaw control):

نتيجة لتغير اتجاه الرياح وبشكل مستمر، دعت الحاجة لتصميم نظام تحكم، يقوم على توجيه العنفة باتجاه الرياح، وخاصة عند السرعة المنخفضة للرياح، الأقل من السرعة الاسمية للاستفادة القصوى من الرياح، وتحقيق معامل كفاءة أعظمي للعنفة، عن طريق تقليل قيمة yaw angle (θ_{ye}) وجعلها مساوية للصفر ($\theta_{ye}=0$). وبالتالي الحصول على استطاعة عظمى، حيث توجد علاقة بين c_p ، yaw angle وفق المعادلات التالية [8]:

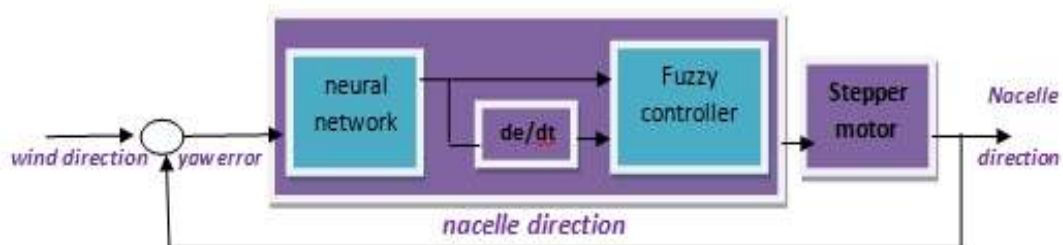
$$P_{ext} = \rho A_r C_p V_e^3 / 2 \quad (5)$$

$$V_e = V_0 \cos(\theta_{ye}) \quad (6)$$

$$P_{ext} = \rho A_r C_p V_0^3 \cos^k(\theta_{ye}) / 2 \quad (7)$$

يتم توجيه محور العنفة عبر محرك خطوي. يقوم حساس الاتجاه الموضوع على العنفة بتحديد اتجاه الرياح (تم التعبير عن حساس الاتجاه عبر تابع ماتلاب لتحديد اتجاه الرياح وفق زوايا محددة بحيث يكون خرج الحساس عبارة عن اتجاه الرياح المحددة كزاوية [9]).

يبين الشكل (8) آلية التحكم بالزاوية yaw حيث تتم مقارنة اتجاه الرياح مع اتجاه العنفة الريحية بشكل مستمر، وفرقهما هي إشارة الخطأ yaw error التي ستدخل إلى المتحكم الذكي، وخرج المتحكم هو الموقع المطلوب (الزاوية التي يدورها المحرك الخطوي) لجعل العنفة مواجهة للرياح.

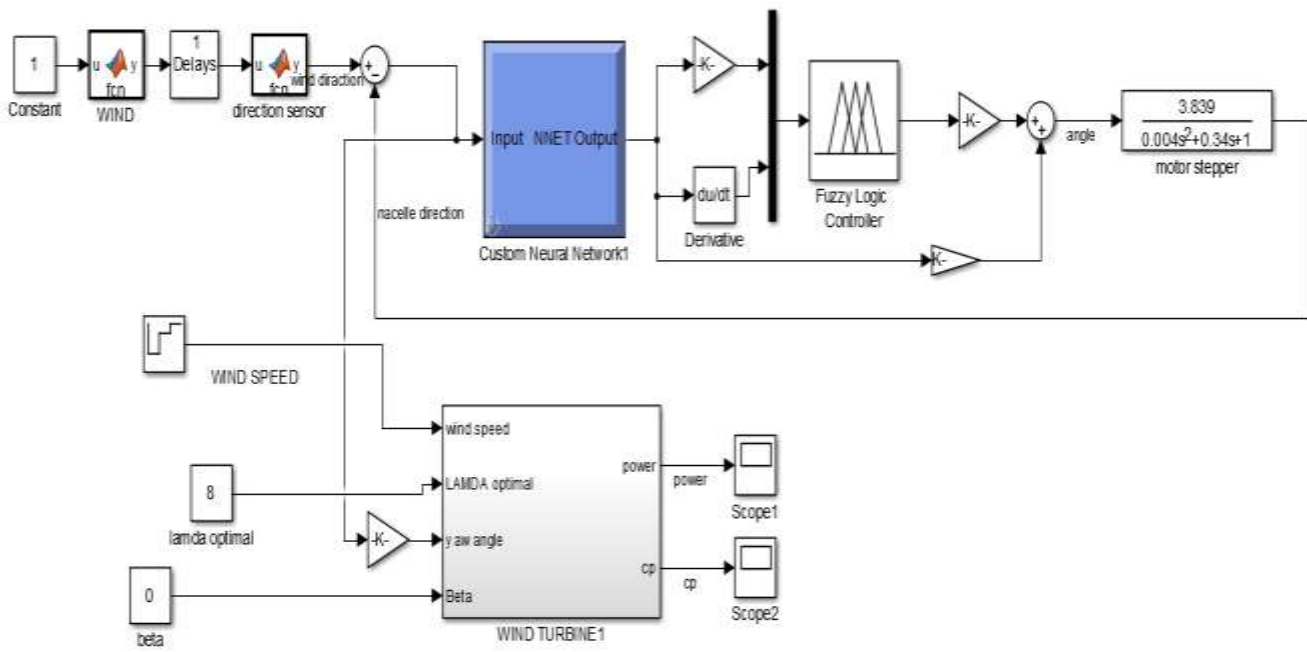


الشكل (8) آلية التحكم بالزاوية yaw

تم التعبير عن المحرك الخطوي عبر تابع تحويل وفق المعادلة التالية [10]:

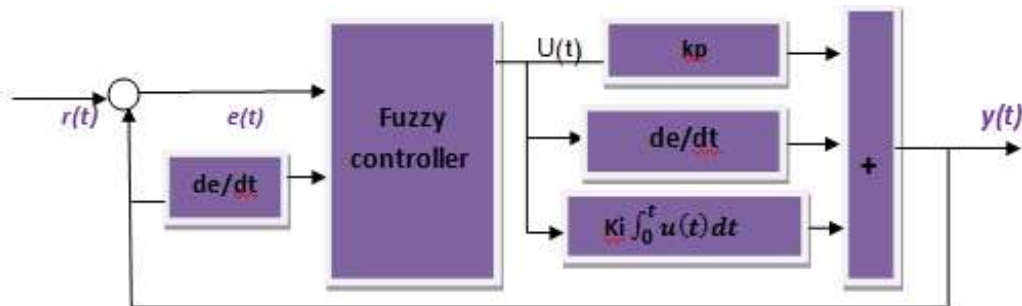
$$G = \frac{3.839}{0.004s^2 + 0.34s + 1} \quad (8)$$

يوضح الشكل (9) نموذج آلية التحكم بالزاوية yaw ببيئة ماتلاب.

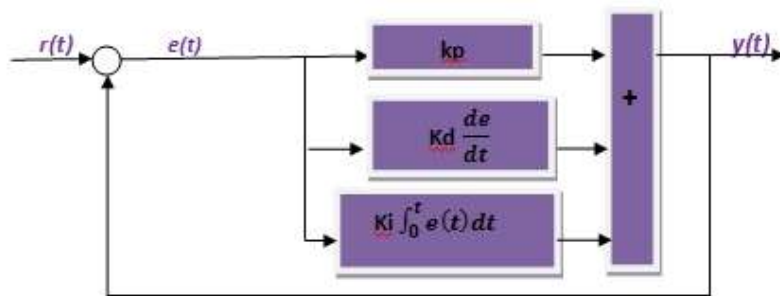


الشكل (9) نموذج آلية التحكم بالزاوية yaw بيئة ماتلاب.

بههدف اختبار فعالية آلية التحكم المقترحة في هذا البحث، تمت مقارنة نتائج المتحكم موضوع الدراسة مع متحكمي pid ، fuzzy pid الشكلين (10) و (11).



الشكل (10) متحكم fuzzy pid



الشكل (11) متحكم pid

النتائج والمناقشة:

تم في المحاكاة استخدام عنفة اختبار أفقية المحور صغيرة مواصفاتها موضحة بالجدول (2) [4].

الجدول (2) مواصفات العنفة الريحية:

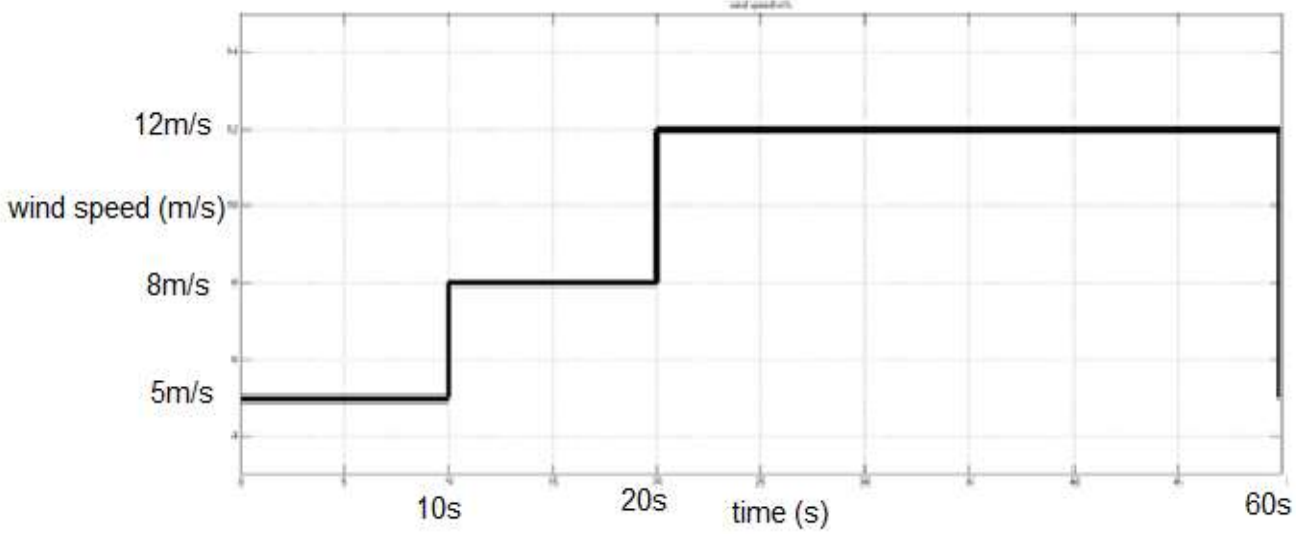
Blade length	L	10 m
Air density	ρ	1.225kg/m ²
Initial pitch angle	β_i	0°
Cut_in wind speed	Vci	3m/s
Cut_off wind speed	Vco	18m/s
rated wind speed	Vrat	8m/s
Rated power	Pm	24617W
Max tip speed ratio	Λ_{opt}	8
Max power coefficient	Cp_max	0.41
Time constant of the pitch serve	Tb	0.2s

1- التحكم بزواوية انحراف الشفرة

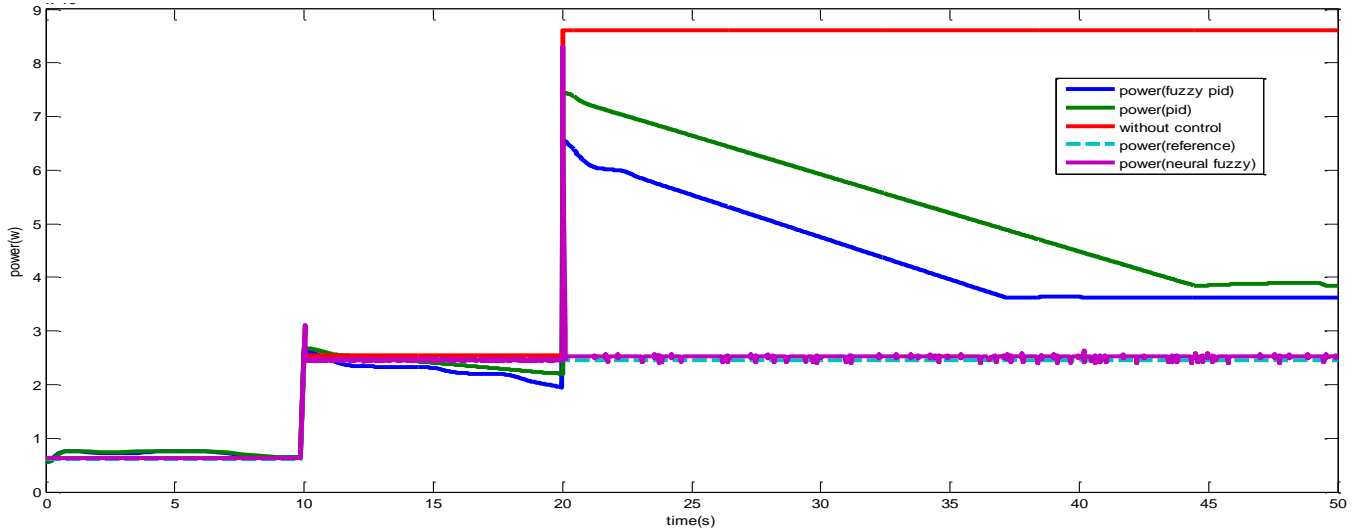
تم في هذا البحث وعند سرعة الرياح العالية الايعاز لبيدأ المتحكم بضبط زاوية انحراف شفرات العنفة الريحية، تمت مقارنة النتائج بين حالة باستخدام ثلاثة متحكمات fuzzy pid, pid, fuzzy pid, وneurl حالة عدم استخدام متحكم، كما تم نمذجة أنظمة تحكم بزواوية الانحراف باستخدام برنامج الماتلاب، لاختبار أداء المتحكمات وتقييم فعاليتها. حيث كان زمن المحاكاة 50s. كانت سرعة الرياح المستخدمة (قبل 10s تكون السرعة تحت السرعة الاسمية 5m/s، وعند الزمن بين 10s-20s مساوية سرعة الرياح الاسمية 8m/s، فوق 20s أعلى من السرعة الاسمية 12m/s) الشكل (12). توضح الأشكال (13-14-15) مقارنة كل من الاستطاعة الميكانيكية للعنفة، زاوية الانحراف، معامل الكفاءة عند استخدام المتحكمات وبلا استخدام متحكمات.

كانت زاوية الانحراف $\beta=0$ عند سرعة الرياح 5m/s وذلك للحصول على معامل كفاءة أعظمي ومنه لإنتاج أكبر قدر ممكن من الاستطاعة. عند سرعة الرياح الاسمية 8m/s تزداد β بما يتناسب مع ظروف الرياح لتحقيق معامل كفاءة أمثل وبالتالي الحصول على الاستطاعة الاسمية المطلوبة. الاستطاعة الاسمية للعنفة الريحية الصغيرة 24617W وهي الاستطاعة المرجعية التي نهدف الحصول عليها عندما تزداد سرعة الرياح فوق السرعة الاسمية. عند سرعة الرياح فوق السرعة الاسمية 12m/s تزداد β بحيث تصبح كبيرة كما هو موضح بالأشكال التالية (13-14-15) للحصول على معامل كفاءة أقل وبالتالي تخفيض استطاعة الخرج لتصبح بحدود الاستطاعة الاسمية.

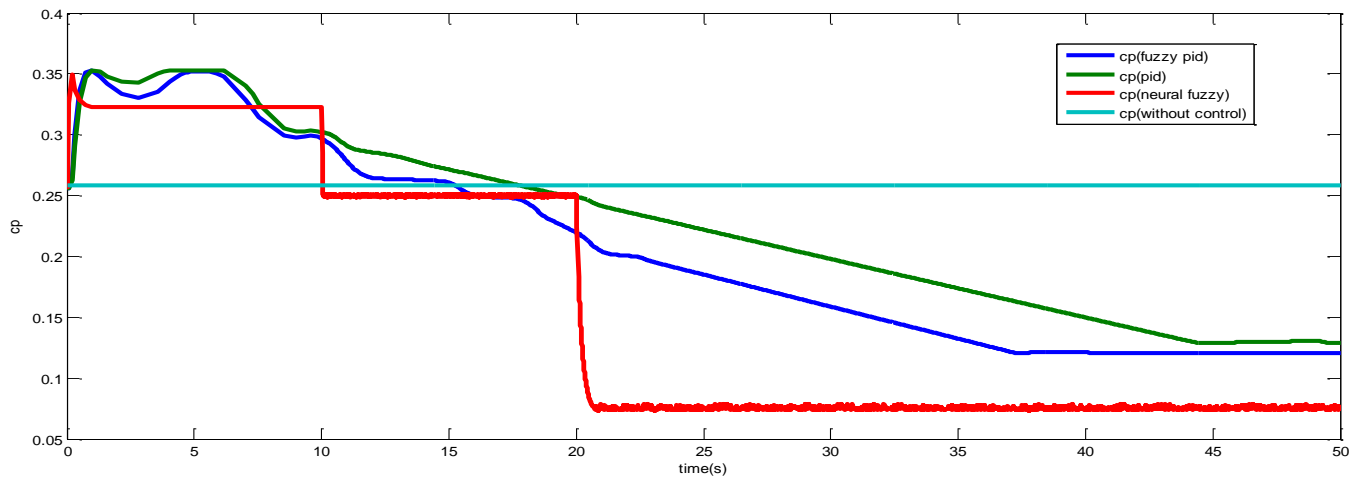
توضح النتائج حساسية المتحكم المقترح Neural fuzzy لتغير الرياح حيث حقق نتائج أفضل من fuzzy pid, pid من حيث تقليل خطأ الحالة الثابتة وسرعة الاستجابة، حيث نلاحظ سرعة استقرار متحكم Neural fuzzy والحصول على استطاعة خرج قريبة من الاستطاعة الاسمية للعنفة مقارنة مع بقية المتحكمات الشكل (13).



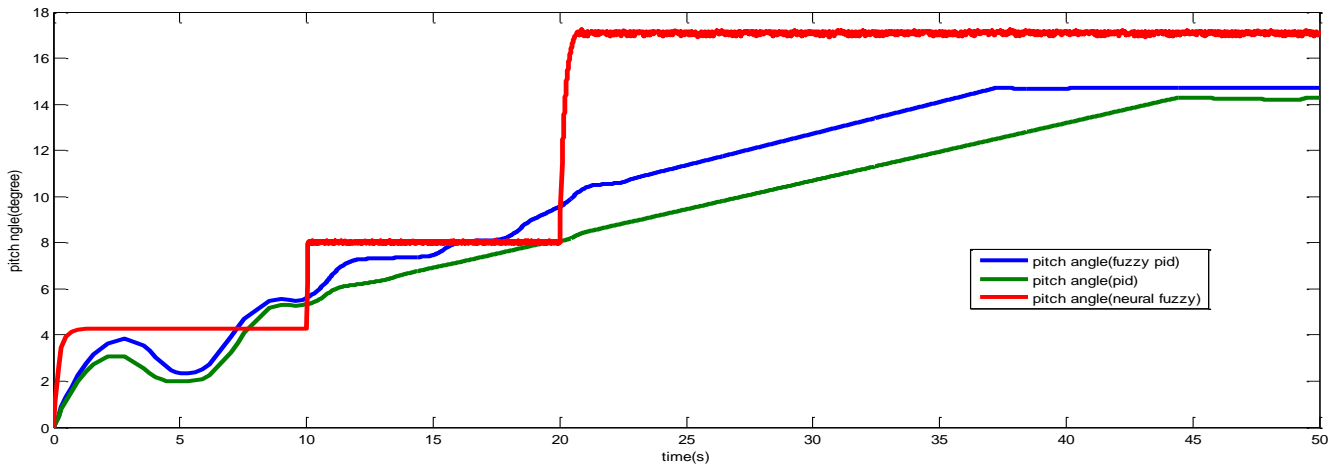
الشكل (12) سرعة الرياح (m/s)



الشكل (13) استطاعة خرج العنفة



الشكل (14) معامل كفاءة العنفة cp



الشكل (15) زاوية انحراف شفرة العنفة الريحية β

يوضح الجدول (3) نتائج مقارنة استطاعة الخرج بين المتحكمات عند سرعة الرياح 12m/s، حيث نلاحظ أن المتحكم المقترح أعطى استطاعة الخرج الأقرب للاستطاعة الاسمية.

الجدول (3) مقارنة استطاعة الخرج بين المتحكمات

	Neural fuzzy	Fuzzy pid	Pid
الاستطاعة الاسمية	24617W		
استطاعة خرج العنفة	25050W	36100W	38200W

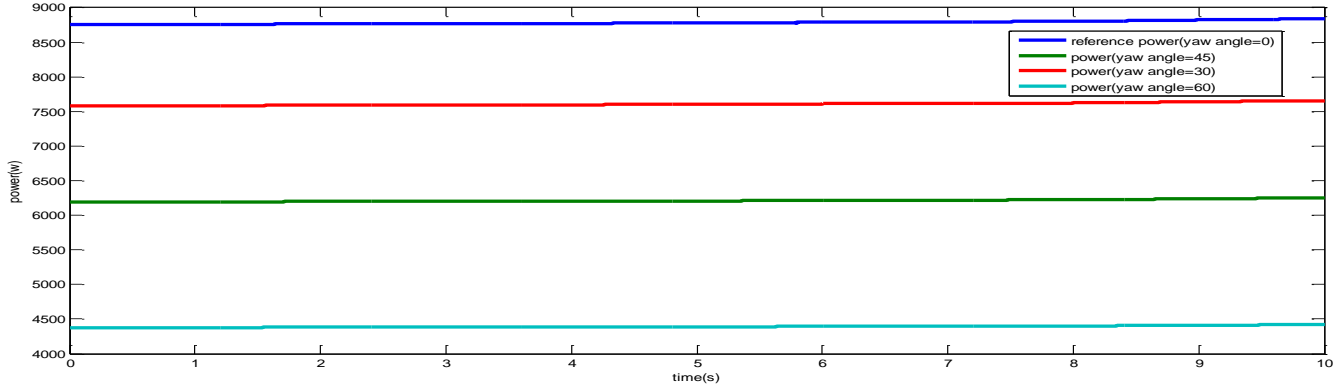
يوضح الجدول (4) مقارنة المتحكمات المستخدمة من حيث زمن التأخير، زمن الصعود، وزمن الاستقرار وخطأ الحالة الثابتة. حيث نلاحظ أن المتحكم المقترح حقق زمن صعود واستقرار أسرع وزمن تأخير وخطأ حالة ثابتة أقل.

الجدول (4) مقارنة بين المتحكمات

مجال الزمن	Neural fuzzy	Fuzzy pid	Pid
زمن التأخير (s)	0.0012	0.002	0.002
زمن الصعود (s)	0.0002	0.0004	0.00054
زمن الاستقرار (s)	0.1	24	23
خطأ الحالة الثابتة (%)	1.7%	46%	55%

2- التحكم بزواوية ميل العنفة عن اتجاه الرياح (Yaw control)

عند السرعة الصغيرة للرياح يتم ضبط اتجاه محور العنفة ليكون مواجها للرياح، لإنتاج أكبر قدر ممكن من الطاقة، أي الحصول على استطاعة خرج عظمى ومعامل كفاءة أعظمي. تمت مقارنة متحكم neural fuzzy مع pid, pid. زمن المحاكاة 10s. تكون $\beta=0$ ، مواصفات العنفة كما وردت سابقاً. تم النمذجة عند سرعة الرياح 5m/s. يوضح الشكل (16) نتائج الاستطاعة عند قيم زوايا مختلفة yaw angle بدون استخدام المتحكم حيث نلاحظ تأثر استطاعة الخرج بزواوية yaw angle وانخفاضها بحسب قيمة الزاوية.



الشكل (16) استطاعة الخرج بدون استخدام متحكم

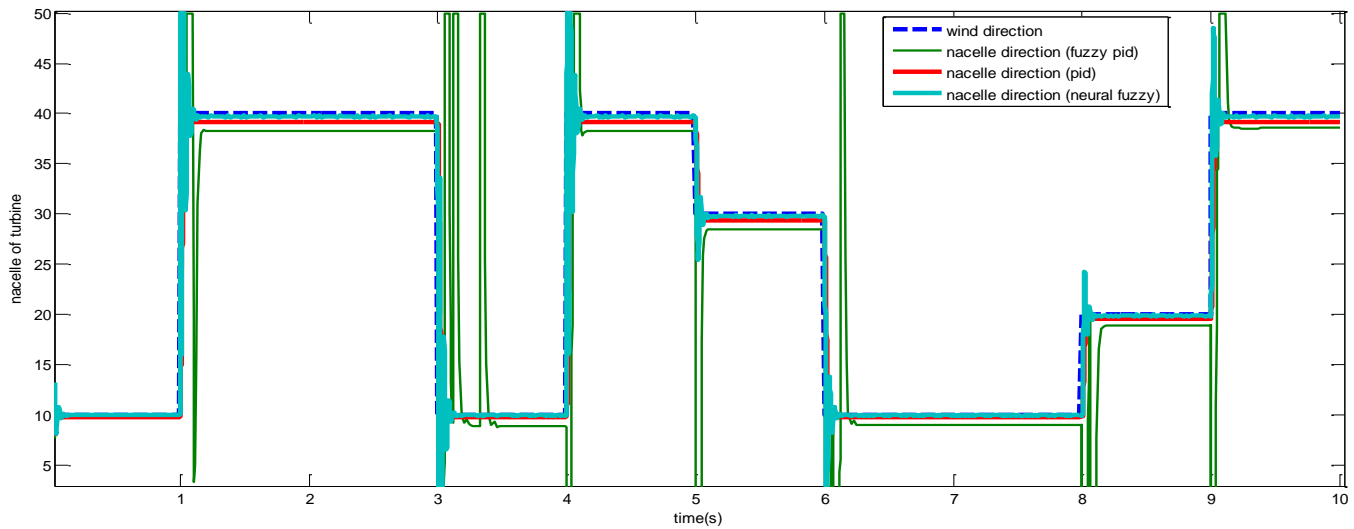
يوضح الجدول (5) قيم استطاعة الخرج عند سرعة رياح مختلفة باستخدام المتحكم بالزاوية yaw، وبدون استخدام متحكم. نلاحظ أنه عند استخدام المتحكم تبقى قيمة استطاعة خرج العنفة ثابتة تقريباً، بالرغم من تغيير اتجاه الرياح، بينما عند عدم استخدام متحكم فإن قيمة استطاعة الخرج تتغير وتتأثر بمدى انحراف العنفة عن اتجاه الرياح.

الجدول (5) قيم استطاعة الخرج عند سرعة رياح مختلفة باستخدام المتحكم بالزاوية yaw، وبدون استخدام متحكم.

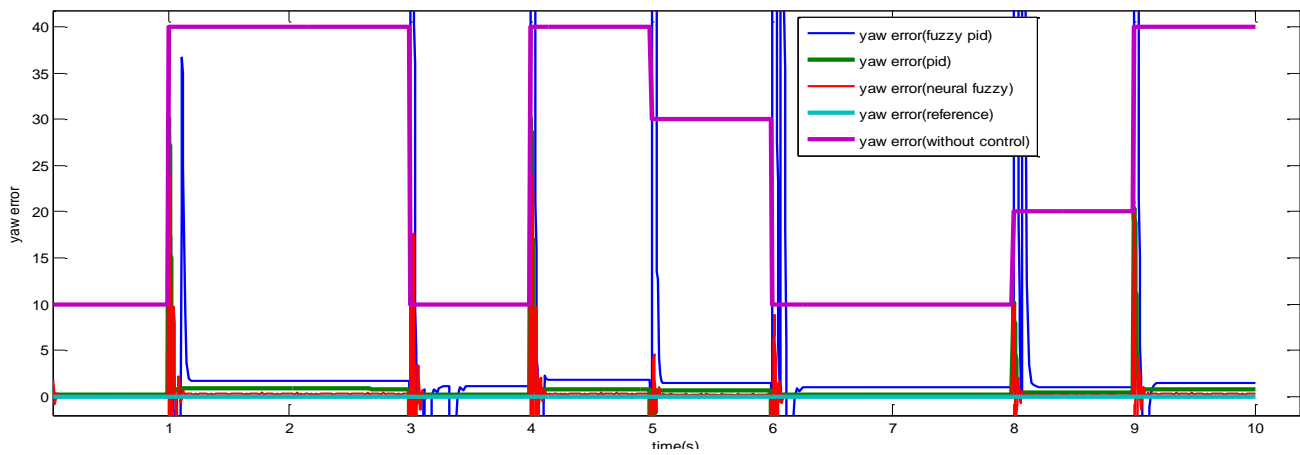
Error angle /degree	استطاعة الخرج بعدم استخدام متحكم			استطاعة الخرج باستخدام متحكم		
	5m/s	6m/s	7m/s	5m/s	6m/s	7m/s
0°(reference)	8750w	15100w	24010w	8750w	15100w	24010w
30°	7600w	13100w	20800w	8220w	15089w	24009w
45°	6200w	10700w	17000w	8210w	15089w	24009w
50°	5650w	9720w	15435w	8210w	15089w	24009w
60°	4400w	7560w	12000w	8210w	15079w	24009w
90°	0w	0w	0w	8208w	15079w	24009w

يوضح الشكل (17) نتائج تتبع العنفة لاتجاه الرياح باستخدام المتحكمات المذكورة حيث نلاحظ أنه عند انحراف العنفة عن اتجاه الرياح فإن المحرك الخطوي يقوم بتدوير محور العنفة باتجاه الرياح وفقاً للزاوية التي يعطيها المتحكم. توضح النتائج فعالية المتحكم المقترح من حيث تقليل خطأ الزاوية بين العنفة واتجاه الرياح كما هو موضح بالشكل (18)، حيث كانت yaw Error تساوي بشكل تقريبي الصفر.

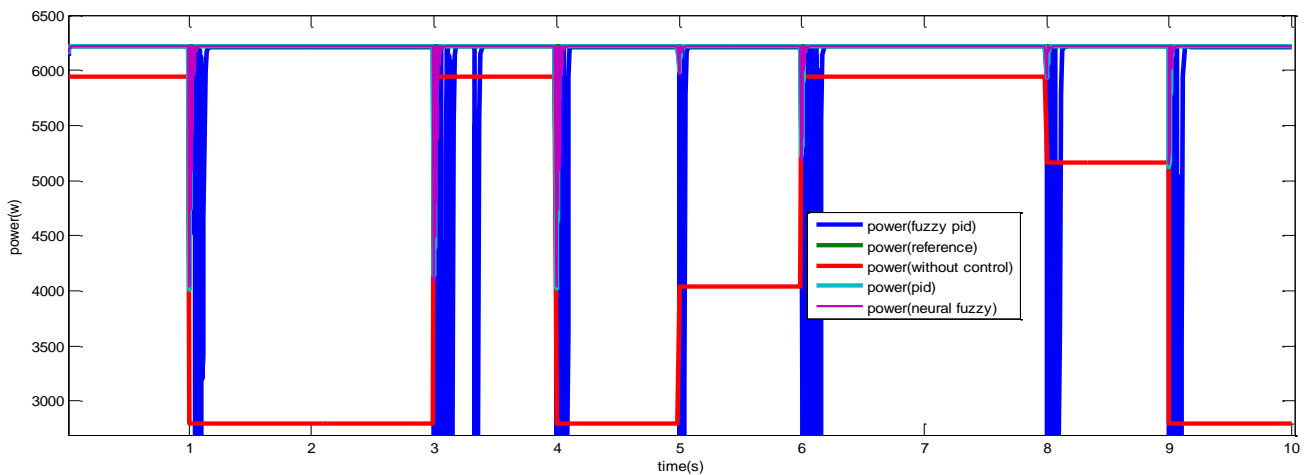
عند عدم استخدام المتحكم فإن استطاعة الخرج تتغير وتتناقص وفقاً لانحراف الرياح عن محور العنفة كما هو موضح بالشكل (19) لذلك يضمن المتحكم الحصول على استطاعة خرج عظمى ومستقرة وعامل كفاءة أعظمي الشكل (20) بالرغم من تغيير اتجاه الرياح.



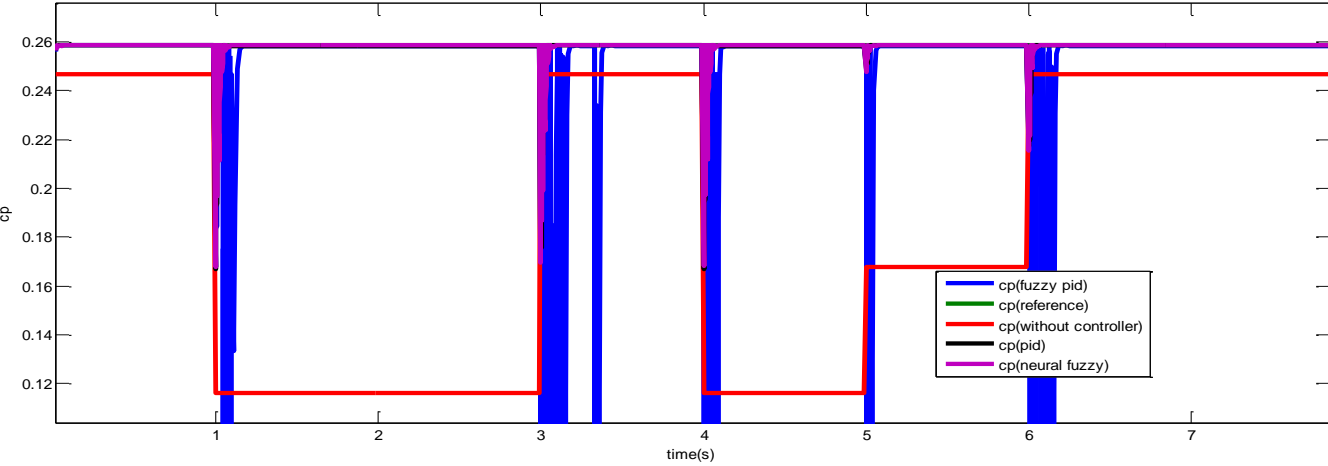
الشكل (17) تتبع العنفة لاتجاه الرياح



الشكل (18) yaw error



الشكل (19) استطاعة خرج العنفة



الشكل (20) معامل كفاءة العنفة cp

يبين الجدول (6) مقارنة بين المتحكمات وفقاً لزمان التأخير و زمن الصعود و زمن الاستقرار و خطأ الحالة الثابتة، حيث نلاحظ أن المتحكم المقترح حقق زمن تأخير و زمن استقرار أقل وهذا يعكس سرعة الاستجابة لدى المتحكم بالإضافة إلى خطأ حالة ثابتة أقل وهذا يعكس الحصول على الخرج الأقرب للخرج المطلوب.

الجدول (6) مقارنة بين المتحكمات

مجال الزمن	Neural fuzzy	Fuzzy pid	Pid
زمن التأخير (s)	0.006	0.014	0.013
زمن الصعود (s)	0.002	0.004	0.004
زمن الاستقرار (s)	0.1	0.25	0.05
خطأ الحالة الثابتة (%)	0.75%	2%	4%

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

تم التوصل من خلال هذا البحث إلى الاستنتاجات الآتية:

- 1- أن استخدام متحكم neural fuzzy للتحكم بزوايا انحراف شفرات العنفة الريحية عند سرع الرياح العالية يحقق استطاعة خرج ضمن حدود الاستطاعة الاسمية.
- 2- إن استخدام متحكم neural fuzzy للتحكم yaw control قد حقق الحصول على أقصى استطاعة ممكنة عند تغير اتجاه الرياح.
- 3- حسن المتحكم neural fuzzy أداء العنفة الريحية من حيث تقليل خطأ الحالة الثابتة مقارنة مع المتحكمات fuzzy pid, pid بحوالي 40% عند التحكم بالزاوية pitch، 1% عند التحكم بالزاوية yaw.
- 4- إن استخدام neural fuzzy زاد من سرعة الاستجابة، من خلال التقليل من زمن الصعود والاستقرار.

التوصيات:

- 1- نوصي الشركات العملية التي تقوم بإنشاء المزارع الريحية باعتماد نتائج البحث باستخدام متحكم neural fuzzy.
- 2- إيجاد قواعد الضبابية بناء على مواصفات العنفة الريحية المدروسة ومكان تواجد العنفة وتطبيقها على المتحكم الضبابي.

الجدول (7) المصطلحات العلمية المستخدمة في البحث:

Pitch control	التحكم بزاوية انحراف شفرة العنفة
Yaw control	التحكم بزاوية ميل العنفة عن اتجاه الرياح
Vcut-in	سرعة البدء للعنفة (السرعة التي تبدأ العنفة بالعمل عندها)
Vcut-off	سرعة التوقف للعنفة (السرعة التي تتوقف العنفة بالعمل عندها)
Fuzzification	التضبيب
Defuzzification	فك التضبيب
Power Coefficient (Cp)	معامل كفاءة العنفة
PID (proportional-integral-derivative)	متحكم تناسبي تكاملي تفاضلي
Neural network (N)	الشبكة العصبية
Fuzzy logic	المنطق الضبابي
Λ	نسبة سرعة الذروة
neural-fuzzy controller	متحكم يعتمد على الشبكة العصبية والمنطق الضبابي

References:

- [1] NAJD, A, GOREL, G, HAMOOD, H. "Pitch angle control using neural network in wind turbines", IOP Conf Series Materials Science and Engineering, Turkey, 2020, 14 pages.
- [2] KARAKASIS, N, MESEMANOLIS, A, NALMPANTIS, TH, MADEMLIS, C. "Active yaw control in a horizontal axis wind System without requiring wind direction, Measurement", The Institution of Engineering and Technology, VOL. 10, N°. 9, 2016, 1441-1449.
- [3] AGUIRRE, A, ZULUETA, A, GAMIZ, U, ULAZIA, A, BETONO, D. "Performance enhancement of the artificial neural network-based reinforcement learning for wind turbine yaw control", Spain, 2019, 676-690.
- [4] CIVELEK, Z. "Optimization of fuzzy logic (Takagi-Sugeno) blade pitch angle controller in wind turbines by genetic algorithm". Engineering Science and Technology, An International Journal, Turkey, Vol.23, N°.1, 2020, 1-9.
- [5] Chen, W, Xiao ,Y. "The design of compound pitch controller for wind turbines", International Conference on New Energy and Future Energy System, Vol.354, N°.1, 2019, 1755-1315.
- [6] HOSSEINI, E, SHAHGOLIAN, G. "Output power levelling for DFIG wind turbine system using intelligent pitch angle control", Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications IRAN, VOL. 58, N°. 4, 2017, 363-374.
- [7] PARAVIL, A, ISMAIL, A. "FUZZY LOGIC PITCH CONTROL OF VARIABLE SPEED WIND TURBINE", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol.4, N°.9, 2017, 1200-1207.
- [8] CHEN. F, YANG.J. "Fuzzy PID Controller Used in Yaw System of Wind Turbine", International Conference on Power Electronics Systems and Applications ,china, 2009, 4 pages.
- [9] THEODOROPOULOS, S, KANDRIS, D, SAMARAKOU, M, KOULOURAS, G. "Fuzzy Regulator Design for Wind Turbine Yaw Control", The Scientific World Journal, Vol. 2014, 2014, 10 pages.
- [10] KABDE, A, SAVIO, D. "Position Control of Stepping Motor", International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, India, VOL. 3, N°. 4, 2014, 8974- 8981.