

دراسة وتصميم نظام تحكم ضبابي في العنفات

الريحية للعمل عند سرعات الرياح العالية

- طالب دراسات عليا (ماجستير): م . عبد الرزاق الابراهيم

قسم هندسة التحكم الآلي والحواسيب - كلية الهندسة - جامعة البعث

الدكتور المشرف: بسيم عمران - أستاذ مساعد

المخلص

تعتبر أنظمة طاقة الرياح صناعة حديثة نسبياً و لكن نتيجة تطورها السريع أصبحت واحدة من أهم مصادر الطاقة المتجددة الواعدة. بالرغم من ذلك فهي مازالت تحتاج لإمكانيات إضافية من أجل توليد طاقة فعالة ذات جودة وموثوقية عالية بأقل تكلفة ممكنة. بما أن الاستطاعة الكهربائية التي يمكن استخلاصها من العنفات الريحية تتأثر بسرعة الرياح بشكل حاد، لذلك تكمن الصعوبة في استخلاص الحد الأقصى الممكن من طاقة الرياح وتحويلها إلى طاقة كهربائية. من أجل ذلك تطورت التكنولوجيا المتعلقة بصناعة أنظمة طاقة الرياح مما أدى إلى تطوير جيل من توربينات ذات سرعات متغيرة و التي تقدم العديد من المزايا مقارنة مع توربينات سرعة ثابتة. تعتبر المولدات التحريضية الأكثر شيوعاً في العنفات الريحية متغيرة السرعة. وزاد التركيز في السنوات الأخيرة على المولدات التحريضية ذات التغذية المضاعفة لما لها من ميزات بالمقارنة مع المولد التحريضي ذو القفص السنجابي. في هذا العمل تم اقتراح وحدة تحكم ضبابية للتحكم بزواوية ميل شفرات التوربين المعرضة للاضطرابات وإشارات الضجيج الخارجية عوضاً عن المتحكمات التقليدية مما يتوقع منها تحسين استجابة النظام وتأمين سهولة في التطبيق والتعديل وانخفاض في الكلفة. حيث تعتمد وحدة التحكم المصممة على قيمة الخطأ في خرج الطاقة للتوربين وعلى سرعة الرياح المقاسة بشكل مباشر، لتعطي

في خرجها زاوية الميل المرجعية لشفرات التوربين. الهدف الأساسي من وحدة التحكم المقترحة تحسين عمل العنقات الريحية من خلال السماح بالتشغيل المستمر على الأقل مع الأداء المنخفض عند حدوث بعض الأعطال وذلك عند سرعات الرياح العالية حيث في الحالة الطبيعية يتم إيقاف عمل العنقات الريحية . تظهر نتائج المحاكاة تحسناً في أداء التحكم عند استخدام وحدة التحكم الضبابية المقترحة. من خلال الدراسة المرجعية توصلنا إلى النتيجة التي بينت بأن أغلب الدراسات السابقة في نظم طاقة الرياح تناولت التحكم باستطاعة عنفة ريشية وبزاوية ميلان الشفرات باستخدام متحكمات تقليدية من نوع PI أو PID مع عدم التركيز على الاستفادة من عمل العنقات الريحية عند سرعات الرياح العالية .

الكلمات المفتاحية: العنفة الريحية - المولد التحريضي و التغذية المضاعفة - زاوية ميل الشفرات - التحكم الضبابي .

Studying and Designing a Fuzzy Control System for the Wind Turbines to operate at high Wind Speeds

Abstract

Wind energy systems are a relatively recent industry, but as a result of their rapid development, they have become one of the most promising renewable energy sources. Despite this, it still needs additional capabilities in order to generate efficient energy of high quality and reliability at the lowest possible cost. Since the electrical power that can be extracted from wind turbines is affected by wind speed sharply, therefore the difficulty lies in extracting the maximum possible amount of wind energy and converting it into electrical energy. For this reason, the technology related to the manufacture of wind energy systems has developed, which led to the development of a generation of variable speed turbines, which offer many advantages over fixed speed turbines. Induction generators are the most common variable speed wind turbines. In recent years, the focus has increased on double-feed induction generators because of their advantages compared to the squirrel-cage induction generator.

In this work, a fuzzy control unit was proposed to control the angle of inclination of the turbine blades that are exposed to turbulence and external noise signals instead of the traditional controllers, which is expected to improve the system response and ensure

ease of application and modification and a decrease in cost. Where the designed control unit depends on the value of the error in the power output of the turbine and the wind speed measured directly, to give in its output the reference inclination angle of the turbine blades. The main objective of the proposed control unit is to improve the work of wind turbines by allowing continuous operation at least with low performance when some malfunctions occur at high wind speeds, where in the natural state the work of wind turbines is stopped. Simulation results show an improvement in control performance when the proposed fuzzy controller is used. Through the reference study, we reached the conclusion that showed that most of the previous studies in wind energy systems dealt with controlling the wind turbine capacity and the angle of inclination of the blades using traditional controllers of the type PI or PID, without focusing on benefiting from the work of wind turbines at high wind speeds.

Keywords: Wind Turbine (WT) – Double Feed Induction Generator (DFIG) – Blades Pitch Angle – Fuzzy Control (FC).

1- مُقدِّمة

إن استخدام الفحم لإنتاج الطاقة هو أحد المساهمين الرئيسيين في تغير المناخ. استخدام مصادر الطاقة هذه منتشرة على نطاق واسع تعد من أكثر المصادر التي تسبب إنبعاثات لثاني أكسيد الكربون [1]. لذلك لإبطاء تغير المناخ وتخفيض نسبة التلوث في الهواء يجب استبدال مصادر الطاقة القائمة على الأحافير بالطاقة المتجددة مثل الرياح والطاقة المائية والشمسية [2]. يزداد استخدام طاقة الرياح عامًا بعد عام. وهو حاليًا ثاني أكثر مصادر الطاقة استخدامًا بعد الطاقة الكهرومائية [3]. يبدو أن هذا الاتجاه المتنامي سيستمر في المستقبل حتى يصبح المصدر الرئيسي لتوليد الطاقة في عام 2050 [4]. للمساهمة في هذا الاتجاه الإيجابي والمستدام ، يجب أن تستمر الأبحاث حول طاقة الرياح وتوربينات الرياح. لا يزال التحكم في توربينات الرياح (Wind Turbines WT) يمثل تحديًا للمهندسين. الصعوبة الرئيسية من وجهة نظر التحكم تأتي من حقيقة أنه يجب أن تفي بعدة أهداف في وقت واحد. يجب تصميم عنصر التحكم للوصول إلى الطاقة المولدة وثبيتها بقيمتها الاسمية. في المقابل يجب ضمان السلامة في جميع ظروف التشغيل [5]. علاوة على ذلك يجب تقليل إجهاد الهيكل واهتزازاته إلى أدنى حد حيث تم إثبات أن التحكم يؤثر على استقرار التوربين [6]. يتم التحكم في التوربين من خلال إجراءات تحكم مختلفة ، وخاصة زاوية الميل ، والسرعة الزاوية للمولد ، وزاوية الانعراج. تقوم زاوية الميل بتحويل سطح الشفرة الذي يواجه الريح بحيث كلما زادت المساحة التي تجتاحه، يتم توليد المزيد من الطاقة الميكانيكية. يتم استخدامه لتنظيم طاقة الخرج حول قيمتها المقدره. من ناحية أخرى يتم التحكم في السرعة الزاوية للجزء الدوار من أجل إيجاد منحنى القدرة الأمثل. أخيرًا يقوم التحكم في الانعراج بتحويل التوربين بأكمله لتتبع اتجاه الرياح.

2- مشكلة البحث

من المشاكل الرئيسية التي تتعرض لها العنفات الريحية أثناء عملها هي عدم قدرتها على العمل عند وجود رياح ذات سرعات عالية ، لذلك سيتم في هذا البحث معالجة هذه المشكلة باستخدام نظم تحكم الضبابية.

3- الهدف من البحث

يهدف هذا البحث إلى التمكن من جعل العنفات الريحية تعمل بشكل طبيعي عند سرعات الرياح العالية باستخدام نظم التحكم الضبابية على الأقل مع أداء منخفض .

4- أهمية البحث

- تحسين كفاءة وموثوقية العنفات الريحية لزيادة إنتاج الطاقة
- تقليل تكاليف إنتاج الطاقة.
- دعم الشبكة الكهربائية العامة بالطاقة الكهربائية لفترات زمنية أطول .

5- مواد البحث وطرائقه

- جهاز حاسب آلي.
- الحزمة البرمجية MATLAB ومكتباتها لتصميم نظام التحكم بزواية ميل الشفرات.
- مجموعة بيانات نظام العنفة الريحية WT والمولد ذو التغذية المضاعفة DFIG لاختبار نظام التحكم المقترح.

6-دراسات مرجعية

قام كل من Khayat, M., & Nekoui, M. A [7] ، في عام 2020 بتصميم متحكم ضبابي للتحكم في سرعة الجزء الدوار للتوربين، أعطت الطريقة المقترحة نتائج جيدة

بالمقارنة مع التحكم التقليدي، لكنه لم يتطرق الى المولد كما ان الطريقة المقترحة لا تشمل التحكم بزواوية ميل شفرات التوربين.

في عام 2020 قام كل من Teja, M. R., RamaSudha, K., & Vijayasanthi [8] بتصميم متحكم ضبابي تكيفي للتحكم بالتوربين وزاوية الميل للشفرات، واعطت الطريقة المقترحة استجابة زمنية جيدة بالمقارنة مع التحكم التقليدي والضبابي، ولكن في هذه الدراسة تم استخدام نموذج خطي مبسط للتوربين لا يعبر عن تعقيدات توربينات الرياح الحقيقية، كما انه لم يتطرق الى التحكم بالمولد.

في عام 2017 قام Tahiri, M., Djebli, A., & Mimet, A [9] بتصميم متحكم تقليدي للتحكم بالتوربين، في هذه الدراسة تم اختبار نماذج رياضية مختلفة واختبارها لايجاد التمثيل الرياضي الأنسب، الا ان النماذج المختبرة جميعها خطية ولا تمثل التوربين بشكل حقيقي، كما انه لم يتم التحكم بزواوية الميل للشفرات.

Civelek, Z في الدراسة [10] قام بأمثلة التحكم الضبابي باستخدام الخوارزميات الجينية للتحكم في زاوية الميل للشفرات للتوربين، واعطت الطريقة المقترحة تحكم امثل لزاوية الميل، ولكن في هذه الدراسة تمت نمذجة زاوية الميل فقط للتوربين بتابع نقل، وتم اختبار الطريقة المقترحة عليه، حيث تم تجاهل جميع تعقيدات وارتباطات المتغيرات غير الخطية المختلفة للتوربين والمولد.

في الدراسة [11] قام Karthik, R., Hari, A. S., Kumar, Y. P., & Pradeep, J. D. بتوليف ثوابت المتحكم التقليدي للتحكم بسرعة التوربين باستخدام الطريقة التجريبية نيكولاس-زيكلر، وتم مقارنتها مع الطرق المختلفة الأخرى لتوليف المتحكم التقليدي، ولكن هذه الدراسة لم تتطرق الى التحكم بزواوية الميل للشفرات كما انها لم تتطرق الى التحكم بالمولد.

في الدراسة [12] قام Sierra-Garcia, J. E., & Santos, M. بدمج المتحكم الضبابي مع التعلم العميق للتحكم بزواوية الميل لشفرات التوربين من خلال تقدير الرياح الفعالة في التوربين باستخدام المنطق الضبابي والتنبؤ بالرياح المستقبلية باستخدام التعلم العميق، واعطت الطريقة المقترحة نتائج جيدة بالمقارنة مع التحكم التقليدي والتحكم الضبابي، لكن في هذه الدراسة تم الاعتماد على نموذج رياضي بسيط لزواوية ميل الشفرات وتطبيق الطريقة المقترحة عليه، كما تم تجاهل تعقيدات المتغيرات غير الخطية للتوربين والمولد وتأثيرها على كفاءة الطريقة المقترحة.

في عام 2022 قام كل من Karami-Mollaei, Ali, and Oscar Barambones [13] بتطبيق خوارزمية PSO وسلسلة تايلور بهدف تحسين عملية التحكم بزواوية الميل لشفرات التوربين في المناطق الخاضعة لسرعات رياح متغيرة، أعطت الطريقة المقترحة نتائج جيدة بالمقارنة مع الطرق الأخرى، ولكن الطريقة المقترحة لا تستطيع تتبع زوايا الميل للشفرات دون الاعتماد على سلسلة تايلور مما يعطي الطريقة المقترحة تعقيدات إضافية، بالإضافة الى تجاهل تعقيدات المتغيرات غير الخطية للتوربين والمولد.

كما قام Mahmoud, Mohamed Metwally, et al [14] في عام 2022 بنمذجة مولدين مستخدمين في مجال توربينات الرياح وهما DFIG و PMSG ، كما تم تطبيق خوارزمية التحكم MRFO-PI للتحكم بزواوية ميل الشفرات والسرعة الزاوية للمولدين، واعطت الطريقة المقترحة نتيج ذات فعالية وموثوقية في التخفيف من الآثار السلبية للأعطال وتغيير سرعة الرياح.

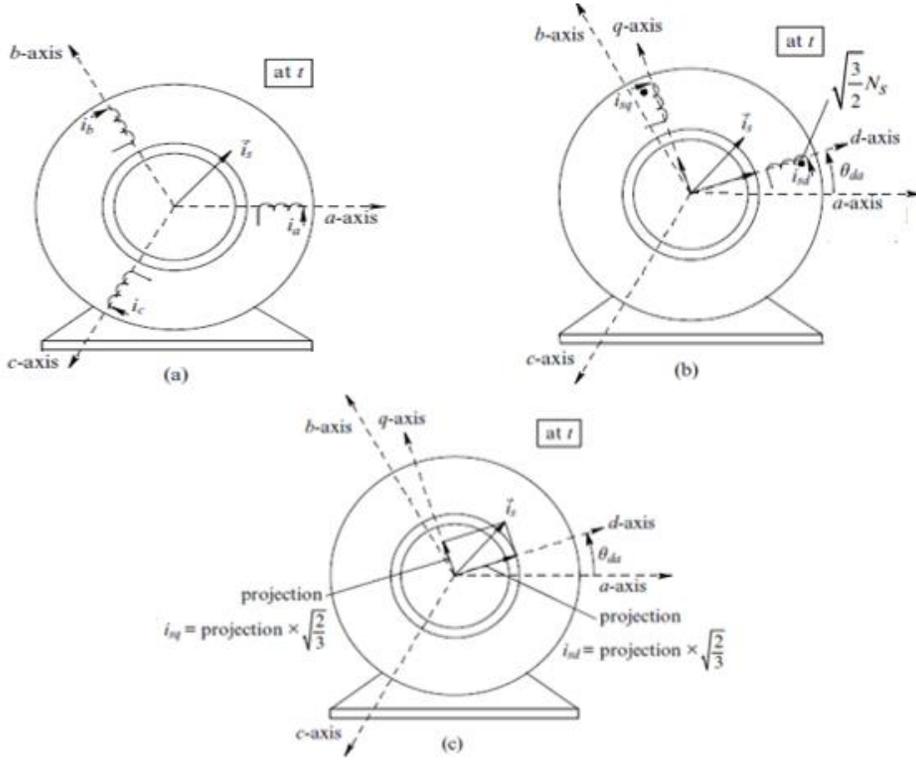
قام Korkos, Panagiotis, et al. في عام 2022 [15] باقتراح طريقة جديدة للتحكم بزواوية الميل لمزرعة ريحية مكونة من خمس توربينات رياح، تعتمد الطريقة المقترحة على استخراج الميزات باستخدام المشفر التلقائي العميق ومن ثم استخدام تقنيات

تقليل الابعاد على السمات المستخرجة قبل إدخالها الى وحدة التحكم، أعطت الطريقة المقترحة نتائج افضل بالمقارنة مع استخدام السمات الاصلية .

7- النموذج الرياضي للمولد التحريضي ذو التغذية المضاعفة DFIG في الإحداثيات dq

من أجل وضع المعادلات الرياضية للمولد التحريضي لأبداً أولاً من اعتماد الفرضيات التالية [16] :

- توزع جيبي للقوة المحركة المغناطيسية تحت القطب الواحد .
 - الدارة المغناطيسية غير مُشعبة (علاقة خطية بين الفيض والتيار).
 - الثغرة الهوائية ثابتة.
 - الضياعات الحديدية مهملة.
 - ملفات الجزء الثابت والدائر متطابقة .
 - يتم تطبيق جهد الجزء الثابت من خلال شبكة الطاقة بجهد جيبي متوازن ثلاثي الطور.
 - يمكن التحكم في جهد الدوار من خلال إلكترونيات القدرة.
 - المحارضات ومقاومات التسرب للجزء الثابت والدوار صغيرة جداً.
- بما أن جهد الجزء الثابت يتم تطبيقه من الشبكة العامة لذلك لا يمكن التحكم فيه . إن الغرض من نمذجة DFIGs في الإحداثيات dq هو التحكم في DFIG (سرعته ، عزم الدوران الكهرومغناطيسي وما إلى ذلك) بشكل مبسط.
- بالاعتماد على الشكل (1) تقبل المعادلات الرياضية للمولد التحريضي المشتقة من الإحداثيات dq بدون برهان وبهدف التبسيط على النحو الآتي :



الشكل (1) المولد التحريضي ذو التغذية المضاعفة DFIG في الإحداثيات dq

بالنسبة لملفات الجزء الثابت في الاحداثيات ثلاثية الأطوار، بافتراض أن الطور a هو الطور المرجعي، ومتجه التيار للجزء الثابت i_s ومتجه القوة المغناطيسية F_s في المجال الزمني t يعطى بالمعادلة التالية:

$$\vec{i}_s^a(t) = i_a(t) + i_b(t) e^{j2\pi/3} + i_c(t) e^{j4\pi/3} \quad (1)$$

$$\vec{F}_s^a(t) = \frac{N_s}{\rho} \vec{i}_s^a(t) \quad (2)$$

حيث $i_a(t)$ و $i_b(t)$ و $i_c(t)$ هي تيارات الأطوار لملفات الجزء الثابت في اللحظة t ، N_s هي اللفات المكافئة لكل ملف ثابت ، و ρ هي عدد الأقطاب.

لنفترض أن القوة المغناطيسية في أي لحظة يتم إنتاجها عن طريق مجموعة من ملفين متعامدين ، i_{sd} و i_{sq} ، كل منهما له دورات مكافئة kN_s ، إذن لدينا:

$$\frac{kN_s}{\rho} (i_{sd}(t) + i_{sq}(t)) = \frac{N_s}{\rho} \tilde{i}_s^a(t) \quad (3)$$

حيث i_s^d : i_s^a تستخدم المحور d كمحور مرجعي ويتم الحصول عليها بالشكل التالي:

$$\tilde{i}_s^d(t) = \tilde{i}_s^a(t) e^{-j\theta_{da}(t)} \quad (4)$$

حيث $\theta_{da}(t)$ هي زاوية التقاطع بين المحور d والمحور a في المجال t.

لذلك، يمكن الحصول على i_{sd} و i_{sq} كما يلي:

$$i_{sd} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \text{Re}\{\tilde{i}_s^d(t)\} \quad (5)$$

$$i_{sq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \text{Im}\{\tilde{i}_s^d(t)\} \quad (6)$$

حيث $\text{Re}\{\tilde{i}_s^d(t)\}$ و $\text{Im}\{\tilde{i}_s^d(t)\}$ هما على التوالي الجزء الحقيقي والخيالي من

$\tilde{i}_s^d(t)$ ، وبالتالي يمكن التعبير عن العلاقة بين التيارات dq والتيارات abc كما يلي:

$$i_{s,dq} = T_{s,abc} \rightarrow dq i_{s,abc} \quad (7)$$

$$i_{s,abc} = T_{s,dq} \rightarrow abc i_{s,dq} \quad (8)$$

حيث:

$$i_{s,abc} = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (9), i_{s,dq} = \begin{bmatrix} i_{sd}(t) \\ i_{sq}(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

و $T_{s,abc} \rightarrow dq$ and $T_{s,dq} \rightarrow abc$ هي تحويل بارك وتحويل بارك العكسي لملفات الجزء

الثابت التي يتم الحصول عليها على الشكل التالي:

$$T_{s,abc} \rightarrow dq = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{da}(t)) & \cos(\theta_{da}(t) - 2\pi/3) & \cos(\theta_{da}(t) + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta_{da}(t)) & -\sin(\theta_{da}(t) - 2\pi/3) & -\sin(\theta_{da}(t) + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$T_{s,dq \rightarrow abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{da}(t)) & -\sin(\theta_{da}(t)) \\ \cos(\theta_{da}(t) - 2\pi/3) & -\sin(\theta_{da}(t) - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_{da}(t) + 2\pi/3) & -\sin(\theta_{da}(t) + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (12)$$

وبالمثل ، بالنسبة للجهود الثابتة ، لدينا :

$$v_{s,dq} = T_{s,abc} \rightarrow_{dq} v_{s,abc} \quad (13)$$

$$v_{s,abc} = T_{s,dq} \rightarrow_{abc} v_{s,dq} \quad (14)$$

حيث :

$$v_{s,abc} = \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} \quad (15), v_{s,dq} = \begin{bmatrix} v_{sd}(t) \\ v_{sq}(t) \end{bmatrix} \quad (16)$$

وبنفس الطريقة لمفات الجزء الدوار ، لدينا :

$$i_{r,dq} = T_{r,ABC} \rightarrow_{dq} i_{r,ABC} \quad (17)$$

$$i_{r,ABC} = T_{r,dq} \rightarrow_{ABC} i_{r,dq} \quad (18)$$

$$v_{r,dq} = T_{r,ABC} \rightarrow_{dq} v_{r,ABC} \quad (19)$$

$$v_{r,ABC} = T_{r,dq} \rightarrow_{ABC} v_{r,dq} \quad (20)$$

حيث :

$$i_{r,ABC} = \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} \quad (21), i_{r,dq} = \begin{bmatrix} i_{rd}(t) \\ i_{rq}(t) \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$v_{r,ABC} = \begin{bmatrix} v_A(t) \\ v_B(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} \quad (23), v_{r,dq} = \begin{bmatrix} v_{rd}(t) \\ v_{rq}(t) \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$T_{r,ABC} \rightarrow_{dq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{da}(t)) & \cos(\theta_{da}(t) - 2\pi/3) & \cos(\theta_{da}(t) + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta_{da}(t)) & -\sin(\theta_{da}(t) - 2\pi/3) & -\sin(\theta_{da}(t) + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$T_{r,dq} \rightarrow_{ABC} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{da}(t)) & -\sin(\theta_{da}(t)) \\ \cos(\theta_{da}(t) - 2\pi/3) & -\sin(\theta_{da}(t) - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_{da}(t) + 2\pi/3) & -\sin(\theta_{da}(t) + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (26)$$

العلاقة بين سرعة الدوران الكهربية ω_m وسرعة الدوران الميكانيكية ω_{mec} :

$$\omega_m = \frac{\rho}{2} \omega_{mec} \quad (27)$$

العزم الكهرومغناطيسي :

$$T_{em} = \frac{\rho}{2} L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (28)$$

معادلة الحركة :

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{\rho}{2} \frac{T_{em} - T_L}{J} \quad (29)$$

حيث T_L هي عزم دوران الحمل و J هي العطالة.

الاستطاعة الفعلية :

$$P_s = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} \quad (30)$$

الاستطاعة الردية :

$$Q_s = v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq} \quad (31)$$

أما الاستطاعة في الجزء الدائر فتحسب بنفس العلاقات السابقة مع استبدال كل $s \rightarrow r$.

8- اختيار متغيرات التحكم بالاعتماد على المحور d

عادةً ما يتم اختيار المحور d ليتم محاذاته مع جهد الثابت ، عندئذ يكون لدينا

المعادلات التالية:

$$|\vec{v}_s^a| = v_{s,d} \quad (32)$$

$$v_{s,q} = 0 \quad (33)$$

$$\vec{v}_s^a = v_{s,d} \angle \theta_{da} \quad (34)$$

$$P_s = v_{sd} i_{sd} \cong - \frac{L_m}{L_s} v_{sd} i_{rd} \quad (35)$$

حيث L_m المحارضة المتبادلة بين الثابت والدائر و L_s محارضة الثابت.

$$Q_s = - v_{sd} i_{sq} \cong v_{sd} \left(\frac{v_{sd}}{\omega_d L_s} + \frac{L_m}{L_s} \right) i_{rq} \quad (36)$$

حيث ω_d سرعة دوران المحور d .

مما سبق يلاحظ أنه يمكن التحكم بـ P_s و T_{em} للجزء الثابت لـ DFIG من خلال

ضبط i_{rd} والتحكم بـ Q_s للجزء الثابت لـ DFIG من خلال ضبط i_{rq} .

9- وحدة التحكم PI للمولد التحريضي ذو التغذية المضاعفة

تم الاعتماد على المتحكم التناسبي التكاملي PI لتوليد إشارات مرجعية تحقق متطلبات الأداء.

تابع النقل للمتحكم التناسبي التكاملي PI :

$$K_i(s) = \frac{K_{i,i}}{s} + K_{p,i} \quad (40)$$

ثوابت المتحكم التناسبي التكاملي PI ($K_{p,i}$ & $K_{i,i}$) على النحو الآتي :

$$K_{i,i} = \omega_c^2 \sqrt{\frac{R_r^2 + (\omega_c L_r \sigma)^2}{\omega_c^2 + \tan^2(PM - \frac{\pi}{2} + \arctan(\omega_c L_r \sigma / R_r))}} \quad (41)$$

$$K_{p,i} = \frac{K_{i,i} \tan(PM - \frac{\pi}{2} + \arctan(\omega_c L_r \sigma / R_r))}{\omega_c} \quad (42)$$

حيث :

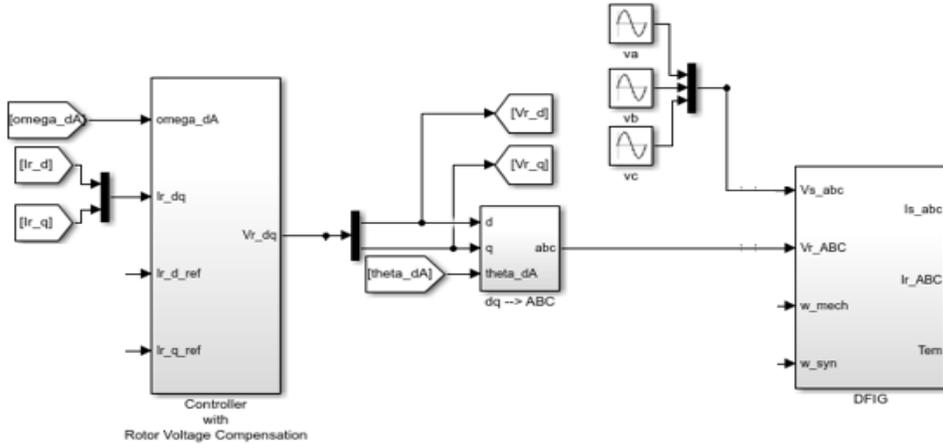
PM هو هامش الطور المرغوب .

ω_c هو تردد النقاط المطلوب .

$$\sigma \triangleq 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (43)$$

يوضح الشكل (3) وحدة التحكم PI المصممة للتحكم بالمولد حيث يتم اختيار i_{rd} و

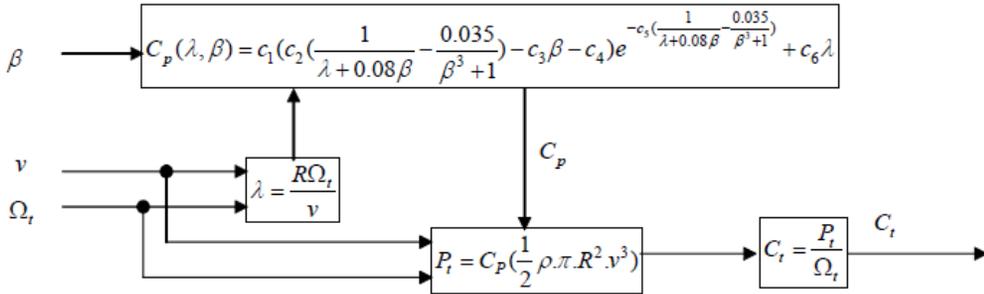
i_{rq} إشارات مرجعية كدخل للمتحكم و $v_{r, dq}$ خرج للمتحكم .



الشكل (3) وحدة التحكم PI المصممة للتحكم بالمولد DFIG

10- النموذج الرياضي للعنفة الريحية

يعبر رياضياً عن العنفة الريحية بالمخطط الصندوقي المبين في الشكل (4) التالي:



الشكل (4) نموذج العنفة الريحية

حيث :

Ω_t : السرعة الميكانيكية لمحور العنفة .

v : سرعة الهواء (m/sec).

ρ : كثافة الهواء (Kg/m^3) وتتعلق بدرجة الحرارة والضغط ($1.22 Kg/m^3$ عند درجة حرارة 15°).

R : نصف قطر العنفة بالمتر.

C_t : العزم الميكانيكي .

يعطى معامل الاستطاعة C_p بالعلاقة :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(C_2 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) - C_3\beta - C_4 \right) e^{-C_5 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)} + C_6\lambda \quad (44)$$

حيث :

$$C_1 = 0.5109, C_2 = 116, C_3 = 0.4, C_4 = 5, C_5 = 21, C_6 = 0.0068$$

حيث العوامل من C_1 و حتى C_6 هي عبارة عن ثوابت تعطى من أجل وصف عنفة ريحية محددة وهي تتعلق بالتصميم الأيروديناميكي لشفرات العنفة .

العزم الميكانيكي C_t الناتج عن الريح والمطبق على محور العنفة يجمع مع العزم الكيرومغناطيسي المقدم

من المولد على محور المولد و يؤخذ بعين الاعتبار علبة السرعة.

تقوم علبة السرعة بمضاعفة السرعة لتلائم السرعة العالية للمولد و تخفيض العزم كما

يلي:

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_t \quad (45)$$

حيث :

C_{mec} : العزم الميكانيكي على محور المولد (N.m) .

G: نسبة المسننات (بدون واحدة).

$$\Omega_{mec} = G \Omega_t \quad (46)$$

حيث :

Ω_{mec} : السرعة الميكانيكية للمولد (rad/sec) .

يمكن التعبير عن العلاقة بين P_{turb} و P_{Wind} \leq :

$$P_{turb} = C_p P_{Wind} = C_p \frac{1}{2} \rho A v_{wind}^3 \quad (47)$$

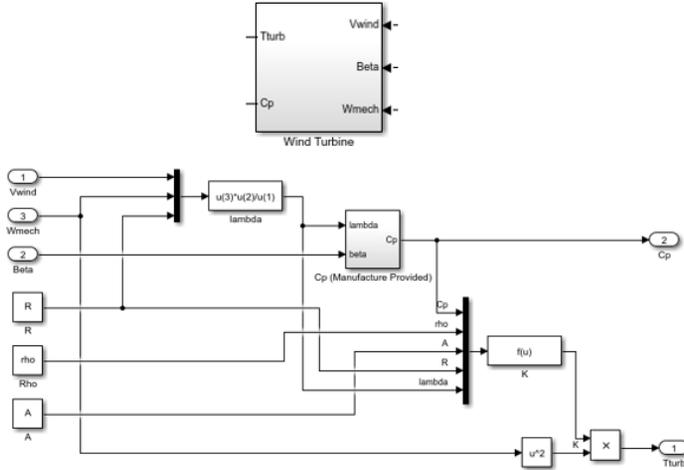
حيث :

$$C_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (48)$$

و يمكن التعبير عن T_{turb} \leq :

$$T_{turb} = C_p \frac{1}{2} \rho A \frac{R^3}{\lambda^3} \omega^2_{wind} \quad (49)$$

يوضح الشكل (5) نموذج توربين الرياح المصمم



الشكل (5) نموذج توربين الرياح المصمم

بالنسبة لزاوية ميل الشفرات فيمكن التعبير عنها بتابع من الدرجة الثانية في فضاء لابلاس كالتالي:

$$\frac{\beta(s)}{\beta_r(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

حيث يكون عامل التخميد ζ يساوي 0.6. ويُعطى التردد الطبيعي بواسطة ω_n وقيمته 11.11rad

11- النمذجة والمحاكاة

يعتمد DFIG المدروس على مثال تم توفيره في [2]، في هذا البحث سنعمل على توريين رياح باستطاعة 1.5 MW. يتم سرد المواصفات المعنية لـ DFIG في الجدول 1، ويتم سرد مواصفات توريينات الرياح في الجدول 2.

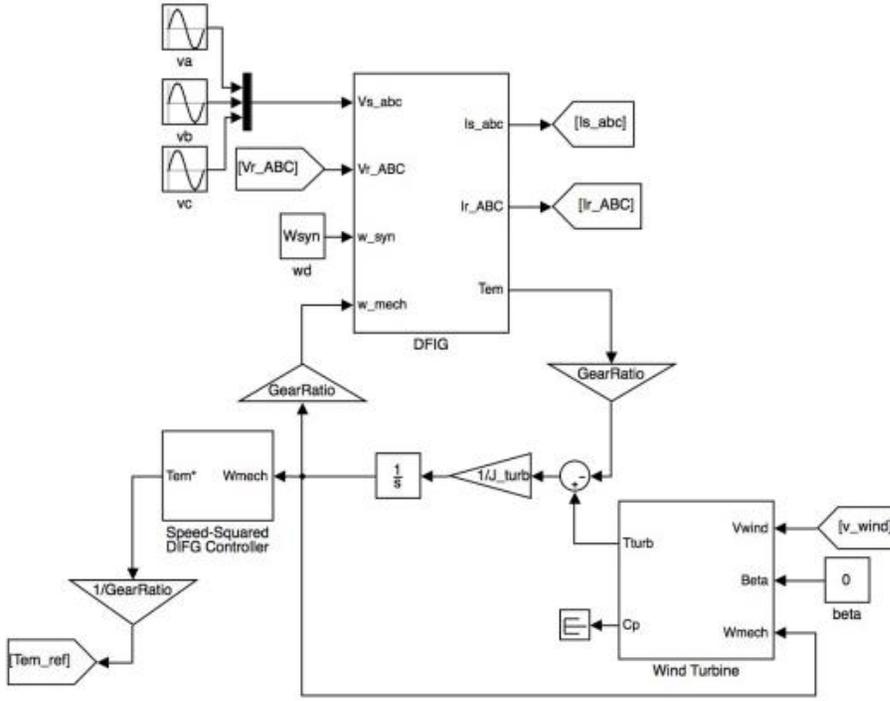
الجدول 1: مواصفات DFIG المدروس

| | | | |
|--------------------------------|-------------------------------|----------|--------|
| Rated Line Voltage (RMS Value) | 690 V | R_s | 2.0 mΩ |
| Rated Frequency | $f_{syn} = 60$ Hz | R_r | 1.5 mΩ |
| Poles | $p = 6$ | X_{ls} | 50 mΩ |
| Full Load Slip | $s = 1\%$ | X_{lr} | 47 mΩ |
| Moment of Inertia | $J = 75$ kg·m ² | X_m | 860 mΩ |

الجدول 2: مواصفات التوريين المدروس

| | | | |
|----------------|-----------------------------|----------------|--|
| Swept Area | $A = 3904 \text{ m}^2$ | Rotor Diameter | $2R = 70.5 \text{ m}$ |
| Density of Air | $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ | System Inertia | $J_{turb} = 2.4 \times 10^6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ |

يوضح الشكل (6) دمج التوربين مع المولد.

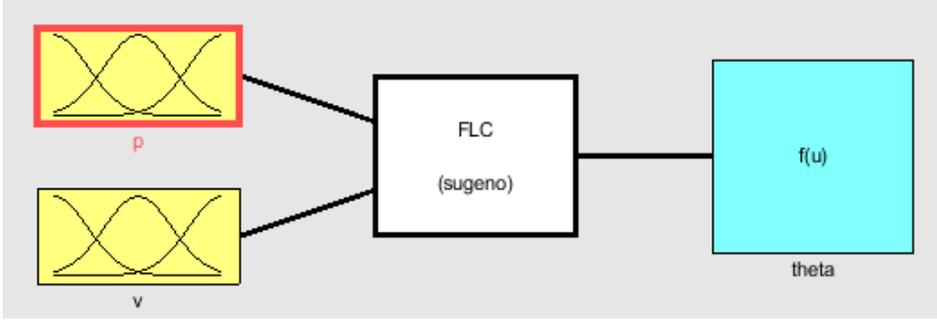


الشكل (6) دمج التوربين مع المولد

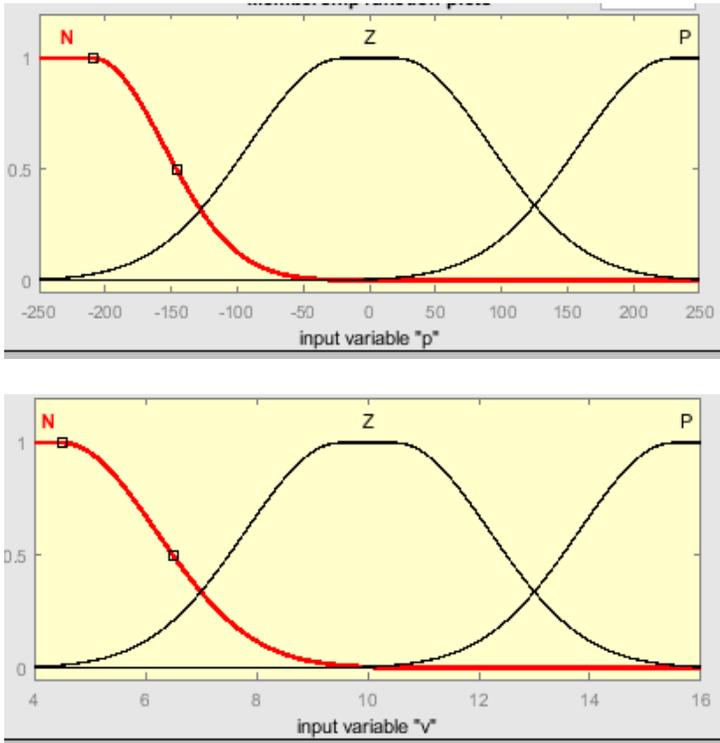
12- نظام التحكم الضبابي المقترح

يتكون المتحكم الضبابي المصمم للتحكم בזوايا ميل الشفرات للتوربين من دخلين وهما مقدار الخطأ في خرج الطاقة الحقيقية وسرعة الرياح المقاسة، وللمتحكم خرج واحد وهو زاوية الميل المرجعية للشفرات كما يوضح الشكل (7). يتكون كل من الدخلين من ثلاث

دالات انتماء بمجالات مختلفة كما يوضح الشكل (8)، اما القواعد المستخدمة لضبط المتحكم موضحة في الشكل (9)، كما يوضح الشكل (10) علاقة المدخل مع الخرج للمتحكم المصمم.



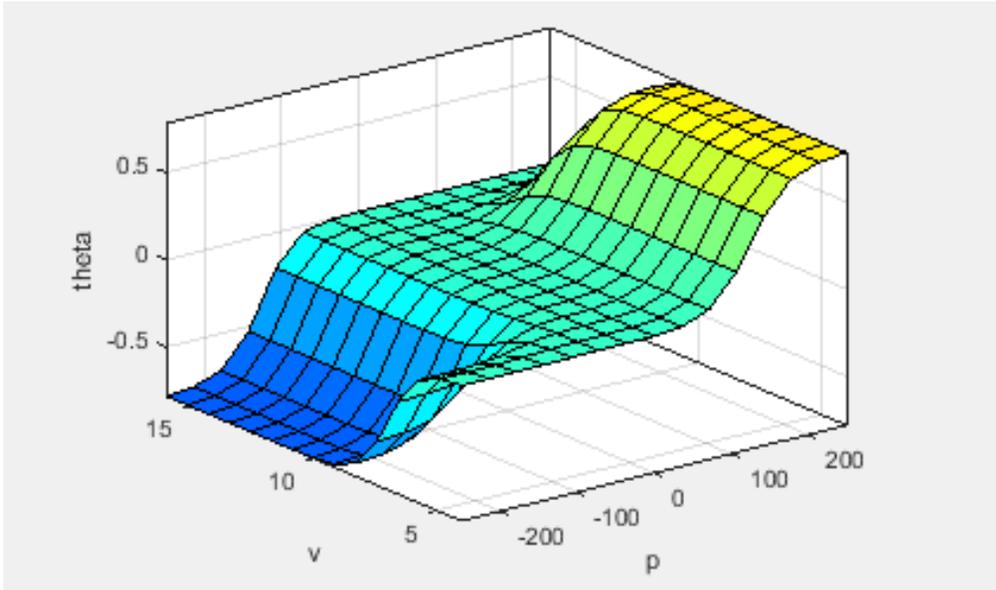
الشكل (7) نظام التحكم الضبابي المصمم



الشكل (8) دالات الانتماء للمداخل

1. If (p is N) and (v is N) then (theta is Z) (1)
2. If (p is N) and (v is Z) then (theta is N) (1)
3. If (p is N) and (v is P) then (theta is N) (1)
4. If (p is Z) and (v is N) then (theta is Z) (1)
5. If (p is Z) and (v is Z) then (theta is Z) (1)
6. If (p is Z) and (v is P) then (theta is Z) (1)
7. If (p is P) and (v is N) then (theta is P) (1)
8. If (p is P) and (v is Z) then (theta is P) (1)
9. If (p is P) and (v is P) then (theta is Z) (1)

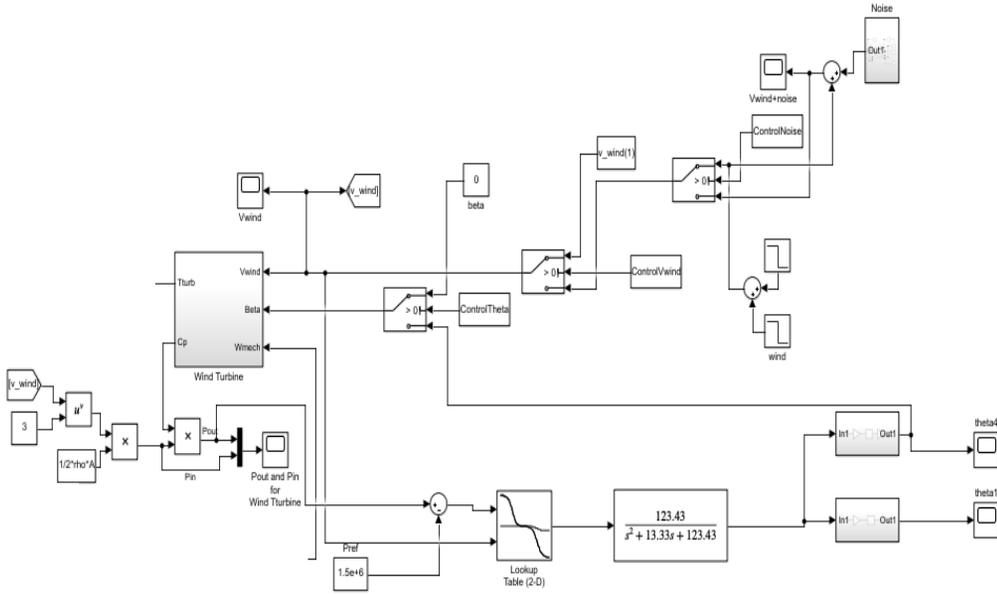
الشكل (9) قواعد المتحكم الضبابي المصمم



الشكل (10) العلاقة بين المداخل والمخارج للمتحكم الضبابي المصمم

يوضح الشكل (11) دمج المتحكم الضبابي المصمم مع التوربين، حيث يظهر بالمخطط إمكانية التحكم بزواوية الميل من حيث إمكانية تمرير قيمة ثابتة للتوربين او تمرير خرج المتحكم الضبابي لأغراض المحاكاة، كما نلاحظ إمكانية التحكم بإشارة سرعة الرياح

لأغراض المحاكاة حيث يمكن تمرير قيمة ثابتة أو إشارة متغيرة بدون ضجيج أو إشارة متغير مع ضجيج.



الشكل (11) دمج التوربين مع المتحكم الضبابي المصمم

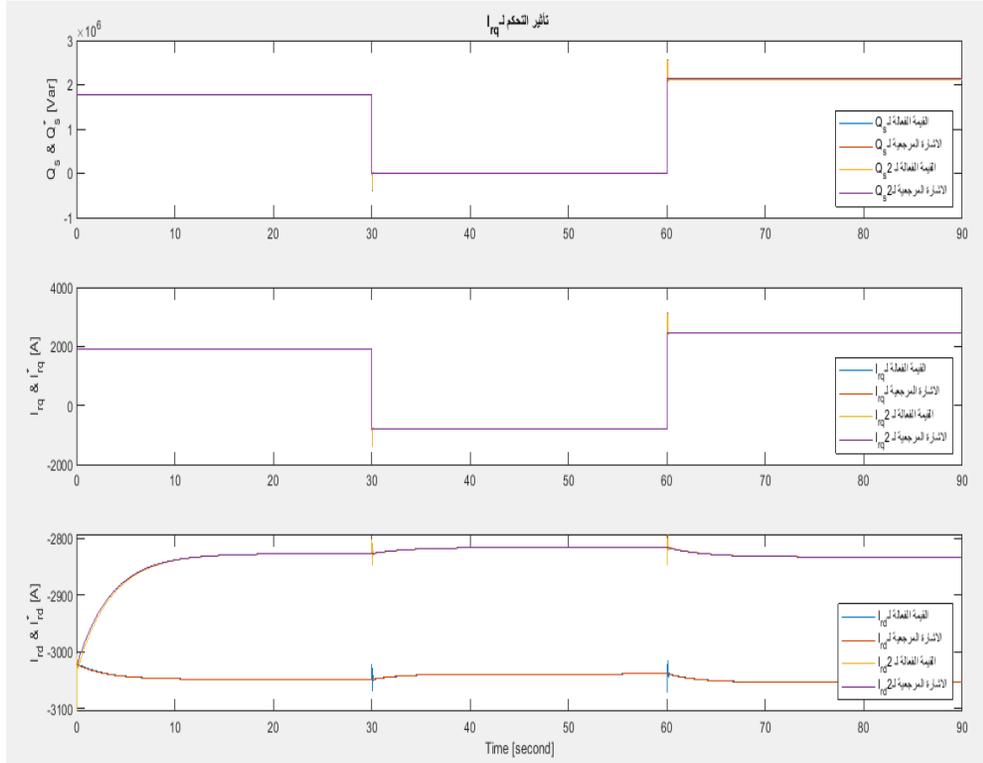
13- النتائج والمناقشة

محاكاة توربين الرياح مع سرعة رياح محددة (بدون ومع تحكم بزواوية الميل)

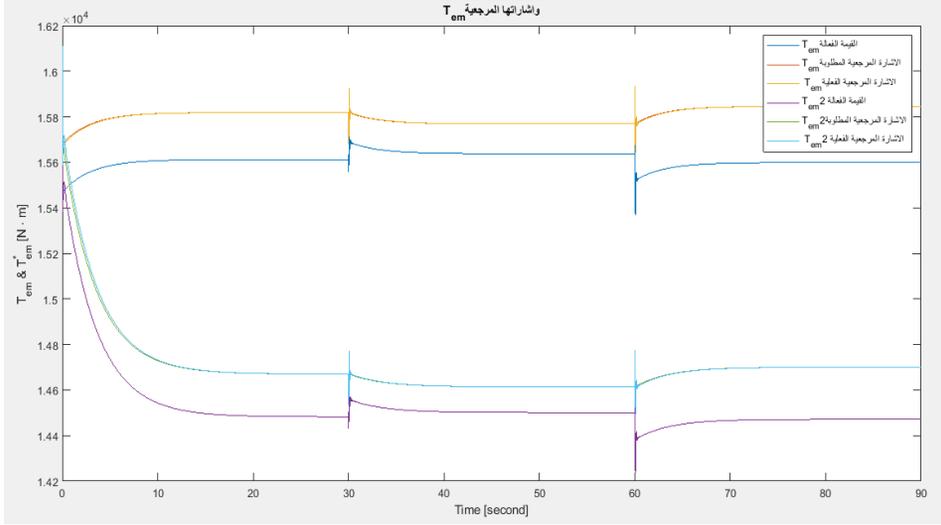
لتوضيح اثر التحكم في زاوية الميل بحالة السرعات الشديدة للرياح، قمنا بهذه المرحلة بتضمين وحدة التحكم بزواوية الميل مع التوربين، بالإضافة الى تثبيت سرعة الرياح على 12 m/s.

يظهر مخطط Q_s و i_{rd} و i_{rq} وإشاراتهم المرجعية في الشكل (12). من الشكل نلاحظ أن آلية التحكم تتمكن من التحكم بـ Q_s و i_{rq} فيها بشكل فعال بعد إضافة التحكم بزواوية الميل بحيث يمكنهم تتبع إشاراتهم المرجعية، كما نلاحظ انخفاض شدة التيار i_{rd} الناتج

عن تغيير زاوية الميل للشفرات بالسرعات المرتفعة للرياح مما ينتج عنه انخفاض في العزم.

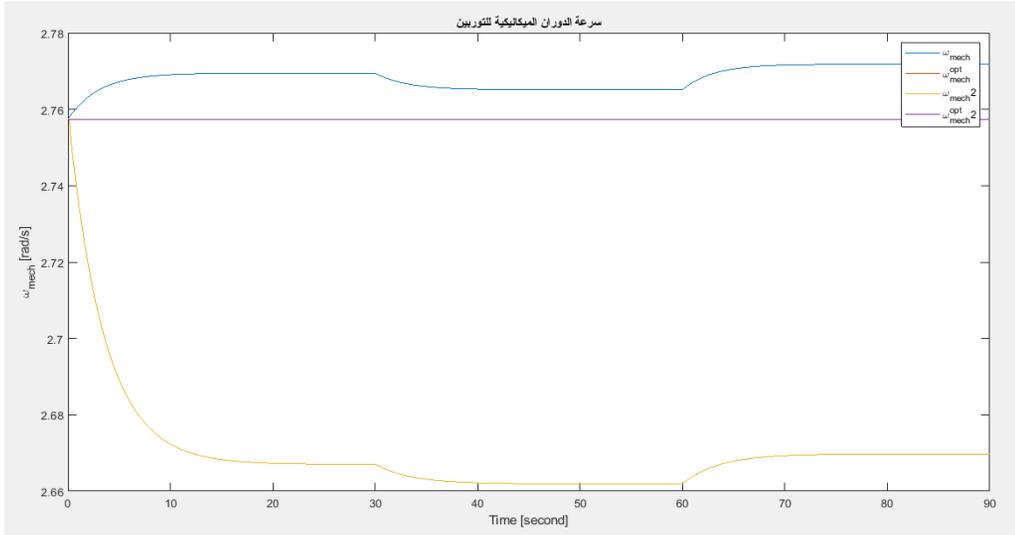


الشكل (12) نتائج محاكاة تأثير التحكم في i_q

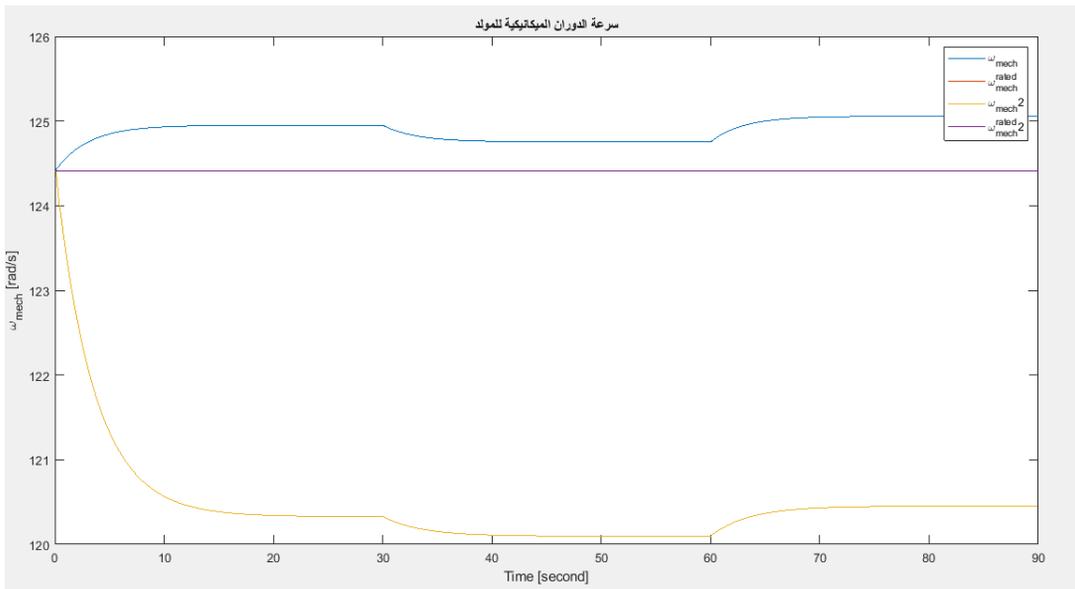


الشكل (13) نتائج محاكاة T_{em} والاشارة المرجعية الخاصة به

نلاحظ من الشكل (13) انخفاض في إشارة العزم الفعلية للتوربين وإشارة العزم المرجعية نتيجة تكامل المتحكم pi مع وحدة التحكم بزواوية الميل للشفرات، كما يؤدي اهتزاز T_{em} أيضاً إلى التغيير في سرعة الدوران الميكانيكية لتوربين الرياح (كما هو موضح في الشكل (14) بحيث تؤدي وحدة التحكم في السرعة إلى التغيير في \dot{I}_{rd}^* . ينعكس تغير سرعة الدوران الميكانيكي لتوربين الرياح أيضاً في سرعة الدوران الميكانيكي لـ DFIG كما هو موضح في الشكل (15).



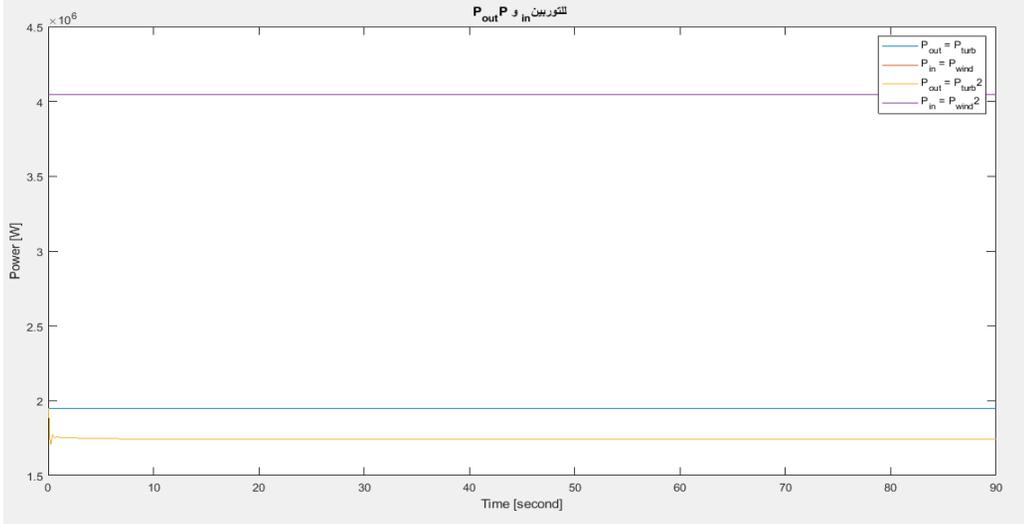
الشكل (14) نتائج محاكاة سرعة الدوران الميكانيكي لتوربين الرياح



الشكل (15) نتائج محاكاة سرعة الدوران الميكانيكية لـ DFIG

من الشكلين (14) و (15)، يمكننا أن نجد أن نظام التحكم خفض سرعة الدوران الميكانيكية لكل من المولد والتوربين بحالة السرعات المرتفعة للرياح. يوضح الشكل

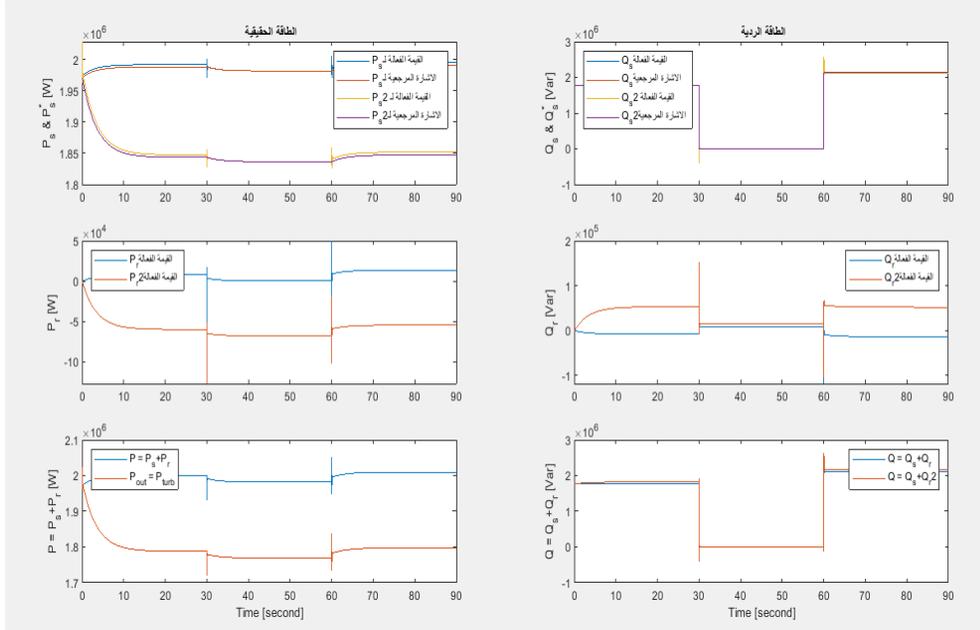
(16) مدخلات وخرج طاقة توربينات الرياح. نظراً لأن سرعة الرياح ثابتة في المحاكاة، فإن قوة الإدخال P_{wind} ثابتة أيضاً. كما نلاحظ انخفاض في خرج الطاقة للتوربين الناتج عن تغيير زاوية الميل للشفرات.



الشكل (16) نتائج محاكاة المدخلات والمخرجات من توربين الرياح

يوضح الشكل (17) القوة الحقيقية والرديئة للجزء الثابت والدوار في DFIG. من

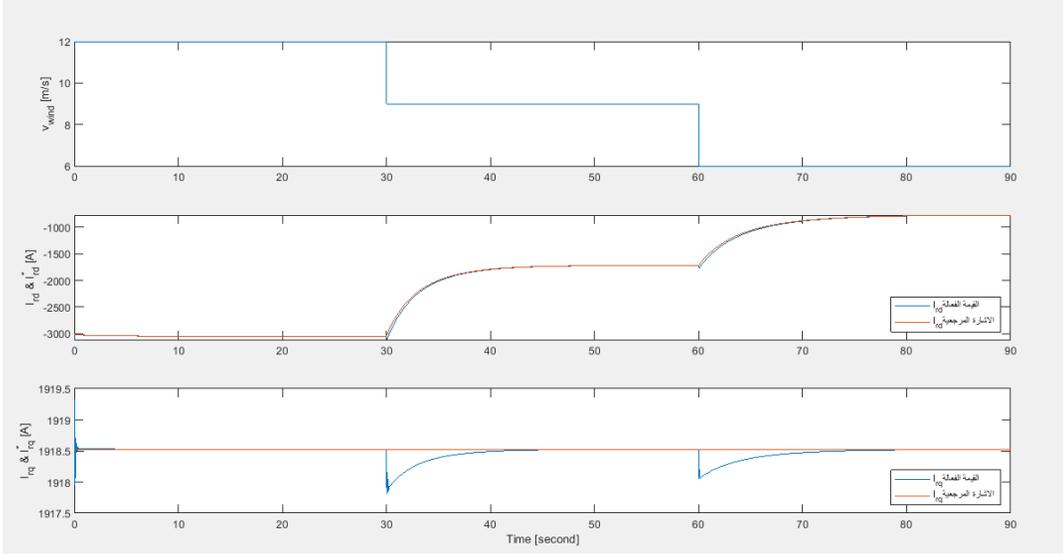
الشكل يمكن ملاحظة انخفاض كل من P_s و P_r و $P = P_s + P_r$.



الشكل (17) نتائج محاكاة القوة الحقيقية والردية لـ DFIG

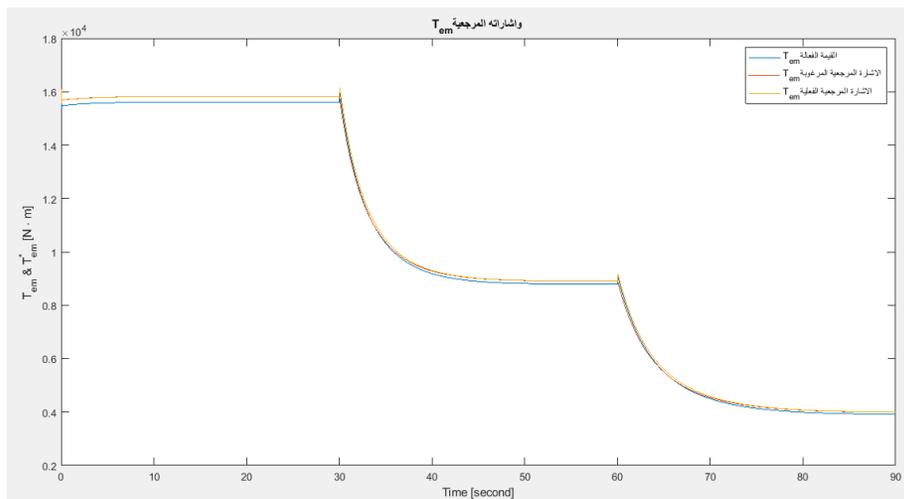
محاكاة توربين الرياح مع سرعة رياح متغيرة (بدون تحكم بزوايا الميل)

في هذه المحاكاة تم تعيين Q_s^* لتكون مساوية للقيمة المقدرة Q_{rated} ، بينما يتم تغيير سرعة الرياح. القيمة الأولية لسرعة الرياح هي 12 m/s ، ثم تتناقص سرعة الرياح إلى 9 m/s في اللحظة $t = 30$ s ، ثم تنخفض إلى 6 m/s في اللحظة $t = 60$ s.

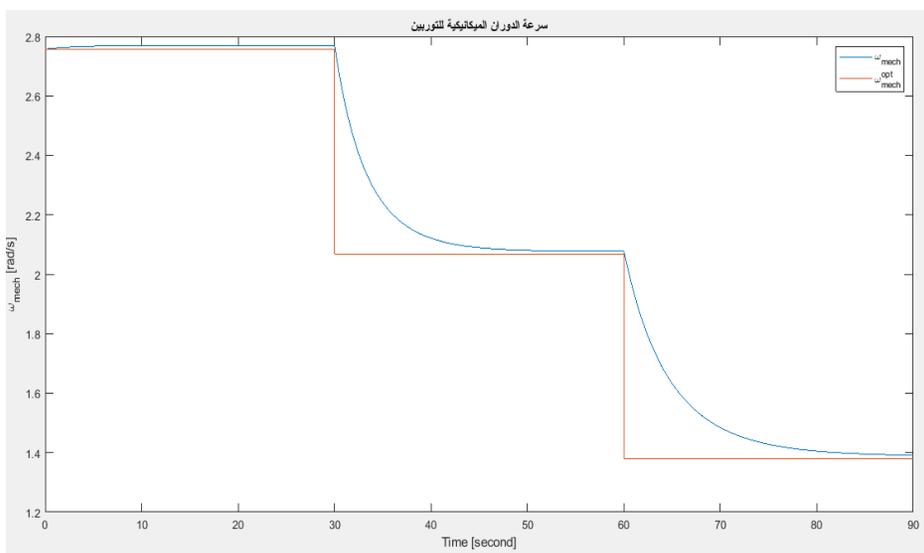


الشكل (18) نتائج المحاكاة لتأثير التحكم في ird

من الشكل (18) يمكننا أن نلاحظ أنه مع التغيير في سرعة الرياح، يمكن لنظام التحكم الخاص بنا أن يستجيب بسرعة ويولد إشارة مرجعية للتحكم في عزم DFIG's كما هو موضح في الشكل (19) وكذلك للتحكم في سرعة الدوران ميكانيكيًا لـ توربينات الرياح (كما هو موضح في الشكل (20)).



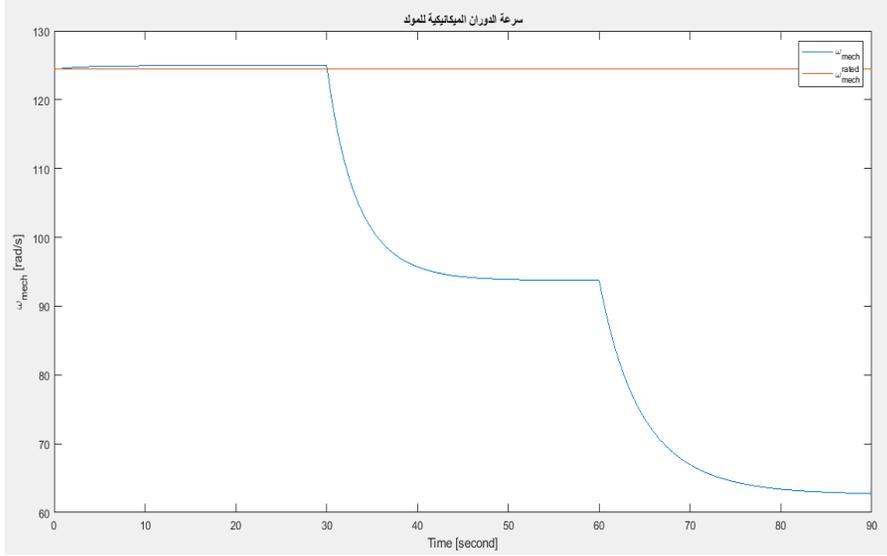
الشكل (19) نتائج محاكاة T_{em} وإشارات المرجعية T_{em}^*



الشكل (20) نتائج محاكاة سرعة الدوران الميكانيكي لتوربين الرياح

على الرغم من التحكم في سرعة الدوران الميكانيكي لتوربين الرياح للحفاظ على القيمة المثلى وفقاً لسرعة الرياح المختلفة كما هو موضح في الشكل (20)، فإن سرعة الدوران الميكانيكي لـ DFIG لا تحافظ دائماً على قيمتها المقدره ، كما هو موضح في الشكل

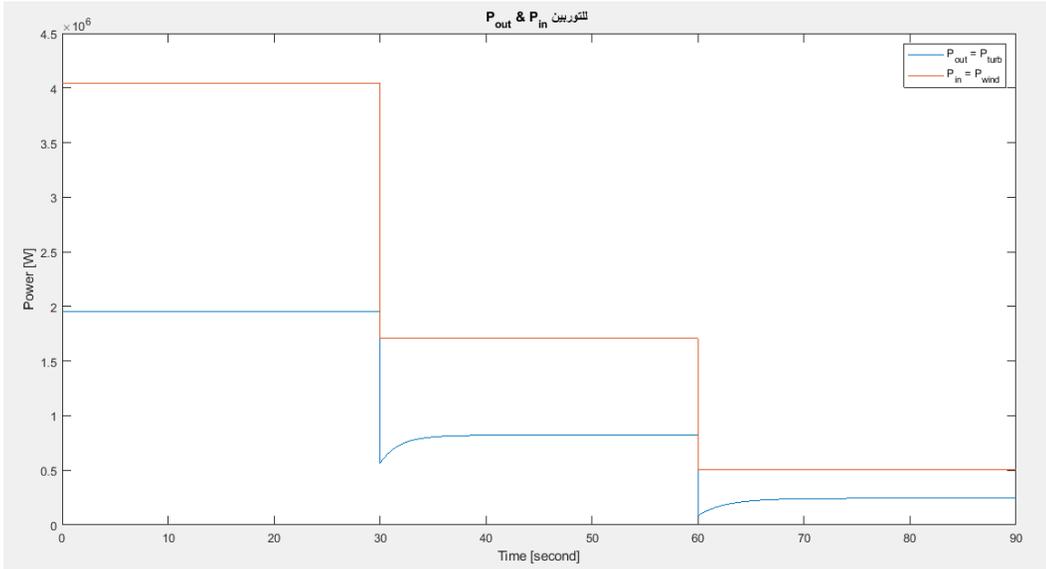
(21) . إلى جانب ذلك من الشكل (21)، تتغير سرعة الدوران ميكانيكياً لـ DFIG بشكل كبير مع تغير سرعة الرياح. نظراً لخصائص DFIG يمكن تشغيل DFIG في نطاق سرعة واسع بما فيه الكفاية بحيث يكون عادةً قابلاً للتكيف مع التغير الكبير في سرعة الدوران ميكانيكياً.



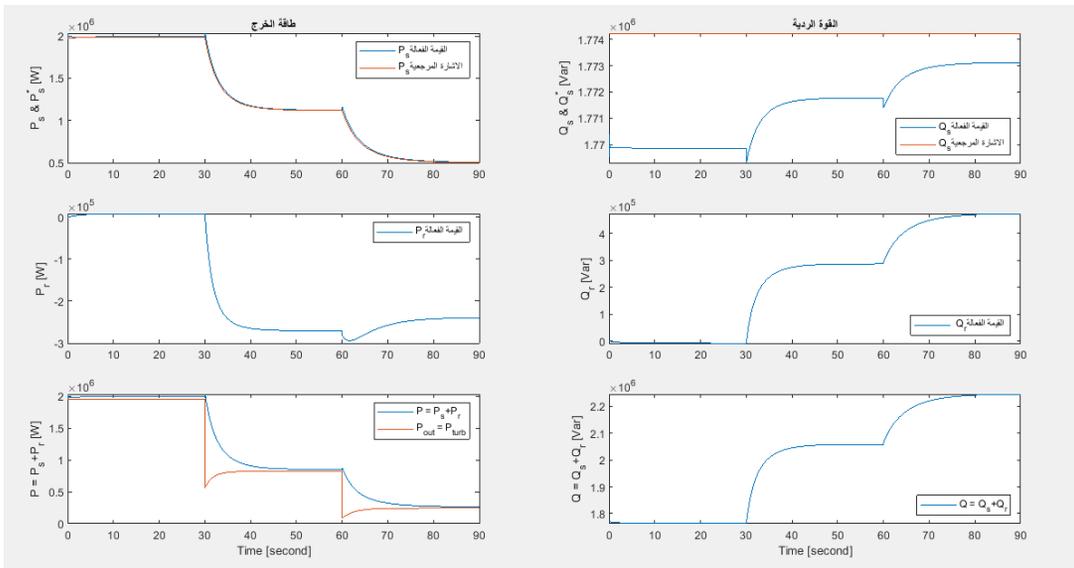
الشكل (21) نتائج محاكاة سرعة الدوران الميكانيكية لـ DFIG

يوضح الشكل (22) مدخلات وخرج طاقة توربينات الرياح. يوضح الشكل (23) القوة الحقيقية والرديية لـ DFIG. من الشكل (23) ، يمكننا أن نجد انه في الحالة المستقرة $P_{turb} \approx P_s + P_r$. يوضح هذا أن الطاقة الناتجة عن توربينات الرياح يتم استهلاكها بواسطة كل من الدوار والجزء الثابت.

دراسة وتصميم نظام تحكم ضبابي في العنفات الريحية للعمل عند سرعات الرياح العالية



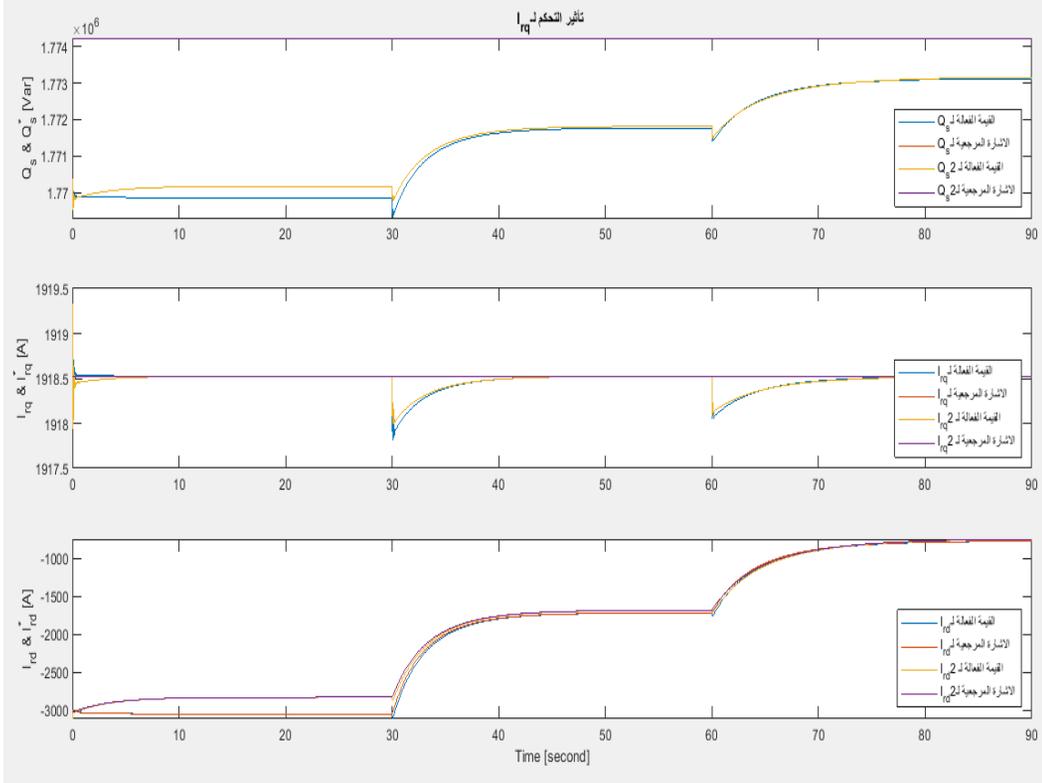
الشكل (22) نتائج محاكاة المدخلات والمخرجات من توربين الرياح



الشكل (23) نتائج محاكاة القوة الحقيقية والردية لـ DFIG

محاكاة توربين الرياح مع سرعة رياح متغيرة (مع تحكم بزواوية الميل)

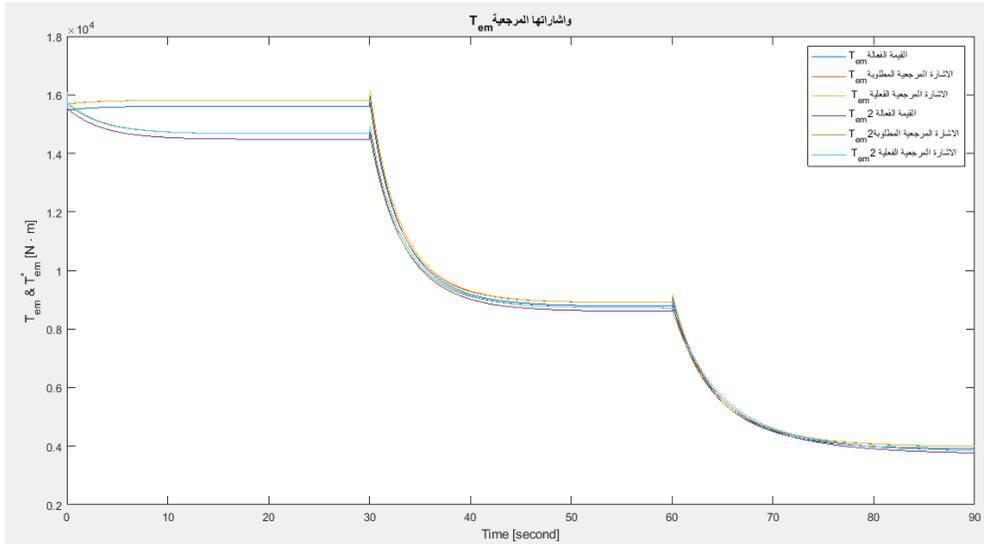
في هذه المحاكاة يتم تغيير سرعة الرياح كما في المحاكاة السابقة، ولكن مع إضافة وحدة التحكم بزواوية الميل للشفرات.



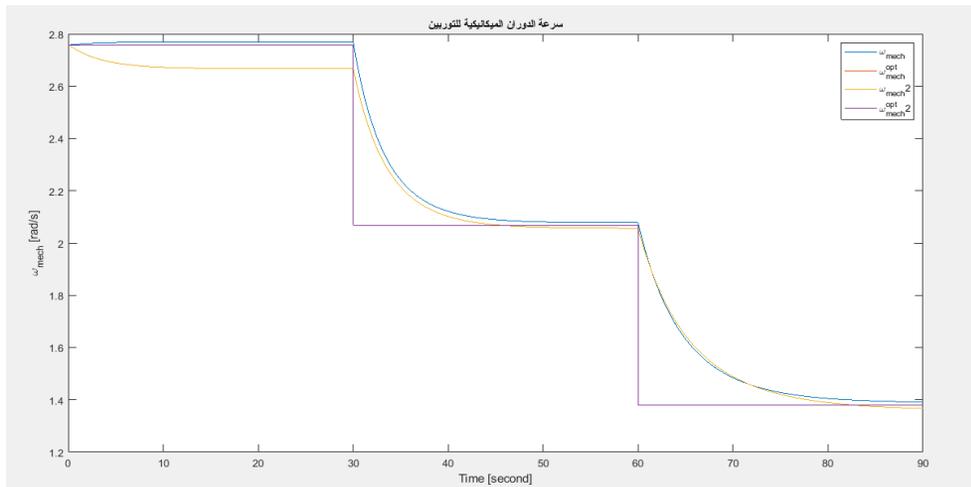
الشكل (24) نتائج المحاكاة لتأثير التحكم في i_{rd} (سرعة رياح متغيرة وتحكم بزواوية الميل)

من الشكل (24) يمكننا أن نلاحظ أنه مع التغيير في سرعة الرياح، يمكن لنظام التحكم الخاص بنا أن يستجيب بسرعة ويولد إشارة مرجعية للتحكم في عزم DFigs كما هو موضح في الشكل (25) وكذلك للتحكم في سرعة الدوران ميكانيكيًا لـ توربينات الرياح (كما هو موضح في الشكل (26)، كما نلاحظ أن التحكم في زاوية الميل للشفرات ساهم

في تخفيض عزم المولد وسرعة التوربين الديناميكية عند سرعات الرياح الكبيرة وذلك للحفاظ على استقرار طاقة الخرج.

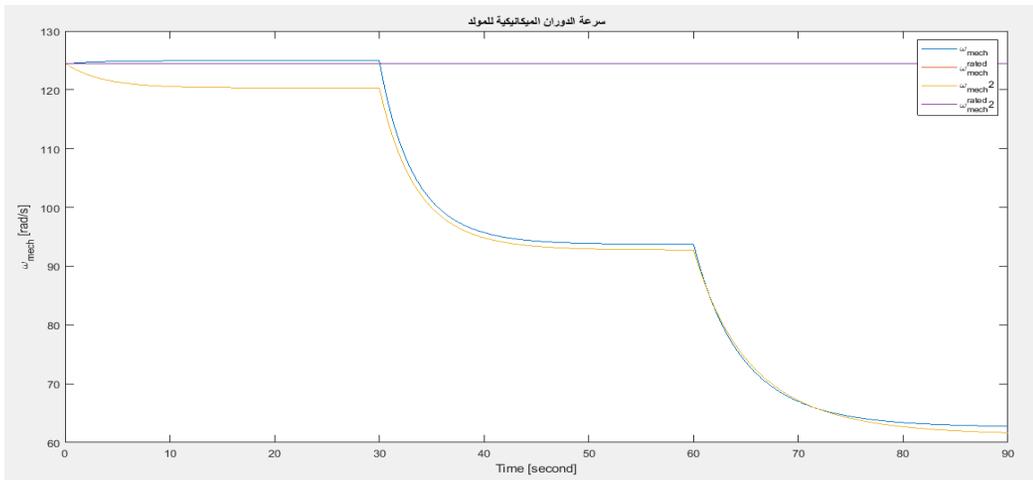


الشكل (25) نتائج محاكاة Tem وإشارات المرجمية *Tem



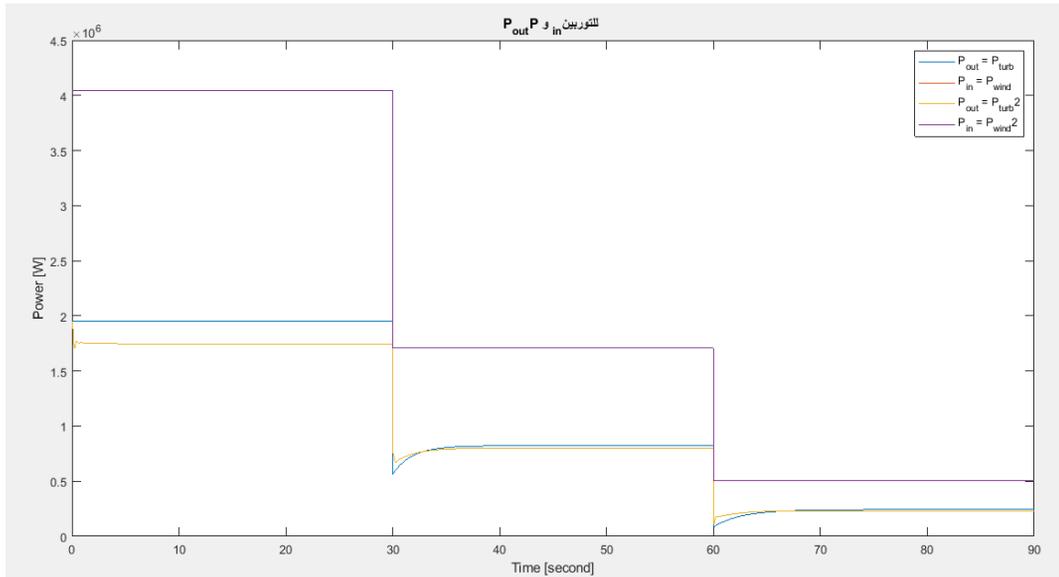
الشكل (26) نتائج محاكاة سرعة الدوران الميكانيكي لتوربين الرياح

على الرغم من التحكم في سرعة الدوران الميكانيكي لتوربين الرياح للحفاظ على القيمة المثلى وفقاً لسرعة الرياح المختلفة كما هو موضح في الشكل (26)، فإن سرعة الدوران الميكانيكي لـ DFIG لا تحافظ دائماً على قيمتها المرجعية، كما هو موضح في الشكل (27). إلى جانب ذلك من الشكل (27)، تتغير سرعة الدوران ميكانيكياً لـ DFIG بشكل كبير مع تغير سرعة الرياح. نظراً لخصائص DFIG يمكن تشغيل DFIG في نطاق سرعة واسع بما فيه الكفاية بحيث يكون عادةً قابلاً للتكيف مع التغيرات الكبيرة في سرعة الدوران ميكانيكياً.

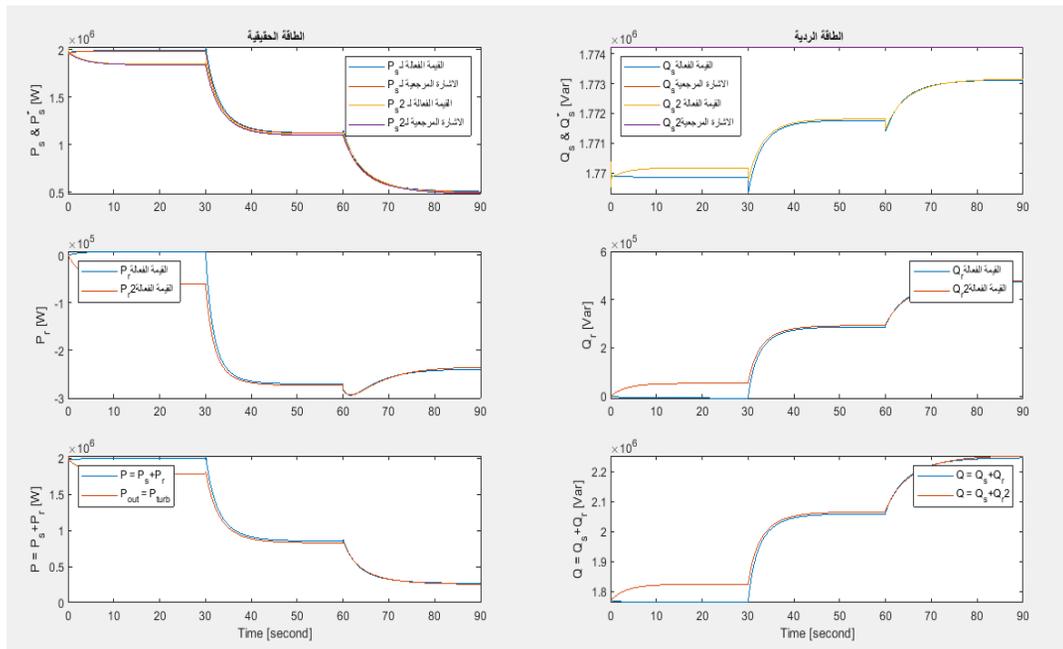


الشكل (27) نتائج محاكاة سرعة الدوران الميكانيكية لـ DFIG

يوضح الشكل (28) مدخلات وخرج طاقة توربينات الرياح. يوضح الشكل (29) القوة الحقيقية والردية لـ DFIG. من الشكل (28) نلاحظ انخفاض خرج التوربين عند السرعات المرتفعة للهواء، وذلك من خلال التحكم بزواوية ميل الشفرات بهدف تخفيض الخرج ليكون أقرب للقيمة المرجعية.



الشكل (28) نتائج محاكاة المدخلات والمخرجات من توربين الرياح



الشكل (29) نتائج محاكاة القوة الحقيقية والردية لـ DFIG

14- النتيجة

ركز البحث على دراسة استخدام تقنيات الذكاء الصناعي في توربينات الرياح ، وعلى وجه الخصوص التحكم الضبابي حيث تم اقتراح وحدة تحكم ضبابية للتحكم بزواوية ميل شفرات التوربين المعرضة للاضطرابات و اشارات الضجيج الخارجية وذلك عند سرعات الرياح العالية . نظرًا لأن استجابة توربين الرياح WT يعتمد على سرعة الرياح ، فمن الضروري مراعاة معلومات الرياح في استراتيجية التحكم. ومع ذلك يمكن أن تكون هذه المعلومات غير دقيقة أو غير مؤكدة بسبب الاضطرابات. لذلك يبدو أن استخدام تقنيات الذكاء الصناعي هو نهج جيد لمواجهة عدم دقة مقاييس الرياح. تأتي أهمية التحكم بزواوية انحراف الشفرات للعنفة الريحية من أن العنفة مصممة لتعطي أعظم استطاعة ممكنة عند سرعة رياح معينة، ولا تصمم العنفات الريحية لتعطي أعظم استطاعة لها عند سرعات رياح عالية جداً لأنها نادرة وتسبب الضرر الميكانيكي لأجزاء العنفة، وفي ظروف سرعات الرياح العالية من الضروري حجب جزء من طاقة هذه الرياح من الدخول إلى العنفة وذلك لتجنب الضرر الناتج عنها في العنفة. تعتمد وحدة التحكم الضبابية المصممة على قيمة الخطأ في خرج الطاقة للتوربين وعلى سرعة الرياح المقاسة بشكل مباشر، لتعطي في خرجها زاوية الميل المرجعية لشفرات التوربين للسماح بالتشغيل المستمر على الأقل مع الأداء المنخفض عند حدوث بعض الأعطال وذلك عند سرعات الرياح العالية .

15- التوصيات المستقبلية

على الرغم من التحسن الواضح في أداء وحدة التحكم، الا انها ما تزال مجال مفتوح للباحثين لاضافة المزيد من التطوير لتحسين دقة عمل التوربين في مواجهة تغييرات البيئة الخارجية، حيث يمكن اختبار إضافة التحكم المناعي والمتحكم الضبابي التكيفي للمتحكم التقليدي للتحكم بعزم المولد في النموذج المقترح، كما يمكن اختبار إضافة خوارزميات امثلة للمتحكم الضبابي المقترح لاضافة مزيد من الدقة في التحكم بزواوية ميل الشفرات.

16- المراجع

- [1] Green Peace (2021)
<https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/cambio-climatico/carbon/> Last accessed on 2021/02/13 .
- [2] Paris, Climate (2021)
https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en. Last accessed on 2021/02/13 .
- [3] Our World in Data (2020)
<https://ourworldindata.org/renewable-energy> Last accessed on 2021/02/13
- [4] IRENA (2019) Future of wind: deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation paper), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Oct/IRENA_Future_of_wind_2019.pdf. Last accessed on 2021/02/13
- [5] Shen YW, Yuan JR, Shen FF, Xu JZ, Li CK, Wang D (2019) Finite control set model predictive control for complex energy system with large-scale wind power. Complexity. <https://doi.org/10.1155/2019/4358958>
- [6] Tomás-Rodríguez M, Santos M (2019) Modelling and control of floating offshore wind turbines. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 16(4):381-390

- [7] Khayat, M., & Nekoui, M. A. (2020). Improving Performance of Variable Speed Wind Turbines using Takagi–Sugeno Fuzzy Controller and LQR Method. *Majlesi Journal of Mechatronic Systems*, 9(1), 1–10.
- [8] Teja, M. R., RamaSudha, K., & Vijayasanthi, R. (2020). Wind Turbine Modelling and Pitch Angle Control Using PID, Fuzzy and Adaptive Fuzzy Control Techniques.
- [9] Tahiri, M., Djebli, A., & Mimet, A. (2017). Drivetrain Flexibility Effect on Control Performance of a Horizontal Axis Wind Turbine. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(16), 5511–5519.
- [10] Civelek, Z. (2020). Optimization of fuzzy logic (Takagi–Sugeno) blade pitch angle controller in wind turbines by genetic algorithm. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(1), 1–9
- [11] Karthik, R., Hari, A. S., Kumar, Y. P., & Pradeep, D. J. (2020, January). Modelling and control design for variable speed wind turbine energy system. In *2020 International Conference on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP)* (pp. 1–6). IEEE.
- [12] Sierra–Garcia, J. E., & Santos, M. (2021). Deep learning and fuzzy logic to implement a hybrid wind turbine pitch control. *Neural Computing and Applications*, 1–15.

- [13] Karami–Mollaei, Ali, and Oscar Barambones. "Pitch Control of Wind Turbine Blades Using Fractional Particle Swarm Optimization." *Axioms* 12.1 (2022): 25.
- [14] Mahmoud, Mohamed Metwally, et al. "Dynamic Performance Assessment of PMSG and DFIG–Based WECS with the Support of Manta Ray Foraging Optimizer Considering MPPT, Pitch Control, and FRT Capability Issues." *Processes* 10.12 (2022): 2723.
- [15] Korkos, Panagiotis, et al. "Representation Learning for Detecting the Faults in a Wind Turbine Hydraulic Pitch System Using Deep Learning." *Energies* 15.24 (2022): 9279.
- [16] N. Mohan, *Advanced Electric Drives: Analysis, Control, and Modeling Using MATLAB/Simulink2014*