

## النمذجة الحاسوبية للنفثات الريحية متغيرة السرعة وتطوير أنظمة التحكم فيها

الدكتور زياد هرموش\*

(تاريخ الإيداع 29 / 1 / 2015. قُبِلَ للنشر في 5 / 3 / 2015)

### □ ملخص □

إن هدف التحكم بالنفثات هو الحصول على الحد الأعظمي من الطاقة المأخوذة من الرياح في الوقت الذي يتم فيه انقاص الأحمال الميكانيكية. إن تقنيات التحكم الحالية لا تأخذ بالحسبان الجانب الديناميكي للريح وللنفثة، وهذا يؤدي إلى خسائر مهمة في الطاقة، إضافة إلى كونها ليست فعالة. لذلك و من أجل إدخال بعض التحسينات على تقييم الفعالية التطبيقية للمتحكمات اللاخطية، يمكن اشتقاق متحكمات التغذية العكسية للحالتين الستاتيكية والديناميكية اللاخطيتين وذلك بالنسبة لمُقيَم سرعة الريح، ثم اختبار المتحكمات وفقاً لنموذج رياضي تم تطبيقه على محاكي نفثة ريحية بوجود اضطرابات وضجيج قياسي. أظهرت النتائج فعلياً تحسناً مهماً بالمقارنة مع المتحكمات الخطية المستخدمة حالياً.

الكلمات المفتاحية: النفثة الريحية-قياس سرعة الريح- المتحكمات - الضجيج.

\* أستاذ مساعد - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## Computerized Modeling of Variable Speed Wind Turbines and developing its control systems

Dr. Ziad Harmoush\*

(Received 29 / 1 / 2015. Accepted 5 / 3 / 2015)

### □ ABSTRACT □

The turbine control purpose is to achieve the maximum limit of wind power, associated with reducing the mechanical loads. The current control techniques do not take into consideration the dynamical side of wind and turbine, which leads to power loss. To improve the effectiveness of the

nonlinear controllers, we can derive the nonlinear feedback controllers for static and dynamic conditions in order to reach the wind speed estimator. Then we can test the controllers by a mathematical model applied on the wind turbine simulator, with disturbances and noise. The results have shown important improvements in comparison with the current used controllers.

**Key Words:** wind turbine – wind speed measurement –controllers– noise.

---

\*Assistant Professor, Electrical power department, Mechanical & Electrical Engineering Faculty, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**مقدمة:**

إن التطورات الحاصلة في تقانة العنفات الريحية [1] جعلت من الضروري العمل على تصميم أنظمة تحكم أكثر فعالية وأكثر استطاعة. وهذا بدوره يقود إلى تحسين و تطوير سلوك العنفات الريحية، بمعنى أن يجعل منها أكثر ربحية وأكثر موثوقية. بإجراء مقارنة بين العنفات ذات السرعة الثابتة و العنفات ذات السرعة المتغيرة و بميزة الطاقة الأعلى فإننا نحصل على إجهاد أقل للمكونات و ذروات طاقة (كهربائية) أقل للربط مع الشبكة. و لكي يتم استثمارها بشكل كامل فإنه يجب أن يتم التحكم بالسرعة المتغيرة بطريقة ذات مغزى واضح و محدد. إن العديد من الدراسات المتعلقة بالتحكم بأنظمة تحويل طاقة الرياح تعاملت و اشتغلت على مفهوم الحل الأمثل للطاقة الأيروديناميكية المنتزعة من منطقة الحمل الجزئي. لبلوغ هذا الهدف فقد تم استخدام المتحكمات التقليدية بشكل مكثف، و خصوصا المنظم PI [2]، [3]. على الرغم من استخدام "مقياس شدة الريح" لقياس سرعة الرياح، فإن القيمة التي يتم الحصول عليها، كحقيقة واقعة ، تكون مختلفة عن القيمة التي تظهر في معادلات نموذج (موديل) العنفة الريحية، كونها قيمة رئيسية.

**أهمية البحث وأهدافه:**

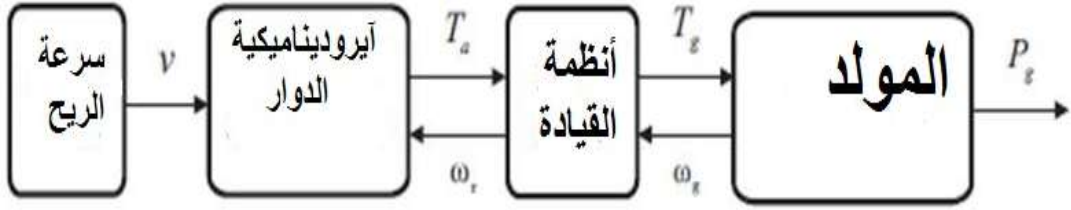
إن أي بحث يدرس في إطار الطاقات المتجددة من شأنه أن يشكل قيمة مضافة في مناخ عديدة مثل النواحي البيئية ونواحي رفد الشبكة الكهربائية باستطاعات نظيفة، و كما هو معروف فإن طاقة الرياح هي واحدة من أهم الطاقات المتجددة التي يعول عليها في توليد طاقة كهربائية نظيفة. إن الهدف من هذا البحث هو تصميم متحكمات لا خطية فعالة تأخذ بالحسبان المنحى الديناميكي لسرعة الرياح وكذلك المنحى الديناميكي للعنفة الريحية، بدون الحاجة لقياس سرعة الرياح.

**طرائق البحث و موادہ:**

أجريت مقارنة بين تقنيات التحكم الحالية التي لا تأخذ بالحسبان الجانب الديناميكي للريح و للعنفة مما يؤدي إلى خسائر مهمة في الطاقة، إضافة إلى كونها ليست فعالة و ليست متينة. لذلك و من أجل إدخال بعض التحسينات على تقييم الفعالية التطبيقية للمتحكمات اللاخطية، يمكن اشتقاق متحكمات التغذية العكسية للحالتين الستاتيكية و الديناميكية اللاخطيتين و ذلك بالنسبة لمُقيم سرعة الريح. تم اختبار المتحكمات وفقاً لنموذج رياضي تم تطبيقه على محاكي عنفة ربحية بوجود اضطرابات و ضجيج قياسي. أظهرت نتائج المحاكاة أداءً جيداً تماماً للطريقة المعروضة على أساس الموديل الرياضي و قد تمت مصادقته على محاكي العنفة الريحية من خلال برنامج حاسوبي.

**1 - نمذجة العنفة الريحية:****A-نمذجة النظام:**

من المعروف إن الطاقة المأخوذة من العنفة الريحية هو تابع لثلاثة بارامترات: توفر طاقة الرياح، منحني القدرة للآلة، و مقدرة هذه الآلة في الاستجابة للتقلبات الريحية [4]. مخطط العنفات الريحية متغيرة السرعة مبين في الشكل (1)، و نقول بشكل تقريبي إن العنفة الريحية متغيرة السرعة تتألف أساساً من عنفة هوائية، علبة سرعة، و مولد.



الشكل (1) مخطط النفقات الريحية متغيرة السرعة

يتم التعبير عن الطاقة الأيروديناميكية المستخلصة من العنفة الريحية من خلال العلاقة اللاخطية الآتية:

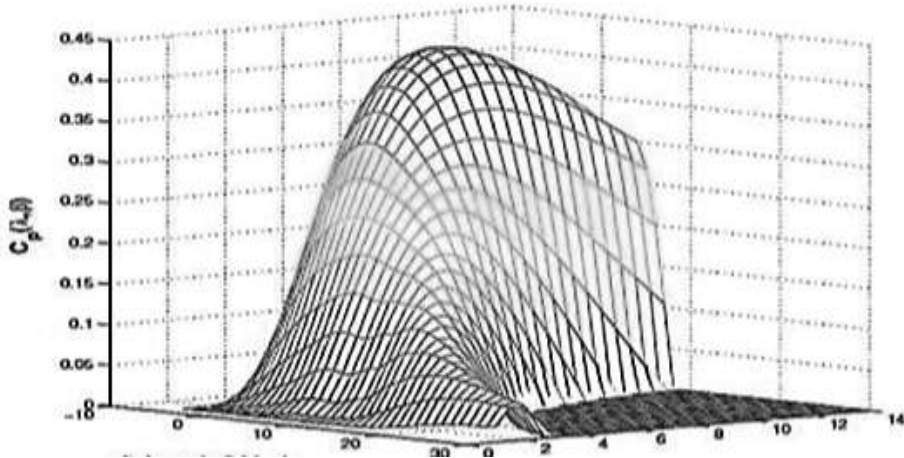
$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p (\lambda \cdot \beta) v^3 \quad (1)$$

حيث:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v}$$

وتدعى نسبة السرعة الرأسية، و هي النسبة بين السرعة الخطية للشفرة الرأسية و سرعة الريح  $v$ (m/s). بينما الرمز  $R$  يمثل نصف قطر الدوار (m)،  $\beta$  هي زاوية تدرج الشفرات، - كثافة الهواء ( $\text{kg/m}^3$ )، - نسبة السرعة الرأسية، - سرعة الدوار ( $\text{rad.s}^{-1}$ ).

وهكذا فإن أي تغيير بسرعة الدوار أو بسرعة الريح يترافق بتغيير نسبة السرعة الرأسية، ويقود ذلك إلى الاختلاف في معامل القدرة، و بالتالي يؤدي إلى أول طاقة مولدة. إن المنحني مبين في الشكل (2).



الشكل (2) منحني معامل الطاقة (القدرة)

تعطى الطاقة الأيروديناميكية بالعلاقة:

$$P_a = \omega_r T_a \quad (2)$$

بينما يتم التعبير عن العزم الأيروديناميكي بالعلاقة الآتية:

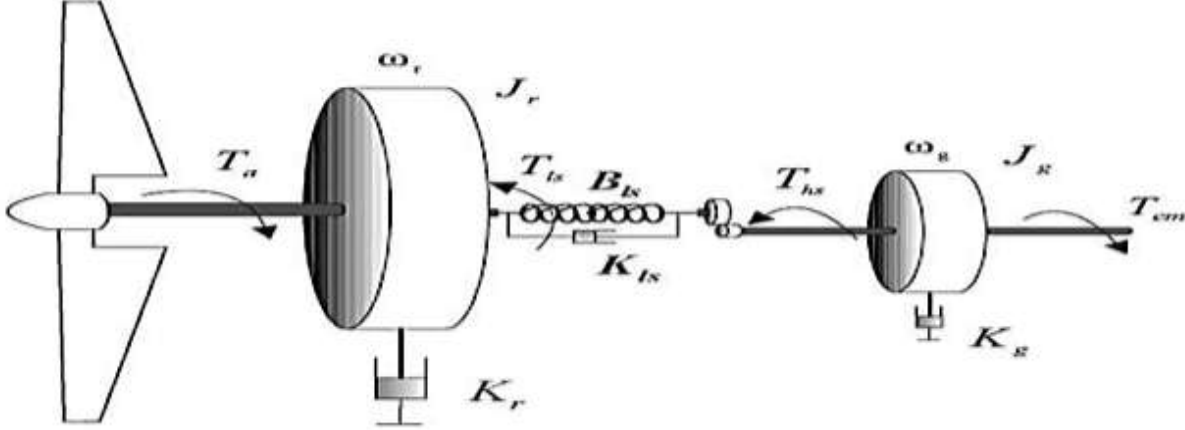
$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_q (\lambda \cdot \beta) v^2 \quad (3)$$

حيث: - معامل العزم و يكون ذا اعتمادية لا خطية وفقاً لنسبة السرعة الرأسية.

من المعادلات (1) حتى (3) نحصل على:

$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda}$$

القيادة بواسطة العزم الأيروديناميكي ، يدور دوار العنفة الريحية بالسرعة . و يتصرف عزم محور السرعة المنخفض كعزم فرملة على الدوار (الشكل 3).



الشكل (3) ديناميكية نظام القيادة

يمكن توصيف ديناميكية الدوار بواسطة المعادلة التفاضلية من الدرجة الأولى (العزم الديناميكي):

$$T_d = J_r \dot{\omega}_r = T_a - T_{ls} - K_r \omega_r \quad (4)$$

مع الأخذ في الحسبان أن السرعة المنخفضة للمحور و الناجمة عن القتل و الاحتكاك اللذان ينشآن بسبب الاختلاف بين و نكتب المعادلة التالية:

$$(5) T_{ls} = B_{ls}(\theta_r - \theta_{ls}) + K_{ls}(\omega_r - \omega_{ls})$$

حيث يتم قيادة المولد بواسطة عزم محور السرعة العالية و يتم كبحها بواسطة العزم الكهرومغناطيسي للمولد .

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - K_g \omega_g - T_{em} \quad (6)$$

ومن خلال علبة السرعة تزداد سرعة المحور السفلي بقيمة نسبة علبة السرعة و ذلك للحصول على سرعة المولد، بينما يزداد عزم محور السرعة السفلي.

$$(7) = \text{نسبة النقل}$$

إن حركية المولد يتم استرجاعها للخلف حتى الوصول إلى جانب السرعة المنخفضة.

$$(8)$$

بافتراض الصلابة الكاملة لمحور السرعة المنخفضة، فإن نموذج الكتلة الواحدة للعنفة يمكن حينها أن يحسب كالآتي:

$$J_r \dot{\omega}_r = T_a - K_t \omega_r - T_g \quad (9)$$

حيث:

- الطاقة الأيروديناميكية (W) .
- عزم المولدة (الكهرومغناطيسي) (N.m) .
- عزم المولدة من جهة الدوار (N.m) .
- عزم محور السرعة المنخفضة (N.m) .
- عزم المولدة (rad.s<sup>-1</sup>) .
- عزم المولدة (N.m) .
- عزم محور السرعة العالية (N.m) .
- العزم الأيروديناميكي (N.m) .
- عزم المولدة (N.m) .
- عزم محور السرعة المنخفضة (N.m) .
- عزم محور السرعة العالية (N.m) .
- القصور الذاتي للدوار (Kg.m<sup>2</sup>) .

**B- أهداف التحكم:**

إن إعادة التقسيم الزمني لسرعة الرياح يجعل العنفة الريحية في غالب الأوقات تعمل بسرعة رياح أقل من معدل سرعة الرياح المعتبرة، مما يعني ازدياد أهمية فعالية التحكم في نظام التشغيل. ففي الوقت الذي يتم فيه الحصول على الطاقة من خلال الرياح المتوفرة، فإنه يجب الوصول إلى القيمة العظمى للطاقة الأيروديناميكية بحيث تصل إلى مادون معدل سرعة الرياح التقليدية.

إن منحنى متعلق بعلاقة الطاقة الأيروديناميكية (1) التي تملك قيمة عظمى فريدة و هي مبينة في العلاقة

التالية:

$$C_p(\lambda_{opt} \cdot \beta_{opt}) = C_{popt} \quad (10)$$

و هي تمثل صلة وصل مع الطاقة المنتجة الأعظمية، حيث:

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega_{opt} R}{v} \quad (11)$$

من أجل ذلك في إطار سرعة الرياح ما دون المعدل، فإنه يجب انتزاع القيمة العظمى لسرعة الرياح، و يجب تثبيت زاوية درجة الشفرات  $\beta$  على القيمة المثلى للزاوية أي وذلك من أجل الإبقاء على قيمة  $\lambda$  عند القيمة المثلى لها (القيمة الأفضل Optimum Value)، كما يجب تعديل سرعة الدوار من أجل ملاحقة المرجعية و التي تملك الشكل نفسه لسرعة الرياح على اعتبار أنها تتاسبية:

$$\omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} v \quad (12)$$

حيث:

- القصور الذاتي للمولد ( $\text{Kg.m}^2$ ) . - القصور الذاتي الكلي للعنفة ( $\text{Kg.m}^2$ ) .

إن الهدف من المتحكم هو تعقب سرعة الدوار المثلى و التي تؤكد على أفضل فعالية (كفاءة) للطاقة في الوقت الذي تنخفض فيه حمولات التحكم.

**II- المنهجية المتبعة في التحكم:** في العنفات الريحية متغيرة السرعة يتم ربط المولد بالشبكة بواسطة مقوم و قابلية. عندما يتم ربط المولد بالشبكة بواسطة مبدلة ترددية فإن السرعة الدورانية للمولد ستكون مستقلة عن تردد الشبكة.

يتم التحكم بسرعة العنفة من خلال تعديل و ضبط عزم المولد. إن اختيار كقيمة دخل للتحكم ناجم عن التحكم بزواوية القدر للقابلية، و بالتالي من الممكن التحكم بالعزم الكهربائي في المولد.

تم استخدام استراتيجيات معروفة جيدا و الوصول إلى استجابات سريعة و منفصلة للعزم و للتدفق و نذكر على سبيل المثال التحكم الشعاعي (Torque control)، و كذلك التحكم الشعاعي المباشر (Direct Torque Control). يسمح عزم التحكم المستخدم لتردد القابلية للعنفة الريحية بالعمل في سرعة متغيرة ناتجة عن تخفيض الإجهاد الميكانيكي لنظام القيادة، و كذلك عن تذبذبات الطاقة الكهربائية و زيادة الطاقة المأخوذة.

تكون في هذا السياق، الحركة ذات سرعة كافية بحيث لا حاجة لوجود فروقات بين العزم الفعلي للمولد و العزم المطلوب. بهدف إجراء مقارنة بين قوانين التحكم الحالية و قوانين التحكم المقترحة، و التي سيتم عرضها أدناه.

في الدراسة المبينة في المرجع [5]، العزم الأيروديناميكي ذو التغذية الأمامية (Aerodynamic Torque Feedback) يستخدم العزم الأيروديناميكي و يتم تقييم سرعة الدوار باستخدام مرشح كالمان Kalman . إن العزم

الأيروديناميكي المقدر يغذي عزم المولد المرجعي. لقد ذُكر في المرجع [5] أيضاً أنه و باعتبار أن سرعة الرياح المتعقبة في حالة تغير مستمر، فإنه لا حاجة لإزالة خطأ الحالة المستقرة و المترافق مع الفعل التكاملي. بالتالي يتم استخدام المتحكم التناسبي:

$$T_g = K_c(\dot{\omega}_r - \omega_{ref}) + \dot{T}_a - K_t\dot{\omega}_r \quad (13)$$

حيث:

$$\omega_{ref} = \sqrt{\frac{\dot{T}_a}{K_t}} \quad (14)$$

بالتوافق مع

$$K_t = \frac{\rho}{2} \pi R^5 C_{popt} \frac{1}{\lambda_{opt}^3}$$

على أية حال، فإن خطأ الحالة المستقرة يبقى متوفراً بشكل خاص في حالة وجود الاضطرابات. ثمة عائق إضافي لهذه التقنية و هو أنه بافتراض تشغيل العنفة الريحية بالقرب من سرعة الدوار المثلى، و الذي يمكن بواسطته الحصول على علاقة من خلال إعدادات و الموضحة في العلاقة الآتية :

$$T_{aopt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 C_{popt} v^3 \quad (15)$$

فإن الفرق بين و سوف يحرض ضياعات طاقة مهمة خلال عملية النقل. بالتالي فإن القيمة الأكثر دقة للسرعة سوف يُحتاج إليها في هذا السياق. أظهر المرجع [4]، أن العنفة الريحية تكون مستقرة حول أية نقطة من نقاط منحنى الكفاءة (الفعالية) الأيروديناميكي المثلى. إحدى النقاط التي يمكن أن تبقى على هذا المنحني هي وذلك من خلال اختيار قيمة ما لعزم التحكم بحيث تتعقب نفس قيمة هذه النقطة بدلاً من سرعة العنفة المتغيرة. عندها يمكن استنتاج علاقة كما يلي:

$$T_g = K_t \omega_r^2 - K_t \omega_r \quad (16)$$

تدعى هذه الطريقة بتقنية التحكم غير المباشر بالسرعة (*Indirect Speed Control*)، على الرغم من هذا، فإن التحويلات (الانتقالات) الحاصلة خلال التغيرات السريعة لسرعة العنفة تكون مترافقة بضياعات الاستطاعة. أضف إلى ذلك أن استراتيجيات التحكم ليست قوية بالنسبة للعلاقة مع ضجيج القياس و الاضطرابات.

في المحصلة، فإن تقنيات التحكم المبينة أعلاه تُظهر عائقين رئيسيين:

من جهة أولى، فإن هذه التقنيات لا تأخذ بالحسبان المفهوم الديناميكي للرياح و للعنفة، و من جهة أخرى، فإن التقنيات نفسها ليست جيدة بالنسبة للعلاقة مع ضجيج القياس و الاضطرابات. و لكي يتم تجاوز هذه العوائق، فإنه سوف يتم استعراض حالة التغذية العكسية الديناميكية اللاخطية، و التي ستستخدم بالتوافق مع مقيم سرعة الريح، و ذلك بهدف الأخذ بالحسبان المفهوم الديناميكي لها. أكثر من ذلك، فإن هذه الهيكلية تسمح برفض الاضطرابات المؤثرة على عزم التحكم .

A. - تقييم العزم الأيروديناميكي:

تتنوع و تختلف سرعات الرياح وفقاً لمدى انزلاق القرص المرتبط بالدوار [2]، بالتالي فإنه من غير الممكن تمثيل سرعة الرياح الدوارة بقيمة مقاسة استثنائية. إن سرعة الرياح المقاسة بواسطة مقياس شدة الريح للعنفة هي عبارة

عن تقريب واحد يظهر في علاقة العزم الأيروديناميكي (3)، و هي تدعى سرعة الرياح الفعالة الدوارة، و هي تعرف كإشارة لسرعة الرياح كنقطة فردية، و التي ستسبب التغيير في عزم الرياح من خلال طاقة الدوار و معاملات الدفع، و التي ستكون مكافئة عشوائياً لتلك الحسابات المطبقة على نظرية عنصر الشفرة في حقل الرياح العاصف [4]. و بهدف الحصول على قيمة أكثر تماسكاً ل  $v$  و للتحكم بالنعفة الريحية بدون استخدام مقياس شدة الرياح بحيث يمكن استخدام النعفة الريحية كجهاز قياس. من أجل هذا يمكن المتابعة وفق الخطوتين التاليتين:

\*مقيم العزم الأيروديناميكي \* انقاصسرعة الرياح

### النتائج والمناقشة:

إن تقنية التحكم الخطي للحالة الستاتيكية للتغذية العكسية ليست جيدة فيما يتعلق بوجود اضطراب ماحتى و لو أمكن جعل النظام خطياً و ذلك من خلال التغذية العكسية للحالة الستاتيكية، فإنه يمكن فرض أعلى درجة للحركات بالنسبة لخطأ التعقب و ذلك من أجل الحصول على التغذية العكسية للحالة الديناميكية. لذلك نختار درجة الديناميكا الثانية، حيث يتم الحكم على خطأ التعقب بواسطة المعادلة التفاضلية الآتية:

$$\ddot{\hat{\epsilon}} + b_1 \dot{\hat{\epsilon}} + b_0 \hat{\epsilon} = 0 \quad (17)$$

نحصل من المعادلات (9) حتى (17) على:

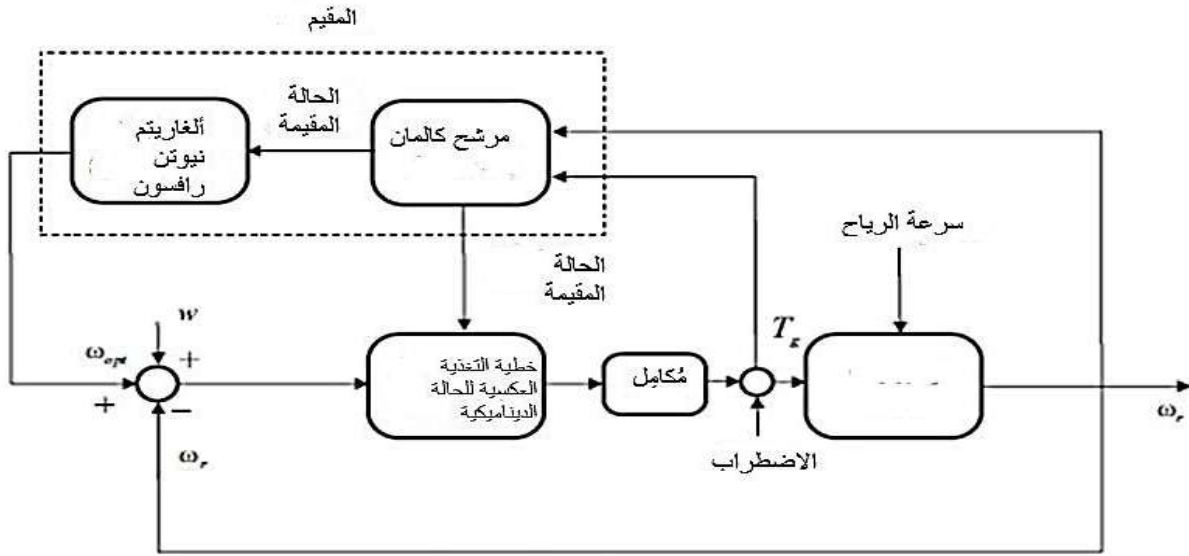
$$\dot{T}_g = \dot{T}_a - K_t \dot{\omega}_r - J_t \dot{\omega}_{opt} - J_t b_1 \dot{\hat{\epsilon}} - J_t b_0 \hat{\epsilon} = 0 \quad (18)$$

حيث:

- الاضطرابات الخارجية للدوار ( $Nm.Rad^{-1} . S^{-1}$ ).
- الاضطرابات الخارجية للنعفة ( $Nm.Rad^{-1} . S^{-1}$ ).
- الاضطرابات الخارجية الكلي للنعفة ( $Nm.Rad^{-1} . S^{-1}$ ).
- الاضطرابات عمود السرعة المنخفضة ( $Nm.Rad^{-1} . S^{-1}$ ).
- صلابة عمود السرعة المنخفضة ( $Nm.Rad^{-1}$ ).

تمثل العلاقة (18) الديناميكا السريعة جداً التي تقود إلى تعقب اضطرابات سرعة الرياح و كذلك تؤدي إلى حمولات تحكم كبيرة. نحصل من خيارات هذه الديناميكيات إلى ملاحقة سرعة الرياح المتوسطة و التي تكون زمنياً أعلى من فترات زمنية قصيرة. يبين الشكل (4) مخطط متحكم التغذية العكسية للحالة الديناميكية، بدون قياس سرعة الرياح حيث أن كل الاشتقاقات التي ظهرت في العلاقات الرياضية لعزم المولد.





مخطط المتحكم المُقيم بالترافق مع التغذية العكسية للحالة الديناميكية

الشكل (4) - التغذية العكسية للحالة الديناميكية للاختبار

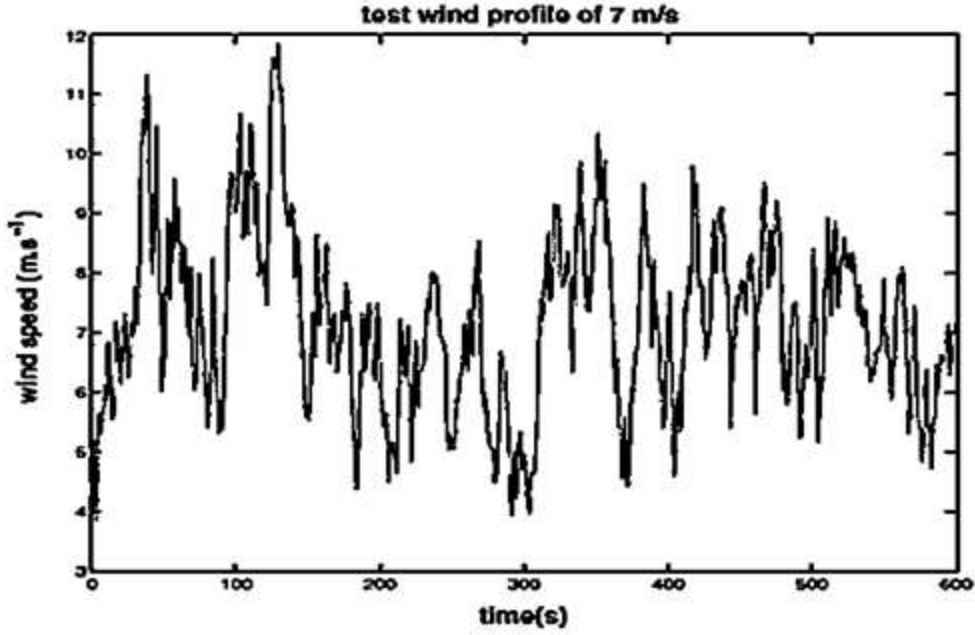
اختبار صحة النتائج:

كما تم ذكره، فإن العنفة الريحية المدروسة في هذا البحث هي ذات سرعة متغيرة، وذات درجة متغيرة أيضاً. تتألف من دوار وشفرتين مربوطتين بعنفة سرعة. المحور المقاد العالي السرعة للمولد التحريضي يتم ربطه بالشبكة بواسطة جهاز طاقة إلكتروني. حيث تم إنجاز المحاكاة الرقمية باستخدام عنفة ريحية ذات مواصفات مبينة في الجدول (1).

الجدول (1) - مميزات العنفة الريحية

43.3 m	قطر الدوار
43.165	نسبة علبه السرعة
36.6 m	ارتفاع المحور
650 kW	الاستطاعة الكهربائية للمولد
162 KN.m	عزم الدوار الأعظمي

اختبارات المصادقية قد تم أداؤها باستخدام محاكي عنفة ريحية، بحيث إن الدخل المطبق على محلل سرعة الريح بقيمة وسطية 7 (متر / الثانية) مبين في الشكل (5).

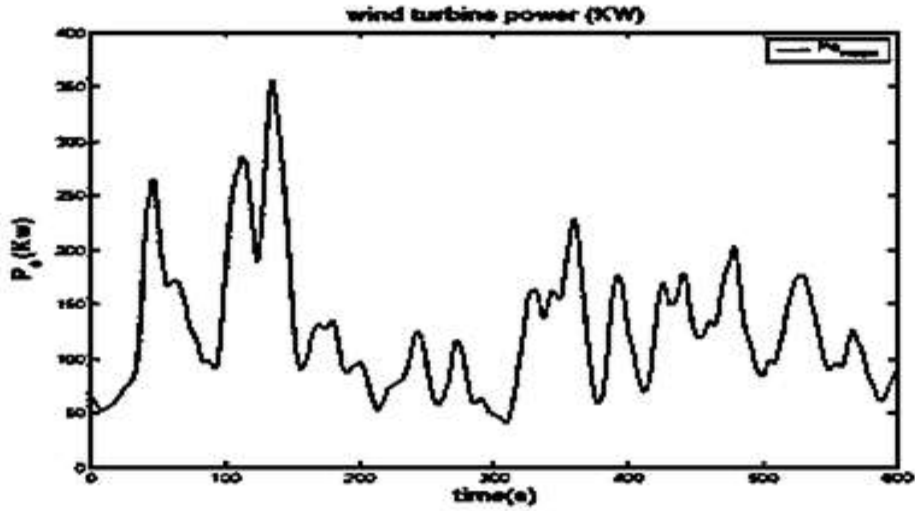


الشكل (5) - محلل سرعة الرياح 7 متر/ الثانية القيمة المتوسطة

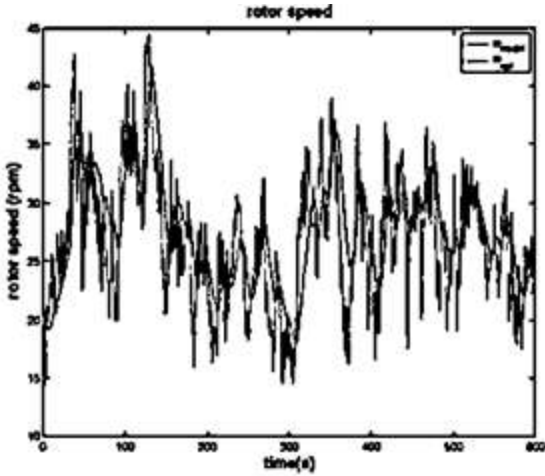
أولاً- استخدام النموذج:

تم استخدام الموديل الرياضي بالترافق مع المتحكم وتم إدخال ضجيج القياس، إضافة إلى الإجهاد 10 KN.m المتعلق بعزم التحكم .

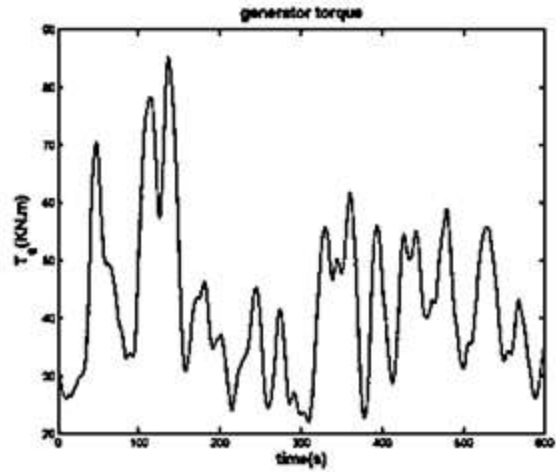
أظهرت نتائج المحاكاة أن الأداء المطلوب قد تم الحصول عليه باستخدام متحكم التغذية العكسية للحالة الديناميكية اللاخطية بوجود مقيم. يمكن في الشكل (6a) التحقق من أن سرعة الدوار تتعقب الكثافة الوسطى للسرعة الدورانية المثالية  $\omega_{opt}$  و ذلك بدون تعقب مكونات الاضطراب. وهذا يقود إلى حملات التحكم المقبول، وكما هو مبين في الشكل 6(b) فإنها تبقى محافظة على ما دون القيمة العظمى ل (162 KN.m).



(c) استطاعة المولد



(a) سرعة الدوار

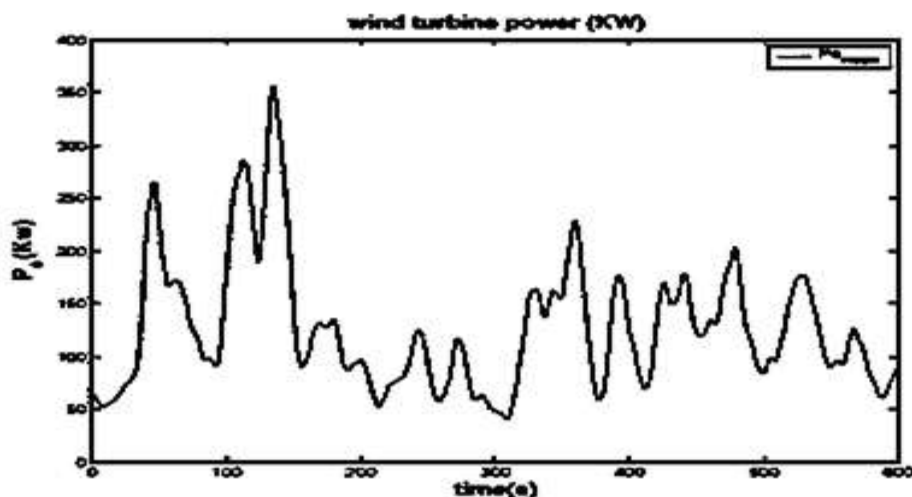


(b) عزم المولد

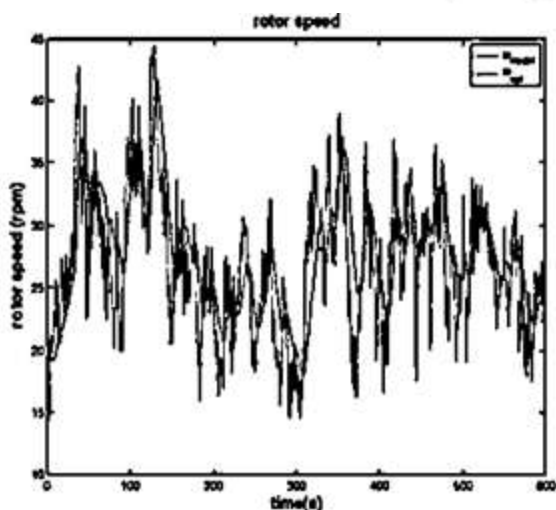
الشكل (6) - اختبارات متحكم التغذية العكسية للحالة الديناميكية للاخطية، بوجود مقيم و ذلك وفقاً للموديل الرياضي

ثانياً- المصادقة باستخدام محاكي العنفة الريحية:

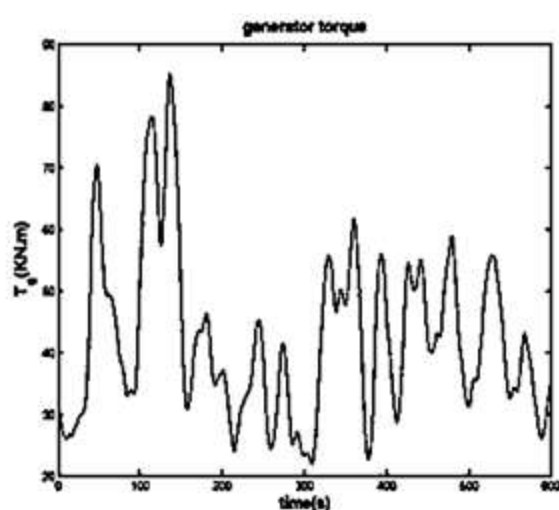
إن المصادقة على المتحكمات قد تم تنفيذها باستخدام محاكي عنفة ريحية. الانجاز الذي تم الحصول عليه قد أظهر ما يجب أن يكون متوقعاً و ذلك باستخدام متحكم التغذية العكسية للحالة الديناميكية و ذلك باستخدام مقيم. يبين الشكل (a) أن تغيرات سرعة الدوار تبقى تغيرات انسيابية، و بدون تذبذبات كبيرة، بينما يتم تعقب النزعة المركزية للسرعة الدورانية المثلى. هذا يؤكد استخلاص الطاقة الأمثل من الرياح، و هكذا فإن التذبذبات سوف تنقص في مكونات مسار القيادة. يبقى عزم المولد مع المحاكي (الشكل (b) 7)، بقيمة أقل من القيمة الأعظمية المقبولة، و يكون العزم ذو تغيرات انسيابية ناعمة. يقدم هذا المحاكي تغيرات قليلة في التردد العائد لتيارات المولد، بكلمات أخرى، يتم الحفاظ بشكل أفضل على الأجهزة الكهربائية للعنفة الريحية. بنفس الطريقة، فإنه يتم استخدام مرشح كالمان مع الغاريتم نيوتن - رافسون و ذلك لتقييم جيد لسرعة الرياح، و كذلك لتقديم العزم الأيروديناميكي بالإضافة إلى سرعة الدوار من خلال القياس المشوش بالضجيج .



(c) استطاعة المولد



(a) سرعة الدوار



(b) عزم المولد

الشكل (7) - المصادقة على متحكم التغذية العكسية للحالة الديناميكية اللاخطية، بوجود مقيم وذلك بمحاكاة العنفة الريحية

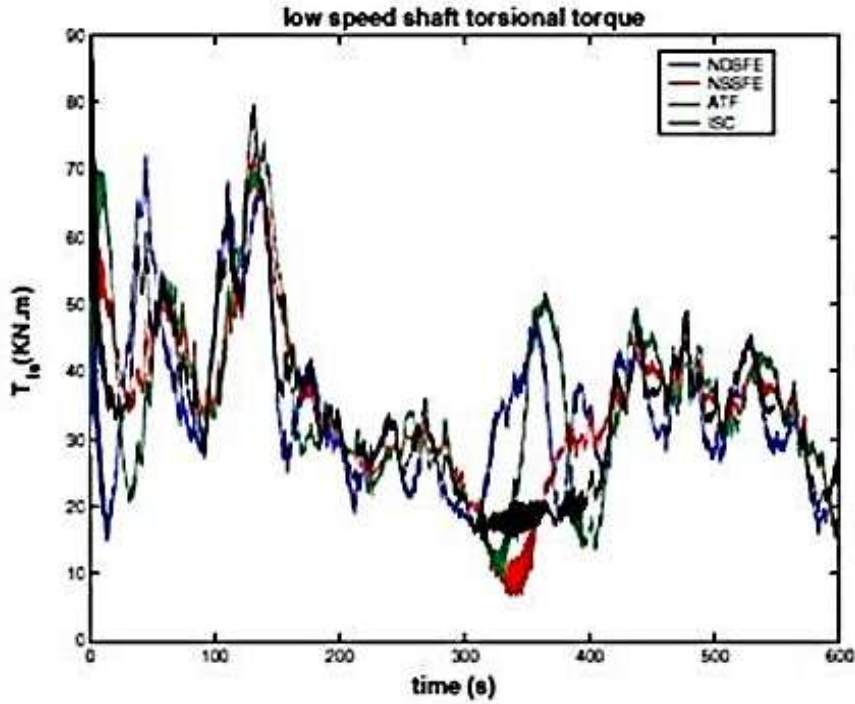
لتقييم مستوى المساهمة للمتحكم المعتبر، فقد تم إجراء مقارنة بين متحكمات مختلفة. تم تنفيذ محاكاة العنفة الريحية، وذلك تحت نفس ظروف التشغيل المتعلقة بضجيج القياس والتشويش. الأداء الذي تم الحصول عليه من خلال متحكمات مختلفة مبين في الشكل (8) و تم تلخيصه وفق الجدول II.

الجدول II- مقارنة بين استراتيجيات التحكم المختلفة

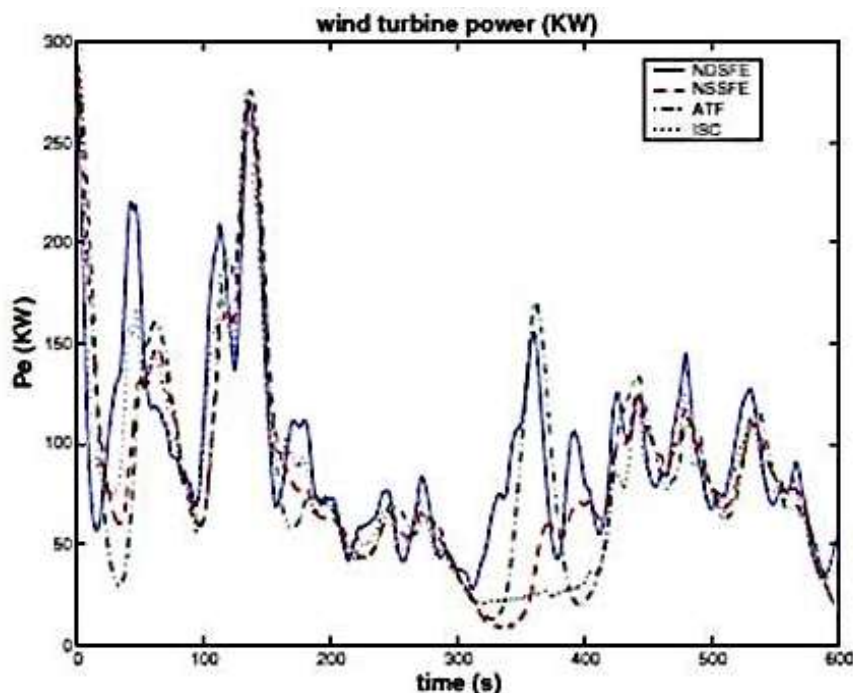
مقارنة بين متحكمات مختلفة	المردود %	الانحراف المعياري (KN.m)
ISC تقنية التحكم غير المباشر بالسرعة	59.01	12.77
NSSFE متحكم التغذية العكسية للحالة السناتيكية اللاخطية	61.28	11.87

العزم الأيروديناميكي ذو التغذية الأمامية ATF	63.49	13.19
متحكم التغذية العكسية للحالة الديناميكية اللاخطية NDSFE	70.01	11.59

يمكن الملاحظة على الشكل 8(a) أن الطاقة الكهربائية المنتجة باستخدام المتحكم المدروس هي أكثر أهمية و أفضل من تلك المنتجة باستخدام متحكمات أخرى. إن تذبذبات عزم محور السرعة المنخفضة أيضاً تنقص باستخدام استراتيجية خطية التغذية العكسية للحالة الديناميكية اللاخطية و بوجود مقيم، و ذلك كما هو موضح في الشكل 8(b). نلاحظ أن أداء أول ثلاثة متحكمات يبقى أداءً مغلقاً. من جهة أخرى، يمكن ملاحظة أن متحكم التغذية العكسية للحالة الديناميكية مع مقيم يسمح بإحداث تحسين للفعالية بنسبة 10% و ذلك بالمقارنة مع متحكم سرعة غير مباشرة مع زيادة 1.18 KN.m للانحراف المعياري لعزم الالتواء لمحور السرعة المنخفضة .



(a) عزم محور السرعة المنخفضة



(b) الطاقة الكهربائية

الشكل (8) عزم الطاقة الكهربائية و عزم محور السرعة المنخفضة باستخدام استراتيجيات التحكم المختلفة

### الاستنتاجات والتوصيات:

تم تطوير متحكمات التغذية العكسية اللاخطية، بوجود مقيم سرعة ربح و ذلك من أجل التحكم بالعنفة الريحية. الأهداف التي أدت إلى تركيب متحكمات جيدة أدت أيضاً إلى الوصول إلى القيمة العظمى للطاقة المأخوذة من الرياح وذلك عند تخفيض الأحمال الميكانيكية. وقد تم اقتراح متحكمات تعتمد على تقنية خطية التغذية العكسية للحالة الديناميكية بوجود متعقب دوار السرعة التقاربي المرجعي، والمركب مع العزم الأيروديناميكي وبوجود مقيم سرعة الربح. لقد تمت مصادقة استراتيجية التحكم بوجود محاكي هوائي من للعنفة الريحية، وهذا قاد إلى نتائج مرضية، والذي فعلاً يشير إلى مستوى فعالية المتحكمات المطورة، و ذلك بالمقارنة مع تلك المتحكمات المعروضة في هذا البحث.

### المراجع :

- [1] L. V. Divone, *Evolution of modern wind turbines*, pp.73-183. David A. Sepra, amse press ed., 1995.
- [2] X. Ma. *Adaptive extremum control and wind turbine control*. PhD thesis, Technical University of Denmark, 1997.
- [3] M.M. Hand and M.J. Balas, "Non-linear and linear model based controller design for variable-speed wind turbine," pp.1-8. NREL Report 2010.
- [4] E.L. Van der hooft, "wind turbine control algorithms", report, ECN Windenergie, December 2003.
- [5] P. Bongers, *Modeling and Identification of flexible wind turbines and a factorizational approach to robust control*. PhD. Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 2011.