

التحكم بلا حساس بسرعة مولد تحريضي مضاعف التغذية في العنفة الريحية

د. هيثم أسمر*

د. نسمت أبو طبق**

مريانا موسى***

(تاريخ الإيداع 1 / 2 / 2017. قُبِلَ للنشر في 25 / 5 / 2017)

□ ملخص □

يقدم هذا المقال مساهمة جديدة في مجال التحكم بالسرعة بدون حساسات للمقادير الميكانيكية لمولد تحريضي مضاعف التغذية في تطبيقات العنفات الريحية. حيث يتم مراقبة السرعة والعزم الديناميكي من أجل استخدامها في التغذية العكسية في حلقات التحكم. إن الخوارزمية المقترحة للتحكم بالسرعة بدون حساس لا تتأثر بتغيرات بارامترات الآلة حيث يتم مراقبة السرعة بشكل مستقل عنها. تتجنب الخوارزمية المستخدمة إجراء التفاضل وهذا يحسن بشكل كبير من عدم التأثر بإشارات الضجيج. اعتمدنا على نظرية التحكم الشعاعي بتوجيه الفيض المغناطيسي وذلك للتحكم بسرعة الآلة التحريضية مضاعفة التغذية. المتحكمات المستخدمة في الحلقات المغلقة هي متحكمات تناسبية تكاملية تقليدية. تمت النمذجة بالاعتماد على معادلات بارك للآلة التحريضية وعلى نموذج مبسط لقالبة جهد ثلاثية الطور. تبين نتائج المحاكاة في برنامج MATLAB أداء جيد للتحكم المقترح بالسرعة من دون حساس.

الكلمات المفتاحية: التحكم بالسرعة بلا حساسات، التحكم الشعاعي، الآلة التحريضية مضاعفة التغذية، العنفة

الريحية.

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

**مدرس-قسم هندسة الطاقة الكهربائية-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

***طالبة دراسات عليا (ماجستير)- قسم هندسة القوى الميكانيكية-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

Sensorless Speed Control of Doubly Fed Induction Generator in Wind Turbine

Dr. Haytham Asmar*
Dr. Nesmat Abu Tabak**
Marianna Musa***

(Received 1 / 2 / 2017. Accepted 25 / 5 / 2017)

□ ABSTRACT □

This paper presents a new contribution the domain of sensorless speed control of doubly-fed induction generator in wind turbine applications. Where the speed and the dynamic torque are estimated and used to feedback the control loops. The proposed sensorless algorithm is robust to variations of the values of machine parameters where the estimated speed is independent of them. The algorithm avoids using differentiation which significantly improves its immunity to noise. The field oriented vector control theory is used to control the speed of the doubly fed induction machine. The used controllers in closed loops are classical proportional integral (PI). The modeling is based on the Park equations of the induction machine and on a simple model of the three phase inverter. The results of simulink on MATLAB provide good performance of the sensorless speed control.

Keywords: Sensorless Speed Control, Vector Control, Doubly-Fed Induction Generator, Wind Turbine.

* Assistant Professor-Mechanical Power Engineering Department-Mechanical and Electrical Engineering Faculty-Tishreen University-Lattakia-Syria.

**Lecturer-Electrical Power Engineering Department-Mechanical and Electrical Engineering Faculty-Tishreen University-Lattakia-Syria.

***Postgraduate (Master) Student-Mechanical Power Engineering Department-Mechanical and Electrical Engineering Faculty-Tishreen University-Lattakia-Syria.

مقدمة

يهدف التحكم بسرعة العنفة الريحية إلى أمثلة الاستطاعة أي استخلاص الاستطاعة الأعظمية الممكنة من الطاقة الحركية للرياح. لتحقيق هذا الهدف يستخدم بشكل أساسي التحكم بالسرعة بحلقة مغلقة أي نحتاج لقياس السرعة من أجل التغذية العكسية. يتم عادةً استخدام حساسات للمقادير الميكانيكية وظيفتها قياس السرعة ولكن حجمها الكبير نسبياً وكلفتها وأداءها الديناميكي بالإضافة للضجيج الصوتي تعتبر من السلبيات التي لا بد منها. يمكن التخلص من تلك السلبيات باستخدام مراقب السرعة (Observer or Estimator) وهو دائرة الكترونية دخلها مقادير سهلة القياس كالجهد والتيار وخرجها السرعة وزاوية الموضع. نقدم في هذا البحث نموذجاً جديداً لمراقب السرعة والموضع مضافاً إليه مراقب العزم الديناميكي. يعمل هذا المراقب ضمن حلقة التغذية العكسية لتوليد السرعة الميكانيكية والعزم الديناميكي اللازمين للتحكم بالسرعة. سنتحكم بسرعة الآلة التحريضية ذات التغذية المضاعفة لملاحقة قيمة مرجعية متغيرة حسب تغير سرعة الرياح لاستخلاص الاستطاعة الأعظمية على محور العنفة. سنستخدم التحكم الشعاعي بتوجيه الفيض المغناطيسي للثابت للتحكم بالعزم الكهرومغناطيسي ثم بالسرعة بثلاث حلقات مغلقة مترابطة من ضمنها حلقات التيارات لضبط تيارات الدائر. يتم ضمن حلقات التحكم فصل تيار الدائر إلى مركبتين يتم التحكم بكل منهما بشكل مستقل عن الأخرى.

أهمية البحث وأهدافه

إن التحكم بسرعة العنفة الريحية يتيح استخلاص الاستطاعة الأعظمية من الرياح. يهدف هذا البحث تقديم مساهمة جديدة من خلال تطوير مراقب السرعة والموضع والعزم الديناميكي لغرض التغذية العكسية لحلقات التحكم المختلفة. تتوضح المساهمة الجديدة تباعاً في النص من خلال مراقبة المقادير الكهربائية في الدائر و استخدام مراقب العزم الديناميكي بالإضافة لمرشح إشارة السرعة المقاسة.

طرائق البحث ومواده:

يعتمد البحث الأسلوب التجريبي من خلال النمذجة والمحاكاة من أجل إثبات فعالية مراقب السرعة المقترح بالإضافة لإيجاد البارامترات ودمج مراقب العزم الديناميكي معه. يتم بعدها استخلاص النتائج وتفسيرها وبيان مزايا ومساوئ استخدام هذا المراقب.

1- دراسة مرجعية

يوجد العديد من طرق التحكم بلا حساسات لمولد تحريضي مضاعف التغذية [1] و كان L. Morel، H. Godfroid، A. Miraian و J.M. Kauffmann من الرواد الذين اقترحوا المراقبة لموضع الدوار لمولد تحريضي مضاعف التغذية، أما سرعة الدائر فيتم الحصول عليها بتفاضل موضع الدائر و هذه إحدى سلبيات هذه الطريقة حيث يؤدي التفاضل إلى زيادة مطال الضجيج.

عام 2005 في المرجع [2]: قدمت دراسة عن تصميم و تحليل مراقب من النوع (نظام النموذج المرجعي التكيفي) Model Reference Adaptive System MRAS لاستخدامه بدل الحساس في تحديد الموضع و السرعة لمولد تحريضي مضاعف التغذية DFIG. اعتمد الباحث في خوارزميته على معادلات الجهد والتيار للحصول

على فيبوز الثابت و من ثم سرعة دوران الدائر و موضعه. كان من الملاحظ في هذه الدراسة أن دقة المراقب تعتمد بشكل أساسي على التحريض المتبادل بين الثابت والدائر (أي تتأثر بارامترات الآلة) وأن التقدير الخاطئ للتحريض المتبادل يؤدي إلى تقدير غير صحيح لسرعة الدائر وبالتالي الموضع.

في عام 2007 قدم الباحث في المرجع [1]: بحثاً تم فيه دراسة نظام تحكم مزدوج P-Q (استطاعة فعلية و ردية) أيضاً لمولد DFIG دون الاعتماد على حساسات و كان الهدف التخلص من حساسية المراقب لتغيرات بارامترات الآلة. بالإضافة إلى ذلك تجنبت الخوارزمية المقترحة استخدام التفاضل وبالتالي هذا يزيد بشكل كبير من دقة النظام و مقاومته للضجيج.

في عام 2010 تمت دراسة [3]: كان هدفها تصميم مراقب لتقدير سرعة الدائر و الموضع وتحقيق استقرار المراقب و تمت المقارنة بين نظامي التحكم بوجود الحساس وبدونه. من نتائج وجود المراقب إنه تم التخلص من التفاضل لحساب سرعة الدوران الميكانيكية و بالتالي تقليل الضجيج. إلا أن التفاضل من أجل حساب سرعة الساحة المغناطيسية بقي موجود.

في المرجع [4] عام 2011: قدمت الدراسة التحكم بلا حساسات لتتبع نقطة الاستطاعة الاعظمية لمولد تحريضي مضاعف التغذية في توربين ريحي متغير السرعة يعتمد على مراقب MRAS و يستخدم FOC (Field Oriented Control) أي التحكم بتوجيه الحقل المغناطيسي ومن نتائجه تحسين فعالية وموثوقية نظام التحكم وتحقيق استجابة ديناميكية سريعة في الظروف العابرة. حيث اعتمد المراقب على قياس جهد الثابت في تحديد القيمة المقدره لفيض الدائر ومن ثم يتم حساب سرعة الدوران وزاوية الموضع. لكن تحديد الفيض يعتمد على بارامترات الآلة وبالتالي المراقب غير مستقل.

عام 2012 قدمت دراسة [5]: كان هدفها تطوير مراقب MRAS ثم مقارنة مراقب السرعة MRAS (حلقة مغلقة) مع مراقب بحلقة مفتوحة. وكنتيجة كان خطأ المراقبة في MRAS أقل.

في المقال [6] عام 2014: كان التحكم المقترح بلا حساسات يعتمد على النمط الانزلاقي عالي الدرجة لتقدير سرعة المولد HOSM (High Order Sliding Mode). حيث HOSM هي مجموعة معادلات رياضية تتعلق ببارامترات الآلة. ومن خصائص الاستراتيجية المقترحة متانة للاضطرابات وحساسية منخفضة لتغيرات بارامترات الآلة. استراتيجية التحكم الشاملة المقترحة دمجت بين ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية (MPPT Maximum Power Point Tracking) و HOSM .

في الدراسة [7] عام 2015: استخدم النظام المقترح مرشح كالمان Kalman وظيفته الحصول رياضياً على قيم فيزيائية لا يمكن قياسها أو صعوبة الوصول وهي موضع وسرعة الدائر. يزيد المرشح متانة النظام لتغيرات بارامترات الآلة ويستخدم لتقدير العزم الميكانيكي لتتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية. يقارن المرجع بين نوعين من المراقبات MRAS ومرشح كالمان وقد أظهرت النتائج أن مرشح كالمان يقيس موضع وسرعة الدوار وعزم الدوران الميكانيكي بدقة أعلى من المراقب MRAS. بالإضافة إلى ذلك فإن مرشح كالمان هو أكثر متانة لتغيرات بارامترات الآلة من MRAS .

النتائج والمناقشة

النمذجة

يوضح الشكل (1) نموذج لعنفة ريحية مريوطة على مولد تحريضي بتغذية مضاعفة مع دائرة القيادة والتحكم بسرعة الدوران. للتحكم بسرعة الدوران نستخدم استراتيجية التحكم الشعاعي بالعزم عن طريق توجيه الفيض المغناطيسي للثابت φ_s باتجاه المحور d .

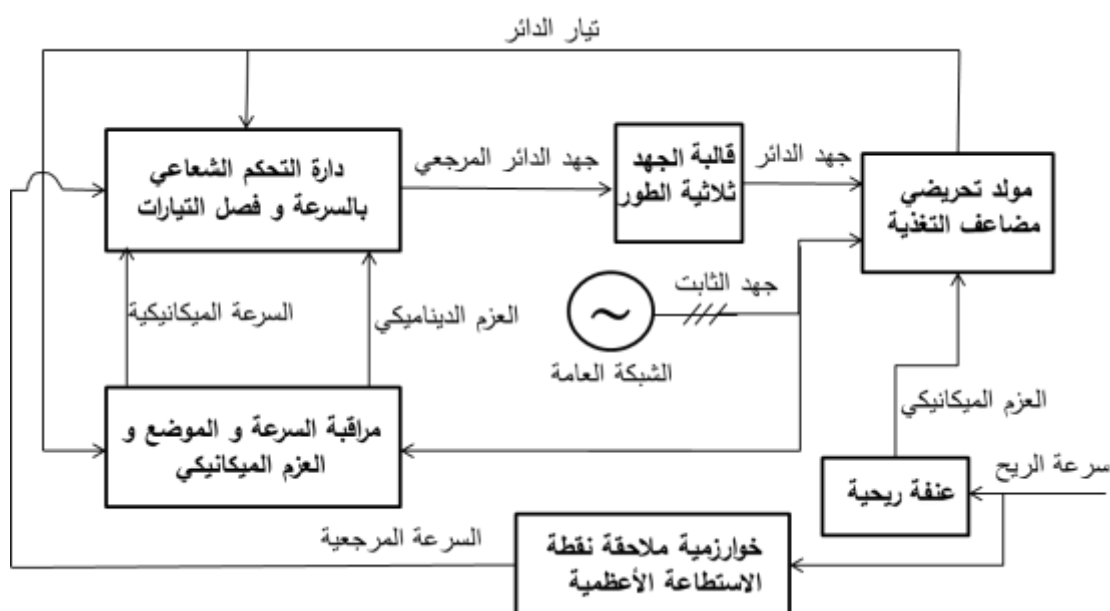
بعض معطيات المولد والعنفة:

$$L_f = L_s - L_r; \quad L_s = 0.0118(H); \quad L_r = 0.0116(H); \quad L_m = 0.0116(H)$$

$$N_r = 1515(\text{rpm}); \quad f_n = 50(\text{Hz}); \quad P_e = 300(\text{kW}); \quad R_r = 0.0048(\Omega); \quad R_s = 0.0063(\Omega); \quad 2p = 4 \text{poles}$$

حيث: R تمثل مقاومة، L تمثل محارضة، s يرمز للثابت، r يرمز للدائر، نصف قطر دوار العنفة

$R=14(m)$ ، نسبة المسننات في علبه السرعة $G=23$ و هي نسبة سرعة مولدة إلى سرعة العنفة.



الشكل (1) المخطط الصندوقي للعنفة الريحية مع التحكم بالسرعة بمساعدة المراقب

نستخدم معادلات بارك في بناء نموذج المحاكاة للأداة التحريضية أي بالإحداثيات الثنائية d, q المرتبطة بالحقل

المغناطيسي الدوار. يوجد قالبية جهد تغذي ملفات الدائر بجهد ذو تردد ومطال مرغوبين ومعطين كمرجعين من دائرة التحكم. أما ملفات الثابت فتتغذى من منبع ثابت الجهد والتردد. يلاحظ إلى اليسار صندوق يحوي مراقب المقادير الميكانيكية (السرعة، العزم الديناميكي وزاوية الموضع للمحور الميكانيكي).

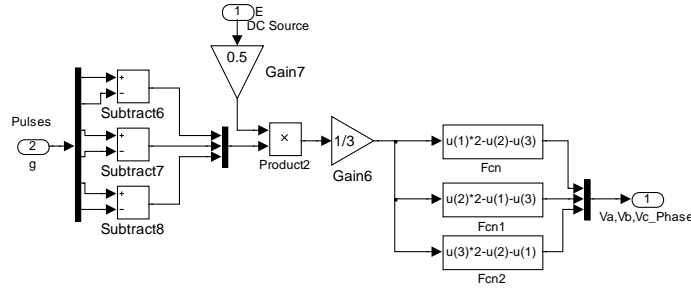
نموذج القالبية

يوضح الشكل (2) النموذج الرياضي لقالبية جهد ثلاثية الطور حيث لها دخلين الجهد المستمر ونبضات القدر

للتأثيرات والخرج عبارة عن جهود الأطوار الدائر.

يتم توليد نبضات القدر للقالبية بطريقة التعديل الجببي المثلي حيث موجة التعديل هي خرج صندوق التحكم

بالسرعة.

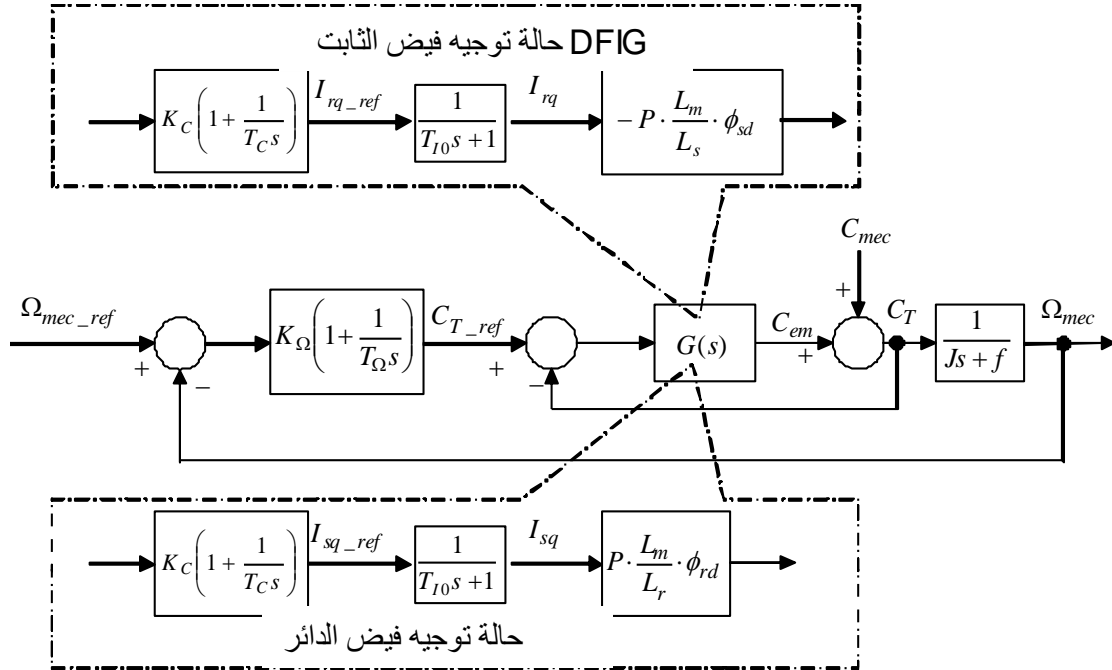


الشكل (2) نموذج القالب ثلاثية الطور

دائرة التحكم

تتألف دائرة التحكم من مجموعة متحكمات تقليدية PI ضمن حلقات مغلقة تعاقبية أو (شلالية) Cascade كما

في الشكل (3).

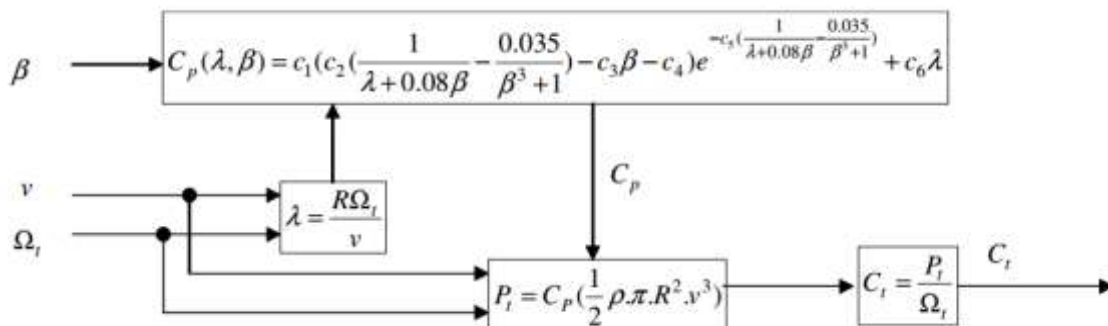


الشكل (3) دائرة التحكم بسرعة المولدة التحريضية

تم في الشكل (3) تصميم متحكمات بالاعتماد على توابع النقل بين تيار الدائر والفيض المغناطيسي للثابت من جهة والعزم الكهربي من جهة أخرى. تم ذلك بعد إجراء عملية الفصل بين مركبتي تيار الدائر I_{rq} ، I_{rd} ، حيث إحدى المركبتين I_{rd} تضبط الفيض المغناطيسي والأخرى I_{rq} تضبط العزم الكهربي بالتالي السرعة الميكانيكية. نحتاج إذن للتحكم بالسرعة إلى قياس تيارات الدائر والتردد الزاوي الكهربي في ملفات الدائر وقياس العزم الديناميكي والسرعة الميكانيكية. باعتبار أن المقادير الكهربائية سهلة القياس أما المقادير الميكانيكية فهي إما صعبة الوصول أو أن المقاييس لا تعطي نتائج دقيقة وخاصة في الحالات العابرة من هنا تأتي أهمية المراقب. سيقوم المراقب بتوليد القيم غير المقاسة أو صعبة القياس ليؤمن مقادير التغذية العكسية اللازمة للتحكم بالسرعة.

نموذج العنفة الريحية

يبين الشكل (4) النموذج الرياضي للعنفة الريحية (القسم الميكانيكي) حيث مداخلة السرعة الميكانيكية وسرعة الرياح وزاوية ميل الشفرات. أما الخرج فهو بشكل رئيسي العزم الميكانيكي الذي سيدير المولدة.

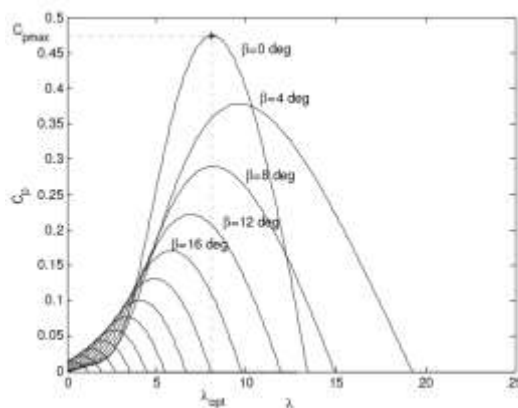


الشكل (4) نموذج العنفة الريحية

حيث: $c_1 = 0.5109$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$, $c_6 = 0.0068$

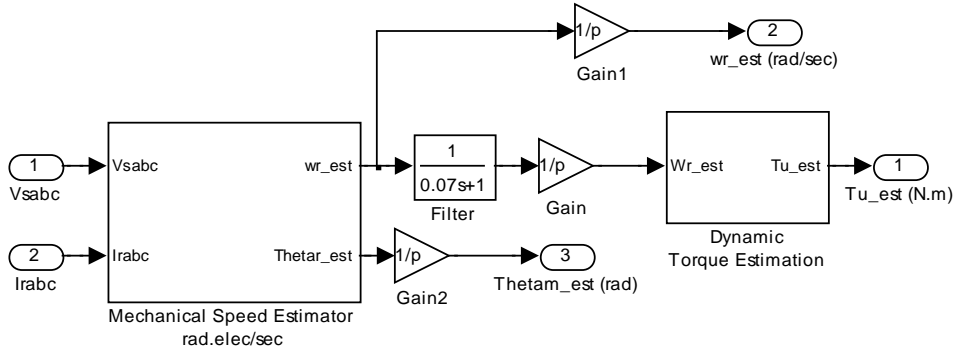
ملاحظة النقطة الأعظمية للاستطاعة

يبين الشكل (5) النقطة الأعظمية لمعامل الاستطاعة المحققة من أجل زاوية انحراف صفرية β وعند قيمة معينة لنسبة السرعة الطرفية λ . إن التحكم بالسرعة الميكانيكية عند تغير سرعة الرياح يسمح بتهيئة نسبة السرعة الطرفية على القيمة الموافقة للقيمة الأعظمية للاستطاعة المسحوبة من الرياح.

الشكل (5) منحنيات $C_p(\lambda, \beta)$ عند زوايا ميلان مختلفة للشفرات

دائرة المحاكاة لمراقب المقادير الميكانيكية المقترح

يتألف المراقب الموضح في الشكل (6) من ثلاثة أقسام رئيسية وهي: مراقب السرعة والموضع إلى اليسار ومرشح في الوسط ومراقب العزم الديناميكي (محصلة العزم على المحور) على اليمين.

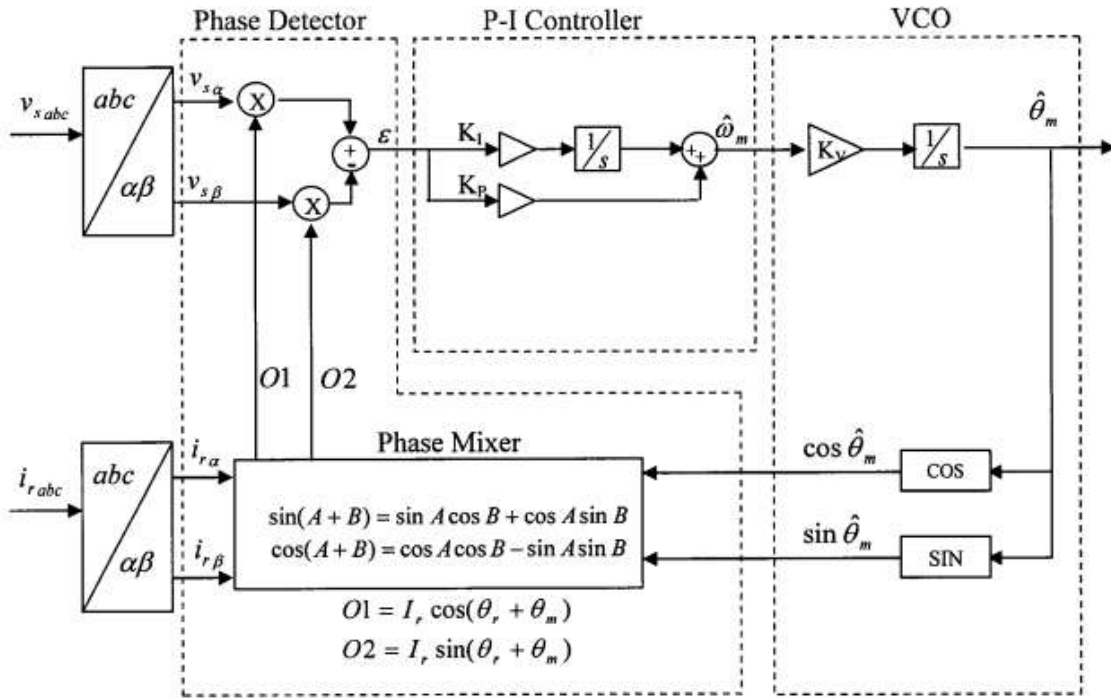


الشكل (6) دائرة المحاكاة لمراقب المقادير الميكانيكية

إن وجود المرشح ضروري حيث تحمل السرعة المراقبة إشارات طفيلية ذات تردد عالي جداً تؤثر على استقرار نظام القيادة.

المخطط الصندوقي لمراقب الموضع والسرعة

يتم مراقبة السرعة $\hat{\omega}_m$ والموضع $\hat{\theta}_m$ عن طريق تخفيض أو إزالة الخطأ ε بين القيمة الحقيقية للموضع والقيمة المراقبة بواسطة متحكم تناسبي تكاملي كما في الشكل (7). نحتاج هنا إلى التحويل من الإحداثيات الثلاثية إلى إحداثيات ثنائية ثابتة α, β لجهد الثابت و تيار الدائر المقاسين وأيضاً نحتاج إلى مزاج الطور Phase Mixer. عند الحصول على النتائج والمقارنة مع المقادير الحقيقية يلزم الضرب بإشارة (-1) للسرعة والموضع المراقبين.



الشكل (7) مراقب السرعة والموضع

تحويل الاحداثيات

يتم التحويل من الإحداثيات الثلاثية إلى الإحداثيات الثنائية مع الحفاظ على استطاعة ثابتة قبل وبعد التحويل

حسب المعادلة المصفوفية التالية:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V \sin(\theta_s) \\ V \sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) \\ V \sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

مازج الطور (Phase Mixer)

للحصول على القيمتين $O_1 = I_r \cos(\theta_r + \hat{\theta}_m)$ و $O_2 = I_r \sin(\theta_r + \hat{\theta}_m)$ نستخدم مازج الطور

Phase Mixer المبين في الشكل (7) ويعتمد على الخواص المثلثية التالية:

$$\sin(A + B) = \sin A \cos B + \cos A \sin B$$

$$\cos(A + B) = \cos A \cos B - \sin A \sin B$$

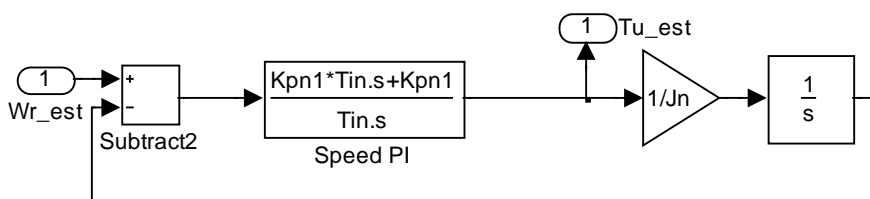
حيث $A = \theta_r$ و $B = \hat{\theta}_m$

مراقب العزم

يتم مراقبة العزم كخرج للمتحكم التناسبي التكاملي في الشكل (8) حيث الدخل هو إشارة السرعة الميكانيكية

المراقبة أساساً. النظام المتحكم به يمثل العطالة الميكانيكية للمحور السريع في العنفة الريحية. إن إضافة هذا المراقب

لمراقب المقادير الميكانيكية الوارد أعلاه هو مساهمة أصيلة في هذا المجال.



الشكل (8) مراقب العزم

المخطط الصندوقي لمراقب المقادير الكهربائية

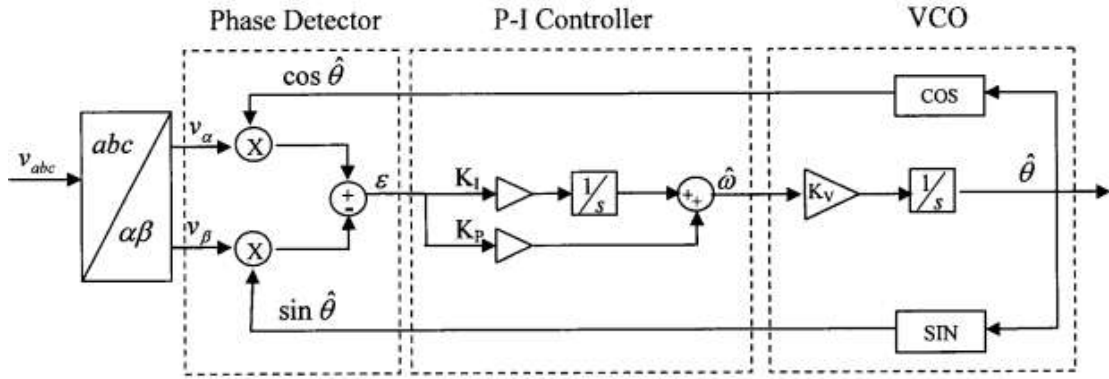
يمكن بالإضافة لما سبق مراقبة المقادير الكهربائية كالسرعة الزاوية في الثابت ω_s والسرعة الزاوية الكهربائية

في الدائر ω_r . الموضع الزاوي الكهربائي في الثابت $\theta_s = \omega_s t$ والدائر $\theta_r = \omega_r t$. يعتبر أيضاً مراقبة

المقادير الكهربائية في الدائر مساهمة أصيلة. يبين الشكل (9) المخطط الصندوقي لمراقب المقادير الكهربائية للثابت

والدائر. قمنا بمعايرة المتحكم التناسبي التكاملي بحيث يكون خطأ المراقب ε بين المقادير المراقبة والحقيقية أقل ما

يمكن أو معدوماً.



الشكل (9) مراقبة المقادير الكهربائية

توفر علينا هذه المراقبات قياس المقادير الكهربائية وهي تعمل بشكل جيد عندما يكون الغرض قياس المقادير من أجل القياس. إلا أننا لا نستطيع استخدامها في التغذية العكسية بشكل ناجح. حيث وجدنا ان استخدام المقادير الكهربائية المراقبة في مسار الحلقة المغلقة للتحكم بسرعة العنفة الريحية يعتبر اضطرارياً بسبب في عدم الاستقرار. وقد لوحظ ذلك من خلال تجارب المحاكاة التي قمنا بها. تم اختبار أداء المراقب للمقادير الكهربائية من أجل القياس فقط دون التحكم وحصلنا على نتائج ممتازة في الحالة العابرة والمستقرة في الاستجابة الزمنية للمقادير المراقبة.

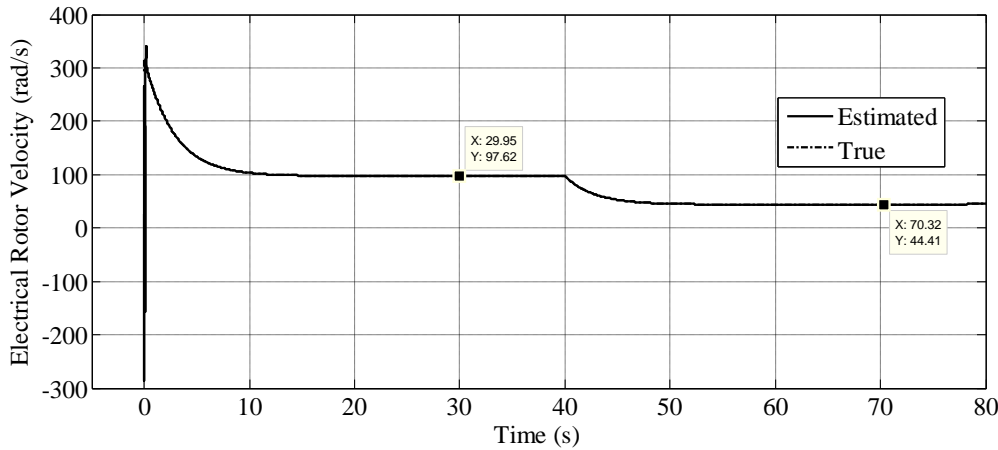
نتائج المحاكاة

سنعالج في فقرة المحاكاة ثلاث فقرات أساسية وهي بهدف إثبات صحة أداء المراقب من أجل القياس. ثم استخدام المراقب في التحكم بسرعة الدوران مع قالبية جهد حسب الشكل (1) وأخيراً مسألة استقرار النظام مع مراقب.

التحقق من أداء المراقب بغرض القياس

يبين الشكل (10) تغير السرعة الزاوية في الدائر (التردد الزاوي) وهناك تطابق جيد بين الحالتين: مراقبة

وحقيقية.



الشكل (10) مراقبة التردد الزاوي في الدائر

تبين من النتيجة السابقة بالإضافة إلى نتائج أخرى لم نقم بعرضها بسبب التشابه أن استخدام المراقب للقياس يعطي نتائج جيدة حيث تطابق القيم المراقبة القيم الحقيقية بشكل شبه مثالي. أما استخدام المراقب من أجل التحكم فهذا أمر يحتاج إلى تأني وحساب جيد لبارامترات المتحكمات لحلقة التحكم والمراقب. حيث أن وجود المراقب في الحلقة المغلقة للتحكم يضيف أقطاباً وأصفاراً جديدة لم تكن بالأساس موجودة عند تصميم المتحكمات للتحكم بسرعة الآلة. أي

أن المراقب يغير شكل تابع نقل النظام ويزيد من اللاخطية في النظام الأساسي. يزداد الأمر تعقيداً عندما تدخل القالبية في الحلقة المغلقة مع المراقب لأجل التحكم بسرعة الدوران. إن وجود المراقب مع القالبية في الحلقة المغلقة لا يسمح بتوقع سلوك النظام بحلقة مغلقة. أي أن استقرار الحلقة المغلقة يكون مهدداً عند أي اضطراب مجهول داخلي أو خارجي وهذا ما سنلاحظه في فقرة لاحقة.

التحكم بسرعة العنفة الريحية عن طريق قالبية جهد وبمساعدة مراقب

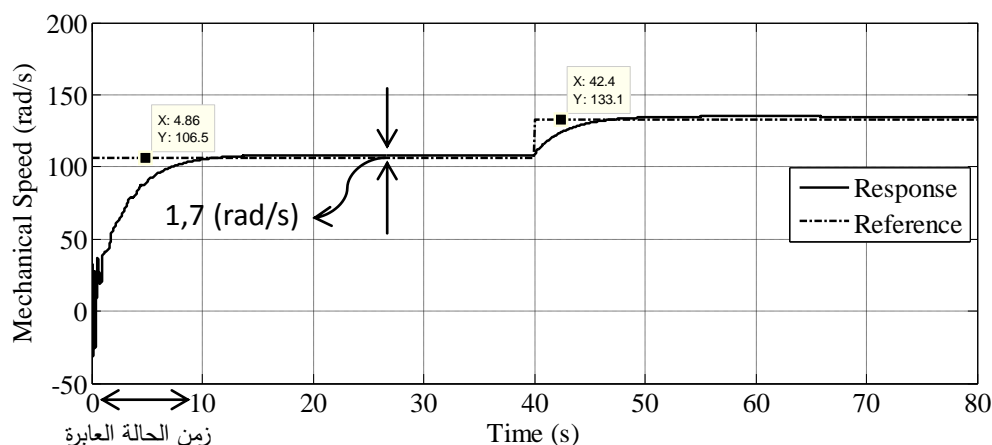
سنقوم هنا بمحاكاة التحكم بسرعة العنفة الريحية عن طريق قالبية جهد وبمساعدة مراقب للمقادير الميكانيكية كما في الشكل (1). في هذه الحالة يعمل المراقب على إنتاج السرعة الميكانيكية والعزم الديناميكي اللازمين للتغذية العكسية للحلقة المغلقة. إلا أننا سنقارن أيضاً مع حالة استخدام المراقب باعتبار القالبية تعطي جهداً جيئياً مثالياً بهدف تبيان مدى تأثير القالبية على السلوك الديناميكي للنظام.

تغير سرعة الرياح

في هذه الفقرة سنقوم بمحاكاة تغير سرعة الرياح من 8 إلى 10 (m/s) بشكل قفزة في اللحظة (s) 40 وهو تغير اختبائي لمعاينة أداء المتحكمات في التغيرات الأكثر حدة لسرعة الرياح.

تغير السرعة الميكانيكية

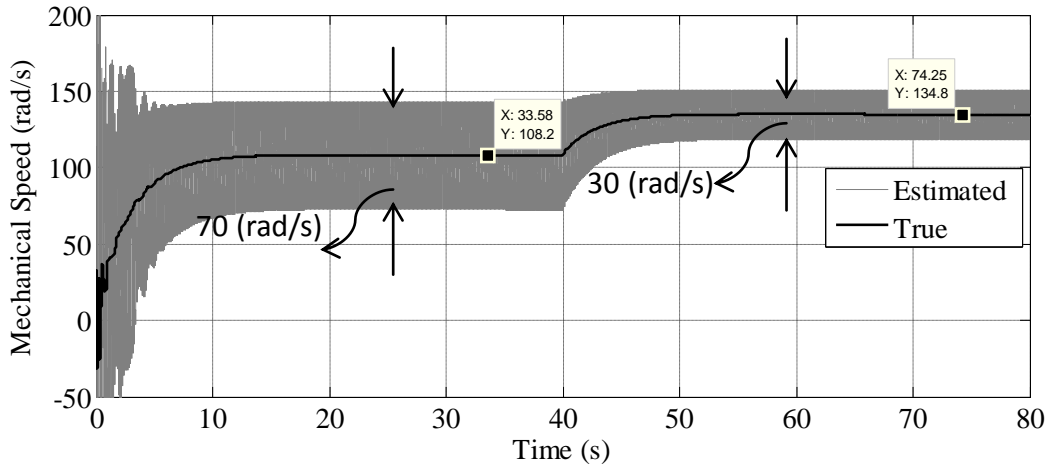
نقارن خرج النظام وهو السرعة الميكانيكية مع السرعة المرجعية التي تؤمن أعلى استطاعة كهربائية من أجل سرعة الرياح المعتبرة. يبين الشكل (11) إن السرعة الميكانيكية تلاحق بشكل جيد السرعة المرجعية ولكن بخطأ حالة مستقرة صغير وقدره 1.7 (rad/s) سببه إجراءات التقريب عند حساب المتحكمات حيث يهمل إشارات تعتبر اضطراباً على شكل ربح. أما بالنسبة للحالة العابرة فهي تمتد حتى (s) 10 وهذا مقبول نظراً لعطالة العنفة.



الشكل (11) تغير السرعة الميكانيكية على خرج المولد

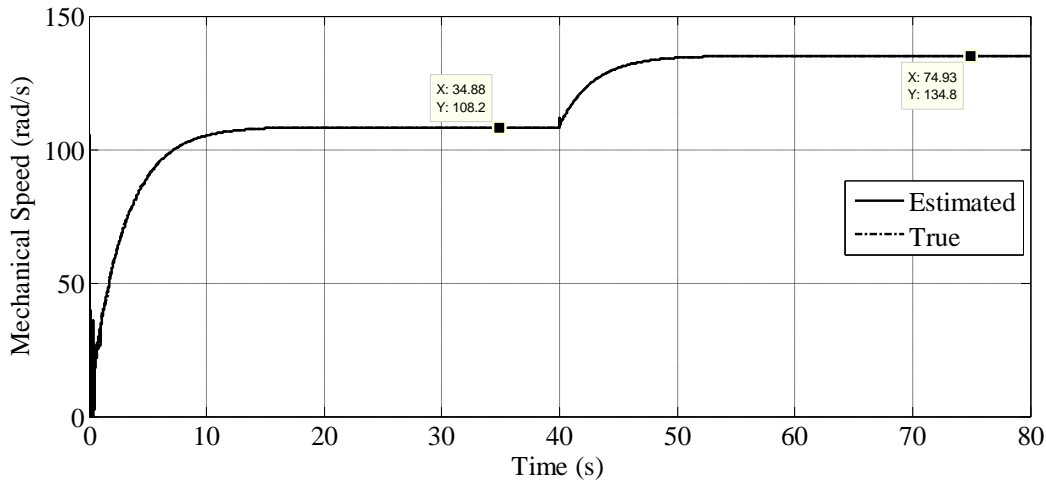
تغير السرعة المراقبة

نلاحظ من الشكل (12) أن السرعة المراقبة تهتز حول السرعة الحقيقية في مجال يتسع (70 rad/s) في السرعة المنخفضة ويضيق في السرعة العالية حتى (30 rad/s). تستخدم السرعة المراقبة من أجل التغذية العكسية بينما تمثل السرعة الحقيقية خرج المولد.



الشكل (12) تغير السرعة المراقبة والحقيقية مع قالبة

لمعرفة سبب هذا الاهتزاز قمنا بإجراء المحاكاة باعتبار القالبة تعطي خرجاً جيبيّاً مثاليّاً (حالة نظرية). نلاحظ من الشكل (13) تطابق بين السرعة المراقبة والسرعة الحقيقية.

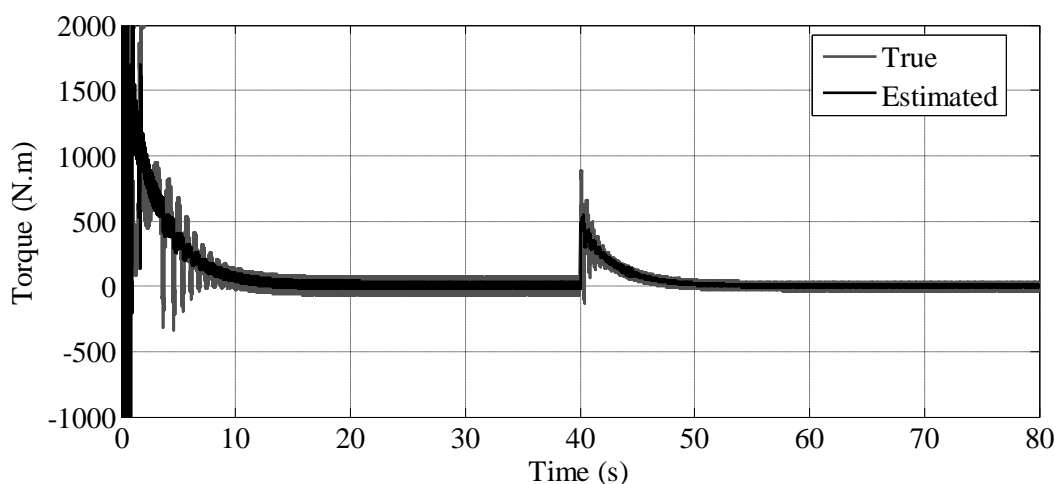


الشكل (13) تغير السرعة الميكانيكية المراقبة والحقيقية مع قالبة مثالية

بالنتيجة إن وجود القالبة في حلقة التحكم يسبب تغييراً في أداء المراقب على شكل تذبذب غير مرغوب به. إن هذا الأمر طبيعي بما أن خرج القالبة هو جهد متناوب على شكل سلسلة نبضات وأن تيار الحمل للدائر والثابت يحويان توافقيات كثيرة وأن تيار الدائر يشكل دخلاً للمراقب بالإضافة لجهد الثابت.

تغير العزم الديناميكي

يوضح الشكل (14) تغير العزم الديناميكي الحقيقي والمراقب ويلاحظ قريهما من بعض ولكن مع حالة عابرة أكبر بالمطال للعزم الحقيقي. كلا العزمين يتذبذبان بسبب وجود القالبة ولكن بمطال صغير نسبياً.

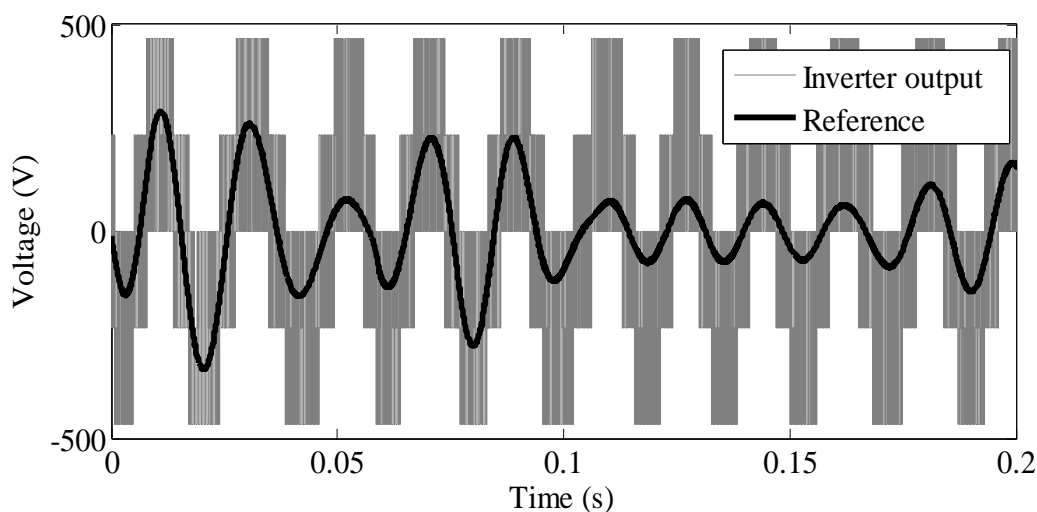


الشكل (14) تغير العزم الديناميكي

جهد الدائر

يوضح الشكل (15) جهد الدائر المرجعي بالأسود وجهد خرج القالب المطبق على ملفات الدائر باللون الرمادي وذلك بتكبير قطاع زمني معين بعد الوصول للحالة المستقرة. إن القيمة الأعظمية لجهد الطور على خرج

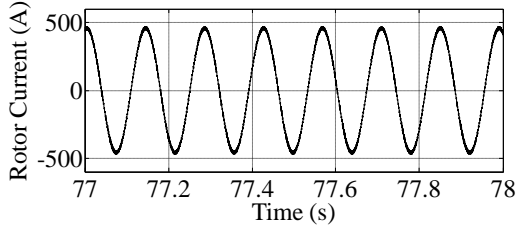
$$\frac{2}{3} \times V_{CD} \text{ أي } \frac{2}{3} \times 700 = 466.6(V)$$



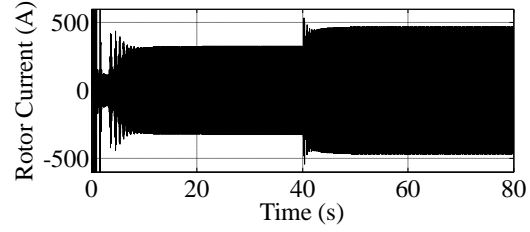
الشكل (15) تغير الجهد المطبق على ملفات الدائر

تيار الدائر

يبين الشكل (16) تغير تيار الدائر عند تغير السرعة حيث يزداد التيار بسبب زيادة سرعة العنفة. يتغير التيار بشكل جيبي ملوث بالتوافقيات كما في الشكل (17). يلاحظ زيادة الحالة العابرة في البداية بسبب المراقب بالإضافة لديناميك النظام وحلقات التحكم. في الحقيقة الموضوع مختلط والتفاعل المشترك بين القالب والمراقب وديناميك النظام وحلقات التحكم تجعل من الصعب الجزم بسبب هذه الحالات العابرة.



الشكل (17) تكبير عن الشكل (16)



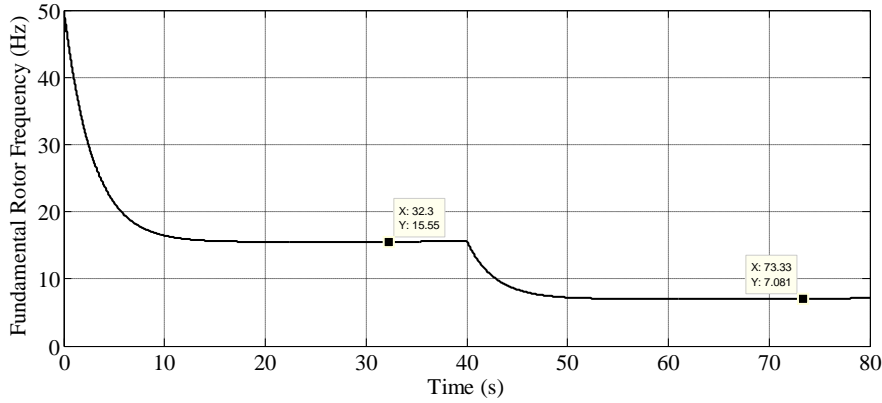
الشكل (16) تيار الدائر

التحليل التوافقي لتيار الدائر

إن التيار في الدائر ملوث بالتوافقيات بسبب القالبية ولتحليل هذه التوافقيات نحتاج لتردد المركبة الأساسية الموضح في الشكل(18).

تردد المركبة الأساسية لتيار الدائر

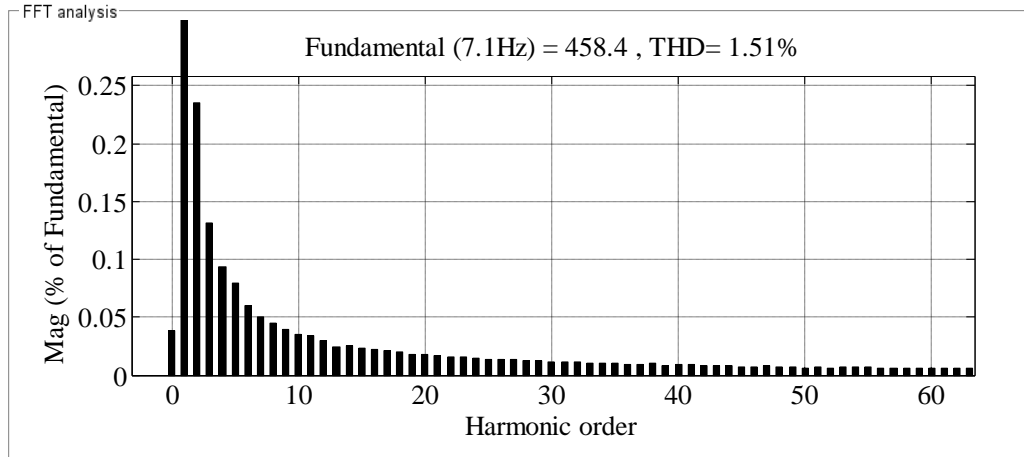
ينخفض تردد التوافقية الأساسية للدائر عند زيادة السرعة وهذا يوافق نظرية المولد التحريضي، حيث عند السكون يكون تردد الدائر مساوياً لتردد الثابت (50 Hz) بعدها ينخفض عند السرعة الأدنى إلى (15.55Hz) وعند السرعة الأعلى ينخفض إلى (7.08 Hz).



الشكل (18) تردد المركبة الأساسية لتيار الدائر

التحليل التوافقي

قمنا بتحليل التوافقيات لتيار الدائر كما هو موضح في الشكل (19).

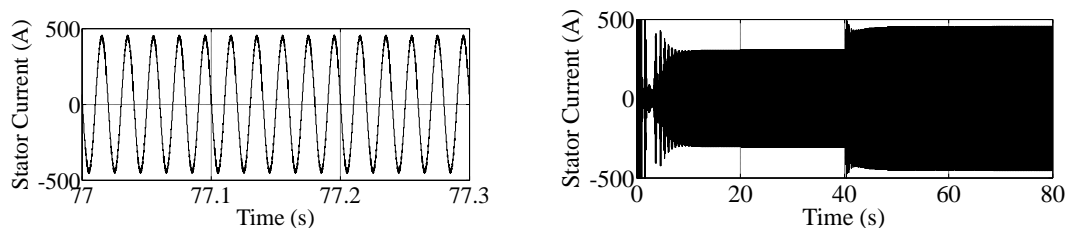


الشكل (19) التحليل التوافقي لتيار الدائر

نلاحظ أن التوافقيات متعددة ولكن بمطالات صغيرة جداً بالنسبة للتوافقية الأساسية وعامل التشوه التوافقي الكلي $THD = 1.51\%$ صغير وجيد نسبياً. أي أن شكل موجة تيار الدائر قريبة جداً للموجة الجيبية المثالية.

تيار الثابت

يبين الشكل (20) تغير تيار الثابت بالمطال عند تغير السرعة وله تردد ثابت (50 Hz).

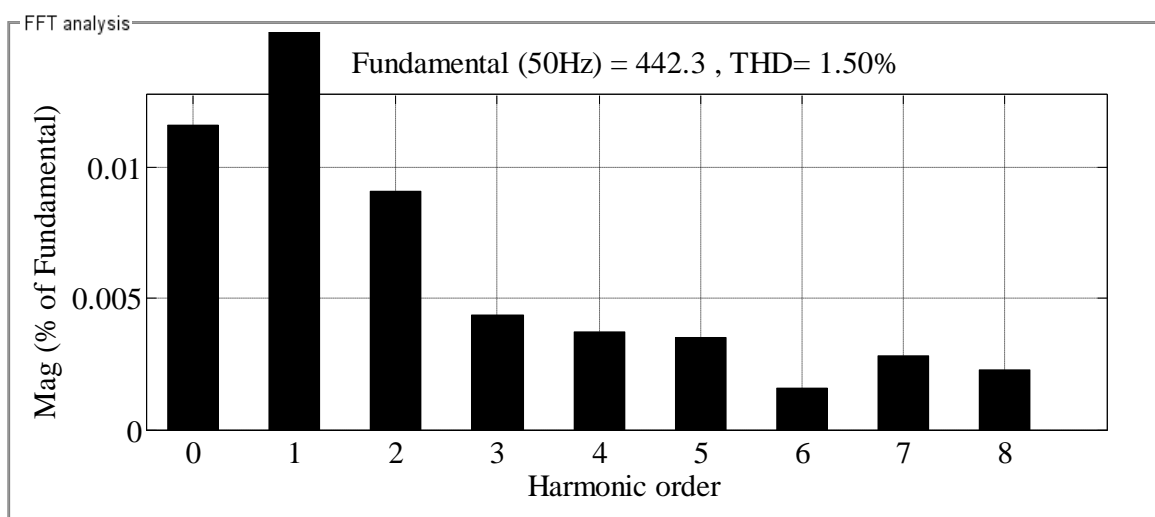


الشكل (21) تكبير عن الشكل (20)

الشكل (20) تيار الثابت

التحليل التوافقي لتيار الثابت

يبين الشكل (22) التحليل التوافقي لتيار الثابت في الحالة المستقرة.



الشكل (22) التحليل التوافقي لتيار الثابت

نلاحظ أن التوافقيات متعددة ولكن بمطالات صغيرة جداً بالنسبة للتوافقية الأساسية وعامل التشوه التوافقي الكلي $THD = 1.50\%$ صغير وجيد نسبياً وقريب من مثيله في الدائر.

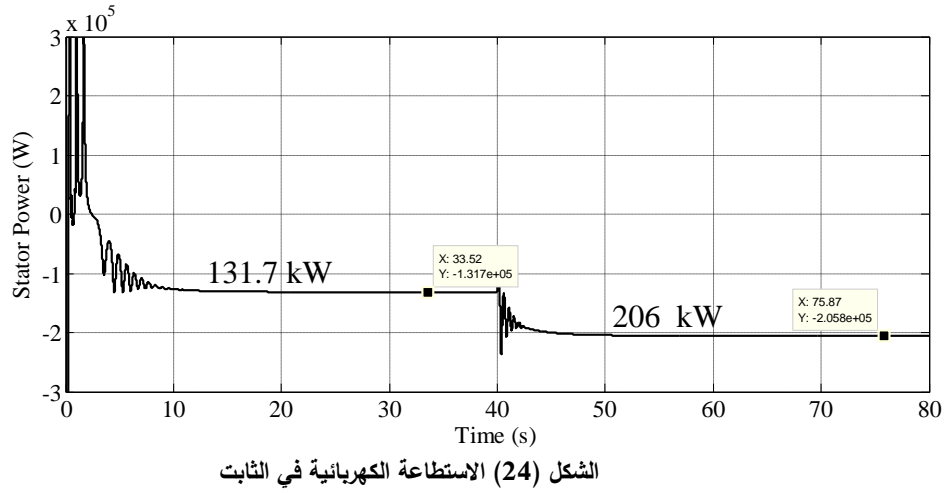
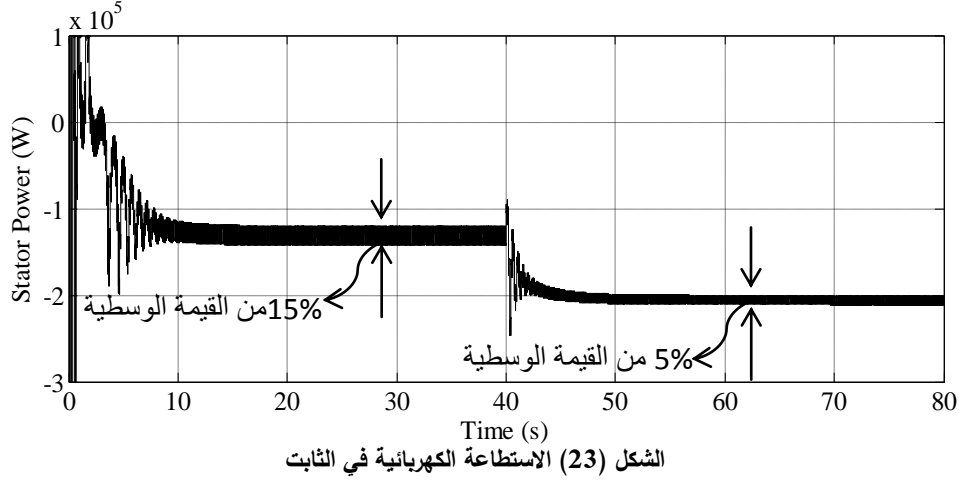
بما أن مطالات توافقيات التيار صغيرة جداً بالنسبة للتوافقية الأساسية يمكن حساب الاستطاعة بشكل تقريبي من المركبة الأساسية للجهد والتيار، وهذا ما سنقوم به وخاصة عند حساب استطاعة الدائر.

الاستطاعة الكهربائية في الثابت

يبين الشكل (23) تغير الاستطاعة الفعلية في الثابت للآلة التحريضية وهي تزداد بزيادة سرعة الريح وسالبة اصطلاحاً لأنها مولدة. تتذبذب الاستطاعة الكهربائية حول قيمة وسطية وقدرها $\langle P_s \rangle = 131700$ (W) عند السرعة المنخفضة وذلك بسبب القالبه ويعرض مجال قدره 15% من القيمة الوسطية وتنخفض هذه النسبة في السرعة العالية إلى 5%.

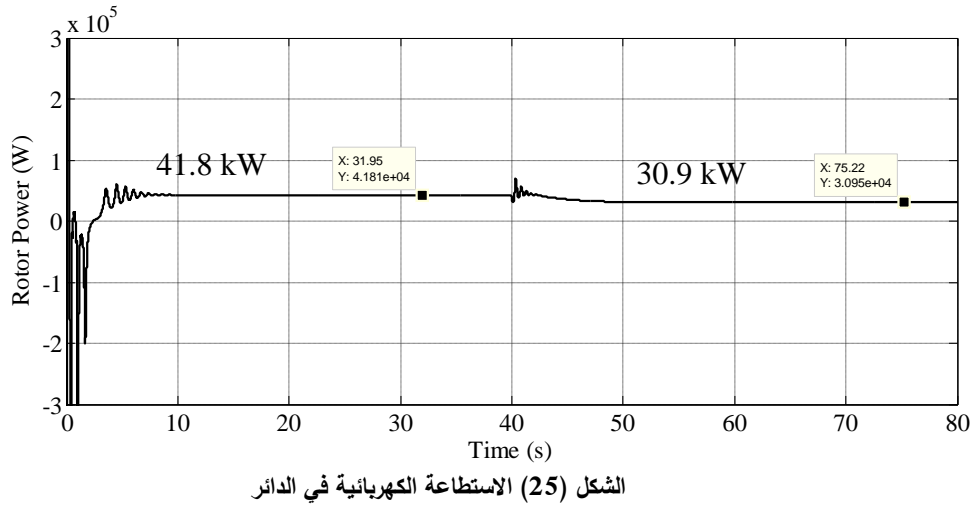
باعتبار القالبه ذات خرج جيبى مثالي تكون الاستطاعة في دارة الثابت كما هو موضح في الشكل (24)

وهي نفس الاستطاعة التي تتذبذب حولها في الشكل (23).



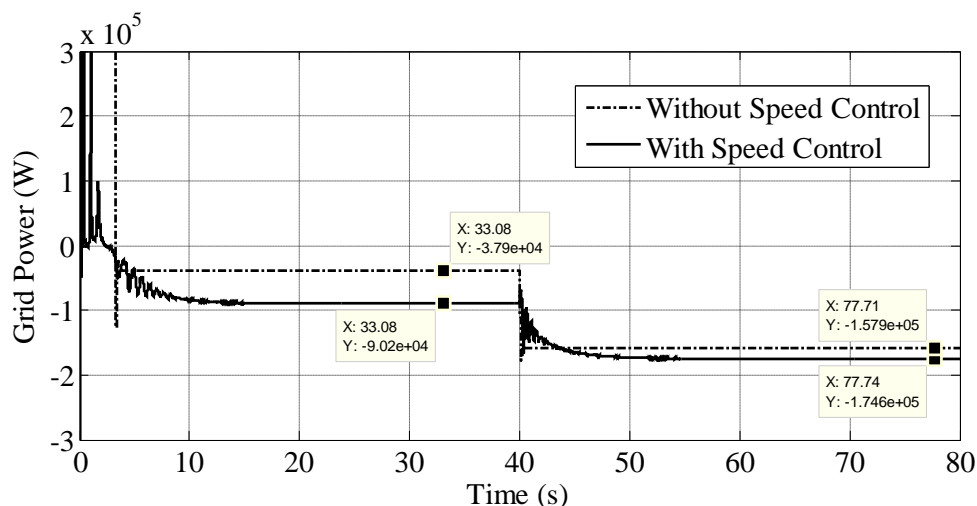
الاستطاعة الكهربائية في الدائر

تم حساب الاستطاعة الكهربائية في الدائر من المركبات الأساسية للجهد والتيار وذلك بشكل تقريبي، يبين الشكل (25) أن هذه الاستطاعة موجبة أي أنها مسحوبة من الشبكة وتعادل تقريباً 32% من الاستطاعة المارة في الثابت وتقل هذه النسبة بزيادة السرعة بسبب انخفاض قيمة الاستطاعة المارة في الدائر وهذا يوافق مبدأ العمل تحت السرعة التزامنية للآلة التحريضية مضاعفة التغذية.



الاستطاعة المرسله إلى الشبكة

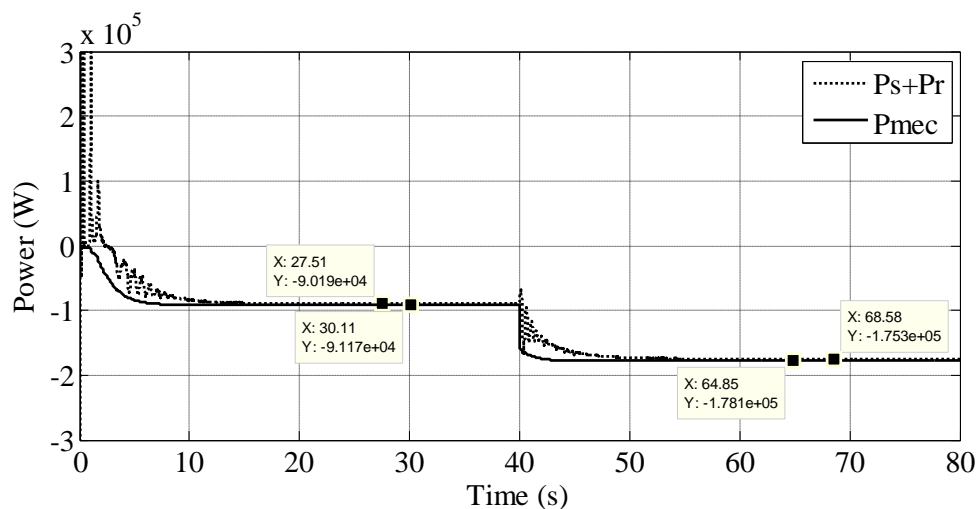
من خلال المقارنة في الشكل (26) والذي يبين الاستطاعة المرسله إلى الشبكة من DFIG العاملة على سرعة متغيرة والاستطاعة المرسله من نفس العنفة إذا كانت تعمل على سرعة ثابتة. هدف المقارنة إظهار أهمية العمل على سرعة متغيرة حيث يلاحظ ربح في الاستطاعة مقداره (W) 52300 عند السرعة المنخفضة و (W) 16700 عند السرعة العالية.



الشكل (26) الاستطاعة المرسله إلى الشبكة

ميزان الاستطاعة

للتأكد من ميزان الاستطاعة قمنا بإجراء مقارنة في الشكل (27) بين الاستطاعة المرسله إلى الشبكة وهي محصلة الاستطاعة في الثابت والدائر والاستطاعة الميكانيكية المستخلصة من الريح. تبين المقارنة أن ميزان الاستطاعة محقق أي أن الاستطاعة المرسله إلى الشبكة تساوي الاستطاعة الميكانيكية مطروحاً منها الضياعات النحاسية في ملفات الثابت والدائر وقدرها (W) 980 للسرعة المنخفضة و (W) 2800 للسرعة العالية. أما الضياعات الميكانيكية فهي مهملة عند تصميم النموذج الرياضي وذلك من أجل التبسيط مما جعل المردود يصل إلى أكثر من % 95.

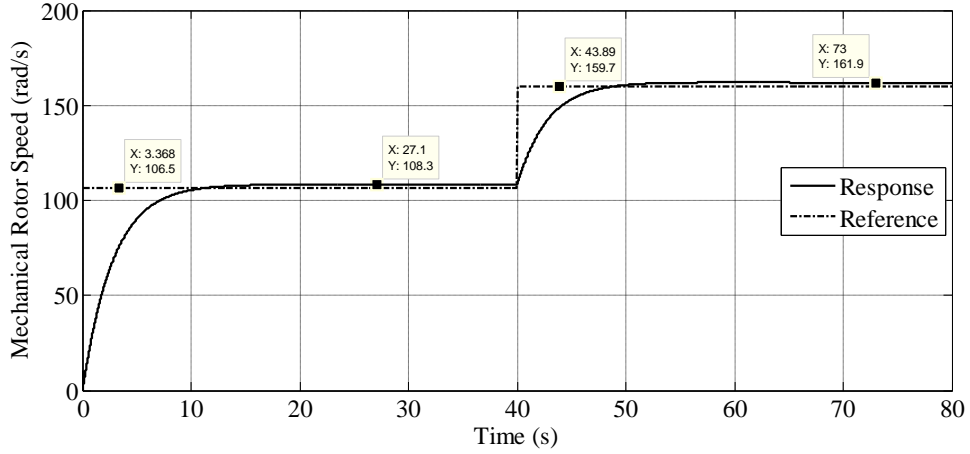


الشكل (27) ميزان الاستطاعة

3-2-2- مشكلة الاستقرار

إن وجود المراقب في الحلقة المغلقة قد يسبب عدم استقرار النظام خاصة عند التغير الشديد في سرعة الرياح. يلاحظ في الشكل (28) تغير السرعة الميكانيكية للعنفة الريحية عند تغير سرعة الرياح من 8 إلى 12 (m/s). يبدو أداء جيد ومستقر لجملة التحكم مع قابلية وبدون مراقب ميكانيكي (بفرض المقادير الميكانيكية مقاسة).

السرعة بدون مراقب

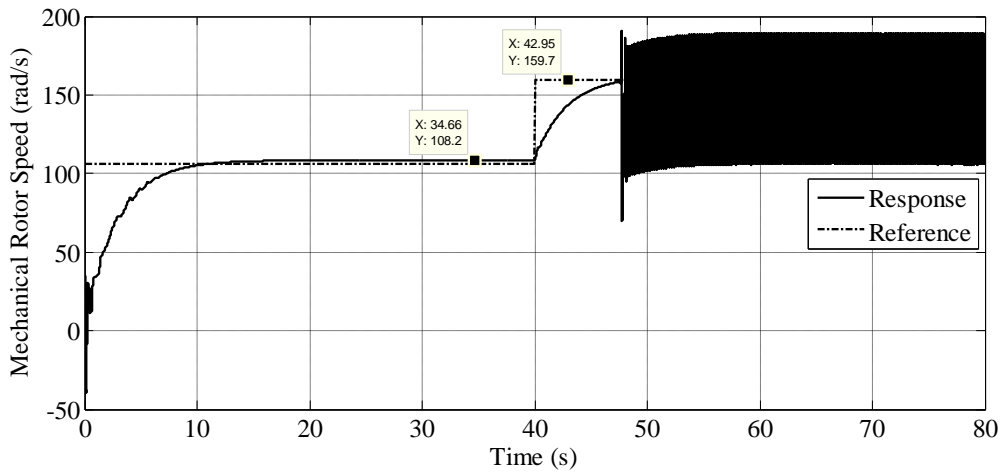


الشكل (28) تغير السرعة مع قابلية بدون مراقب

إلا أن الأمر مختلف عند وجود مراقب في الشكل (29) حيث خرج النظام عن استقراره وأصبحت السرعة مهتزة عند لحظة زمنية معينة وهذا غير مقبول. يمكن تفسير التأرجح في السرعة لحظة الوصول للقيمة المرجعية العليا إلى زيادة في ربح الحلقة المفتوحة مما أدى إلى وصول النظام إلى حافة الاستقرار.

السرعة مع مراقب

يوضح الشكل (29) عدم استقرار السرعة عند وصول الخرج للقيمة المرجعية الأعلى.



الشكل (29) تغير السرعة مع قابلية مع مراقب

الاستنتاجات والتوصيات

- انطلاقاً من الدراسة السابقة بمساعدة النمذجة والمحاكاة يمكن أن نعرض الاستنتاجات التالية:
- 1- تمت مراقبة المقادير الميكانيكية والكهربائية للقياس بشكل ممتاز بفضل المراقب المقترح.
 - 2- يعتبر هذا البحث مساهمة جديدة بإضافة مراقب العزم ومراقب مقادير الدائر الكهربائية.
 - 3- حصلنا عند استخدام المراقب على نتائج جيدة في التغير الطفيف لسرعات الرياح. أما في التغيرات الفجائية ذات المطال الكبير نسبياً في سرعة الرياح فتظهر مشاكل في استقرار النظام.
 - 4- لوحظ أنه بوجود قالبية الجهد تتذبذب المقادير الميكانيكية المراقبة حيث أن السرعة المراقبة تهتز حول السرعة الحقيقية في مجال يتسع $70(\text{rad/s})$ في السرعة المنخفضة ويضيق في السرعة العالية حتى $30(\text{rad/s})$ ، إلا أن ذلك لم يؤثر على خرج النظام حيث عملت حلقات التحكم على التخلص من أثر تذبذب السرعة المراقبة.
 - 5- وجدنا أن السرعة الميكانيكية تلاحق بشكل جيد قيمتها المرجعية ولكن بخطأ حالة مستقرة صغير وقدره $1.7(\text{rad/s})$ ، أما بالنسبة للحالة العابرة فهي تمتد حتى $10(\text{s})$ وهذا مقبول نظراً لعطالة العنفة.
 - 6- بينت النتائج أهمية العمل على سرعة متغيرة، حيث لوحظ ربح في الاستطاعة مقداره $(W) 52300$ عند السرعة المنخفضة و $(W) 16700$ عند السرعة العالية.
 - 7- في النهاية تم الوصول إلى هدف البحث وهو ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية عن طريق التحكم بالسرعة باستخدام المراقب المقترح.

يمكن أن نوصي بما يلي:

- 1- دراسة إمكانية تحسين أداء جملة التحكم بوجود القالبية والمراقب عن طريق تغيير استراتيجية التحكم أو نوع المراقب والمقارنة مع أنواع أخرى لاختيار الأفضل منها من ناحية السلوك الديناميكي والاستقرار.
- 2- دراسة تأثير إضافة التحكم بزواوية ميل الشفرات على أداء النظام المدروس واستقراره.
- 3- دراسة إمكانية التطبيق العملي مخبرياً لإدارة التحكم مع المراقب المقترح للآلة التحريضية مضاعفة التغذية.
- 4- دراسة إمكانية تخفيف أثر الحالة العابرة عند الربط مع الشبكة العامة وخاصة في مرحلة الإقلاع.

المراجع

- [1].GOGAS K. *Design of a robust speed and position sensorless decoupled P-Q controlled Doubly-Fed Induction Generator for variable-speed wind energy applications*. Department of Electrical and Computer Engineering McGill University Montreal, Quebec, Canada 2007, 28-39.
- [2].CARDENAS R., PENA R.,PROBOSTE J., ASHER G., CLARE J. *MRAS Observer for Sensorless Control of Standalone Doubly Fed Induction Generators*. IEEE Transactions on energy conversion, VOL. 20, NO. 4, 2005,710-717.
- [3]. YANG Sh. *Novel sensorless generator control and grid fault ride-through strategies for variable-speed wind turbines and implementation on a new real-time simulation platform*. Graduate Theses and Dissertations, Digital Repository, Iowa State University, 2010, 35-44.
- [4].SERHOUD H., BENATTOUS D. *Sensorless Sliding Power Control of Doubly Fed Induction Wind Generator Based on MRAS Observer*. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011, 920-925.

[5]. ESMAEELI M.R., KIANINEZHAD R., RAZZAZ M. *Field Oriented Control of DFIG Basedon MRAS Observer*. Department of Electrical Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran 2012,93-98.

[6]. BENBOUZID M., BELTRAN B., AMIRAT Y., BRETON S. *Sensorless Control of Doubly-Fed Induction Generator-Based Wind Turbines using a High-Order Sliding Mode Observer*. International Review of Electrical Engineering, 2014, 9 (1), 514-525.

[7]. ABDELRAHEM M., HACKL Ch., KENNEL R. *Sensorless Control of Doubly-Fed Induction Generators in Variable-Speed Wind Turbine Systems* , Technische University München (TUM), Munich (Germany) , IEEE, 2015, 406-413.