

تحسين جودة الاستطاعة الكهربائية للعنفة الريحية باستخدام نظام التخزين بالقرص الدوار

الدكتورة نسمة أبو طبق*

الدكتورة إيمان ديلانة**

رنا سعيد***

(تاريخ الإيداع 20 / 4 / 2015. قُبِلَ للنشر في 12 / 8 / 2015)

□ ملخص □

يعالج هذا البحث مسألة تخزين الطاقة الكهربائية ميكانيكياً بالقرص الدوار في نظام توليد ريحي كهربائي. يتم التحكم بسرعة دوران المولدة الريحية و الآلة التحري ضية ذات القرص الدوار بطريقة كهربائية باستخدام المتحكمات التقليدية PID (تناسبية - تكاملية - تفاضلية) المختارة بالاعتماد على نموذج النظام و محدداته. يعتمد التحكم بسرعة دوران الآلة التحريضية على مبدأ توجيه الفيض المغناطيسي أو ما يسمى التحكم الشعاعي بتوجيه الفيض. يتم توليد القيم المرجعية لسرعة دوران العنفة الريحية بهدف ملاحقة النقطة الأعظمية للاستطاعة. أما السرعة المرجعية للقرص الدوار فيتم توليدها بالاعتماد بشكل أساسي على مرشح من الدرجة الثانية للاستطاعة حيث يعتبر ذلك مساهمة جديدة في هذا المجال. لم يتم نمذجة المبدلات الترددية بل اكتفينا باستراتيجية التحكم. نتائج النمذجة و المحاكاة في برنامج ج Matlab/Simulink مرضية من جهة تعميم الاستطاعة المسلمة للشبكة و تعكس أهمية هذا البحث.

الكلمات المفتاحية: العنفات الريحية، تخزين بالقرص الدوار، تحكم شعاعي.

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

** مدرسة - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

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

Power Quality improvement of wind turbine using flywheel storage system

Dr. Nesmat Abo Tabak*
Dr. Imane Dilaneh**
Rana Saeed***

(Received 20 / 4 / 2015. Accepted 12 / 8 / 2015)

□ ABSTRACT □

This paper treats the issue of wind energy storage, mechanically, using the flywheel device. We control the speed of the wind turbine and the flywheel by means of traditional PID controllers. These controllers are designed depending on the system model and its parameters. Speed control is achieved by electromagnetic rotor flux orientation as called vector control. Speed reference value of the wind turbine will be generated in order to track the maximum power point. The flywheel reference speed is generated based on a second order filter of power which is considered as a new contribution in this field of research. Frequency converters are not modeled but we only consider the control strategy. The results of modeling and simulation in Matlab satisfy the power smoothing issue and reflect the importance of this study.

Key words: Wind turbines, flywheel storage device, vector control.

*Assistant Professor, Department of Electrical Power Engineering, faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**Assistant Professor, Department of Mechanical Power Engineering, faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

***Postgraduate Student, Department of Mechanical Power Engineering, faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

بسبب فقدان القدرة على التحكم بالرياح تظهر عدة مشاكل للأنظمة الكهربائية عند وصل العنفات الريحية (Wind Turbines) مع الشبكات الكهربائية. من بين هذه المشاكل تلك الناتجة بسبب تقلبات سرعة الرياح القصيرة الأمد كالمشاكل التي تظهر في جودة الاستطاعة (Power Quality) وفي ديناميكية النظام (System Dynamic). للتخلص من هذه المشاكل في أنظمة القدرة الكهربائية فإنه من الضروري استخدام نظام تخزين مع العنفات الريحية لا سيما في المناطق المعزولة (Isolated Areas) حيث يتم إنتاج الطاقة الكهربائية فيها عبر نظام (عنفة ريحية - ديزل).

أهمية البحث و أهدافه:

يهدف هذا البحث إلى نمذجة و محاكاة استخدام القرص الدوار (Flywheel) من أجل تخزين طاقة الرياح و التحكم بالاستطاعة الناتجة عن المولد المربوط معه. تأتي أهمية هذا البحث في أنه يمثل مساهمة جديدة من ناحية استخدام طريقة لم ترد في المراجع من أجل تحديد الاستطاعة المرجعية (Reference Power) المطلوبة من المجموعة (عنفة ريحية - آلة ذات القرص الدوار). تكمن أهمية استخدام القرص الدوار في تخزين طاقة الرياح في كتلة دوارة عند سرعات الرياح العالية من خلال تسارعها ومن ثم إعادة القدرة المخزنة عند انخفاض سرعة الرياح. إن الأقراص الدوارة مثالية لتخزين القدرة وذلك بسبب كفاءتها العالية و ارتفاع كثافة الطاقة المخزنة بها. بما أن القدرة المخزنة تتناسب مع مربع سرعة القرص الدوار فإنه من الممكن قياس حالة الشحن بسهولة من خلال مقياس سرعة بسيط. تتميز هذه الأقراص الدوارة بسرعة دورانها وزمن إعادة الشحن القصير لها الذي هو عبارة عن عدة دقائق مما يقلل من استهلاك الوقود في حال استخدامها مع بدائل (مجموعات ديزل). كما أنها تتمتع بمجال درجة حرارة واسع عند العمل. إن زمن الاستجابة السريع الذي تتميز به يجعلها مناسبة لموازنة تردد الشبكة وبالتالي تعميم التغيرات في الاستطاعة و الحمولة. تعتبر الأقراص الدوارة تكنولوجيا قابلة للتطوير و تشكل مواد صديقة للبيئة وذات تأثير بيئي منخفض. كما أن دورة حياتها الطويلة - (التي قد تصل إلى حوالي 20 سنة) و أنها لا تتطلب صيانة دورية - تميزها عن المدخرات المعرّضة لحالة الشحن أو التفريغ الزائدين بالإضافة إلى خطورة المواد الكيميائية داخلها لذلك يجب احتواؤها لتجنب التسرب. تطلق المدخرات الهيدروجين والأكسجين عند شحنها لذلك يجب وضعها في الهواء الطلق ويجب تنظيف أطرافها ووصلاتها دورياً لتجنب الفاقد في الطاقة، و يجب أيضاً أن يضاف الماء المقطر إليها بشكل روتيني. كما أن مجال درجة الحرارة الذي تعمل عنده محدود فأدائها يفسد بشكل حاد عند درجات الحرارة العالية أو المنخفضة. إن هذه المدخرات غير قابلة للصيانة وكفاءتها تنخفض مع التقدم بالعمر وليس من السهل قياس درجة شحنها أو التحكم به [1,2]. يبين الجدول (1) مقارنة بين طرق مختلفة لتخزين الطاقة الكهربائية [3]:

الجدول (1) مقارنة بين أهم طرق تخزين القدرة الكهربائية

Energy storage type	Round-trip efficiency [%]	Energy density [Wh/l]	Power density [kW/l]	Cycle life/calendar life	Depth of discharge [%]	Self-discharge [%]	Deployment time	Charging time	Operating temperature [°C]
Flywheel	80-95	20-200	up to 10	Many millions/15 years-20 years	75	2-5/h	10 ms	Minutes	-35 + +40
Supercapacitor	90-94	2-10	up to 15	Up to one million/15 years	75	Very slow	<10 ms	Seconds	-40 + +65
Lithium-ion battery	83-86	200-350	0,1-3,5	75-20 years (according to temperature)	100	5/monthly	3 ms-5 ms	Hours	-20 + +50
Lead-acid battery	75-80	50-100	0,01-0,5	500-2000 cycles/5-15 years (according to temperature)	70	0,1-0,4/daily	3 ms-5 ms	Many hours	0 + 40
CAES	60-70	3-6	n.a.	Unlimited/25 years	35-50	0,5-1/daily	3 min-10 min	Hours	-30 + 60
SMES	80-90	0,5-10	1-4	Unlimited/20 years	100	10-15/daily	1 ms-10 ms	Seconds-minutes	n.a.

يقارن الجدول (1) بين القرص الدوار، المكثفات الفائقة السعة، المدخرات بأنواعها، التخزين بالهواء المضغوط و التخزين بالملفات الفائقة الناقلية. تتم المقارنة في عدة مجالات منها المردود، كثافة الطاقة، العمر الفني و زمن الاستخدام.

طرائق البحث ومواده:

سنقوم في هذه الدراسة بنمذجة و محاكاة (Modeling and Simulating) نظام يتألف من عنفتين ريحيتين و آلة تحريضية ذات تخزين بالقرص الدوار في بيئة Matlab/Simulink. الهدف هو تبيان كيفية عمل هذا النظام و اختيار المتحكمات (Controllers) المناسبة و اختبار الأداء. سنقوم بمقارنة نتائج المحاكاة بدون تخزين طاقة الرياح من جهة مع النتائج بوجود التخزين بالقرص الدوار من جهة أخرى حتى نبين أهمية ما توصلنا إليه.

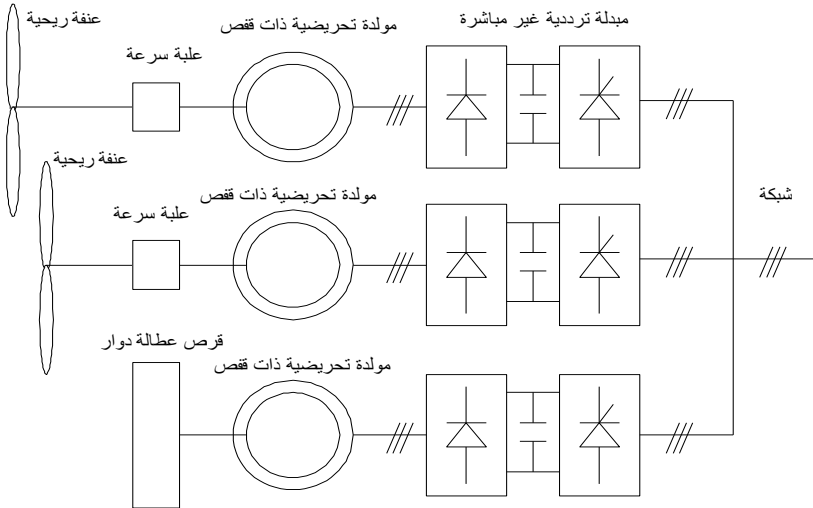
تخزين طاقة الرياح بالقرص الدوار:

يمكن استخدام تخزين طاقة الرياح بالقرص الدوار (Flywheel Energy Storage System, FESS) مع مختلف أنواع المولدات الريحية و التحكم بالنظام عنفة ريحية - قرص دوار بطرق عدة. ففي المرجع [4] استخدمت عنفة ريحية مبروطة مع مولد تحريضي مضاعف التغذية (Doubly Feed Induction Generator). يتم التحكم بالمولد من جانب الدوار من خلال المبدلات الالكترونية (Electronic Converters) التي تضمن العمل على سرعة متغيرة. تم توليد الاستطاعة المرجعية المطلوبة من المجموعة (عنفة ريحية - قرص دوار) باستخدام المنطق الضبابي (Fuzzy Logic). أما في المرجع [5] كان نظام التوليد مؤلف من مولد ديزل - عنفة ريحية ذات سرعة ثابتة مرتبطين مع نظام تخزين بالقرص الدوار ذو آلة تحريضية ذات قفص سنجابي وتم توليد الاستطاعة المرجعية المطلوبة أيضا بالاعتماد على المنطق الضبابي. في المرجع [6] حيث كان النظام مؤلف من مزرعة ريحية (Wind Farm) تعمل على سرعة ثابتة، مقترنة مع نظام التخزين بالقرص الدوار ومن مولد تزامني كمنبع طاقة أساسي مقاد بمحرك ديزل فقد تم توليد الاستطاعة المرجعية وفق خوارزمية تعتمد في الأساس على مدخل وهو إشارة الخطأ بين التردد المرجعي للجملة و التردد المقاس ويهدف في النهاية إلى تنظيم تردد الجملة المعزولة. تم في المرجع [6] الحصول على الاستطاعة المرجعية عن طريق مرشح من الدرجة الأولى أما في البحث الحالي فنستخدم مرشح من الدرجة الثانية. يمتاز المرشح من الدرجة الثانية عن الدرجة الأولى بتبعه لإشارة دخل تابع انحدار على عكس المرشح من الدرجة الأولى. ولذلك أهمية حيث أن تغيرات الرياح يمكن تمثيلها بتتابع انحدار. أما في المرجع [7] فقد ثبتت الاستطاعة المرجعية على قيمة ثابتة. في المرجع [8] تم توليد الاستطاعة المرجعية اعتمادا على الاستطاعة المطلوبة للتحكم بجهد الوصلة المستمر (DC Bus Voltage). في المرجع [9] تم توليد الاستطاعة المرجعية للقرص الدوار بالاعتماد على

خوارزمية حساب قابلة للبرمجة، مداخلها هي الاستطاعة المرجعية المطلوبة للشبكة و الاستطاعة الناتجة عن العنفة الريحية، أحد مخارج الخوارزمية هو الاستطاعة المرجعية للقرص الدوار. تبين نتائج الدراسة تحسين سلوك النظام و نوعية الطاقة المنتجة. في المرجع [10] يتألف النظام من عنفة ريحية مربوطة مع مولد تحريضي مضاعف التغذية و نظام تخزين بالقرص الدوار تم تحديد الاستطاعة المرجعية من خلال تحديد الاستطاعة الأيروديناميكية المرجعية و ذلك تبعاً لمردود الآلة التحريضية ثنائية التغذية.

مخطط توضيحي لنظام التخزين بالقرص الدوار:

يوضح الشكل (1)

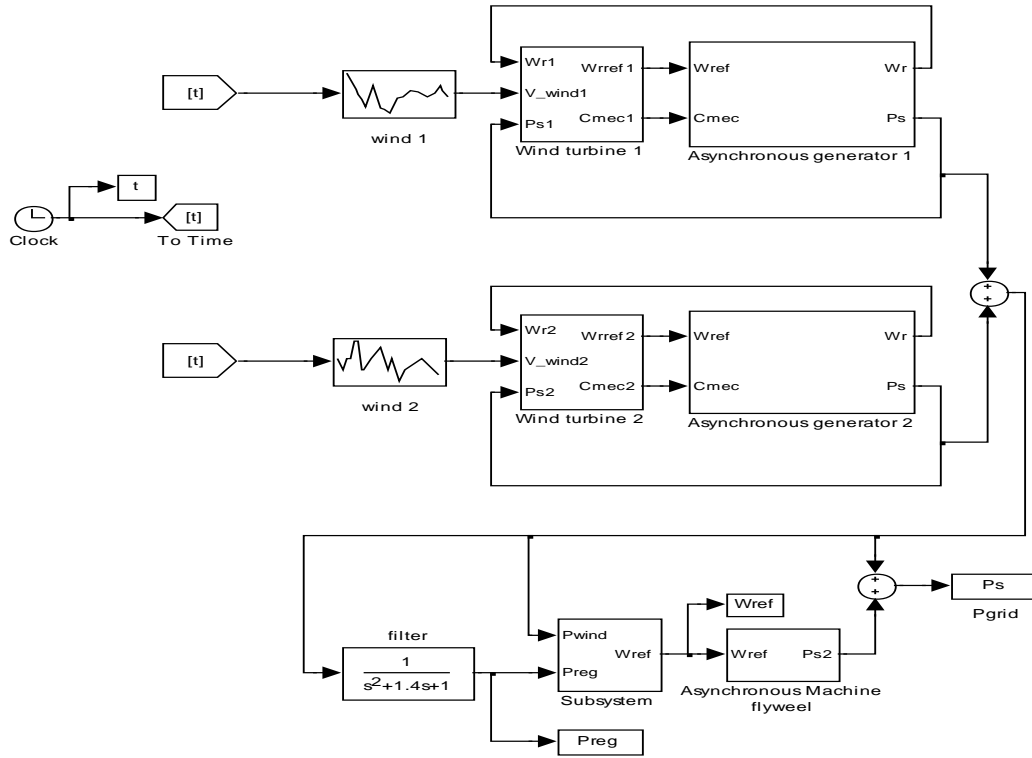


الشكل (1) النظام المدروس

عنفتين ريحيتين مربوطتين على التوازي مع مولدة تحريضية ذات قرص عطالة دوار. الآلات الثلاثة تحريضية ذات قصص سنجابي. تتم قيادة الآلات الثلاثة بمبدلات ترددية غير مباشرة في دارة الثابت وظيفتها التحكم بالسرعة بتغيير تردد و جهد الثابت.

تتصل الآلات الثلاثة كهربائياً عند جهة التيار المتناوب ذو التردد الثابت (الشبكة). لم نوضح في الشكل (1) دارات التحكم و القيادة للمبدلات الترددية لأننا نركز في دراستنا على استراتيجية التحكم بالاستطاعة و السرعة و ليس على التحكم بالمبدلات الترددية. يوجد لدينا تحكم بالسرعة لالتقاط الاستطاعة الأعظمية (Maximum Power Tracking) من الريح و تحكم بزوايا الموضع للشفرات (Pitch Control) لثبيت استطاعة خرج العنفات الريحية على القيمة الاسمية عند ازدياد سرعة الريح عن قيمتها الاسمية. أما بالنسبة لآلة ذات القرص فليديها نظام ملاحقة للسرعة المرجعية المعطاة لها من أجل تنعيم الاستطاعة المسلمة للشبكة.

نوضح في الشكل (2) مخطط المحاكاة باستخدام بيئة MATLAB/Simulink الذي يحاكي النظام المبين في الشكل (1). تتعرض كل عنفة ريحية لسرعة رياح متغيرة وهذا يحاكي توضع جغرافي مختلف لهما. يتضمن مخطط المحاكاة في الشكل (2) بالإضافة للنماذج مخططات التحكم بحلقة مغلقة للاستطاعة و السرعة و زاوية الموضع و طرق توليد القيم المرجعية. نعرض فيما يلي تفاصيل النماذج و مخططات التحكم بحلقة مغلقة.

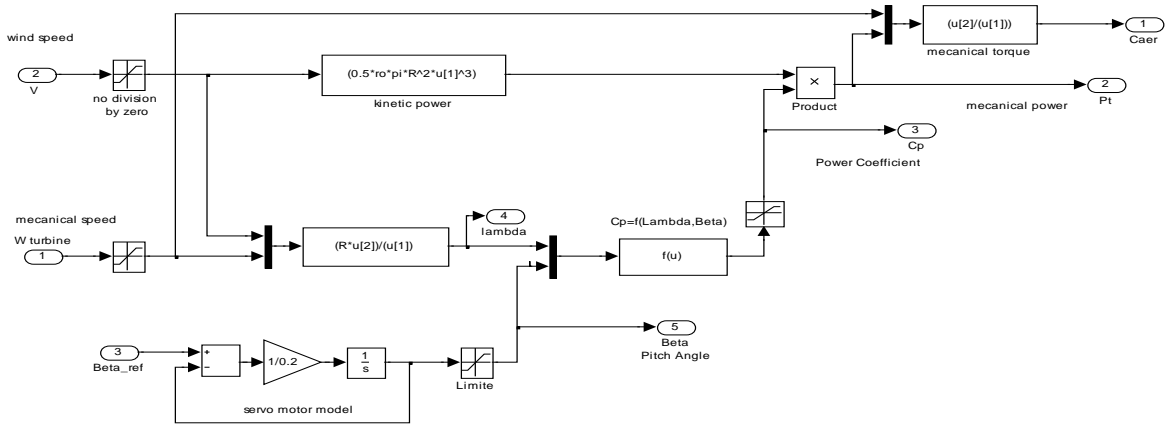


الشكل (2) مخطط المحاكاة للنظام المدروس

نموذج النفة الريحية:

يبين الشكل (3) نموذج النفة الريحية المستخدم في المحاكاة حيث أن مداخل نموذج النفة هي: سرعة الريح v ، السرعة الميكانيكية ω turbine، زاوية ميل الشفرات β_{ref} . تتألف مخارج نموذج النفة من: العزم الميكانيكي C_{aer} ، الاستطاعة الميكانيكية P_t ، معامل الاستطاعة C_p ، نسبة السرعة الطرفية λ .

يبين الشكل (3) المخطط الصندوقي المفصل لنموذج النفة الريحية:

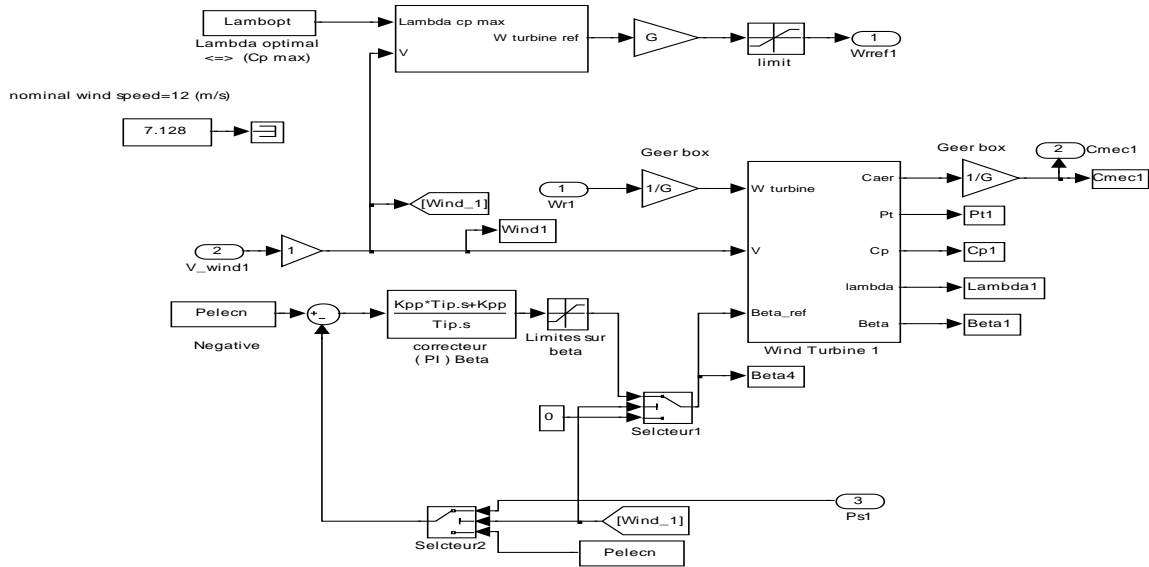


الشكل (3) نموذج النفة الريحية

علبة السرعة (gear box): تمثل بنسبة المسننات $\frac{1}{G} < 1$ فقط حيث يتم إهمال الاحتكاك و الالتواء أما

العطالة فتجمع مع العطالة الكلية للعنفة الريحية و المولد مأخوذ بعين الاعتبار نسبة المسننات.

فيكون نموذج العنفة الريحية و توليد القيم المرجعية للسرعة و زاوية الشفرات كما يلي:



الشكل (4) العنفة الريحية و توليد القيم المرجعية للسرعة و زاوية الشفرات و علبة السرعة

يتضمن النموذج المبين في الشكل (4) العلاقات اللازمة للحصول على العزم الميكانيكي من الاستطاعة

الميكانيكية على المحور التي تمثل بدورها جزءاً من الاستطاعة الحركية الملتقطة على مساحة الدائرة المرسومة بالشفرات الدوارة. تحدد قيمة معامل الاستطاعة C_p (Power Coefficient) مقدار الاستطاعة المفيدة المستجرة من الاستطاعة الكلية الملتقطة من الرياح على الشفرات. نسعى لجعل قيمة C_p أعظمية عن طريق التحكم بسرعة دوران جملة (العنفة- مولد) عندما تكون سرعة الرياح أقل من قيمتها الاسمية. أما عندما تتجاوز سرعة الرياح قيمتها الاسمية فتتحكم بزاوية ميل الشفرات β لتخفيض معامل الاستطاعة C_p و بالتالي الحد من استطاعة الخرج على قيمتها الاسمية و منعها من تجاوزها. نموذج المحرك الخطوي (Step Motor) هو عبارة عن تابع نقل من الدرجة الأولى

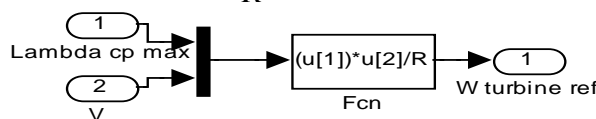
$$\frac{1}{0.2s + 1}$$

صندوق توليد السرعة المرجعية:

حسب الشكل (5) يتم توليد السرعة المرجعية w_{ref} من قياس سرعة الرياح v و معرفة نصف قطر العنفة R

و تثبيت $\lambda = \lambda_{max}$ بالاعتماد على العلاقة (1):

$$w_{ref} = \frac{\lambda_{max} v}{R} \quad (1)$$



الشكل (5) توليد السرعة المرجعية

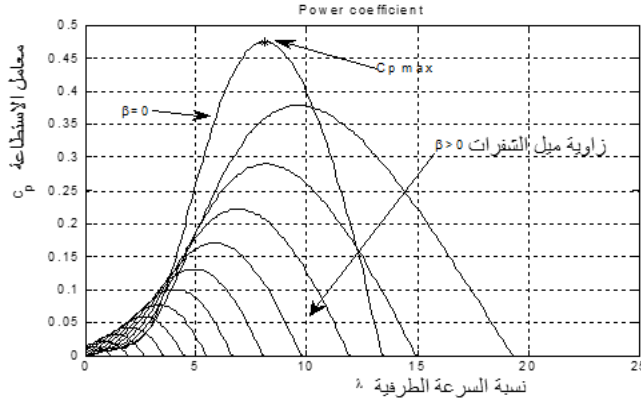
معامل الاستطاعة:

يوضح الشكل (6) منحنيات خواص معامل الاستطاعة C_p مع زاوية الشفرات β و نسبة السرعة λ حيث تتميز كل عنفة ريحية بخواص مميزة مختلفة و يمكن حساب $C_p(\lambda, \beta)$ من العلاقة التالية [11]:

$$C_p(\lambda, \beta) = C1 \cdot \left(\frac{C2}{\lambda_i} - C3 \cdot \beta - C4 \right) \cdot e^{-\frac{C5}{\lambda_i}} + C6 \cdot \lambda_i \quad (2)$$

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

سوف ترد قيم الثوابت في الملحق.



الشكل (6) منحنيات خواص معامل الاستطاعة و زاوية الشفرات و نسبة السرعة

نلاحظ أن القيمة الأعظمية للاستطاعة يمكن الحصول عليها عند C_{pmax} أي عند $\beta = 0$ الموافقين لـ $\lambda_{max} = \lambda_{optimal}$ كلما زادت β انخفضت قيمة C_p .

زاوية ميل الشفرات:

يتم التحكم بزاوية ميل الشفرات β بواسطة متحكم PI (تناسبي-تكاملي) بحلقة مغلقة بعد مقارنة استطاعة الخرج مع الاستطاعة الاسمية كما في الشكل (4). يهدف هذا التحكم إلى الحد من الاستطاعة المسحوبة من الرياح بالتالي تثبيت استطاعة الخرج الكهربائية على قيمتها الاسمية.

الآلة التحريضية و حلقات التحكم:

تم نمذجة الآلة التحريضية بناء على معادلات بارك التالية كما ورد في المرجع [12]:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \quad (4)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \quad (5)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} = 0 \quad (6)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} = 0 \quad (7)$$

$$\phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (8)$$

$$\phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (9)$$

$$\phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (10)$$

$$\phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (11)$$

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_r} (\phi_{rd} i_{qs} - \phi_{rq} i_{ds}) \quad (12)$$

حيث:

v_{qs}, v_{ds} مركبتي جهد الثابت على المحورين q, d . v_{qr}, v_{dr} مركبتي جهد الدائر على المحورين q, d .
 ϕ_{qs}, ϕ_{ds} مركبتي فيض الثابت على المحورين q, d . ϕ_{qr}, ϕ_{dr} مركبتي فيض الدائر على المحورين

q, d

i_{qs}, i_{ds} مركبتي تيار الثابت على المحورين q, d . i_{qr}, i_{dr} مركبتي تيار الدائر على المحورين q, d .
 L_s, L_r محارضة الدائر و الثابت على التوالي. L_m المحارضة المتبادلة. C_{em} العزم

الكهرومغناطيسي. R_r, R_s مقاومة الطور للثابت والدائر على التوالي. ω_s التردد الزاوي للساحة المغناطيسية

الدوارة. ω_r التردد الزاوي لتيار الدائر. P عدد أزواج أقطاب الآلة التحريضية.

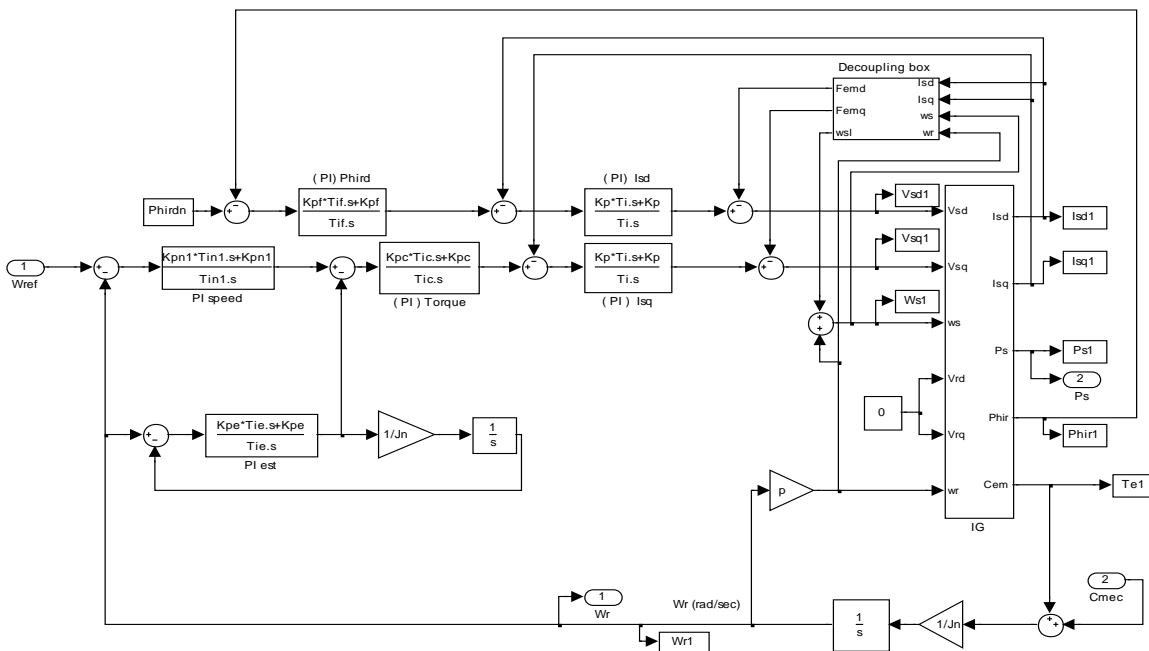
يمثل الشكل (7) نموذج بارك للألة التحريضية بناء على المعادلات السابقة حيث تقاس مركبتي التيار الثابت ثم

يتم فصلهما في صندوق الفصل. يتم توليد مركبتي جهد الثابت من مركبتي جهد إحداهما من بلوك الفصل و الأخرى

هي خرج المتحكم PI للتيار. يتم توليد القيم المرجعية للتيارات من متحكمين أحدهما للفيض و الآخر للعزم . تتم

التغذية العكسية (Feedback) بتخمين العزم الديناميكي (Torque Estimation) باستخدام مخمن عزم بحلقة مغلقة.

يولد العزم المرجعي باستخدام متحكم PI للسرعة.



الشكل (7) الآلة التحريضية و حلقات التحكم

المتحكمات PI :

تم اختيار المتحكمات بطريقة تعويض الأقطاب (Pole Placement) للحصول على سلوك ديناميكي مرغوب للحلقة المغلقة بعد تبسيط توابع نقل الحلقة المفتوحة. نراعي في اختيار المتحكمات (اختيار الثوابت) أن تكون الحلقات الداخلية في نظام الحلقات المتعاقبة أسرع في الاستجابة من الحلقات الخارجية.

صندوق الفصل [12] decoupling box:

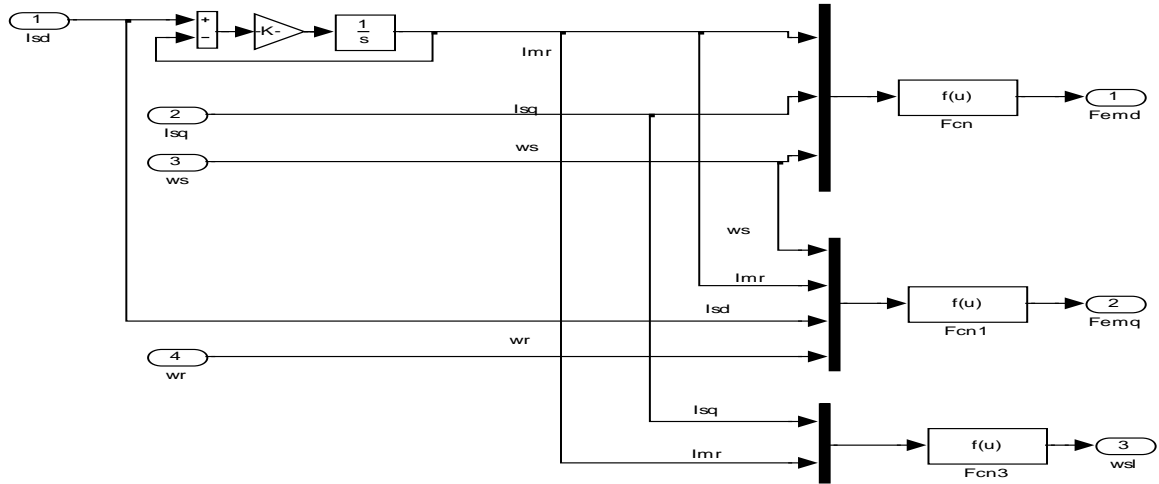
يستخدم هذا الصندوق لفصل مركبتي التيار في الثابت I_{sd}, I_{sq} عن بعضهما البعض بحيث يتم التحكم بكل مركبة تيار على حدى. الهدف النهائي هو التحكم بالفيض عن طريق I_{sd} و التحكم بالعزم أو السرعة عن طريق I_{sq} . يتألف خرج الصندوق من إشارتين F_{emd}, F_{emq} و $\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r$ و هو الفرق بين الترددات الزاويين للساحة المغناطيسية الدوارة وللدائر. حيث $I_{mr} = \frac{I_{sd}}{1+T_r \cdot s}$ تيار التمغنط، $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ الثابت الزمني لمفات الدائر، L_f المحارضة التسريية.

تتضمن صناديق التوابع fcn في الشكل (8) العلاقات الرياضية التالية:

$$F_{emd} = \omega_s \cdot L_f \cdot I_{sq} + R_r \cdot I_{mr} \quad (13)$$

$$F_{emq} = -\omega_s \cdot L_f \cdot I_{sd} - \omega_r \cdot L_m \cdot I_{mr} \quad (14)$$

$$\omega_{sl} = \frac{1}{T_r} \frac{I_{sq}}{I_{mr}} \quad (15)$$



الشكل (8) نموذج الفصل

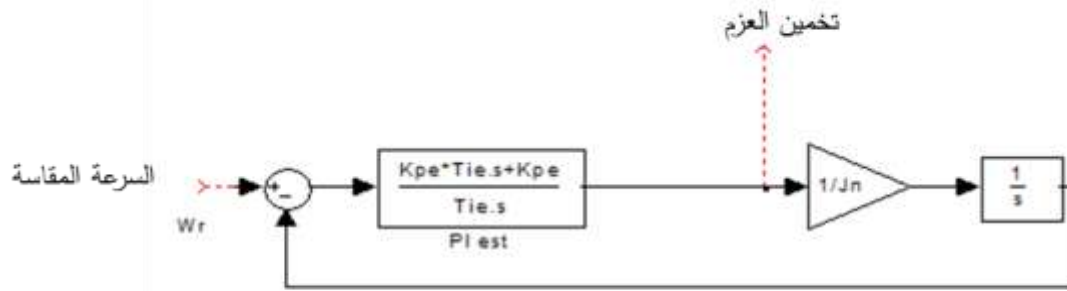
الآلة التحريضية مع القرص الدوار:

تمتلك الآلة التحريضية ذات القرص الدوار النموذج السابق في الشكل (7) نفسه مع عدم وجود حمل ميكانيكي. بالتالي تقوم الآلة بتدوير عطالة القرص الدوار الشكل (9). يتم التحكم بالآلة التحريضية كما في الآلتين السابقتين عبر حلقات تحكم تعاقبية كما في الشكل (9) ضمن إستراتيجية التحكم الشعاعي (Vector Control) بتوجيه الفيض. يكمن الاختلاف في متحكم السرعة حيث تم استخدام متحكم PID من أجل سلوك حلقة مغلقة من الدرجة الثالثة بالنسبة للسرعة. الهدف من اختيار هذا السلوك هو ملاحقة مرجع للسرعة خطوة واحدة (Unite Step Function)، تابع

إن ميزة استخدام مرشح من الدرجة الثانية عن الدرجة الأولى هي أن المرشح من الدرجة الأولى لا يلاحق دخل تابع انحدار و بالتالي لا يناسب ذلك تغيرات افتراضية للريح على شكل تابع انحدار .

تخمين العزم الديناميكي:

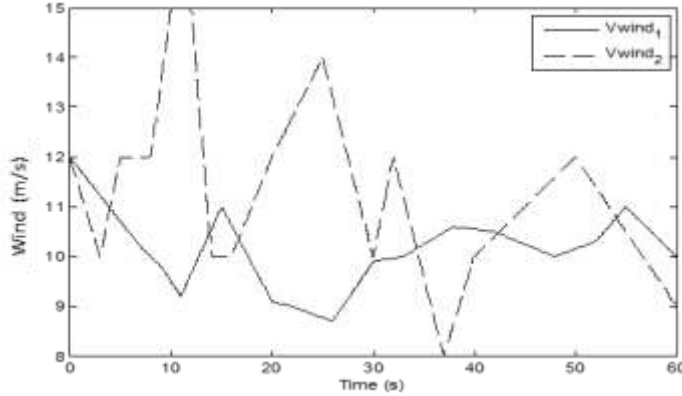
إن العزم الديناميكي هو دخل و ليس متحول حالة لذلك لا يمكن استخدام مراقب حالة (Observer) للحصول عليه لذلك قمنا باستخدام المخمن كما في الشكل (12). يتألف المخمن من نظام مكامل ثابت التكامل له يعادل عطالة الأجزاء الدوارة و متحكم به بواسطة متحكم تناسبي تكاملي. يتم اختيار المتحكم من أجل ثابت زمني للحلقة المغلقة للمخمن أقل من الثابت الزمني للحلقة المغلقة للسرعة. بالتالي بديها يكافئ خرج المتحكم إشارة العزم الديناميكي المطلوب عندما تكون إشارة الدخل هي السرعة المقاسة.



الشكل (12) مخمن العزم الديناميكي

النتائج و المناقشة:

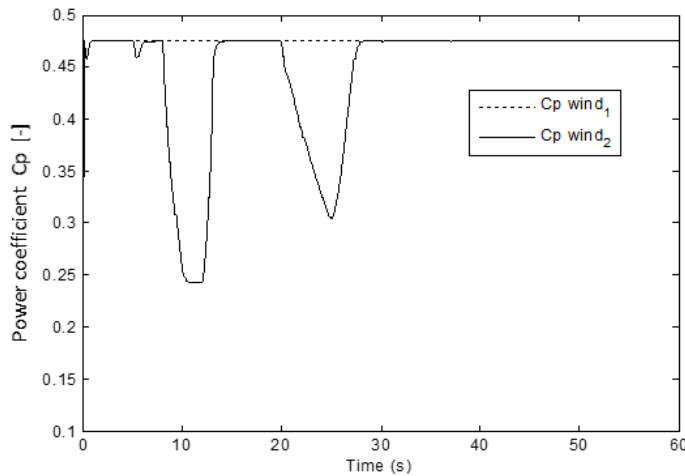
يتم في هذه الفقرة محاكاة عمل النظام المبين في الشكل (1) من أجل سرعتين مختلفتين للريح للنفثتين و آلة ذات قرص دوار لها نفس مواصفات النفثة الريحية. تتم الدراسة خلال مدة زمنية قدرها 60 ثانية.



الشكل (13) تغير سرعة الريح

تغير سرعة الريح:

تغير سرعة الريح للنفثة 2 أعلى و أسفل السرعة الاسمية و قدرها (12m/s) و للنفثة 1 أسفل السرعة الاسمية كما هو موضح في الشكل (13).



الشكل (14) معامل الاستطاعة

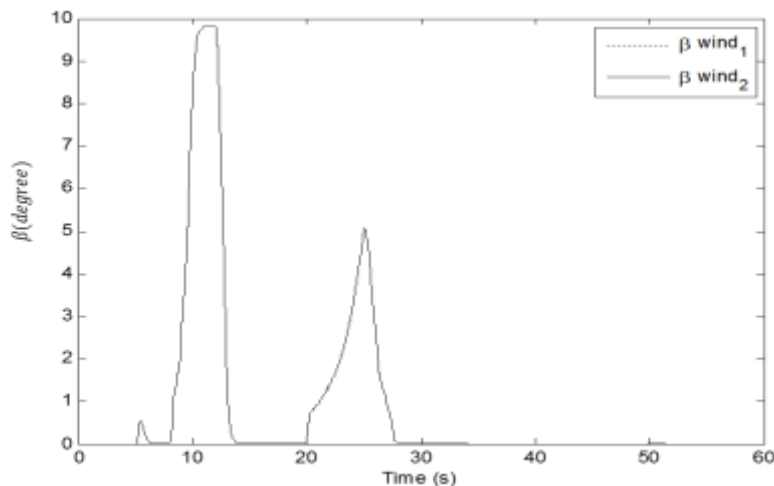
تغير قيمة معامل الاستطاعة:

يظهر الشكل (14) كيفية تغير قيمة معامل الاستطاعة مع الزمن مع تغير سرعة الرياح. يلاحظ أن معامل استطاعة العنفة 1 يبقى على قيمته العظمى لأن سرعة الرياح أقل من السرعة الاسمية و يؤمن التحكم الكهربائي بالسرعة هذا النمط في التشغيل للحصول على الاستطاعة العظمى (أمثلة الاستطاعة).

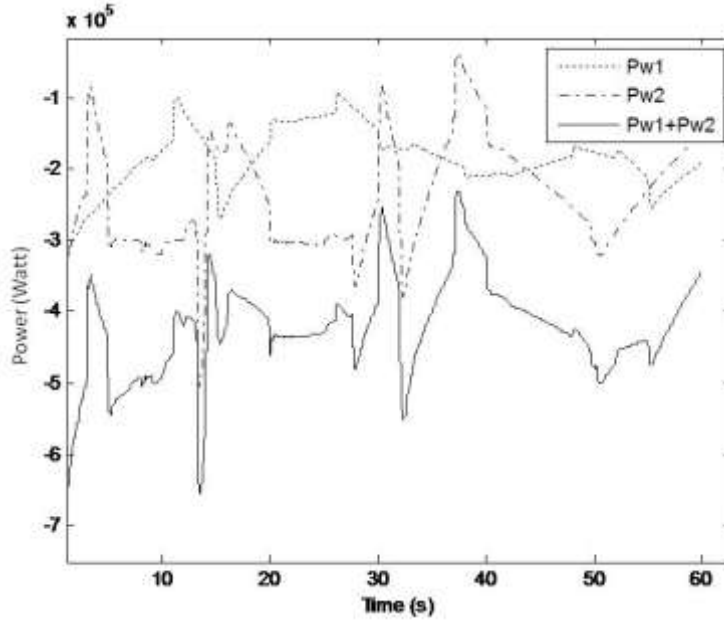
أما بالنسبة للعنفة الثانية فتتأرجح قيمة المعامل بين القيمة العظمى عند سرعة رياح أقل من الاسمية و قيم أقل من العظمى عند سرعة رياح أعلى من الاسمية. يعود هذا النمط من السلوك للتحكم بزواوية ميل الشفرات و هو تحكم ميكانيكي هدفه تخفيض الاستطاعة عندما تتجاوز قيمتها الاسمية وجعلها قريبة من الاسمية. يبدو هذا واضحاً في الشكل (15).

تغير زاوية ميل الشفرات:

بالنسبة للعنفة 1 لا تتغير قيمة زاوية ميل الشفرات بل هي ثابتة على الصفر. بالنسبة للعنفة 2 تتغير زاوية ميل الشفرات بهدف الحد من استطاعة الخرج على قيمتها الاسمية عند ازدياد سرعة الرياح عن قيمتها الاسمية كما يبين الشكل (15).



الشكل (15) تغير زاوية ميل الشفرات



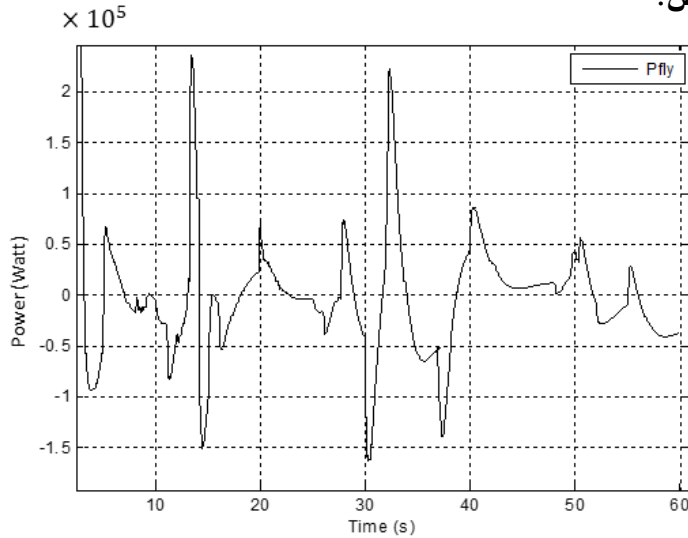
الشكل (16) تغير الاستطاعة الكهربائية

تغير الاستطاعة الكهربائية:

يوضح الشكل (16) تغير الاستطاعة الكهربائية للنفة 1 و للنفة 2 و محصلة الاستطاعة المنتجة من الريح. نلاحظ التذبذب الكبير في الاستطاعة الكهربائية و يعود ذلك للتذبذب في سرعة الرياح و للحالات العابرة الناتجة عن التحكم.

يوجد لهذه التذبذبات و التغيرات الفجائية السريعة أثراً سلبياً على الشبكة خاصة في الشبكات الضعيفة المعزولة حيث تؤثر مباشرة على استقرارها. يؤثر التذبذب أيضاً على نوعية و جودة الطاقة المسلمة للمستهلك لذلك يفضل تعميم هذه الاستطاعة. يتم التعميم عبر استخدام التخزين بالقرص الدوار حيث يستفيد القرص الدوار من زيادة الاستطاعة لزيادة سرعته و عندها تتحول الطاقة إلى طاقة كامنة يمكن استعادتها عند نقصان الاستطاعة القادمة من النفة الريحية.

تغير الاستطاعة الكهربائية للمولدة ذات القرص:



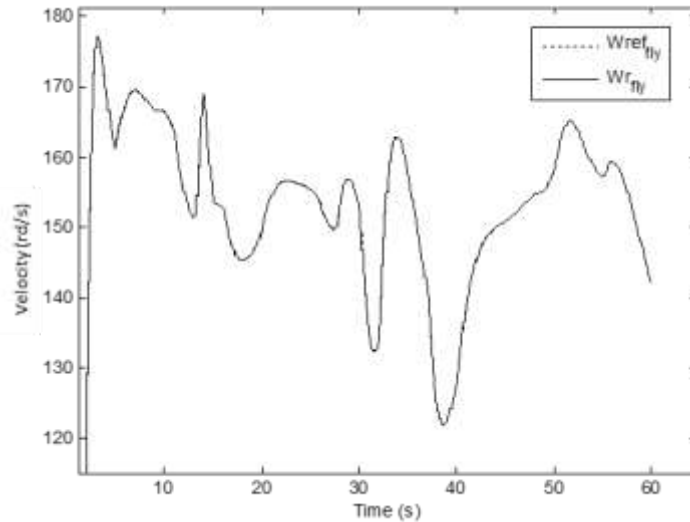
الشكل (17) تغير استطاعة الآلة ذات القرص

يلاحظ من الشكل (17) أن الاستطاعة

على خرج الآلة تتأرجح حول الصفر موجبة (استهلاك)، سالبة (توليد). يتبع ذلك لسرعة الريح أي لقيمة الفرق بين استطاعة الخرج للنفات الريحية و إشارة الاستطاعة المرجعية المقدمة من مرشح الاستطاعة.

سرعة القرص:

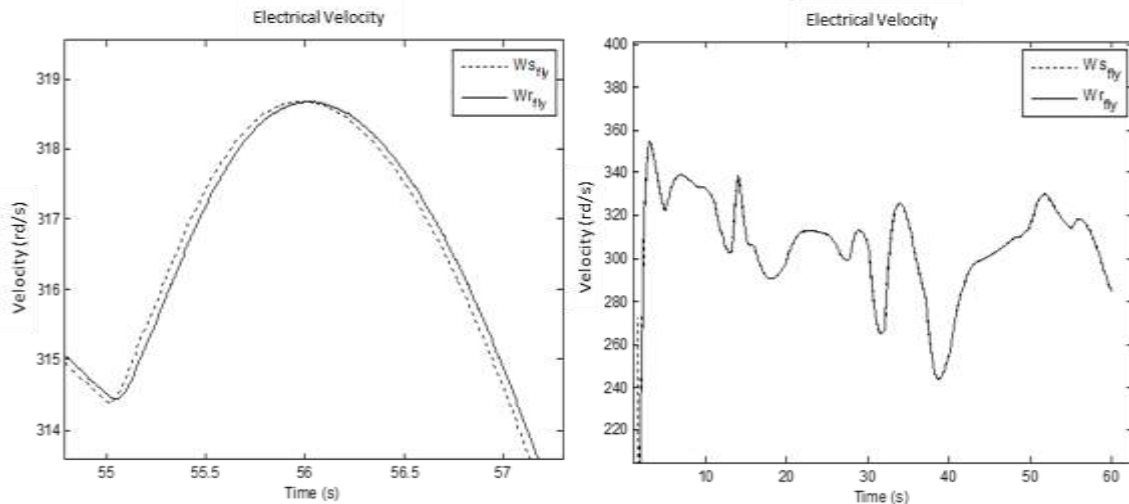
يوضح الشكل (18) تغير سرعة القرص الدوار لأجل تلبية الاستطاعة المرجعية. يلاحظ أن السرعة تزداد (الآلة تعمل كمحرك) و تنقص (الآلة تعمل كمولد) و يبقى القرص في حالة دوران. كما نلاحظ أن السرعة و هي خرج للآلة تتبع السرعة المرجعية بشكل مرضي جداً و تقريباً بدون خطأ حالة مستقرة و يعود ذلك للتصميم المناسب للمتحكمات.



الشكل (18) تغير السرعة الميكانيكية للقرص

تغير سرعة القرص بالنسبة لسرعة الساحة المغناطيسية:

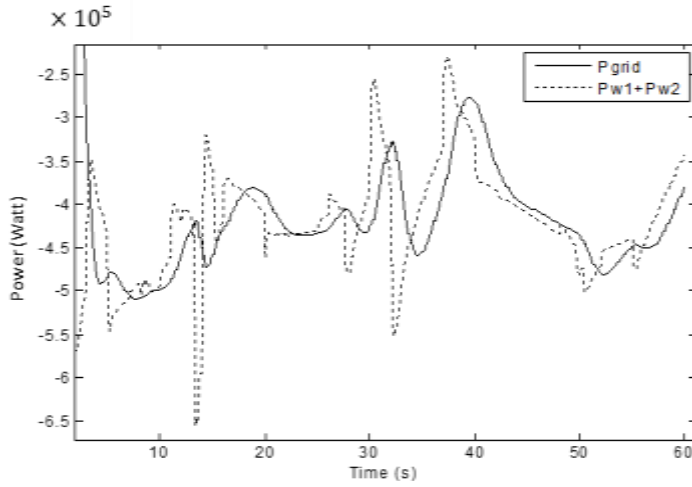
الهدف هنا هو إظهار الفرق بين سرعة الساحة المغناطيسية (بالخط المنقط) و سرعة الدوران الكهربائية للدائر (بالخط المستمر). تؤكد المقارنة في الشكلين (19) و (20) عمل الآلة في نمط التوليد عند التباطؤ (سرعة الدوران أكبر من سرعة الساحة) و في نمط التحريك عند التسارع (سرعة الدوران أقل من سرعة الساحة).



الشكل (20) تكبير عن الشكل (19)

الشكل (19) تغير سرعة الدوران الكهربائية

مقارنة بين الاستطاعة المرسله للشبكة و الاستطاعة المنتجة من الريح:



الشكل (21) الاستطاعة المرسله للشبكة و الاستطاعة المنتجة من الريح

يوضح الشكل (21) مقارنة بين

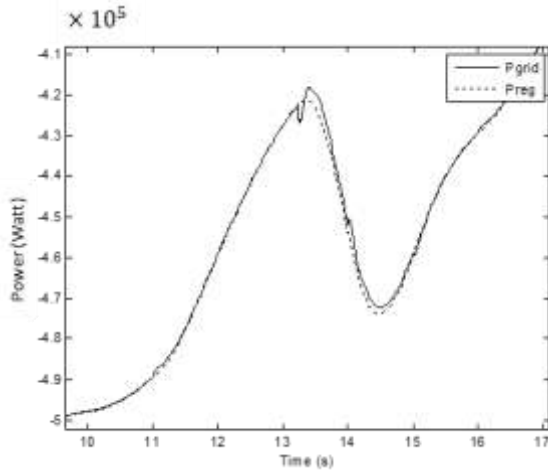
مجموع الاستطاعة الكهربائية المتولدة من العنفات الريحية (متذبذبة) و الاستطاعة الكهربائية المرسله للشبكة (أقل تذبذباً) و هو الهدف المطلوب.

يبين الشكل (21) أن الاستطاعة المرسله للشبكة أكثر نعومة لأنها مجموع استطاعة العنفات الريحية و استطاعة التخزين بالقرص الدوار.

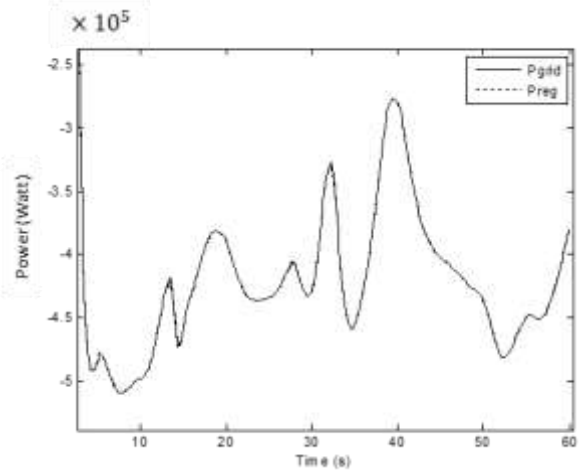
قام التخزين إذن بامتصاص الاستطاعة الزائدة و بتعويض الناقصة بالاعتماد على الاستطاعة المرجعية (استطاعة التنظيم P_{reg}).

المقارنة بين استطاعة المرسله للشبكة و استطاعة التنظيم:

الهدف من هذه المقارنة تبيان جودة التحكم بالآلة ذات القرص حيث تعطي على خرجها تقريباً قيمة الاستطاعة المرجعية المطلوبة منها. يوضح الشكلان (22) و (23) النتيجة المذكورة.



الشكل (23) تكبير للشكل (22)



الشكل (22) تغير الاستطاعة المرسله للشبكة

يلاحظ وجود بعض التذبذب في استطاعة الخرج بالمقارنة مع القيمة المرجعية. يعزى هذا الأمر إلى التغير الفجائي السريع لسرعة الريح (الاستطاعة) و قدرة المتحكمات على الاستجابة حسب ثوابتها الزمنية. يعود ذلك أيضاً إلى درجة سلوكها الديناميكي و إلى دقة التقريب لنموذج النظام عند تصميم المتحكمات.

الاستنتاجات و التوصيات:

تم في هذا البحث معالجة النمذجة و المحاكاة لنظام ريحي مع تخزين بالقرص الدوار. تم اختيار المتحركات المناسبة من أجل تأمين تشغيل مقبول للجملية ككل. تبين من خلال النتائج أن الجملية تعمل بشكل جيد و أن الاستطاعة المسلمة إلى الشبكة أصبحت أكثر نعومة مقارنة مع خرج العنفات الريحية المتذبذب. يمكن فيما يلي من دراسات مقارنة نتائج التحكم عن طريق الثابت (التغذية في الثابت) و عن طريق الدائر (للمولدات مضاعفة التغذية) لتبيان ميزة أحدهما عن الأخرى. كما يمكن تطوير النموذج ليشمل طرق أخرى في التخزين مثل المدخرات و مولدات أخرى كالديزل و الخلايا الكهروضوئية. يمكن أيضا استخدام طرق أخرى في التحكم كالتحكم الضبابي و الشبكات العصبونية و مقارنة النتائج مع ما ورد في هذا البحث.

المعطيات:

الآلات التحريضية متماثلة و معطياتها افتراضية و لا تعبر عن حقيقة واقعية و هي مستخدمة من أجل المحاكاة فقط.

عدد أزواج الأقطاب $p = 2$ ، مقاومة الثابت $R_s = 6.3 \times 10^{-3} [\Omega]$ ، مقاومة الدائر $R_r = 4.8 \times 10^{-3} [\Omega]$ ،
 محارضة الثابت $L_s = 11.8 \times 10^{-3} [H]$ ، محارضة الدائر $L_r = 11.6 \times 10^{-3} [H]$ ، المحارضة المتبادلة
 $L_m = 11.6 \times 10^{-3} [H]$ ، محارضة التسرب $L_f = L_s - L_r$ ، الاستطاعة الميكانيكية $P_{mec} = 3.08 \times 10^5 [Watt]$ ،
 السرعة الاسمية $Nr = 1515 [rpm]$ ، التردد الاسمي $fn = 50 [Hz]$ ، نسبة علبه السرعة $G = 23$ ، نصف قطر
 العنفة $R = 14 [m]$ ، كثافة الهواء $\rho = 1.22 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ ، سرعة الريح الاسمية $12 \left[\frac{m}{s} \right]$ ، عطالة الآلة $J = 50 [kg.m^2]$ ،
 معامل الاحتكاك $f = 0.36 \left[\frac{kg.m^2}{s} \right]$ ، ثوابت العنفة لحساب (C_p) :

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

النقطة الأعظمية للمنحني C_p هي $\lambda_{optimal} = 8.1$ ، $C_{pmax} = 0.4745$ ، $\beta = 0^\circ$ ،

نقطة التوازن نمط مولد تحكم بتوجيه الفيض بالثابت حالة IG :

الاستطاعة الكهربائية $-300878.582089 [Watt]$ ، الاستطاعة الميكانيكية $308000.000000 [Watt]$ ،
 العزم الاسمي $-1941.375147 [N.m]$ ، الفيض الاسمي $1.217826 [web]$ ،
 تيار الثابت $I_{sq} = -797.065575 [A]$ ، $I_{sd} = 104.985042 [A]$ ، $I_s = 803.949868 [A]$ ،
 التيار الفعال $I_{eff} = 464.160673 [A]$ ،
 تيار الدائر $I_{rq} = 797.065575 [A]$ ، $I_{rd} = 0.000000 [A]$ ،
 جهد الثابت $V_{sq} = 384.166368 [V]$ ، $V_{sd} = 50.742513 [V]$ ، $V_s = 387.503033 [V]$ ،
 جهد الطور الفعال $V_{eff} = 223.724981 [V]$ ،
 المردود 0.976879 ،
 السرعة الاسمية $317.300858 [rd/s]$ ،
 الثوابت الزمنية لحلقات التحكم:
 سلوك من الدرجة الأولى للحلقة المغلقة

$$\begin{aligned}
 T_{0f} &= 0.012083 \text{ [s]} \text{ حلقة الفيض} & T_0 &= 0.036036 \text{ [s]} \text{ حلقة التيار} \\
 T_{0n} &= 0.419499 \text{ [s]} \text{ حلقة السرعة} & T_{0c} &= 0.036036 \text{ [s]} \text{ حلقة العزم} \\
 T_{0e} &= 0.036036 \text{ [s]} \text{ حلقة مخمن العزم} & T_{0a} &= 0.010000 \text{ [s]} \text{ حلقة زاوية ميل الشفرات}
 \end{aligned}$$

الجدول (2) ثوابت المتحكمات حالة IG

تفاضلي Td	تكامل Ti	تناسبي Kp	المتحكم/الثابت
-	0.0180	0.0055	متحكم التيار PI
-	2.4167	17241	متحكم الفيض PI
-	0.0360	0.4106	متحكم العزم PI
-	139.8331	119.1897	متحكم السرعة 1 PI
-	0.3597	449.6424	متحكم السرعة 2 PI
-	0.2000	7.5×10^{-5}	متحكم الزاوية βPI
-	139.8331	1.3875×10^3	مخمن العزم PI
0.0172	20.0196	1.8036×10^4	متحكم السرعة للقرص PID

نلاحظ من الجدول وجود قيم كبيرة و صغيرة للريح و الثوابت الزمنية إلا أنه يمكن تحقيقها باستخدام التحكم

الرقمي.

المراجع:

- [1]- LIU, H.; JIANG, J. *Flywheel Energy Storage —An Upswing Technology for Energy Sustainability*. Energy and Buildings 39, 2007, 599–604.
- [2]- BOLUND, B; BERNHOFF, H; LEIJON, M. *Flywheel Energy and Power Storage Systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 11, 2007, 235–258.
- [3]- JIAN, L. *Operation of a Wind Turbine-Flywheel Energy Storage System under Conditions of Stochastic Change of Wind Energy*. The Scientific World Journal Volume 2014, ID 643769, 16 pages.
- [4]- JERRI, L.; KRICHEN, L.; OUALI, A. *A Fuzzy Logic Supervisor for Active and Reactive Power Control of a Variable Speed Wind Energy Conversion System Associated to a Flywheel Storage System*. Electric Power Systems Research 79, 2009, 919–925.
- [5]- ECLERCQ, L.; ROBYNS, B.; GRAVE, J. M. *Control Based on Fuzzy Logic of a Flywheel Energy Storage System Associated with Wind and Diesel Generators*. Mathematics and Computers in Simulation 63, 2003, 271–280.
- [6]- TAKAHASHI, R. *Frequency Control of Isolated Power System with Wind Farm by Using Flywheel Energy Storage System. From Turbine to Wind Farms - Technical Requirements and Spin-Off Products*, In Tech, April, 2011, 66-76.
- [7]- GHEDAMSI, K.; AOUZELLAG, D.; BERKOUK, E. M. *Control of Wind Generator Associated to a Flywheel Energy Storage System*. Renewable Energy 33, 2008, 2145–2156.

[8]- REKIOUA, D.; REKIOUA, T.; IDJDARENE, K.; TOUNZI, A. *Control of a Wind Energy Conversion System Associated to a Flywheel Energy Storage System*. http://www.researchgate.net/publication/225609053_Wind_energy_conversion_system_associated_to_a_flywheel_energy_storage_system.15/10/2011.

[9]- YOUNSI, S.; JRAIDI,M.; HAMROUNI,N.; CHERIF,A. *Modelling and Control of Hybrid Renewable Energy System Connected to AC Grid*. International Journal on Computer Science and Engineering (IJCSE) Vol. 3 No. 12, December 2011, 3854-3864.

[10]- TARAFT. S; REKIOUA.D; AOUZELLAG. D. *Wind Power Control System Associated to the Flywheel Energy Storage System Connected to the Grid*. Energy Procedia 36, 2013, 1147 – 1157.

[11]- RAMESHBABU, N.; ARULMOZHIVARMAN, P. *Wind Energy Conversion Systems - a Technical Review*. Journal of Engineering Science and Technology Vol. 8, No. 4, 2013, 493 – 507.

[12]- RETIF, J.M. *Commande Vectorielle des Machines Asynchrones et Synchrones*. Cours Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2008, 68.