

تطوير استراتيجية تحكم ذكية لتحسين التشغيل المستقر للمولدات الريحية ذات السرعة الثابتة

د. سحر العلي*

أ. د. علي خضور**

م. علا الشيخ***

(تاريخ الإيداع 2022/9/15 . قبل للنشر في 2023/1/16)

□ ملخص □

تم في هذا البحث تطوير استراتيجية تحكم لتحسين التشغيل المستقر للمولدات الريحية ذات السرعة الثابتة المتصلة مع الشبكة الكهربائية، والتي تعتمد على المولد التحريضي ذو القفص السنجابي. تهدف استراتيجية التحكم المقترحة إلى تحسين الاستقرار الديناميكي والاستقرار العابر للمولدات الريحية ذات السرعة الثابتة، من خلال تصميم نظام تحكم يتألف من STATCOM لتعويض الاستطاعة الردية بالإضافة إلى وحدة تحكم بزوايا ميل الشفرات. تعمل وحدة التحكم في حالتي عمل، أولاً حالة التحكم بالطاقة لتحقيق الاستقرار الديناميكي، ثانياً حالة التحكم بالسرعة لتحقيق الاستقرار العابر. تم تصميم ثلاث مُتحكمات PI، FLC، FLC-PI للتحكم بزوايا ميل الشفرات، كما تم اختبار النظام عند حالتي عمل، الحالة الأولى حالة اضطراب ديناميكي (اضطراب ريحي)، والثانية هي حالة خطأ عابر (خطأ ثلاثي الطور مع أرضي).

أكدت نتائج المحاكاة على قدرة STATCOM على تنظيم الجهد وتحقيق أفضل استقرار، وكذلك على:

- كفاءة وحدة التحكم FLC في حالة الاضطراب الديناميكي، حققت أقل قيمة لمؤشر الأداء 97.9p.u بالمقارنة مع وحدتي التحكم PI و FLC-PI و 225.9p.u و 103.1p.u على التوالي.
- كفاءة وحدة التحكم FLC-PI في حالة الخطأ العابر، حققت أقل قيمة لمؤشر الأداء 171p.u بالمقارنة مع وحدتي التحكم PI و FLC و 258.4p.u و 184.7p.u على التوالي.

الكلمات المفتاحية: التوربينات الريحية ذات السرعة الثابتة - المولد التحريضي - التحكم بزوايا ميل الشفرات المعوض المتزامن الساكن - المتحكم الضبابي - الاستقرار الديناميكي - الاستقرار العابر.

* دكتورة في قسم الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - طرطوس - سورية.
** أستاذ في قسم الطاقات المتجددة - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - طرطوس - سورية.
*** طالبة دراسات عليا (ماجستير) في قسم الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - طرطوس - سورية.

Develop an intelligent control strategy to improve the stable operation of the fixed speed wind generator

Dr. Sahar Alali*
Prof. Dr. Ali khaddour**
Eng. Ola Alshikh ***

(Received 15/9/2022 . Accepted 16/1/2023)

□ ABSTRACT

In this paper, a control strategy was developed to improve the stable operation of the fixed speed wind generators connected to the electrical network, which depends on the squirrel cage induction generator.

The proposed control strategy aims to improve the dynamic stability and transient stability of constant speed wind generators, by designing a control system consisting of STATCOM for reactive power compensation as well as a blade pitch control unit. The controller operates in two working states, first the power control state for dynamic stabilization, secondly the speed control state for transient stabilization.

Three controllers PI, FLC, FLC-PI are designed to control the angles of inclination of the blades, and the system has been tested in two working states, the first is a dynamic turbulence (wind turbulence), and the second is a transient fault (three-phase fault with ground).

Simulation results confirmed the ability of STATCOM to regulate voltage and achieve optimum stability, as well as to:

- The efficiency of the FLC controller in the case of dynamic turbulence, achieved the lowest performance index value of 97.9p.u compared to the PI and FLC-PI controllers 225.9p.u and 103.1p.u, respectively.

- The efficiency of the FLC-PI controller in the event of a transient fault, achieved the lowest performance index value of 171p.u compared to the PI and FLC controllers 258.4p.u and 184.7p.u, respectively.

Keywords: Wind Turbine - Fixed Speed - Induction Generator - Pitch Angle Controller - STATCOM - Fuzzy Logic Controller – Stability.

*Doctor in Department of Industrial Automation - Faculty of Technical Engineering - Tartous University.

**Professor in Department of Renewable Energy - Faculty of Technical Engineering - Tartous University.

***Postgraduate Student (M.A) - Faculty of Technical Engineering - Tartous University.

المقدمة:

يعد نظام طاقة الرياح (WES) Wind Energy Systems أحد مصادر الطاقة المتجددة التي تشهد حالياً نمواً كبيراً بسبب الاعتبارات الاقتصادية والبيئية. في الوقت الحاضر تستخدم أنظمة الطاقة الريحية الحديثة في الغالب المولدات الريحية المتغيرة السرعة المزدوجة التغذية [1]، بالمقابل مازالت المولدات الريحية التحريضية ذات السرعات الثابتة (FSIGs) fixed-speed induction generators تُستخدم بكثرة في أنظمة توليد الطاقة الكهربائية الريحية بسبب قوتها وبساطتها، والانخفاض في كلفتها وكلفة صيانتها، مما استدعى القيام بأبحاث لدراسة جودة الطاقة التي تقدمها هذه المولدات نظراً لأن خرج التوربين الريحي يتناسب مع مكعب سرعة الرياح ذات الطبيعة العشوائية المتغيرة. إن التغيرات المستمرة في سرعة الرياح تحدث تذبذبات في الاستطاعة الفعلية التي تنتجها المولدات التحريضية والتي يحتاج إنتاجها إلى استطاعة ردية مما جعل الاستطاعة الردية أيضاً تتأثر بتغيرات سرعة الرياح، مؤثرة على الشبكة بتذبذبات تحصل على الجهد [2]. التحدي الثاني هو أن الجزء الثابت لتلك المولدات متصل مباشرة بالشبكة، مما يجعل المولدات لتحريضية ذو القفص السنجابي (SCIGs) Squirrel cage induction generators شديدة الحساسية لأعطال الشبكة. بالإضافة إلى ذلك، إن SCIG يميل إلى استهلاك قدر كبير من الطاقة الردية من الشبكة في حالة التشغيل الغير طبيعية، مسبباً عدم استقرار الدائر [3]. عادةً يتم وصل مكثفات على خرج (FSIGs) لتعويض الاستطاعة الردية لتحسين الجهد الناتج، وهذا يعطي نتائج جيدة في الحالات الطبيعية، ولكن في ظرف الاضطرابات وتغير سرعات الرياح يحتاج الأمر للاستعانة بأنظمة نقل التيار المتناوب المرنة (FACTS - Flexible AC Transmission Systems). استخدمت معظم الأبحاث أجهزة مختلفة مع (FSIGs)، كأجهزة معوّضات القدرة الساكنة (SVCs) Static Var Compensators، وكذلك المعوض المتواقت الساكن (STATCOM) Static Compensator الذي يوفر استقرار ديناميكي جيد نتيجة لاستجابته السريعة بتعويض الاستطاعة الردية، وزيادة قدرة التمرير لخطوط النقل [4]، لكن لا يمكنه تعويض الاستطاعة الفعلية، لذا تم إيجاد حلول عن طريق تخزين بعض الطاقة من جهة وصلة التيار المستمر، كاستخدام مكثفات مضاعفة الصفائح أو جهاز تخزين الطاقة المغناطيسية الفائقة الناقلية، لكنها ذات عمر قصير، وتكلفة عالية [5].

أظهرت دراسات أخرى أهمية التحكم بمعيارية زوايا الشفرات لتحسين الاستقرار بسبب تأثيرها على الاستطاعة الفعلية، لأنها تحد من الطاقة الهوائية من أجل تنعيم تقلبات طاقة المولد وتحقيق الاستقرار العابر أثناء أعطال الشبكة [6]، لذلك صُممت استراتيجية التحكم في زاوية الميل لتحسين جودة الطاقة، وتعزيز الاستقرار العابر في وضعي التحكم في الطاقة والسرعة، على التوالي، باستخدام وحدة التحكم المنطقية الضبابية (تسمى وحدة التحكم المنطقية الضبابية من النوع 1 (FLC)). تعتبر أداة التحكم في زاوية الميل المبنية على المنطق الضبابي هي الأنسب لأنها توفر أداءً محسناً في تتبع المرجع مقارنةً بوحدات التحكم الأخرى [7].

إن أهمية هذا البحث تكمن في التمكن من تصميم استراتيجية تحكم بالمولد التحريضي ذو القفص السنجابي، تعتمد على نظام السرعة الثابتة مع تغير في زاوية ميل الشفرات FS-VP (Fixed speed-variable pitch)، لما يملكه هذا النظام من أداء جيد عند سرعات مختلفة للرياح، لذلك، من أجل تنظيم طاقة خرج التوربين الريحي تعد استراتيجية التحكم في الاستطاعة الفعلية (التحكم بزوايا ميل الشفرات) والتحكم بالاستطاعة الردية (التحكم ب STATCOM) هي الخيار الأفضل، حيث تقوم بتنعيم تقلبات طاقة الخرج، وتنظيم الفولتية الطرفية للمولد الريحي ذات السرعة الثابتة، الذي يخضع لتغيرات في سرعة الرياح.

أهمية البحث وأهدافه:

في ظل الحاجة إلى مصادر طاقة متجددة، يتطلب الأمر تعزيز إمكانية بناء نظام ريحي عالي الوثوقية ومنخفض التكلفة والصيانة. انطلاقاً من ذلك تكمن أهمية البحث في تطوير استراتيجية تحكم لزيادة وثوقية نظام القدرة الكهربائي بمساهمة الوحدات الريحية من خلال تحسين الاستقرار الديناميكي والعابر للمولدات الريحية ذات السرعة الثابتة المتصلة مع الشبكة الكهربائية في ظل حدوث اضطراب في سرعة الرياح والتي تؤدي إلى حدوث تذبذبات في جهد الشبكة الكهربائية، أو في حال حدوث أي خطأ عابر أو زيادة سرعة الدائر للمولد الريحي فوق السرعة الاسمية.

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تصميم استراتيجية تحكم لتحسين جودة الطاقة الناتجة عن المولدات الريحية ذات السرعة الثابتة لزيادة الاستقرار الديناميكي وتحسين استقرار الحالة العابرة، من خلال:

- تصميم حلقة تحكم بجهاز STATCOM لتعويض الاستطاعة الرديئة.
- تصميم حلقة تحكم بعزم الدوران الميكانيكي من خلال التحكم بمعايير زاوية ميل الشفرات لتنظيم الاستطاعة الفعلية.

❖ التوربينات ذات السرعة الثابتة وذات السرعة المتغيرة

توربينات السرعة الثابتة: تعتمد هذه التوربينات على ثبات سرعة دوران شفرة التوربين وبالتالي الجزء الدوار في المولد (أي عدد اللفات في الدقيقة)، وتستخدم هذه التوربينات المولد التحريضي، لذا يكون خرج المولد تيار ذو تردد ثابت.

توربينات السرعة المتغيرة: تعتمد هذه التوربينات على تغير سرعة دوران شفرات التوربين وبالتالي الجزء الدوار في المولد، مما يؤدي إلى اختلاف خرج المولد، ويتطلب ربط هذه التوربينات على الشبكة الكهربائية ضبط تردد التيار الناتج منها، وذلك باستخدام إلكترونيات القدرة [8].

❖ أنواع المولدات المستخدمة في أنظمة التوليد بالطاقة الريحية

1. المولدات الريحية ذات السرعة الثابتة FSIG.
2. توربينات الرياح المتغيرة السرعة مع مقاومة الدائر المتغيرة.
3. توربينات الرياح للمولد التحريضي ذو التغذية المضاعفة.
4. توربينات الرياح متغيرة السرعة مع مبدل النطاق الكامل.

تم في هذا البحث استخدام المولد الريحي ذات السرعة الثابتة، بسبب بساطته ووثوقيته وانخفاض تكلفته وصيانته بالإضافة إلى إمكانية اتصاله بالشبكة الكهربائية مباشرة دون الحاجة إلى استخدام مبدلات القدرة. حيث يستخدم المولد التحريضي ذو الققص السنجابي ويكون التباين في سرعة دوران المولد محدوداً حوالي 1% من السرعة الاسمية عند قيم مختلفة لسرعات الرياح، لذلك يسمى هذا النوع بالمولد التحريضي ذو السرعة الثابتة. استُخدمت هذه التوربينات في أستراليا وألمانيا والدنمارك، بحوالي 87 MW و 48 MW و 47.1 MW على التوالي (المصنفة 1.5 MW) [9].

❖ الجهة المستفيدة من البحث

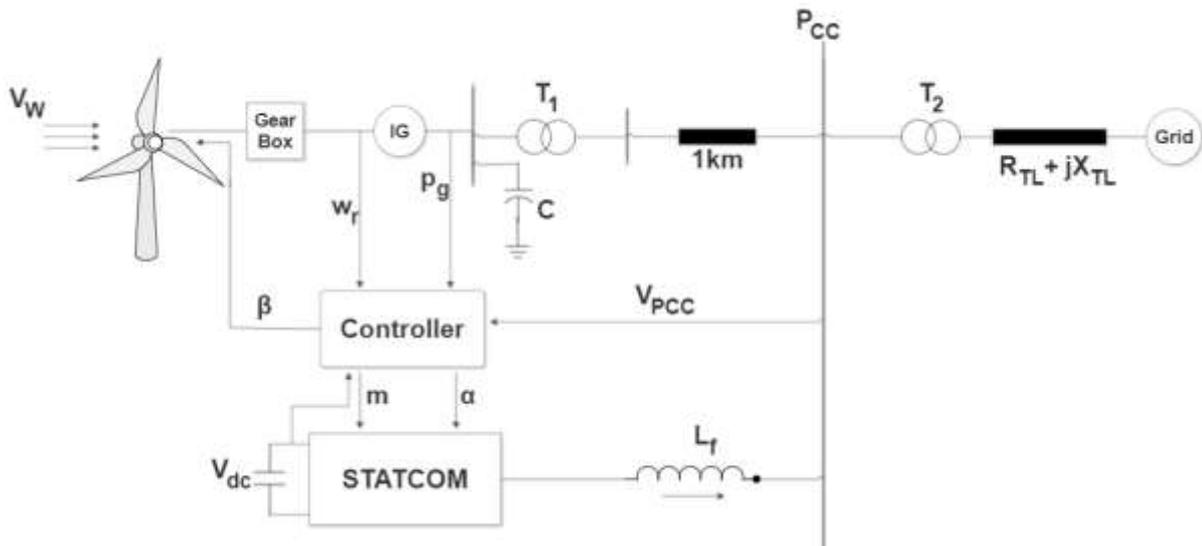
جامعة طرطوس، بالإضافة إلى الباحثين المهتمين .

طرائق البحث ومواده:

تم باستخدام البيئة البرمجية Matlab and Simulink للقيام بتمثيل التوربين الريحي ومعوّض الاستطاعة الردية STATCOM ومحاكاة النماذج الرياضية وتصميم ثلاث مُتحكمات PI ، FLC ، FLC-PI واستخلاص النتائج.

1. نظام الطاقة الريحي المتصل مع الشبكة الكهربائية:

يبين الشكل (1) نظام الطاقة النموذجي المدروس، حيث يُربط المولد الريحي إلى نقطة الاقتران المشترك point of common coupling PCC من خلال محول رافع (20kV/600V)، والذي يصدر الطاقة إلى شبكة 66KV من خلال خط النقل. يعمل المولد تحريضي (IG) induction generator في نقطة تشغيل محددة ويزود 1.5MW من الطاقة الفعلية.



الشكل (1): مخطط توضيحي للنظام المقترح.

إن مكثف تصحيح معامل الاستطاعة (C) مرتبط بمحطة الجهد المنخفض لمولد التوربين الريحي، حيث في ظل ظروف ثابتة، توفر المكثفات القدر المطلوب من الطاقة الردية FSIGs، لكنه لا يقدم الطاقة الردية الديناميكية التي يطلبها FSIG في ظل ظروف الاضطراب، ولتوفير الطاقة الردية والحفاظ على تنظيم الجهد في PCC في ظل اضطرابات الرياح أو في حال حدوث عطل، استُخدم جهاز STATCOM وربط مع الشبكة عند جهد 20KV. بالإضافة إلى وجود جهاز STATCOM تم إضافة وحدة للتحكم بزوايا ميل الشفرات تعمل عند تعرّض النظام لاضطراب في سرعة الرياح أو في حال حدوث خطأ عابر.

1.1 نمذجة التوربين الريحي ذو السرعة الثابتة المتصل مع الشبكة الكهربائية:

الطاقة الميكانيكية التي يستخرجها التوربين الريحي تتناسب طردياً مع مكعب سرعة الرياح وتعطى بالعلاقة:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A_r C_p(\lambda, \beta) V_w^3 = C_p(\lambda, \beta) P_w \quad (1)$$

حيث ρ (k_g/m^3): كثافة الهواء، $A_r = \pi R^2$ (m^2): المساحة التي يغطيها دوائر العنفة، R (m): نصف قطر الشفرة، V_w (m/s): سرعة الرياح، $C_p(\lambda, \beta)$: معامل الاستطاعة أو مردود العنفة (كمية الطاقة التي يستخرجها التوربين من الهواء) حيث λ : سرعة طرف الشفرة وتتغير من توربين الى اخر حسب الاختلاف في تصميم التوربين، β : زاوية ميلان شفرة التوربين وتغيرها يؤدي الى تغير سرعة المولد الريحي.

بالنسبة لتوربينات الرياح التجارية، المصنعين لا يقدمون أي معلومات عن معامل الاستطاعة، وبالتالي، تم وضع العديد من المعادلات الرياضية لتحديد هذه القيمة. ووصفت العديد من المراجع منحني معامل الاستطاعة مع معادلات مختلفة. في هذا البحث، تم تحديد خاصية معامل الاستطاعة على النحو التالي [10]:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6\lambda \quad (2)$$

حيث

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.008\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3)$$

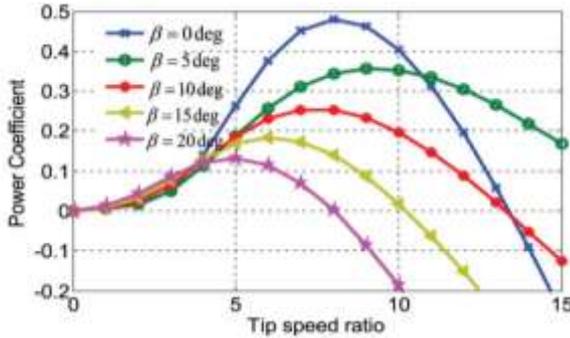
$$c_6 = 0.0068, c_5 = 21, c_4 = 5, c_3 = 0.4, c_2 = 116, c_1 = 0.5176$$

$$\lambda = \frac{\text{tip speed of the blade}}{\text{wind speed}} = \frac{WR}{V_m} \quad (4)$$

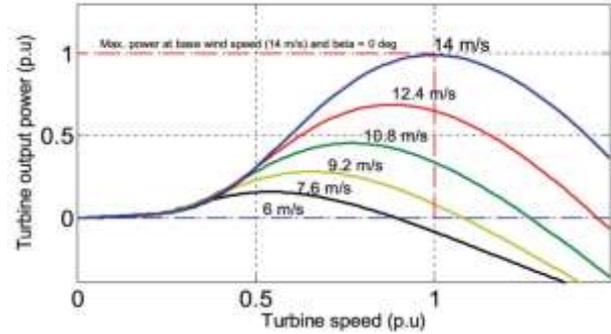
وبالتالي، يمكن اشتقاق ناتج عزم الدوران الميكانيكي للمولد التحريضي بالعلاقة التالية

$$T_m = \frac{P_m}{w_r} = \frac{C_p(\lambda, \beta)P_w}{w_r} \quad (5)$$

حيث، w_r (rad/s): سرعة التوربين الريحي، وفقاً للمعادلات من (1) إلى (4)، يوضح الشكل (2) منحني معامل الاستطاعة مقابل السرعة الطرفية للشفرة (C_p, λ) بالنسبة لقيم مختلفة لزاوية الميل (β) ، كما يوضح الشكل (3) طاقة خرج التوربين مقابل سرعة التوربين عند قيم مختلفة لسرعة الرياح (V_w) .

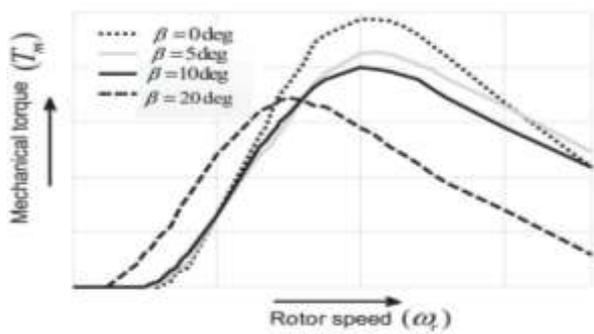


الشكل (2): العلاقة بين معامل الاستطاعة وسرعة طرف الريشة.

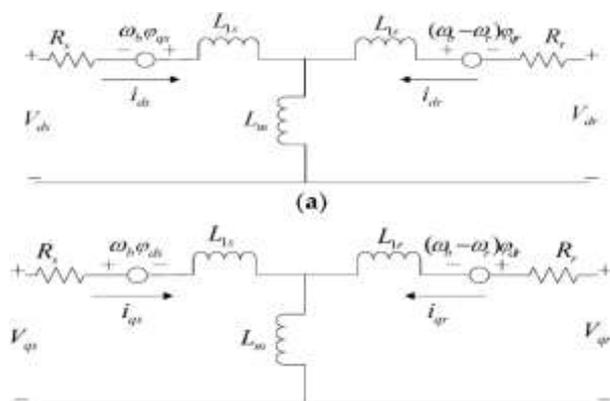


الشكل (3): خصائص طاقة التوربين.

باستخدام الشكل (2) والمعادلة (5) تم الحصول على العلاقة بين عزم الدوران الميكانيكي (T_m) وزوايا الميل (β) وسرعة الدائر (w_r) كما هو موضح في الشكل (4). نلاحظ من المعادلة (5) إن الاستطاعة الميكانيكية (P_m) للتوربين الريحي تعتمد على كل من معامل الاستطاعة (C_p) و (w_r) ، ولكن مولدات القفص السنجابي ذات السرعة الثابتة نطاق تغير (w_r) لها صغير جداً أقل من 1% [11]. انطلاقاً من ذلك، نجد أن اختلاف الاستطاعة الميكانيكية يعتمد فقط على معامل الاستطاعة $C_p(\lambda, \beta)$ الذي يتغير مع نسبة السرعة الطرفية (λ) وزاوية الميل (β) .



الشكل (4): عزم الدوران الميكانيكي مقابل سرعة الدائر.



الشكل (5): النظام المرجعي للمولد التحريضي: (a) المحور d، (b) المحور q.

L_m المحارضة المتبادلة بين الملفات، ω_b (rad/s): السرعة التزامنية، ω_r (rad/s): السرعة الزاوية الكهربائية، R_r, R_s مقاومة كل من ملفات الثابت والدائر على التوالي.

يتم التعبير عن معادلة العزم الكهربائي على النحو التالي:

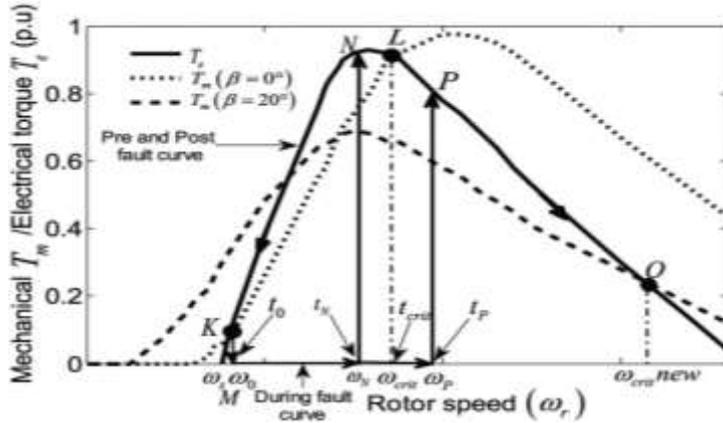
$$T_e = \varphi_{qs} i_{qs} - \varphi_{as} i_{as} \quad (6)$$

1.3 مفهوم سرعة الدائر الحدية:

هناك قيمة حدية لسرعة دائر FSIG بعد حدوث عطل عابر، حيث بعدها يصبح IG غير مستقر ويفصل عن الشبكة. يتم التعبير عن التوازن الميكانيكي الكهربائي لـ IG من خلال العلاقة التالية

$$\frac{dwr}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e) \quad (7)$$

حيث H هو ثابت العطالة (sec) وهو محدد تصميمي يؤخذ من النشرات الفنية للشركات الصانعة للمولدات. باستخدام المعادلتين (5) و (6)، يمكن رسم عزم الدوران الميكانيكي والكهربائي مقابل سرعة الدائر كما هو موضح في الشكل (6).



الشكل (6): خصائص T_m و T_e مقابل سرعة الدائر.

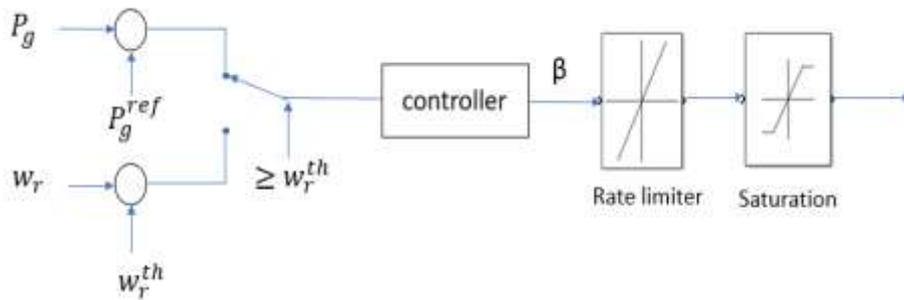
نلاحظ من الشكل (6)، يكون IG في نقطة تشغيل K عند حدوث عطل في الوقت t_0 ، فينخفض عزم الدوران الكهربائي T_e فجأة إلى الصفر ونقطة تشغيل المولد تنتقل من K إلى M حيث تكون سرعة الدائر w_0 . بسبب ذلك، فإن عزم الدوران الميكانيكي الزائد T_m بدون تحكم في زوايا الميل ($\beta = 0$) يتسبب في تسارع الدائر IG والبدء في الزيادة (أثناء منحنى العطل).

● عند t_N ، يتم عزل العطل تنتقل نقطة تشغيل المولد إلى النقطة N، حيث يكون ($T_m < T_e$)، مما يؤدي إلى تباطؤ سرعة الدائر وبالتالي يعود المولد إلى نقطة التشغيل الأولية K ومنه نجد أن IG سيبقى مستقرًا في حال تم إصلاح العطل قبل السرعة الحدية للدائر w_{crit} .

● إذا لم يتم عزل العطل قبل الوقت الحدي t_{crit} المقابلة إلى w_{crit} ، فإن w_r ستزداد أكثر، إذا تم عزل العطل عند t_p ، تنتقل نقطة تشغيل المولد T_e إلى النقطة P حيث يكون ($T_e < T_m$)، مما يؤدي إلى تسارع الدائر أي يصبح IG غير مستقر. في هذه الحالة، يُلاحظ من الشكل (6) أنه من خلال زيادة زاوية الميل بمقدار $\beta = 20^\circ$ ، يتم تقليل عزم الدوران الميكانيكي إلى ما دون عزم الدوران الكهربائي ليحافظ النظام على ثباته، وبالتالي فإن تقاطع T_m و T_e عند النقطة O يوفر السرعة الحدية الجديدة ($w_{critnew}$).

نستنتج أنه من خلال وحدة التحكم بزوايا الميل يمكن زيادة β لتحسين حدود الاستقرار للتوربين الريحي عن طريق التخفيض المؤقت لعزم الدوران الميكانيكي T_m ، أي يمكن رفع السرعة الحدية من w_{crit} إلى $w_{critnew}$.

2. تصميم وحدة التحكم في زاوية ميل الشفرات في وضعي التحكم في الطاقة والسرعة



الشكل (7): وحدة تحكم في زاوية الميل في وضعي التحكم في الطاقة والسرعة.

يظهر الرسم التخطيطي لنظام التحكم في زاوية الميل في الشكل (7). عندما تتجاوز سرعة الرياح القيمة المحددة، يحد جهاز التحكم في زاوية الميل من القيمة الديناميكية الهوائية للحفاظ على طاقة خرج المولد بقيمتها المحددة، يمر الفرق بين الاستطاعة المقاسة (P_g) والاستطاعة المرجعية (P_g^{REF}) عبر وحدة التحكم التي تنظم طاقة الخرج وفقاً للخطأ (ε) عن طريق توليد زاوية ميل مناسبة. من أجل الحصول على استجابة واقعية من نظام التحكم في الميل، تم ضبط نطاق التنظيم لزاوية الميل ومعدل الميل على $\pm 2^\circ/s$ و $0^\circ - 45^\circ$ على التوالي.

يمكن تشغيل وحدة التحكم الموضحة في الشكل (7) في وضعي تحكم (الطاقة والسرعة) من أجل تحقيق المهام المذكورة أعلاه بشكل فعال. حيث يحدد وضع التشغيل لوحدة التحكم باستخدام مفتاح الاختيار. تعمل وحدة التحكم في وضع التحكم في الطاقة مع ضبط المفتاح على الدخل 1 عندما تتجاوز سرعة الرياح سرعتها المحددة للحفاظ على طاقة خرج المولد عند القيمة المحددة. ومع ذلك، إذا زادت سرعة الدائر للمولد التحريضي عن السرعة الحدية (W_r^{th}) بسبب اضطرابات الشبكة، يتم تلقائياً ضبط دخل وحدة التحكم على 2، ونتيجة لذلك، يعمل وضع التحكم في السرعة لتحقيق زيادة الاستقرار العابر من خلال توليد زاوية الميل المناسبة.

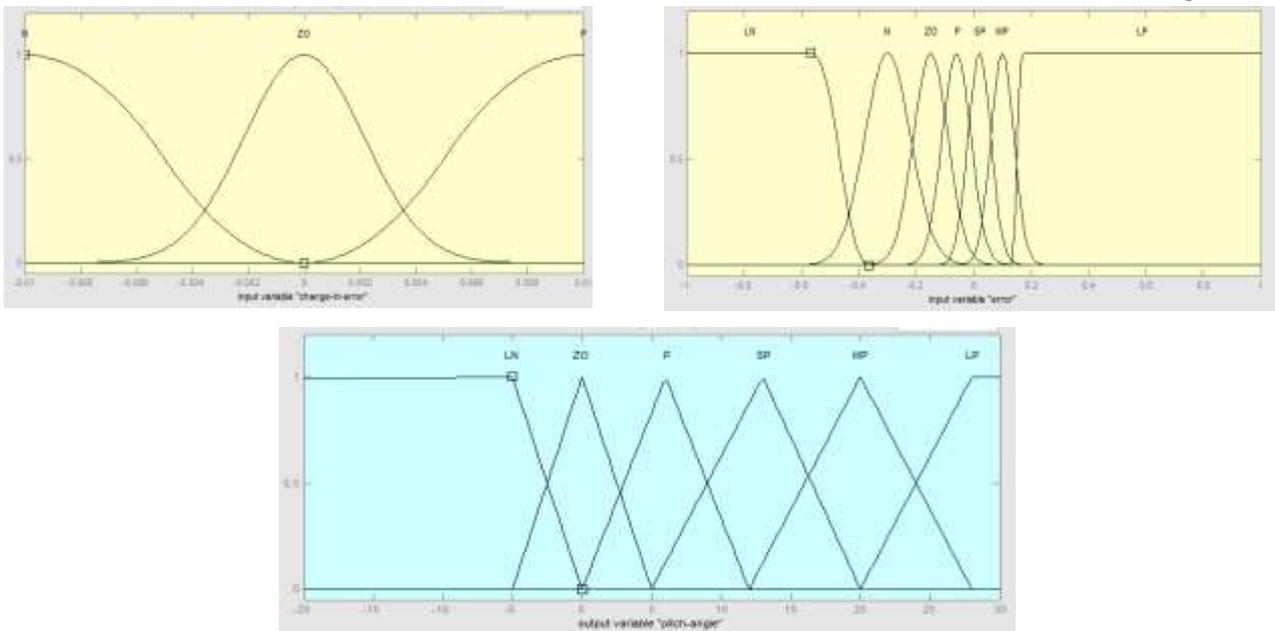
2.1. تصميم وحدة تحكم (PI) للتحكم بزواوية الميل للشفرات

تم تصميم وحدة تحكم PI لتوليد زوايا ميل مناسبة لشفرات التوربين الريحي، حيث تم تحديد ثوابت ربح وحدة التحكم $K_i=25, K_p=5$ بالطريقة التجريبية. على الرغم من أن هذه الطريقة لها بنية بسيطة واستجابة أفضل للحالة المستقرة وسهلة التنفيذ، إلا أنها تظهر استجابة ضعيفة بسبب ثوابت ربح وحدة التحكم الثابتة. لذلك تم تصميم وحدة التحكم بالمنطق الضبابي.

2.2. تصميم وحدة تحكم بالمنطق الضبابي Fuzzy logic للتحكم بزواوية الميل للشفرات

يستخدم التحكم الضبابي بشكل فعال عندما تكون ديناميكية النظام غير معروفة بشكل جيد حيث لا تتطلب النموذج الرياضي للنظام أو عندما يكون النظام يعتمد اللاخطية كاضطراب الرياح غير المستقر، حيث يعمل التحكم الضبابي على تقليل الحمل على الشفرات.

إن المزايا الأكبر للتحكم الضبابي عند تطبيقه على عنفة ريحية هو أنه لا داعي لوصف نظام العنفة بدقة ولا يحتاج إلى أن يكون خطياً.



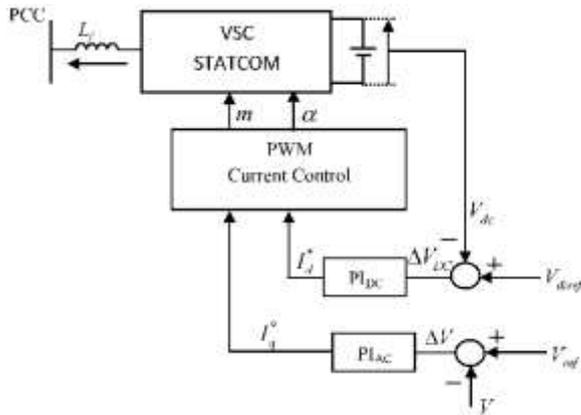
الشكل (8): توابع الانتماء للتحكم الضبابي بزواوية ميل الشفرات.

الجدول (1) قواعد التحكم للمتحكم الضبابي بزواوية ميل الشفرات.

	LN	N	ZO	P	SP	MP	LP
N	LN	LN	LN	ZO	P	SP	MP
ZO	LN	LN	ZO	P	SP	SP	LP
P	LN	LN	P	SP	MP	LP	LP

N: negative; ZO: zero; P: positive; LN: large negative; SP: small positive; MP: medium positive; LP: large positive

3. المعوض المتواقت الساكن (STATCOM) Static Compensator



الشكل (9): مخطط التحكم بالمعوض المتواقت الساكن STATCOM.

يظهر نموذج STATCOM في الشكل (9)، حيث يتكون STATCOM من مبدلة من جهد VSC مع مكثف على جانب وصلة التيار المستمر من المبدل. إذا كان جهد الشبكة أكبر من جهد جهاز STATCOM فإن الجهاز يولد استطاعة رديه تحريضية وإذا كان جهد الشبكة أصغر من جهد جهاز STATCOM فإنه يولد استطاعة رديه سعويه وإذا تساوى جهد الشبكة مع جهد جهاز STATCOM عندها لا يوجد أي تحكم بالاستطاعة الردية.

حيث تتم مقارنة جهد خط التيار المتناوب (V) مع الجهد المرجعي (V_{ref})، ويتم تمرير قيمة الخطأ من خلال وحدة التحكم PI_{AC} ، ليحدد (I_q^*) خرج وحدة التحكم مقدار الطاقة الردية التي سيتم توليدها بواسطة STATCOM. من أجل دعم خط ناقل DC STATCOM، تتم مقارنة جهد خط التيار المستمر (V_{DC}) مع الجهد المرجعي (V_{dcref})، ويتم تمرير قيمة الخطأ عبر وحدة تحكم أخرى (PI_{DC})، ليحدد (I_d^*) خرج وحدة التحكم مقدار تعويض الطاقة الفعلية. مكاسب وحدات التحكم PI ($K_{Iac} = 1000$ ، $K_{pac} = 5$ و $K_{pdc} = 0.001$ ، $K_{Idc} = 0.2$) من STATCOM في نقطة تشغيل محددة من أجل تحقيق أداء جيد عندما يتعرض النظام لاضطرابات صغيرة وكبيرة.

3. مؤشر الأداء

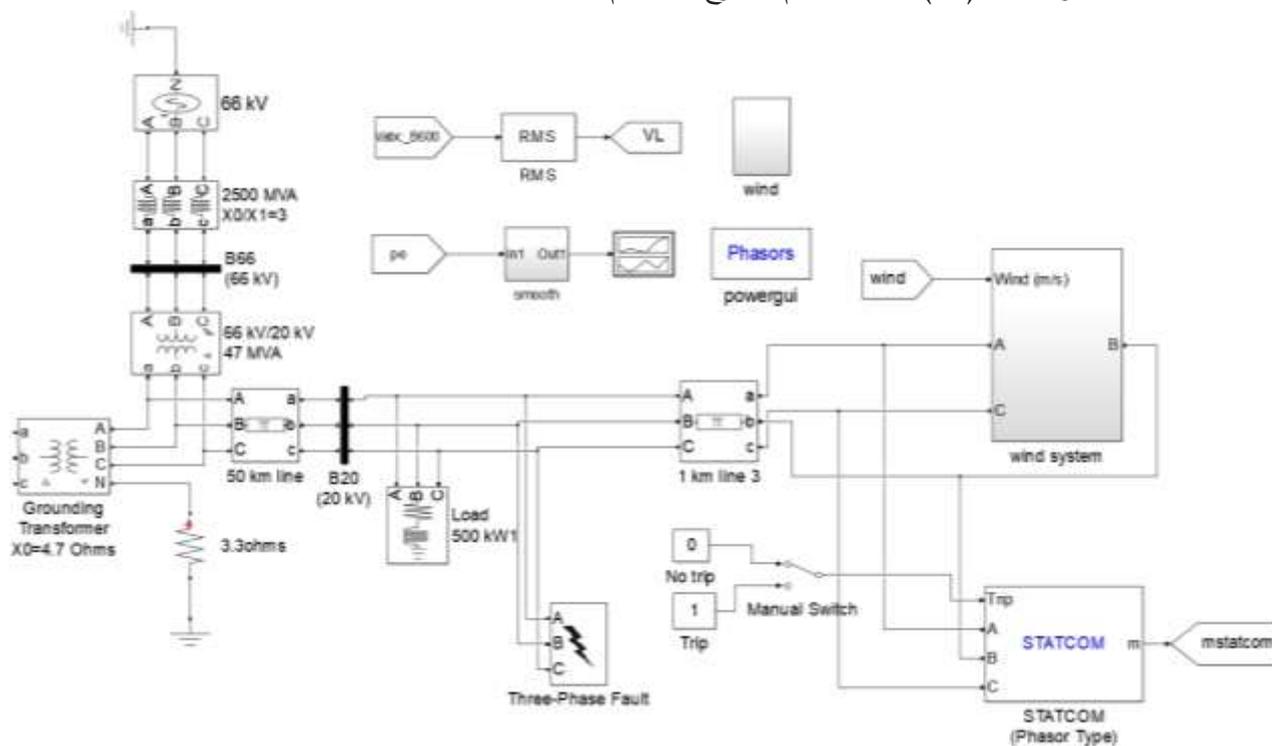
لتقييم أداء وحدة التحكم المقترحة، تم حساب وظائف وتجانس طاقة الخرج P_{smooth} على النحو التالي [14]:

$$P_{smooth} = \int_0^T \left| \frac{dp_g(t)}{dt} \right| dt \quad (8)$$

حيث، p_g هي طاقة الخرج المتولدة و T هي إجمالي وقت المحاكاة. P_{smooth} هو تكامل طاقة الخرج المتولدة (p_g) بالقيمة المطلقة، بالتالي، إذا كانت قيمة P_{smooth} منخفضة، هذا يشير إلى أن تذبذبات طاقة الخرج المتولدة تم تخفيضها بشكل كبير.

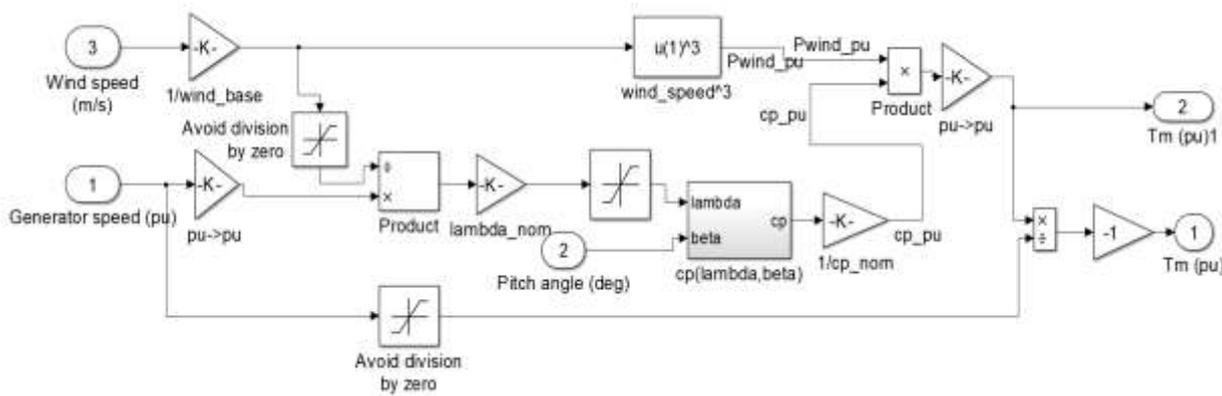
4. نمذجة النظام باستخدام matlab / simulink

يظهر الشكل (10) نمذجة النظام المقترح باستخدام Matlab\simulink.



الشكل (10): النموذج الرئيسي الشامل للنظام المقترح باستخدام Matlab\simulink.

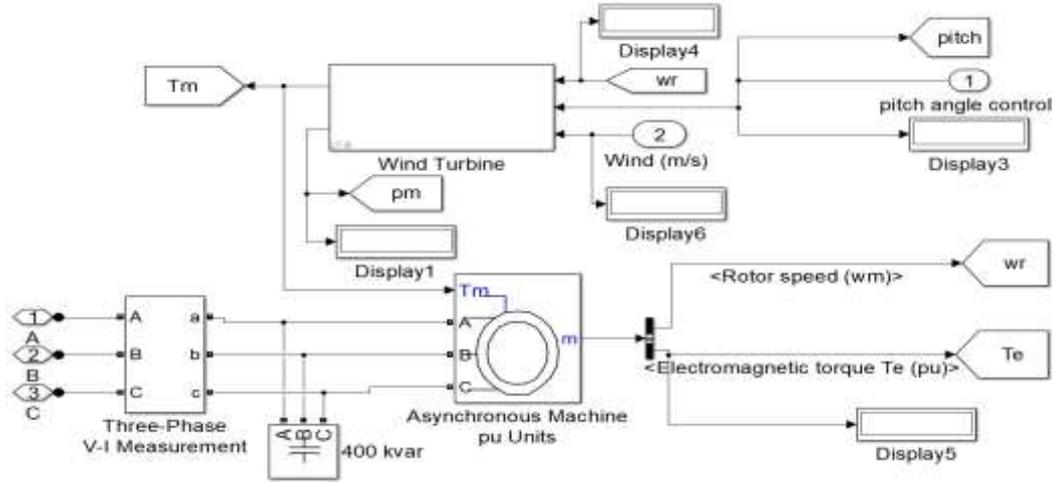
يظهر الشكل (11) نمذجة التوربين الريحي باستخدام Matlab\simulink.



الشكل (11): نمذجة التوربين الريحي باستخدام Matlab\simulink.

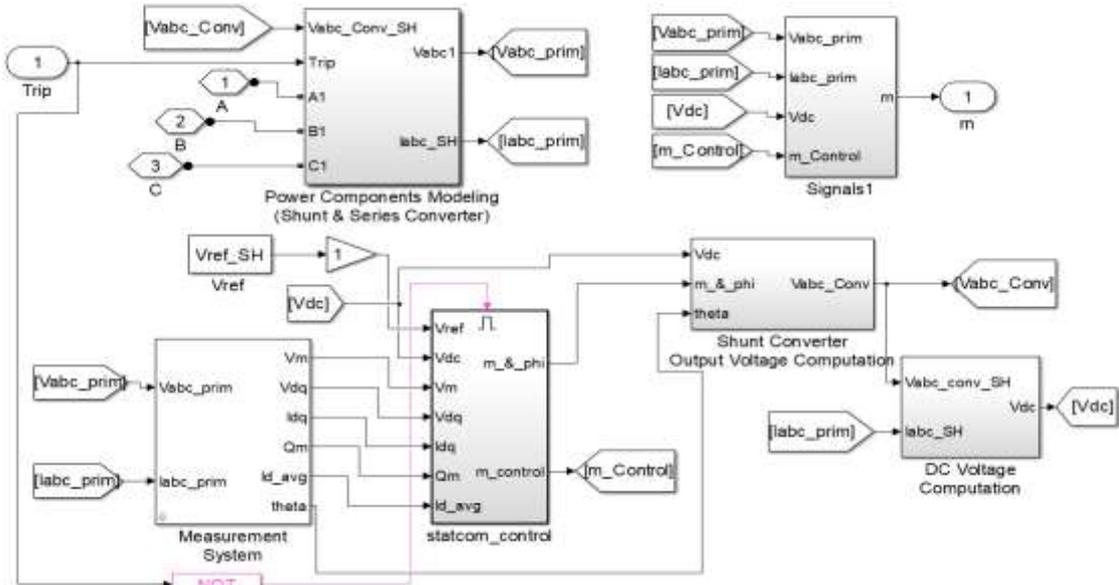
يظهر الشكل (12) نمذجة SCIG مع التوربين الريحي المتصل مع الشبكة الكهربائية باستخدام

Matlab\simulink.



الشكل (12): نمذجة SCIG مع التوربين الريحي المتصل مع الشبكة الكهربائية باستخدام Matlab\simulink.

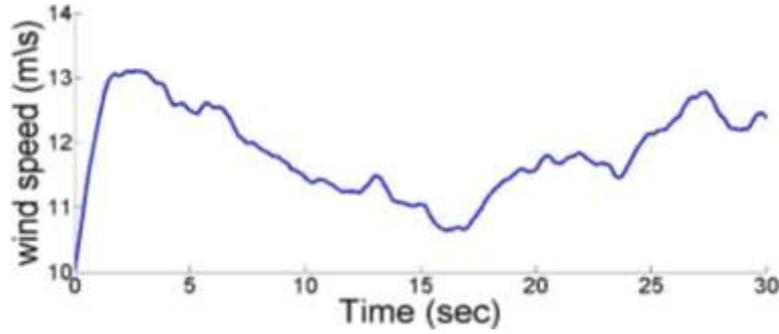
يظهر الشكل (13) نمذجة STATCOM باستخدام Matlab\simulink.



الشكل (13): نمذجة STATCOM باستخدام Matlab\simulink.

نتائج المحاكاة والمناقشة

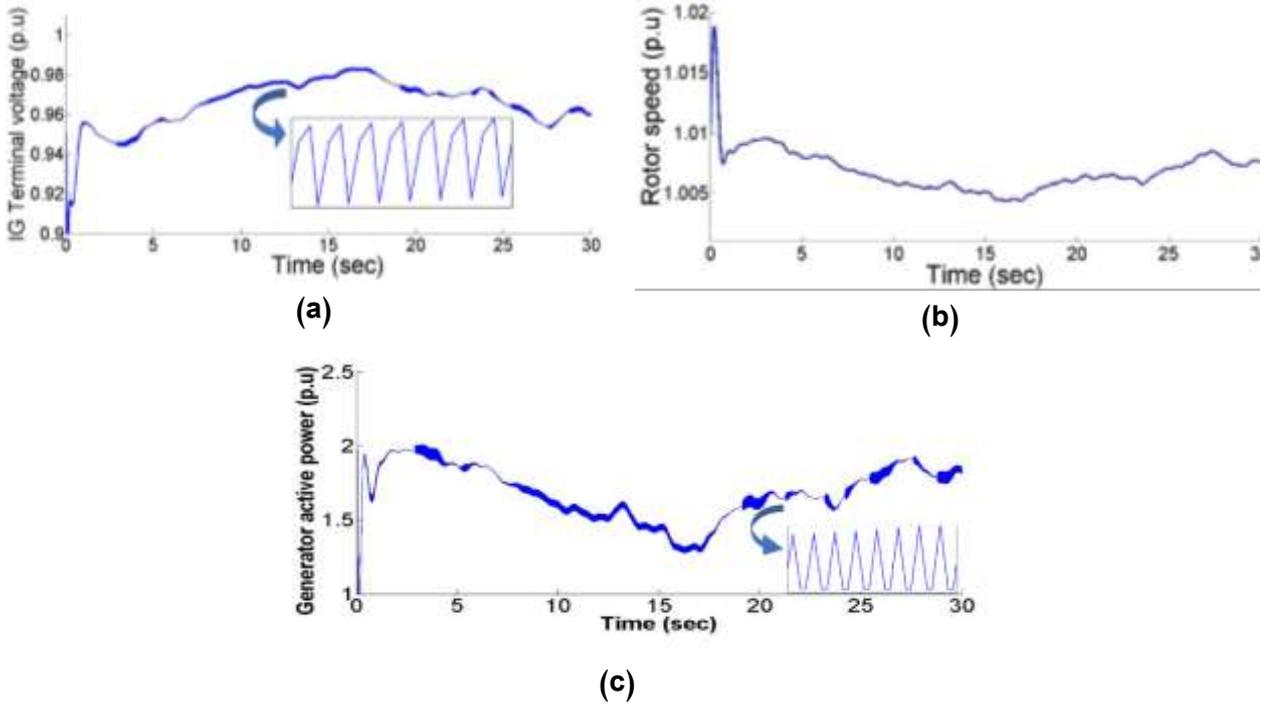
لتقييم فعالية استراتيجية التحكم المستخدمة، تم دراسة الحالات الثلاث التالية: النظام بدون تعويض (أي بدون STATCOM ووحدة تحكم بزواية الميل)، النظام مع STATCOM، النظام مع STATCOM ووحدة التحكم بزواية الميل. من أجل مراقبة تجانس الطاقة والقدرة على تنظيم الجهد التي ساهمت بها وحدة التحكم المقترحة، بالاعتماد على نظام الاختبار المبين في الشكل (1). يوضح الشكل (14) بيانات سرعة الرياح المستخدمة في المحاكاة عندما تكون سرعة الرياح أقل وأعلى من السرعة الاسمية 12m/s .



الشكل (14): تغير سرعة الرياح مع الزمن.

الحالة 1: النظام بدون تعويض أو تحكم

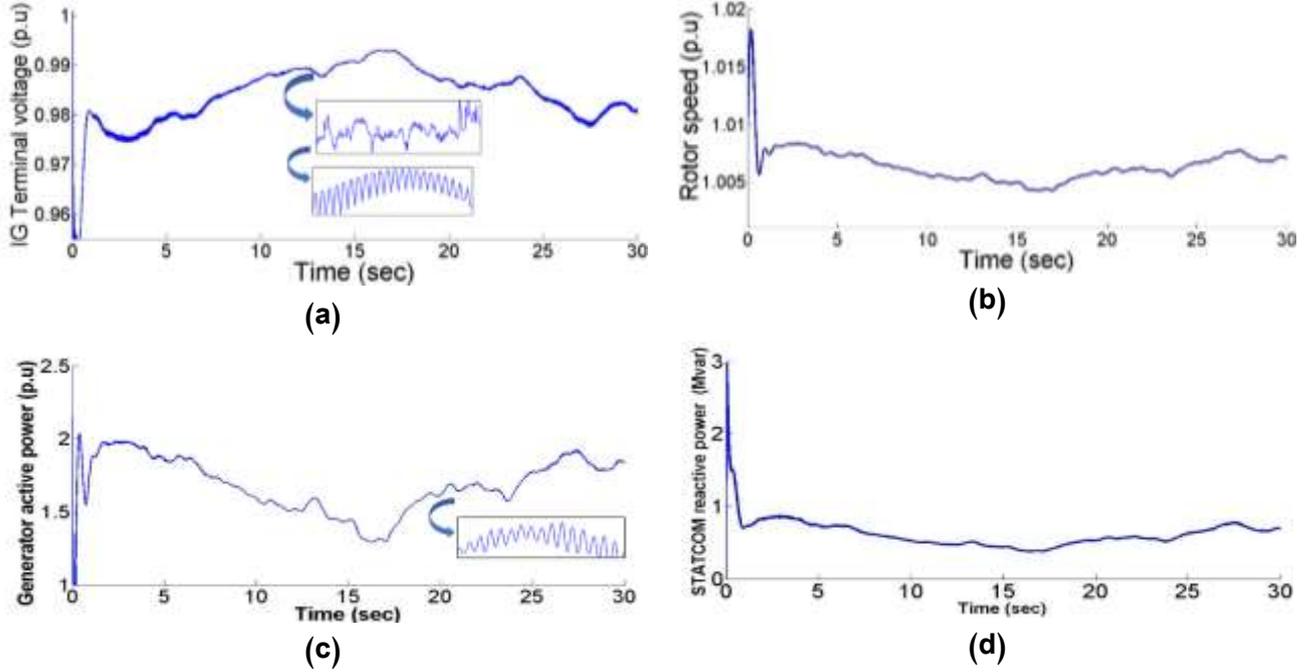
تمت نمذجة النظام بدون تعويض أو تحكم (أي من دون STATCOM ووحدة التحكم بزواوية الميل) في ظل تغير سرعة الرياح، حيث يوضح الشكل (15a) التذبذب الكبير للجهد المولد خلال الزمن. الشكل (15b) يبين القيمة الأقصى لارتفاع سرعة الدائر حيث بلغت 1.01 p.u، كما يوضح الشكل (15c) الاستطاعة الفعلية المُولدة ويظهر بشكل واضح مقدار انخفاض الاستطاعة بشكل كبير عند انخفاض سرعة الرياح من اللحظة 10sec حتى اللحظة 20sec.



الشكل (15): الاستجابة الديناميكية للنظام في ظل اضطراب سرعة الرياح (بدون تعويض استطاعة رديية أو تحكم) (a) جهد المولد، (b) سرعة الدائر للمولد، (c) الاستطاعة الفعلية للمولد.

الحالة 2: النظام مع المعوض STATCOM لتعويض الاستطاعة الرديية

تم استخدام STATCOM وتوصيله بنقطة PCC ودمجه مع نظام طاقة الرياح المدروس. يوضح الشكل (16) الاستجابات الديناميكية للنظام في ظل تغير سرعة الرياح.



الشكل (16): الاستجابة الديناميكية للنظام في ظل اضطراب سرعة الرياح مع تعويض استطاعة ردية، (a) جهد المولد، (b) سرعة الدائر، (c) الاستطاعة الفعلية للمولد، (d) الاستطاعة الردية المعوضة من STATCOM.

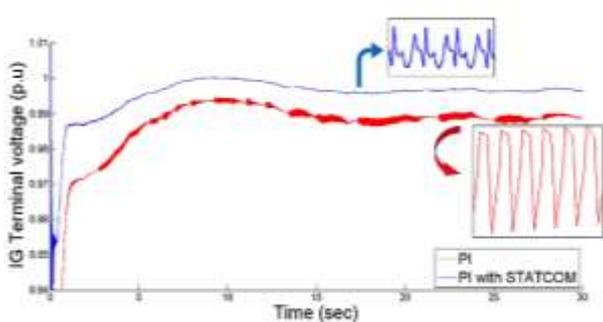
يوضح الشكل (16a) تنظيم تذبذب الجهد الناتج عن تغير سرعة الرياح. بالتالي، يحقق اتصال آمن للتوربين الريحي مع الشبكة. على الرغم من أن STATCOM يحسن تذبذبات الجهد بسبب تغيرات سرعة الرياح من خلال التعويض السريع للاستطاعة الردية، إلا أنه لا يملك أي قدرة على التحكم في الاستطاعة الفعلية. نتيجة ذلك، تتبع طاقة خرج المولد تغيرات سرعة الرياح نظراً لعدم استخدام وحدة تحكم في زاوية الميل وتعرض للتقلبات مسببة مشاكل في استقرار الشبكة كما هو موضح في منحنى استطاعة المولد في الشكل (16c). التعويض الردي انعكس إيجاباً على سرعة الدائر واستطاع تخفيض القيمة الأقصى لارتفاع سرعة الدائر إلى القيمة $1.008p.u$. مقدار تعويض الاستطاعة الردية الذي يؤمنه STATCOM لتنظيم جهد المولد موضح في الشكل (16d)، حيث بلغ أقصى قيمة للتعويض الردي $0.86 Mvar$.

الحالة 3: النظام في حالة الاضطراب الديناميكي بعد إضافة المعوض STATCOM مع وحدة التحكم بزوايا ميل الشفرات

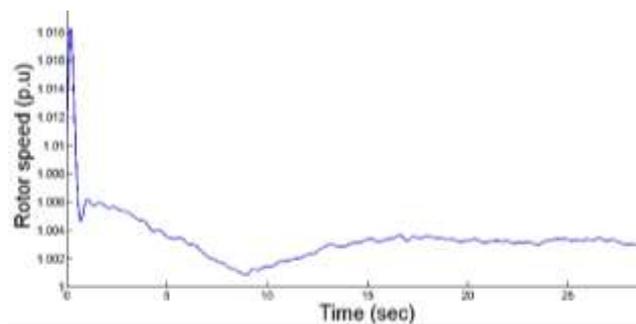
ميل الشفرات

(A) تصميم وحدة PI للتحكم بزوايا ميل الشفرات

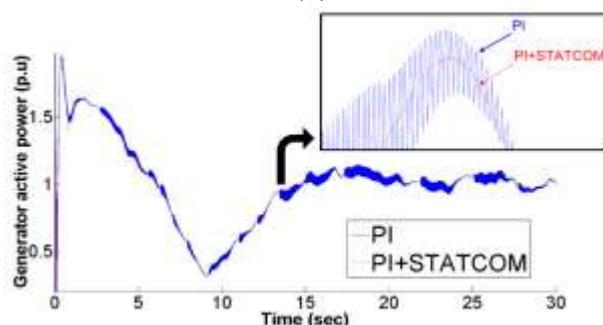
تم تصميم وحدة تحكم بزوايا الميل باستخدام متحكم PI مع مزامنة إضافة STATCOM لتعويض الاستطاعة الردية أثناء حدوث الاضطراب الريحي.



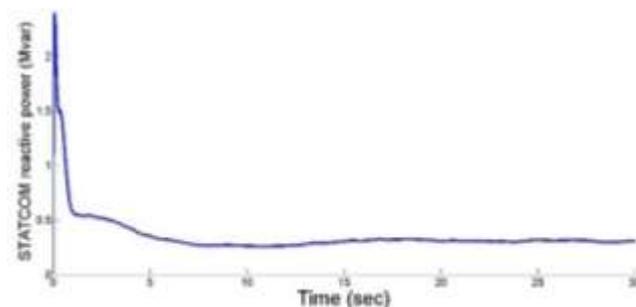
(a)



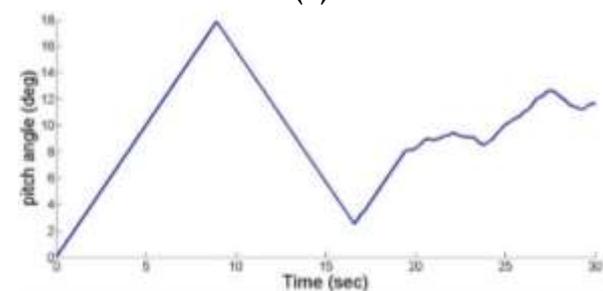
(b)



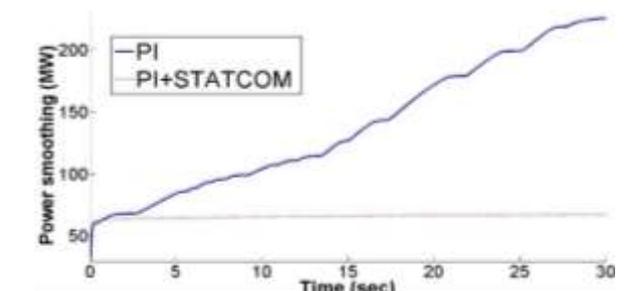
(c)



(d)



(e)



(f)

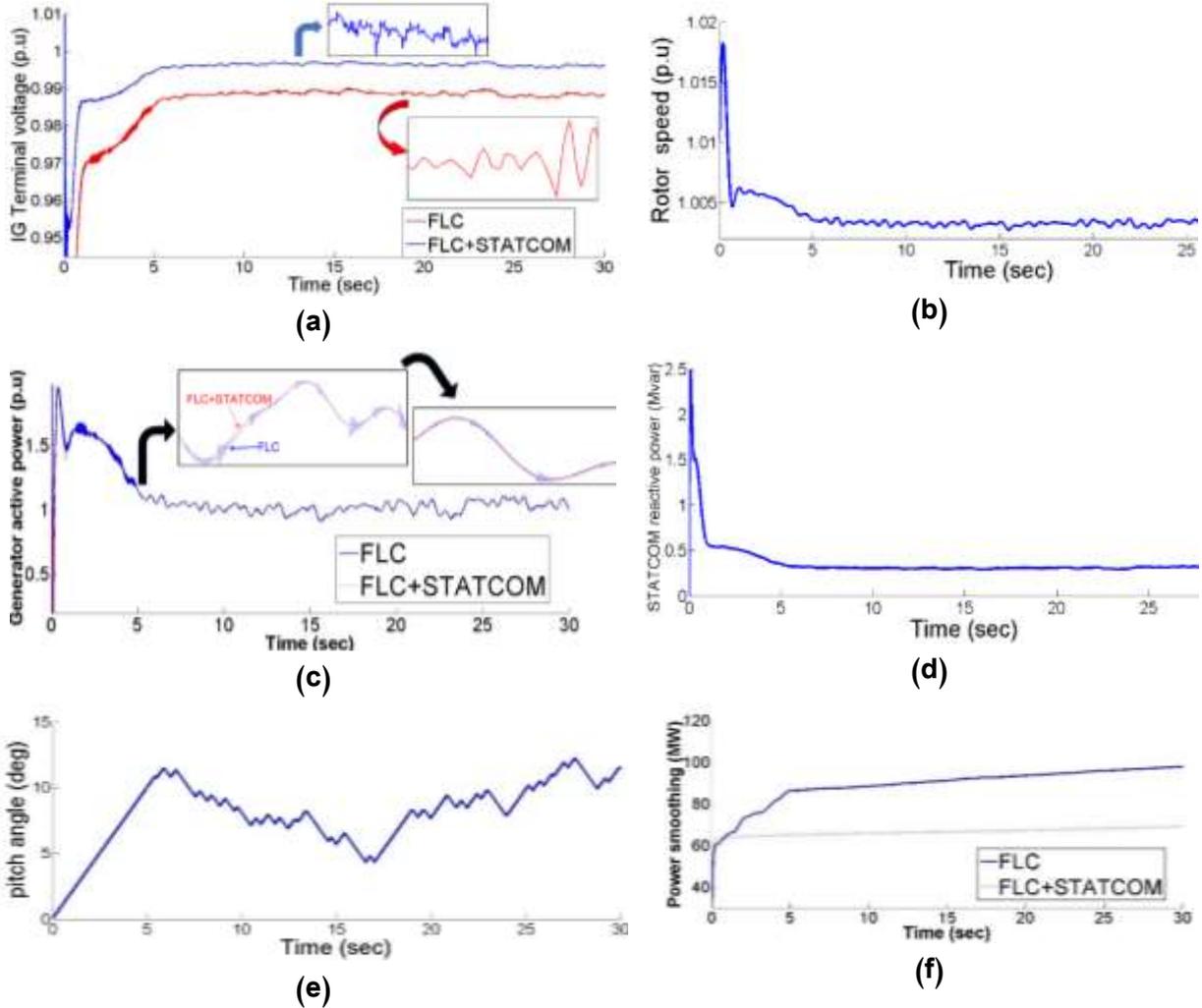
الشكل (17): الاستجابة الديناميكية للنظام في ظل اضطراب سرعة الرياح مع تصميم متحكم FLC-PI للتحكم بزوايا ميل الشفرات بالمزامنة مع دراسة تأثير إضافة STATCOM، (a) جهد المولد، (b) سرعة الدائر، (c) الاستطاعة الفعلية للمولد، (d) الاستطاعة الردية المعوضة من STATCOM، (e) زاوية ميل الشفرات، (f) مؤشر الأداء.

نلاحظ من الشكل (17a) تأثير وحدة PI على استقرار الجهد بالمقارنة مع الحالتين السابقتين كما نلاحظ مدى التأثير الكبير ل STATCOM في تقليل تذبذب الجهد بشكل كبير، ولكن على الرغم من تحسين الاستجابة بالمقارنة مع النتائج السابقة إلا أن وحدة PI لاتزال تنتج تذبذب بالجهد واضطراب من اللحظة 6sec حتى اللحظة 14sec. كما نلاحظ من الشكل (17b) استطاعت وحدة PI تخفيض القيمة الأقصى لسرعة الدائر إلى القيمة 1.006p.u. الشكل (17c) يوضح أن الاستطاعة

الفعلية تحسنت بمقدار ضئيل إلا أن لا يزال هناك وجود تذبذب دائم كما نلاحظ وجود اضطراب كبير من اللحظة 6sec حتى اللحظة 14sec. أن انحراف زاوية ميل الشفرات الموضح في الشكل (17e) أدى إلى تخفيض القيمة اللازمة ل STATCOM من أجل تعويض الاستطاعة الردية وتنظيم الجهد، حيث من الشكل (17d) نجد أقصى قيمة لتعويض STATCOM بلغت 0.5Mvar. كما يظهر الشكل (17f) مؤشر أداء النظام بلغ قيمة (225.9MW) عند الزمن 30 بعد إضافة وحدة التحكم بزوايا الميل كذلك يوضح تأثير إضافة STATCOM من خلال انخفاض مؤشر الاداء.

(B) تصميم وحدة FLC للتحكم بزوايا ميل الشفرات

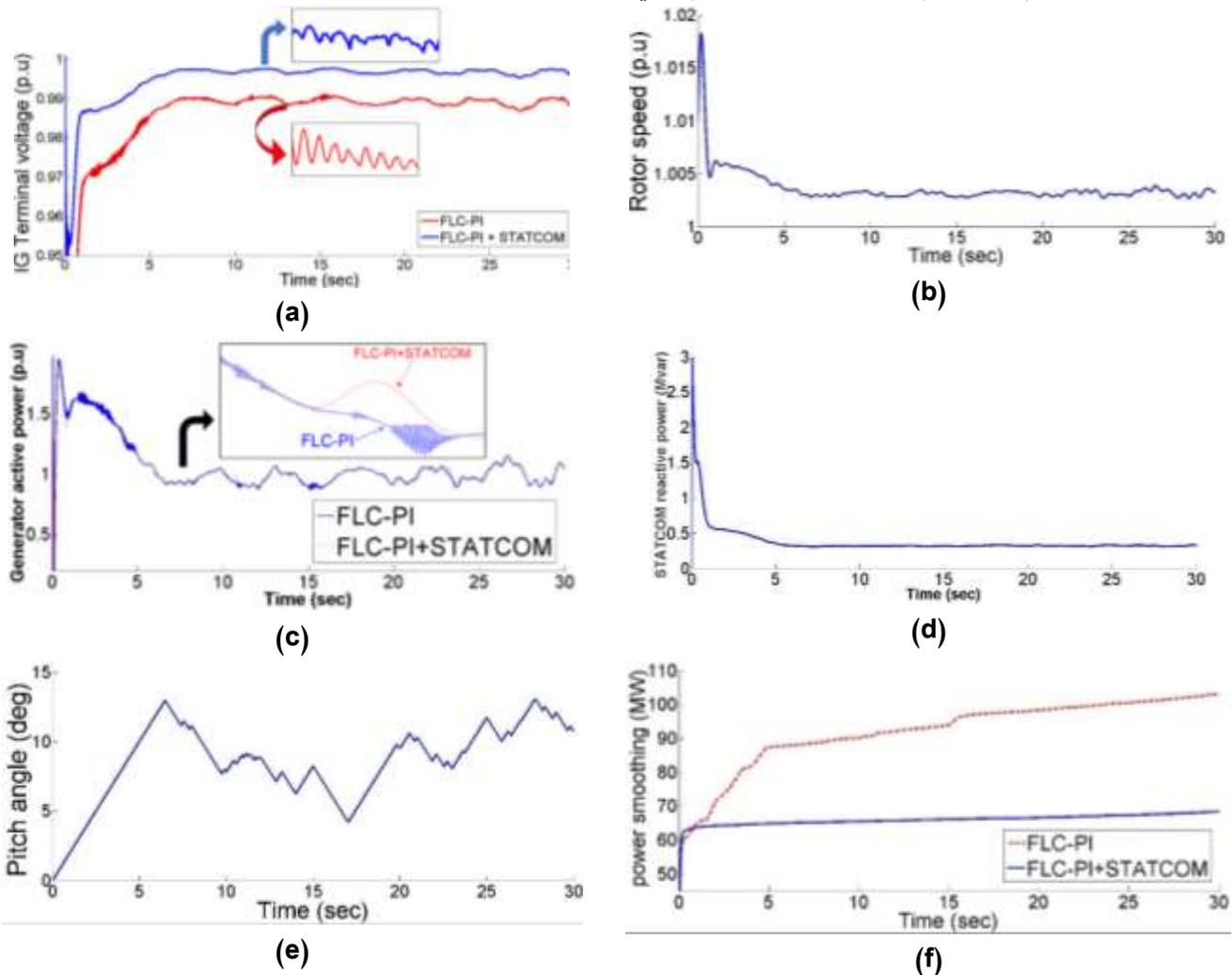
بسبب طبيعة سرعة الرياح المتغيرة بشكل لاخطي تم الاعتماد على مُتحكم FLC للتحكم بزوايا الميل ، حيث يعمل التحكم الضبابي على تقليل الحمل على الشفرات والحصول على استجابة أكثر استقراراً ديناميكي.



الشكل (18): الاستجابة الديناميكية للنظام في ظل اضطراب سرعة الرياح مع تصميم مُتحكم FLC للتحكم بزوايا ميل الشفرات بالمزامنة مع دراسة تأثير إضافة STATCOM. (a) جهد المولد، (b) سرعة الدائر، (c) الاستطاعة الفعلية للمولد، (d) الاستطاعة الردية المعوضة من STATCOM، (e) زاوية ميل الشفرات، (f) مؤشر الأداء.

يؤكد الشكل (18a) تأثير وحدة FLC على استقرار الجهد وتقليل قيمة التذبذبات بالمقارنة مع وحدة PI بالإضافة لذلك قدرتها على التغلب على الاضطراب الذي أحدثته وحدة PI بين اللحظة 6sec حتى اللحظة 14sec، كما نلاحظ مدى تأثير STATCOM على تقليل تذبذب الجهد بشكل أكبر وزيادة الاستقرار بشكل كبير، كما نلاحظ من الشكل (18b) استقرار سرعة الدائر والتغلب على الاضطراب الناتج من وحدة PI، مما انعكس بشكل إيجابي على الاستطاعة الفعلية كما هو موضح في الشكل (18c). نلاحظ من الشكل (18d) أن أقصى قيمة لتعويض STATCOM لاتزال ثابتة على 0.5Mvar هذا يؤكد تأثير المتحكم FLC على تحسين الاستقرار الديناميكي بشكل كبير بمعزل عن إضافة STATCOM. يوضح الشكل (18e) انحراف زاوية ميل الشفرات بشكل مستمر مع الزمن. كما يؤكد انخفاض مؤشر الأداء في الشكل (18d) إلى القيمة 97.9MW عند الزمن 30 على زيادة الاستقرار الديناميكي.

(C) تصميم وحدة FLC-PI للتحكم بزاوية ميل الشفرات

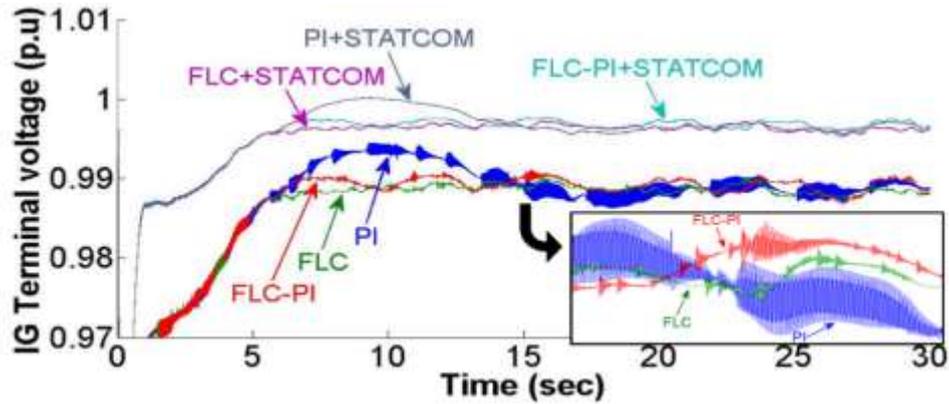


الشكل (19): الاستجابة الديناميكية للنظام في ظل اضطراب سرعة الرياح مع تصميم متحكم FLC-PI للتحكم بزاوية ميل الشفرات بالمزامنة مع دراسة تأثير إضافة STATCOM، (a) جهد المولد، (b) سرعة الدائر، (c) الاستطاعة الفعلية للمولد، (d) الاستطاعة الرديية المعوضة من STATCOM، (e) زاوية ميل الشفرات، (f) مؤشر الأداء.

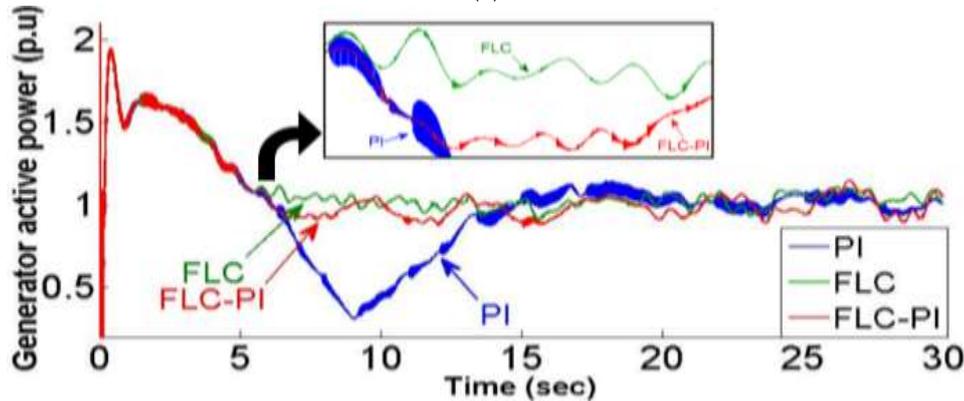
يظهر الشكل (19a) تأثير وحدة FLC-PI على استقرار الجهد حيث قدمت استجابة قريبة من استجابة وحدة التحكم FLC ولكن أكثر تذبذب أي أقل استقرار ديناميكي. كما نلاحظ من الشكل (19b) استقرار أقل لسرعة الدائر من وحدة FLC لكن

تم التغلب على الاضطراب الناتج من وحدة PI، الشكل (19c) يوضح الاستطاعة الفعلية وزيادة الاضطراب قليلاً بالمقارنة مع FLC ومدى تأثير STATCOM على التغلب على الاضطراب وزيادة الاستقرار. نلاحظ من الشكل (19d) أن أقصى قيمة لتعويض STATCOM ارتفعت إلى 0.57Mvar. كما يوضح الشكل (19e) انحراف زاوية ميل الشفرات الموافق لهذا المتحكم. كما يؤكد ارتفاع مؤشر الأداء في الشكل (19f) إلى القيمة 103.1MW عند الزمن 30 على تفوق تصميم وحدة التحكم FLC على جميع وحدات التحكم المصممة في الحصول على أفضل استقرار ديناميكي للنظام المدروس.

بعد دراسة استجابة النظام مع أنظمة التحكم بزوايا ميل الشفرات (PI, FLC, FLC-PI) في ظل تغير سرعة الرياح الموضحة في الشكل (14). يوضح الشكل (20a) أهمية تأثير STATCOM مع جميع وحدات التحكم لما له دور فعال في التعويض الردي، كما يؤكد أن FLC قدمت أفضل استجابة حيث قلّت بشكل كبير وملحوظ الاضطراب والتذبذبات الناتجة لتعطي أفضل استقرار ممكن للجهد مما يؤمن اتصال أمن للتوربين مع الشبكة. يبين الشكل (20b) الاستطاعة الناتجة ومدى تأثير استخدام FLC للتحكم في زاوية ميل الشفرات على تخفيف الاضطراب والتذبذب بشكل كبير بالمقارنة مع أنظمة التحكم الأخرى.



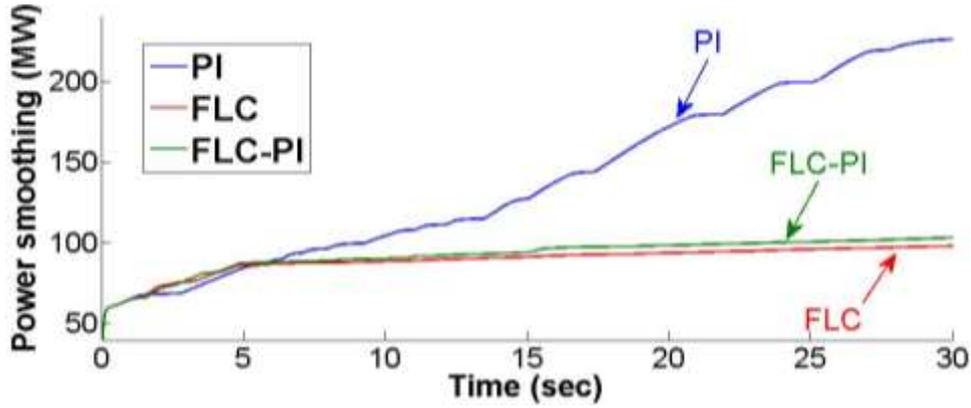
(a)



(b)

الشكل (20): (a) الجهد الناتج من المولد مع أنظمة التحكم بزوايا ميل الشفرات (PI, FLC, FLC-PI) مع وبدون إضافة STATCOM، (b) الاستطاعة الناتجة من المولد مع أنظمة التحكم بزوايا ميل الشفرات (PI, FLC, FLC-PI).

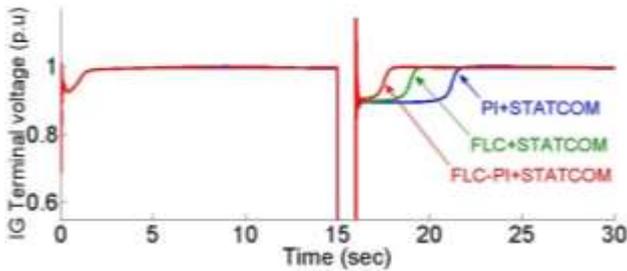
لدراسة تقييم أداء تقييم وحدات التحكم بزوايا ميل الشفرات في ظل تغير سرعة الرياح الموضحة في الشكل (14)، وبمعزل عن وجود STATCOM لتأكيد النتائج السابقة من خلال حساب P_{smooth} لوحدات التحكم الثلاث. من نتائج المحاكاة الموضحة في الشكل (21) نجد أن وحدة FLC حققت أقل قيمة عند نهاية زمن النمذجة وهذا يشير إلى أن تقلبات طاقة الخرج تم تخفيضها بشكل أكبر لنحقق أفضل استقرار، كما يوضح الجدول (2) قيم P_{smooth} لوحدات التحكم الثلاث عند الزمن 30sec.



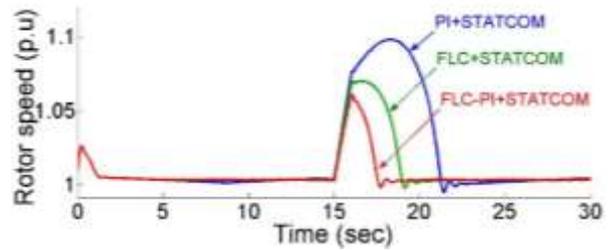
الشكل (21): مؤشر الأداء للنظام المدروس في حالة اضطراب ديناميكي.
الجدول (2) قيمة مؤشر الأداء لوحدات التحكم (PI, FLC, FLC-PI) عند الزمن 30sec.

PI	FLC	FLC-PI
225.9 MW	97.9 MW	103.1 MW

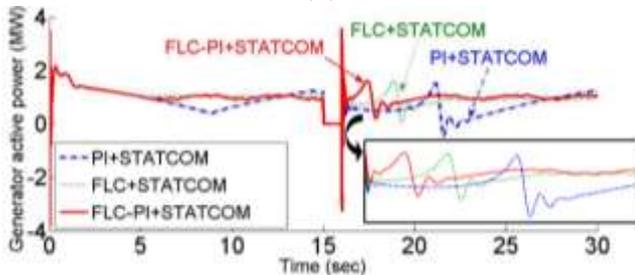
الحالة 4: النظام في حالة الخطأ العابر بعد إضافة المعوض STATCOM مع وحدة التحكم بزوايا ميل الشفرات تم التحقق من الأداء العابر للتوربينات الريحية مع وحدات التحكم (PI, FLC, FLC-PI) بعد إضافة STATCOM. في البداية تم افتراض أن سرعة الرياح ثابتة 12m/s، وتم تطبيق عطل ثلاثي الطور مع أرضي من اللحظة 15sec إلى اللحظة 16sec. بعد حدوث العطل، ازدادت سرعة الدائر للمولد الريحي بسرعة، وعندما تجاوزت سرعة الدائر القيمة الحدية للسرعة (1.01p.u)، عملت وحدة التحكم في زاوية الميل على الرغم من ثبات سرعة الرياح في وضع التحكم في السرعة كما هو موضح في الشكل (7) مما نقل التوربين الريحي إلى الحالة المستقرة، من خلال زيادة زاوية الميل الموضحة في الشكل (22d).



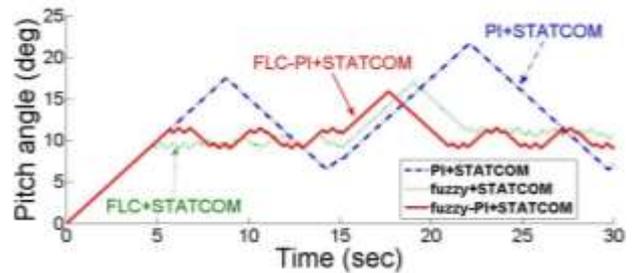
(a)



(b)



(c)



(d)

الشكل (22): استجابة النظام مع إضافة STATCOM ووحدة التحكم بزوايا الميل الثلاث (PI, FLC, FLC-PI) في حالة خطأ عابر، (a) جهد المولد، (b) سرعة الدائر، (c) الاستطاعة الفعلية للمولد، (d) زاوية ميل الشفرات.

يوضح الشكل (22a) الجهد الطرفي للمولد وبمقارنة وحدات التحكم الثلاث نجد أن تفوق وحدة تحكم FLC-PI على وحدتي التحكم FLC و PI التقليدية، حيث استغرقت زمن أقل للاستقرار والجدول (3) يوضح الزمن عند استقرار النظام على القيمة 0.99 p.u.

الجدول (3) الزمن عند استقرار الجهد للنظام باستخدام وحدات التحكم الثلاث.

PI+STATCOM	FLC+STATCOM	FLC-PI+STATCOM
21.9 sec	19.5 sec	18.1 sec

كما يوضح الشكل (22b) سرعة الدائر للمولد الريحي والقيمة القصوى التي يبلغها والزمن اللازم لعودة النظام إلى الاستقرار، بمقارنة النتائج لوحدات التحكم الثلاث نلاحظ تفوق أداء وحدة التحكم FLC-PI على وحدتي التحكم FLC و PI، حيث حقق نظام التحكم أقل قيمة لسرعة الدائر عند أقل زمن ممكن، ويظهر الجدول (4) مقارنة القيمة الأقصى لسرعة الدائر لوحدات التحكم الثلاث.

الجدول (4) القيمة القصوى لسرعة الدائر عند حدوث العطل باستخدام وحدات التحكم الثلاث.

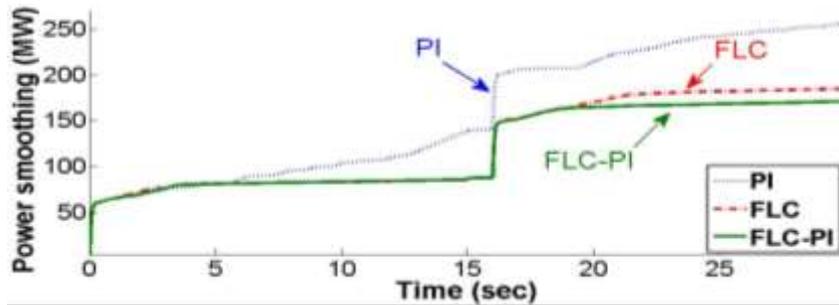
PI+STATCOM	FLC+STATCOM	FLC-PI+STATCOM
1.098 p.u	1.07 p.u	1.059 p.u

يوضح الشكل (22c) الاستطاعة الفعلية للمولد الريحي عند استجابة النظام لوحدات التحكم الثلاث، حيث أظهرت وحدة PI اضطراب بين اللحظة 5sec حتى اللحظة 15 sec، كم استغرقت زمن طويل لإعادة التوربين إلى حالة الاستقرار. بالمقابل تغلبت وحدة FLC على الاضطراب الذي أحدثته وحدة PI وأظهرت نتائج أفضل من حيث الزمن اللازم للاستقرار، لكن أفضل النتائج أظهرتها وحدة FLC-PI من حيث تقليل التذبذبات والحصول على أفضل استقرار عند أقل زمن بعد حدوث العطل، حيث يؤكد ذلك في الجدول (5) الذي يظهر الزمن لحظة استقرار الاستطاعة الفعلية للنظام على القيمة 0.99 p.u.

الجدول (5) الزمن لحظة استقرار الاستطاعة الفعلية للنظام باستخدام وحدات التحكم الثلاث.

PI+STATCOM	FLC+STATCOM	FLC-PI+STATCOM
27sec	22.6 sec	20.4 sec

لدراسة تقييم أداء وحدات التحكم بمعزل عن وجود STATCOM لتأكيد النتائج السابقة من خلال حساب P_{smooth} لوحدات التحكم الثلاث ومن نتائج المحاكاة الموضحة في الشكل (23) نجد أن وحدة FLC-PI حققت أقل قيمة من بداية العطل حتى نهاية زمن النمذجة وهذا يشير إلى أن تقلبات طاقة الخرج تم تخفيضها بشكل أكبر، يوضح الجدول (6) قيمة P_{smooth} عند الزمن 30 sec.



الشكل (23): مؤشر الأداء للنظام المدروس في حالة خطأ عابر.

الجدول (6) قيمة مؤشر الأداء عند الزمن 30 sec.

PI	FLC	FLC-PI
258.4 MW	184.7 MW	171 MW

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

تم في هذا البحث تنفيذ إستراتيجية للتحكم في زاوية الميل لشفرات مع تنظيم الجهد باستخدام STATCOM للتوربينات الريحية ثابتة السرعة. أظهرت نتائج المحاكاة ما يلي:

◀ تأثير STATCOM أعطى تعويضاً للاستطاعة الردية، حيث حَقَّق تنظيم الجهد وقَلَّ التذبذبات بالتالي أعطى استقرار لعمل التوربين الريحي.

◀ في حالة الاضطراب الديناميكي:

1. حَقَّق النظام مع مُتحكم FLC أفضل أداء من حيث زيادة الاستقرار الديناميكي بالمقارنة مع وحدتي PI و FLC-PI.

2. تم تخفيض القيمة العظمى المطلوبة من STATCOM لتنظيم الجهد من 0.86Mvar إلى 0.5Mvar، على الرغم من أنَّ مُتحكمي PI و FLC بلغت القيمة المطلوبة لهما إلى 0.5Mvar هذا يؤكد تأثير المُتحكم FLC على تحسين الاستقرار الديناميكي بشكل كبير بمعزل عن إضافة STATCOM، بالمقابل احتاج مُتحكم FLC-PI إلى 0.58Mvar.

3. تم تخفيض قيمة مؤشر الأداء P_{smooth} إلى 97.9MW بالمقارنة مع وحدتي PI و FLC-PI و 225.9MW و 103.1 على التوالي، وهذا يدل على تحقيق أفضل استقرار ديناميكي باستخدام وحدة FLC.

◀ في حالة الخطأ العابر:

1. حَقَّق النظام مع مُتحكم FLC-PI أفضل أداء من حيث زيادة الاستقرار العابر بالمقارنة مع وحدتي PI و FLC.

2. تم تخفيض سرعة الدائر أثناء حدوث العطل باستخدام مُتحكم FLC-PI إلى 1.059p.u بالمقارنة مع وحدتي PI و FLC-PI و 1.098p.u و 1.07p.u على التوالي.

3. تم تخفيض قيمة مؤشر الأداء P_{smooth} إلى 171MW بالمقارنة مع وحدتي PI و FLC و 258.4MW و 184.7MW على التوالي، وهذا يدل على تحقيق أفضل استقرار عابر باستخدام وحدة FLC-PI.

التوصيات:

◀ يوصى بدراسة أنواع أخرى من وحدات التحكم الذكية لتحسين كل من الاستقرار الديناميكي والعابر.

◀ يوصى بتعويض الاستطاعة الردية وتنظيم الجهد باستخدام أنواع أخرى من أنظمة نقل التيار

المتناوب المرنة FACTS كالمعوض التسلسلي المتواقت الساكن، ومتحكم سريان الاستطاعة بين الخطوط.

المراجع

1. **Taraft, S., Rekioua, D., Aouzellag, D., & Bacha, S.** A proposed strategy for power optimization of a wind energy conversion system connected to the grid. *Energy Conversion and Management*,. 2015, pp. 101, 489-502.
2. **KIM, Yeonhee, et al.** Power Smoothing of a Variable-Speed Wind Turbine Generator in Association with the Rotor Speed-Dependent Gain. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2017.
3. **Samuelsson, O., & Lindahl, S.** . On speed stability. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2005, pp. 20(2), 1179-1180.
4. **Shi, J., Kalam, A., & Shi, P.** . Improving power quality and stability of wind energy conversion system with fuzzy-controlled STATCOM. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 2015, pp. 12(3), 183-193.
5. **Zhang, L., Shen, C., Crow, M. L., Dong, L., Pekarek, S., & Atcitty, S.** Performance indices for the dynamic performance of FACTS and FACTS with energy storage. *Electric Power Components and Systems*. 2004, pp. 299-314.
6. **Duong, M. Q., Grimaccia, F., Leva, S., Mussetta, M., & Le, K. H.** . Hybrid controller for transient stability in wind generators. In *2015 Clemson University Power Systems Conference (PSC)*. March 2015, pp. pp. 1-7.
7. **Hagras, H., & Wagner, C.** Towards the wide spread use of type-2 fuzzy logic systems in real world applications. *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2012, pp. 14-24.
8. **محمد مصطفى محمد الخياط.** تكنولوجيا طاقة الرياح، مجلة الكهرباء العربية. 2007.
9. **Naik, K. A., Gupta, C. P., & Fernandez, E.** . Advanced Type-2 fuzzy logic-based pitch-angle control strategy for wind energy system. *Wind Engineering*. 2020.
10. **Ackermann, T.** *Wind Power in Power Systems*. 2005.
11. **Wu, B., Lang, Y., Zargari, N., & Kouro, S.** . Power conversion and control of wind energy systems. *John Wiley & Sons*. 2011.
12. **Trudnowski, D. J., Gentile, A., Khan, J. M., & Petritz, E. M.** Fixed-speed wind-generator and wind-park modeling for transient stability studies. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2004, pp. 1911-1917.
13. **Ackermann, T.** *Wind Power in Power Systems*. 2005.
14. **Senjyu, T., et al., et al.** Output power leveling of wind turbine generator for all operating regions by pitch angle control. *IEEE Transactions on Energy conversion*. 2006.
15. **The Wind Power** . http://www.thewindpower.net/windfarm_en_86_challicum-hills.php . [Online]
16. **HAQUE, M. H.** Evaluation of power flow solutions with fixed speed wind turbine generating systems. *Energy Conversion and Management*. 2014.

الملحق

بارامترات المولد SCIG [16].

Parameter	Values
P_{rated}, V_{rated}	1.5 MW, 575 V
R_s, R_r	0.004843pu, 0.004377 pu
L_s, L_r	0.1248pu, 0.1791 pu
L_m, H	6.77pu, 5.04 s
C_{wf}	200 KVAR

بارامترات التوربين الريحي [15].

Parameter	Values
Rated power	1.5 MW
Rotor diameter	64m
Number of blades	3
Cut-in wind speed	4m/s
Cut-out wind speed	25m/s
Rated wind speed	14m/s
Generator	SCIG