

Modeling, Vector Control and Simulation of Wind Turbine with Dual Excited Synchronous Generator

Dr. Nesmat Abu Tabak*

(Received 7 / 1 / 2020. Accepted 13 / 8 / 2020)

□ ABSTRACT □

This paper deals with a new excitation control technology for the synchronous generator with two excitation windings, it is vector control by flux orientation. The main goal is to control the angle of the load to make the generator more stable and more freedom to magnetic flux than to be placed on the axis of the pole. The paper includes proportional additional control that improves the transient state response of the mechanical velocity. Benefit of the Park transformations for the model of the synchronous generator to develop a vector control algorithm by integral proportional controllers. The simulation results in MATLAB showed good performance of the proposed control system for transient and steady-state conditions.

Keywords: Dual excited synchronous machine, Vector control for magnetic flux orientation. Wind turbine with synchronous generator.

* Assistant Professor, Department of Electrical Power, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria, nesmat975@gmail.com.

النمذجة، التحكم الشعاعي والمحاكاة لعنفة ريحية ذات مولد متواقت ثنائي التهييج

د. نسمة أبو طبق *

(تاريخ الإيداع 2020 / 1 / 7. قُبِلَ للنشر في 2020 / 8 / 13)

□ ملخص □

يعرض هذا البحث تقنية جديدة للتحكم بالتهييج للمولدة المتواقتة ذات ملفي تهييج وهي التحكم الشعاعي بتوجيه الفيض مع تحكم إضافي. الهدف الرئيسي هو التحكم بزواوية الحمولة لجعل المولدة أكثر استقراراً وتحرير الفيض المغناطيسي من التوضع على محور القطب. يتضمن هذا البحث أيضاً تحكماً إضافياً تناسبياً يحسن من استجابة الحالة العابرة للسرعة الميكانيكية. الاستفادة من النموذج المعتمد على تحويلات بارك للمولدة المتواقتة لتطوير خوارزمية التحكم الشعاعي بتوجيه الفيض بمساعدة المتحكمات التناسبية التكاملية. بينت نتائج المحاكاة في MATLAB أداءً جيداً لنظام التحكم في الحالتين العابرة والمستقرة وأهمية استخدام هذا النوع من المولدات.

الكلمات المفتاحية: الآلة المتواقتة ذات ملفي تهييج، التحكم الشعاعي بتوجيه الفيض المغناطيسي، العنفات الريحية مع مولدة متواقتة.

* مدرس - قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية -
nesmat975@gmail.com

مقدمة:

يتعلق استقرار النظام الكهربائي باستقرار المولد المتوافق لأنه العنصر الرئيس في هذا النظام [1]. تم التوجه لبناء مولد ذي استقرار كبير وتجاوب سريع للتصدي لتغيرات الحمل بالقيمة وبالطبيعة المتباينة، وذلك بإضافة ملف تهييج ثان على المحور q المتعامد مع المحور المباشر d وبوجود منظم في كل ملف بحيث يتم التحكم بالاستطاعة الردية Q والفعالة P كل على حدى.

بما أن طاقة الرياح منبع متذبذب للطاقة لذلك لا يمكن استخدام مولد متوافق معها دون وجود وسيط يلائم التردد الناتج مع تردد الشبكة وإلا يخرج المولد عن استقراره. تفيد الطريقة المقترحة في التحكم بالمولد ثنائي التهييج المرتبط مع عنفة ريفية بربطه مباشرة مع الشبكة دون الحاجة إلى مبدلات ترددية. بالتالي التخفيف من الأعطال عند التشغيل المستمر والطويل إضافة إلى التوفير في ثمن المجموعة من 15% إلى 20%. كل ذلك مع العديد من المزايا كزيادة معامل الاستقرار الساكن والديناميكي وخاصة عند الأحمال الخفيفة والسعوية إضافة إلى الوثوقية العالية في تأمين الاستطاعة المطلوبة في حالات التشغيل المختلفة.

حل المرجع [1] مبدأ عمل المولد المتوافق ثنائي التهييج واستعرض الاستقرار الديناميكي وحدود الاستقرار من خلال المخططات الشعاعية والمنحنيات البيانية. درس حالة تهييج متساوي على المحورين وحالة تهييج متحكم به للحفاظ على زاوية استطاعة ثابتة. وصف المرجع [2] النموذج الرياضي الخطي واللاخطي للمولد المتوافق ثنائي التهييج مع نظام التهييج والعنفة والتحكم بالجهد الطرفي وزاوية الاستطاعة. في المرجع [3] استُخدم النموذج الخطي في فراغ الحالة للمولد المتوافق ثنائي التهييج، وعُرض استخدام التحكم الأمثل بالتغذية العكسية. وحسب النتائج، حسن التحكم الأمثل من استجابة متحولات النظام في الحالة العابرة بالمقارنة مع التحكم التقليدي. قدم الباحث في المرجع [4] التهييج الذاتي Self Excitation في المولد المتوافق ثنائي التهييج ووضع النموذج المناسب وحدد المناطق المستقرة في عمل هذا المولد بطريقة روث Routh-Hurwitz. وتضمن البحث حالتين للتحكم بالزاوية وللتحكم بالجهد بمتحكمات تقليدية تناسبية-تفاضلية-تفاضلية مرتبة ثانية. عرض المرجع [5] نموذج فراغ الحالة الخطي للمولد المتوافق ثنائي التهييج محسوباً بالقيم الواحدية Per-unit system ويمكن استخدام الحساب بالقيمة الواحدية بالتماثل مع المولد المتوافق أحادي التهييج فقط في المولد ذو الدائر الاسطواني. في المرجعين [6,7] استخدم الباحث نموذج مصغر مع تحكم حاسوبي بالتردد والجهد على خرج المولد المتوافق ثنائي التهييج متغير السرعة. أثبتت النتائج مرونة وقدرة نظام التهييج ودقته في تتبع تغيرات السرعة المرجعية. أما المرجع [8] فقد بحث طريقة تحكم لاخطية لتحسين سلوك المولد المتوافق ثنائي التهييج بالاستفادة من النموذج اللاخطي له. في المرجع [9] تناول الباحث التحكم الأمثل اللاخطي لتحسين الاستقرار الديناميكي للمولد المتوافق ثنائي التهييج. غطى الباحث في المرجع [10] طريقة Coordinated Passivation للتحكم بحلقة مغلقة لضبط نظام التهييج والمحرك القائد لتحسين استقرار الزاوية واستقرار الجهد للمولد المتوافق ثنائي التهييج. قارن المرجع [11] المولد المتوافق ثنائي التهييج المقاد بالدائر والمولد التحريضي على عنفة ريفية من ناحية الاستطاعة والسرعة وبين أن استخدام المولد المتوافق أفضل من ناحية السلوك العابر والمستقر. أما المرجع [12] فقد عالج التحكم اللاخطي الصلب Nonlinear Robust Control من أجل استقرار النظام وتحسين سلوكه الديناميكي. استفاد المرجع [13] من نموذج فراغ الحالة الخطي في تصميم تحكم بالتغذية العكسية Bounded Passivity-Based Control لتحسين السلوك الديناميكي للنظام. في المرجع [14] وهو المرجع الأقرب لموضوع مقالنا الحالي اعتمد الباحث على التشابه بين المولد التحريضي ثنائي التهييج والمولد المتوافق

ثنائي التهييج في النمذجة والتحكم من أجل العمل على سرعة متغيرة في العنفات الريحية. في المقال [15] اهتم الباحث في التصميم للمولد المتواقت ثنائي التهييج بطريقة العناصر المنتهية Finite Element Method وسرد أيضاً النموذج الرياضي في الإحداثيات الثنائية وفق تحويلات Park والذي استقدا منه في النموذج الرياضي المعتمد في مقالنا هذا. في المرجع [16] عرض الباحث دراسة للحقل المغناطيسي والقوى المحركة المغناطيسية للمولد المتواقت ثنائي التهييج بالطريقة الشعاعية. حديثاً تم الاهتمام أكثر بالآلة المتواقتة ثنائية التهييج (ذات الأقطاب الدائمة وملف التهييج) لما لها من ميزات كما في المراجع [17,18,19,20] إلا أن ذلك خارج مجال دراستنا ويمكن أن يكون موضوعاً لبحث قادم.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى إثبات فعالية استخدام طريقة التحكم الشعاعي بتوجيه الفيض المغناطيسي للثابت في التحكم بتهييج الآلة المتواقتة ثنائية ملف التهييج. وأيضاً تقديم نموذج مبسط وسهل الاستخدام للباحثين في مجال التحكم بالمولد المتواقت ثنائي التهييج. إظهار أهمية هذا النوع من المولدات من حيث إمكانية التصدي لتغيرات الأحمال والاستطاعة الردية وضبط عامل الاستطاعة مع استقرار كامل. يعتبر هذا البحث مساهمة جديدة في النمذجة والمحاكاة والتحكم بالمولد المتواقت ثنائي التهييج واستخدامه في العنفات الريحية.

طرائق البحث ومواده:

بعد دراسة مرجعية تحليلية عن نماذج المولد المتواقت والعنفات الريحية تم بناء نموذج للعنفة الريحية ذات المولد المتواقت ثنائي التهييج في بيئة Simulink في برنامج MATLAB. جرى بعده تصميم حلقات التحكم والمتحكمات التقليدية PID للتيارات والعزم والسرعة والاستطاعة الردية وزاوية ميل الشفرات. اعتمد في هذا البحث على تحليل نتائج النمذجة والمحاكاة والمقارنة من أجل إثبات صحة وفعالية الطريقة المقترحة للتحكم بالمولد والعنفة الريحية.

النتائج والمناقشة:

في الفقرات التالية سنورد دراسة مختصرة عن نمذجة العنفة الريحية والمولدة المتواقتة. يلي ذلك شرح عن التحكم بالعنفة الريحية والتحكم الشعاعي بالتهييج. سيتم أيضاً مناقشة نتائج تطبيق هذا التحكم على النموذج المدروس واستخلاص الاستنتاجات.

فوائد استخدام الآلة المتواقتة ثنائية التهييج:

إن التحكم بالتهييج بملفين في الدائر يتيح إمكانيتين:

الأولى: تغيير زاوية الحمل، أي الاستطاعة المولدة تبعاً لتغير هذه الزاوية مع المحافظة على زاوية ثابتة للدائر. بمعنى آخر تصبح زاوية الاستقرار مستقلة عن زاوية الحمل، وبالتالي عن الاستطاعة المولدة، أي لا تتأثر سرعة الدوران ولا التردد بتحميل المولد. الإمكانية الثانية: التحكم بكل من الاستطاعة الفعالة والردية سعوية أو تحريضية وبمعزل عن بعضهما بعضاً، وبالتالي إمكانية التحكم بعامل الاستطاعة.

نمذجة المولد المتوافقت ثنائي التهييج:

ورد في المراجع عدة نماذج للمولد المتوافقت ثنائي التهييج إلا أننا اخترنا هنا التعامل مع نموذج الآلة التحريضية نفسه بسبب التشابه مع الآلة المتوافقة كما في [14,15]. وكما نعلم أن تغذية ملف الدائر في الآلة التحريضية بتيار مستمر يحولها إلى آلة متوافقة. إذن يكفي أخذ ذلك بالحسبان عند ملائمة تحويلات بارك لنموذج الآلة التحريضية في إحداثيات مرتبطة بالحقل الدوار ليصبح ممثلاً للآلة المتوافقة. وعند العودة للمقادير ثلاثية الطور تعود فقط مقادير الثابت إلى الطبيعة الجيبية ثلاثية الطور أما مقادير الدائر فتبقى على الطبيعة ثنائية الطور المستمرة دون تطبيق تحويل بارك العكسي عليها.

النمذجة في الإحداثيات d, q المرتبطة بالحقل الدوار:

في نظام الإحداثيات d, q المرتبط بالحقل الدوار تكون معادلات الآلة المتوافقة ذات ملفي تهييج كما يلي:

التوترات الداخلية في الثابت:

$$\frac{d\phi_{sd}}{dt} = V_{sd} - R_s I_{sd} + \phi_{sq} \omega_s \quad (1)$$

$$\frac{d\phi_{sq}}{dt} = V_{sq} - R_s I_{sq} - \phi_{sd} \omega_s \quad (2)$$

ϕ_{sq} , ϕ_{sd} الفيض في الثابت على المحورين d و q . V_{sq} و V_{sd} الجهد في الثابت على المحورين d و q . I_{sq} و I_{sd} التيار في ملفات الثابت على المحورين d و q . ω_s السرعة الزاوية الكهربائية التي يدور بها الدائر والساحة المغناطيسية الدوارة (الآلة متوافقة). R_s مقاومة ملفات الثابت. L_s المحارضة الذاتية لملفات الثابت.

الفيوض في الثابت:

$$\phi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \quad (3)$$

$$\phi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \quad (4)$$

L_m المحارضة المتبادلة بين ملفات الثابت وملفات الدائر.

التوترات الداخلية في ملفي الدائر:

على فرض أن ملفي تهييج الآلة المتوافقة المدروسة متماثلان يمكن كتابة:

$$\frac{d\phi_{rd}}{dt} = V_{rd} - R_r I_{rd} \quad (5)$$

$$\frac{d\phi_{rq}}{dt} = V_{rq} - R_r I_{rq} \quad (6)$$

ϕ_{rq} , ϕ_{rd} الفيض في الدائر على المحورين d و q . V_{rq} و V_{rd} الجهد في الدائر على المحورين d و q . I_{rq} و I_{rd} التيار في ملفات الدائر على المحورين d و q . L_r المحارضة الذاتية لملفات الدائر.

الفيوض في الدائر:

$$\phi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd} \quad (7)$$

$$\phi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq} \quad (8)$$

العزم الكهرومغناطيسي:

يمكن التعبير عن العزم الكهرومغناطيسي عند انحفاظ الاستطاعة قبل وبعد تحويل بارك بعدة معادلات كما يلي:

$$T_{em} = PL_m(I_{rd}I_{sq} - I_{rq}I_{sd}) \quad (9)$$

$$T_{em} = P(\phi_{sd}I_{sq} - \phi_{sq}I_{sd}) \quad (10)$$

$$T_{em} = P \frac{L_m}{L_r} (\phi_{rd} I_{sq} - \phi_{rq} I_{sd}) \quad (11)$$

$$T_{em} = P \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} (\phi_{rd} I_{sq} - \phi_{rq} I_{sd}) \quad (12)$$

$$T_{em} = -P (\phi_{rd} I_{rq} - \phi_{rq} I_{rd}) \quad (13)$$

معادلة الحركة:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = T_T - f \Omega_{mec} \quad (14)$$

معام f $T_T = T_{mec} + T_{em}$ محصلة العزم على محور الدوران. J ثابت العطالة، $J \frac{d\Omega_{mec}}{dt}$ عزم العطالة. f معامل الاحتكاك الميكانيكي. T_{em} العزم الكهرومغناطيسي. P عدد أزواج الأقطاب. Ω_{mec} سرعة المحور الميكانيكية.

الاستطاعة الفعالة في الثابت:

عند انحفاظ الاستطاعة قبل وبعد تحويل بارك يمكن كتابة:

$$P_s = (V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq}) \quad (15)$$

الاستطاعة الردية في الثابت:

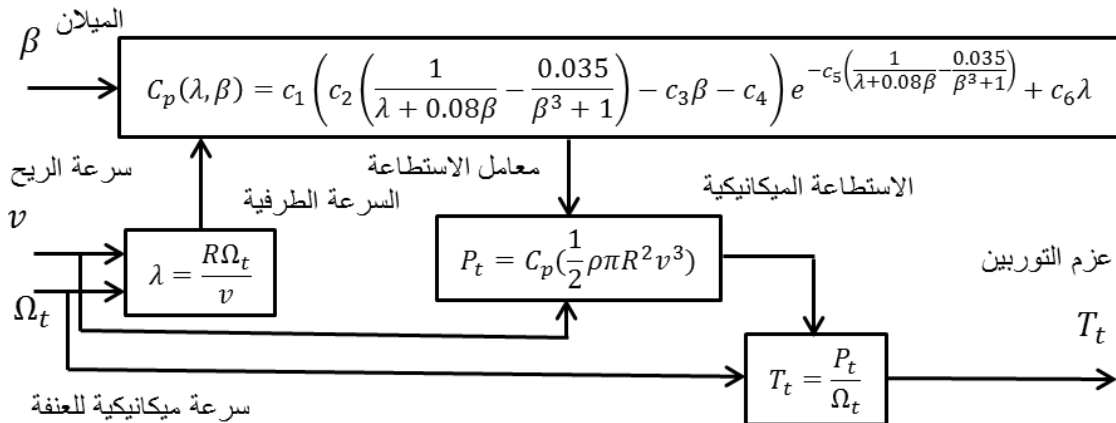
عند انحفاظ الاستطاعة قبل وبعد تحويل بارك يمكن كتابة:

$$Q_s = (V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq}) \quad (16)$$

نمذجة العنفة الريحية والتحكم بها:

نموذج العنفة:

للعنفة الريحية شفرة واحدة أو اثنتان ولكن العدد الأكثر شيوعاً هو ثلاث شفرات لأنها تحقق مردود جيد بأقل ضجيج وتوازن ميكانيكي أفضل. تقوم الشفرات باستقبال الطاقة الحركية للرياح وتحولها إلى طاقة ميكانيكية على محور العنفة. إلا أن الشفرات لا يمكن لها استقبال أكثر من $C_{p_{max}} = 0.59$ من الطاقة الحركية للرياح وهو ما يعرف بحد بيتز BETZ. يعبر عن هذه النسبة بمعامل الاستطاعة C_p ويمكن تمثيل العنفة الريحية بالمخطط الصندوقي المبين في الشكل رقم (1)، المرجع [18].



الشكل رقم (1): نموذج العنفة الريحية

Ω_t السرعة الميكانيكية لمحور العنفة. v سرعة الريح (m/s). ρ كثافة الهواء قيمتها في الشروط النظامية $1.22 (kg/m^3)$ عند درجة حرارة $15^\circ C$. $R(m)$ نصف قطر العنفة. T_t العزم الميكانيكي.

يعطى معامل الاستطاعة C_p بالعلاقة التالية:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(c_2 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) - c_3\beta - c_4 \right) e^{-c_5 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)} + c_6\lambda \quad (17)$$

حيث أن:

$$\begin{aligned} c_1 &= 0.5109 & c_2 &= 116 & c_3 &= 0.4 \\ c_4 &= 5 & c_5 &= 21 & c_6 &= 0.0068 \end{aligned}$$

T_t العزم الميكانيكي الناتج عن الريح والمطبق على محور العنفة يجمع مع العزم الكهرومغناطيسي القادم من المولدة على محور المولدة وتتخذ بعين الاعتبار علبة السرعة كريح صرف G .

تقوم علبة السرعة بمضاعفة السرعة لتلائم السرعة العالية للمولد وتخفيض العزم كما يلي:

$$T_{mec} = \frac{1}{G} T_t \quad (18)$$

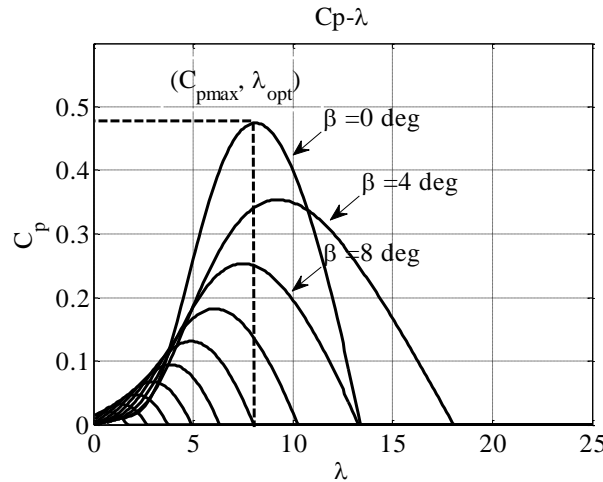
G نسبة المسننات بدون واحدة. T_{mec} العزم الميكانيكي على محور المولد ($N.m$).

$$\Omega_{mec} = G\Omega_t \quad (19)$$

Ω_{mec} السرعة الميكانيكية جهة المولدة (rad/s).

معامل الاستطاعة:

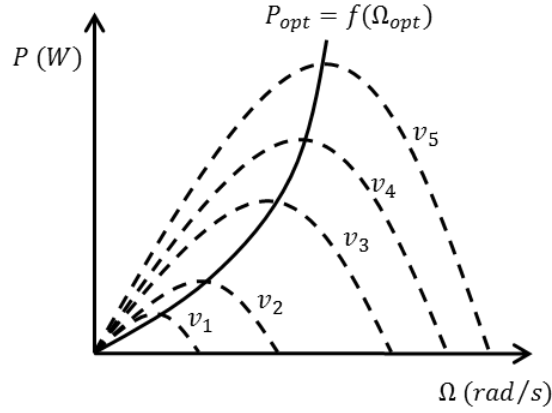
يعبر معامل الاستطاعة C_p ، الشكل رقم (2)، عن قدرة العنفة على تجميع الطاقة الحركية للريح وتحويلها لطاقة ميكانيكية على المحور ولكل عنفة معامل خاص بها ويرتبط بالسرعة الطرفية المحيطية للشفرات $\lambda = \frac{R\Omega_t}{v}$ وبزاوية ميل الشفرات β (deg). تؤدي زيادة الزاوية β لنقصان المردود ويتم ذلك عند السرعات العالية للريح لتجنب عطب العنفة وبقاء التشغيل عند القيم الاسمية.



الشكل رقم (2): علاقة معامل الاستطاعة C_p مع λ, β

توافق القيمة العظمى للمعامل C_p القيم التالية: $\lambda_{opt} = 8.1, C_{pmax} = 0.475, \beta = 0$ (deg) هذا يعني أن تثبيت $\lambda = \frac{R\Omega_t}{v}$ على القيمة $\lambda_{opt} = 8.1$ يسمح بالحصول على استطاعة أعظمية من الريح. يتم ذلك من خلال

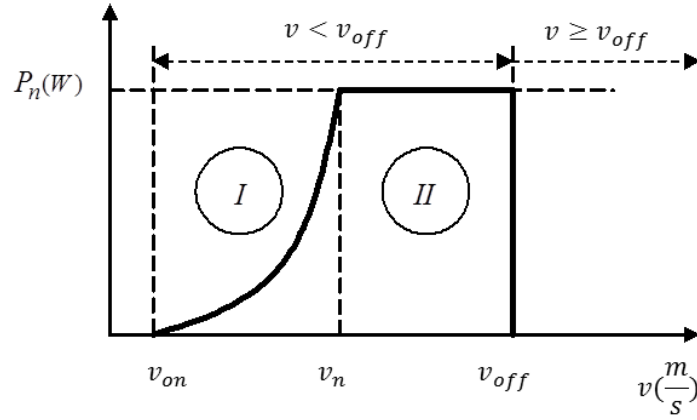
تعديل السرعة الميكانيكية للمولد في كل مرة تتغير فيها سرعة الرياح حسب العلاقة: $\Omega_{t_ref} = \frac{v\lambda_{opt}}{R}$ ، وهذا ما يسمى ملاحقة النقطة الأعظمية للرياح حسب الشكل رقم (3).



الشكل رقم (3): ملاحقة النقطة الأعظمية

استراتيجية التحكم بالعنفات الريحية:

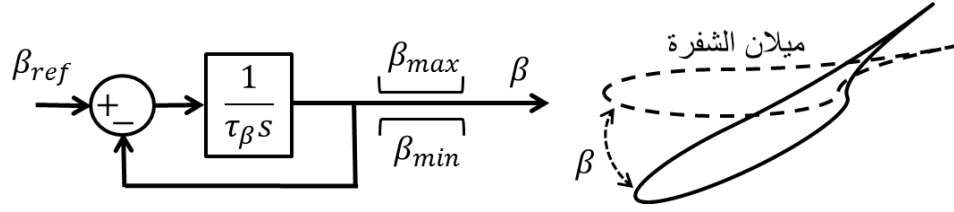
تشمل الاستراتيجية على العمل في منطقتين كما في الشكل رقم (4):
 الأولى: ما قبل السرعة الاسمية v_n وفيها يتم التحكم بالسرعة من أجل ملاحقة النقطة الأعظمية.
 الثانية: ما بعد السرعة الاسمية وفيها تثبت السرعة على القيمة الاسمية ويتم التحكم بزوايا ميل الشفرات لتقليل الاستطاعة المسحوبة من الرياح والحفاظ عليها كقيمة قريبة من الاستطاعة الاسمية P_n .



الشكل رقم (4): استراتيجية التحكم بالعنفات الريحية

ميلان الشفرات والنموذج الرياضي لمحرك الشفرات:

يتم إمالة الشفرات في مواجهة الرياح كما هو موضح بالشكل رقم (5) وذلك بهدف تقليل معامل الاستطاعة، وبالتالي الحد من الاستطاعة الميكانيكية الواصلة لمحور دوران المولدة.

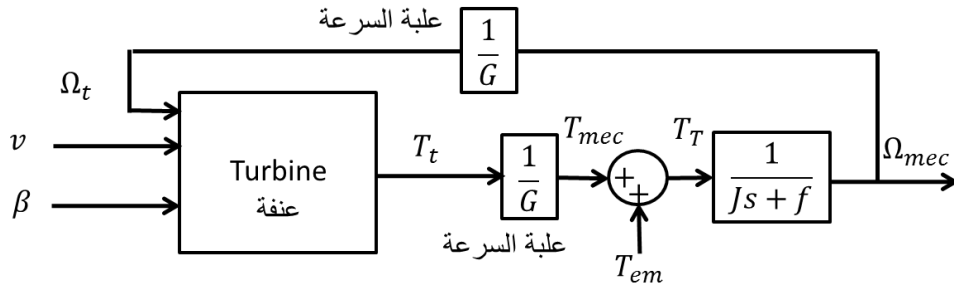


الشكل رقم (5): التحكم بميلان الشفرات

τ_β الثابت الزمني لمحرك السيرفو. β_{ref} القيمة المرجعية المحددة من متحكم زاوية ميل الشفرات.

المخطط الصندوقي للقسم الميكانيكي:

يمثل الشكل رقم (6) المخطط الصندوقي للعنفة الريشية وكيفية ربطها مع المولد.



الشكل رقم (6): المخطط الصندوقي للقسم الميكانيكي

في هذا المقال لن يكون التحكم بالعنفة الريشية عند السرعات المنخفضة للريش بهدف تتبع النقطة الأعظمية للاستطاعة. حيث أن العنفة المدروسة تملك نظام تحكم بزوايا ميل الشفرات ونظام تهيج المولد بهدف الحفاظ على سرعة دوران ثابتة للآلة المتوافقة.

التحكم المقترح في العنفة الريشية المدروسة:

للتحكم المقترح وظيفتان وهما:

الوظيفة الأولى: تثبيت سرعة الدائر على السرعة التزامنية مهما تغير العزم الميكانيكي القادم من الريش عند عزم أقل من العزم الاسمي، وذلك عن طريق التحكم بالتهيج في ملفي الدائر. يتم ذلك بطريقة التحكم الشعاعي بتوجيه الفيض المغناطيسي للثابت عن طريق التحكم بتيارات الدائر.

الوظيفة الثانية: وهي تحكم ميكانيكي بالعزم الميكانيكي عند زيادته عن العزم الاسمي عن طريق إمالة الشفرات بزوايا مناسبة لإعادته قرب العزم الاسمي، وبالتالي تثبيت السرعة والاستطاعة على قيمتيهما الاسميتين.

أولاً- التحكم الشعاعي بتوجيه فيض الثابت للآلة المتوافقة ثنائية التهييج:

سنقوم فيما يلي باشتقاق رياضي لقوانين التحكم الشعاعي بالفيض.

من علاقة العزم $T_{em} = P(\phi_{sd}I_{sq} - \phi_{sq}I_{sd})$ يتم توجيه المحاور أي جعل $\phi_{sd} = \phi_s$ و $\phi_{sq} = 0$. من

المعادلة $\phi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} = 0$ نحصل على $I_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} I_{rq}$. فتصبح معادلة العزم $T_{em} =$

$-P\phi_{sd} \frac{L_m}{L_s} I_{rq}$. عندها يتعلق العزم بـ I_{rq} عندما يثبت ϕ_{sd} على قيمة ثابتة.

$$\left[V_{sd} = 0, \quad I_{sd} = \frac{\phi_{sd}}{L_s}, \quad \phi_{sq} = 0 \right] \text{ من العلاقة: } \frac{d\phi_{sd}}{dt} = V_{sd} - R_s I_{sd} + \phi_{sq} \omega_s$$

يرتبط الفيض مع التيار بالعلاقة:

$$\left(\frac{L_s}{R_s} \frac{d}{dt} + 1 \right) \phi_{sd} = L_m I_{rd} \quad (20)$$

$V_{sd} = 0$ لأن جهود الشبكة جيبيية متوازنة.

من معادلات الجهود والتيارات في الدائر يلاحظ اللاخطية في علاقة التيارات. حيث يرتبط تيار الدائر مع بعضهما بعضاً. لذلك من أجل التحكم بكل تيار على حدى (I_{rq} للتحكم بالعزم و I_{rd} لثبتيب الفيض المغناطيسي) عن طريق الجهود، نلجأ لفصلهما رياضياً حسب التحليل التالي:

فصل تيارات الدائر:

نكتب معادلة جهود الدائر بدلالة التيارات كما يلي:

$$V_{rd} = (L_r \sigma) s I_{rd} + \left(R_r + R_s \frac{L_m^2}{L_s^2} \right) I_{rd} - \frac{R_s}{L_s} L_m^2 I_{ms}$$

$$V_{rq} = (L_r \sigma) s I_{rq} + \left(R_r + R_s \frac{L_m^2}{L_s^2} \right) I_{rq} + \frac{R_s}{L_s} L_m^2 I_{rq}$$

$$\text{حيث: } I_{ms} = \frac{1}{T_s s + 1} I_{rd}, \quad T_s = \frac{L_s}{R_s}, \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

نعرف متحولات جديدة حسب العلاقات التالية المستنتجة من نموذج الآلة:

$$F_{emd} = \frac{R_s}{L_s} L_m^2 I_{ms}$$

$$F_{emq} = -\frac{R_s}{L_s} L_m^2 I_{rq}$$

التوترات في الدائر (توتر التهيج):

$$V_{rd} = V_{rd1} - F_{emd} \quad (21)$$

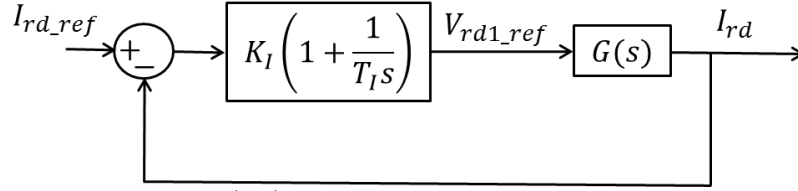
$$V_{rq} = V_{rq1} - F_{emq} \quad (22)$$

التيارات في الدائر بدلالة الجهود الجديدة ($V_{rq1}; V_{rd1}$):

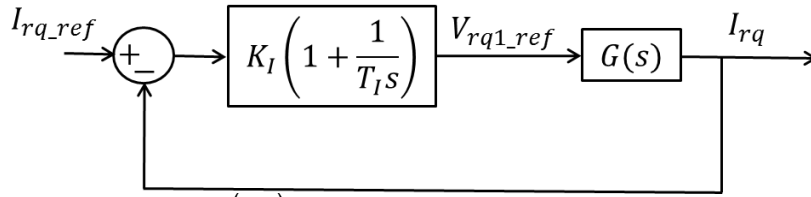
$$I_{rd} = \frac{\left(\frac{1}{R_r + R_s \frac{L_m^2}{L_s^2}} \right)}{\left(\frac{L_r \sigma}{R_r + R_s \frac{L_m^2}{L_s^2}} \right) s + 1} V_{rd1} = G(s) V_{rd1}; \quad I_{rq} = \frac{\left(\frac{1}{R_r + R_s \frac{L_m^2}{L_s^2}} \right)}{\left(\frac{L_r \sigma}{R_r + R_s \frac{L_m^2}{L_s^2}} \right) s + 1} V_{rq1} = G(s) V_{rq1}$$

يمثل تابعا النقل السابقان تابعين من الدرجة الأولى بالتالي يمكن التحكم بكل من التيارين ($I_{rq}; I_{rd}$) بشكل منفصل أحدهما عن الآخر. وهو ما يعرف بمبدأ الفصل (مبدأ التحكم الموجه).
حلقة التحكم بالتيار:

للتحكم بالتيار نستخدم متحكم PI كما يوضح الشكلان رقم (7,8):



الشكل رقم (7): حلقة التحكم بالتيار (I_{rd})



الشكل رقم (8): حلقة التحكم بالتيار (I_{rq})

بعد إيجاد المكافئ للحلقة المغلقة للتيار تصبح العلاقة:

$$I_{rd} = \frac{1}{T_{I0}s + 1} I_{rd_ref}, \quad I_{rq} = \frac{1}{T_{I0}s + 1} I_{rq_ref} \quad (23)$$

نختار الثابت الزمني T_{I0} صغير جداً بالمقارنة مع $T_s = L_s / R_s$ لذلك يهمل أمامه وبالعودة للعلاقة:

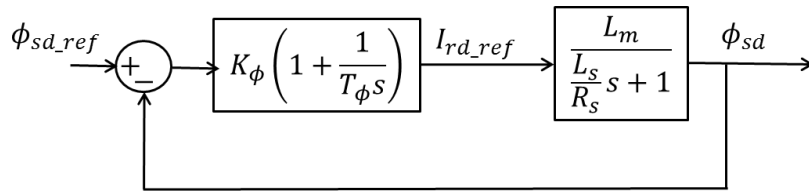
$$\left(\frac{L_s}{R_s} \frac{d}{dt} + 1\right) \phi_{sd} = L_m I_{rd}$$

تبقى العلاقة التالية صحيحة وهي تابع نقل من الدرجة الأولى:

$$\left(\frac{L_s}{R_s} \frac{d}{dt} + 1\right) \phi_{sd} = L_m I_{rd_ref} \quad (24)$$

حلقة التحكم بالفيض:

يتم التحكم بالفيض باستخدام حلقة مغلقة مع متحكم PI كما في الشكل رقم (9):



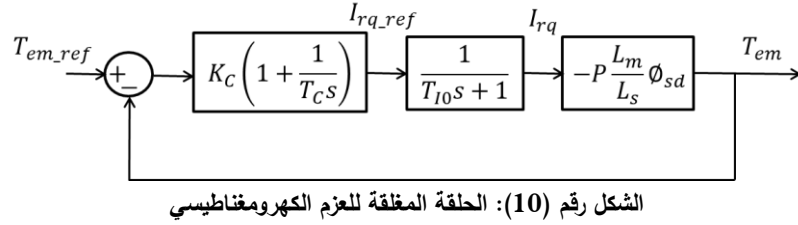
الشكل رقم (9): حلقة التحكم بفيض الثابت

حلقة التحكم بالعزم الكهرومغناطيسي:

تصبح العلاقة بين العزم والتيار بعد فصل التيارات كما يلي:

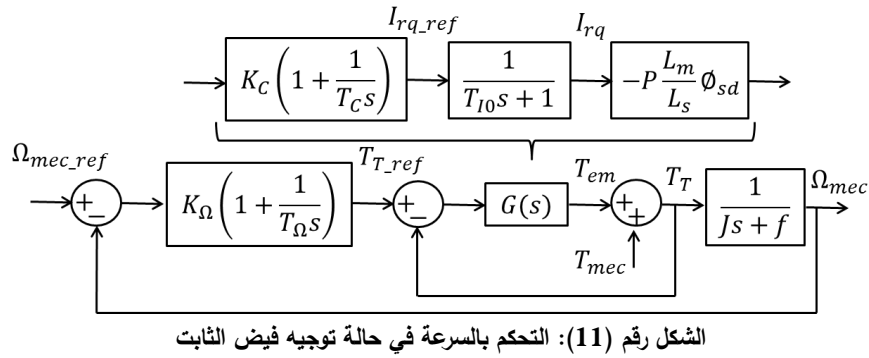
$$T_{em} = \frac{-p L_m \phi_{sd}}{T_{I0}s + 1} I_{rq_ref} \quad (25)$$

العلاقة السابقة تمثل تابع نقل من الدرجة الأولى نستخدم للتحكم به متحكم PI بحلقة مغلقة ويعتبر الفيض ϕ_{sd} اضطراباً ثابتاً، الشكل رقم (10):



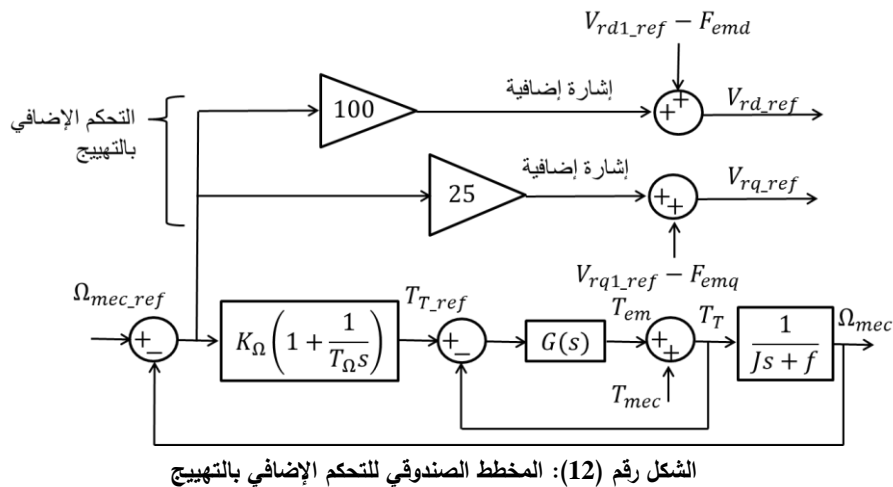
حلقة التحكم بالسرعة الميكانيكية:

بعد التحكم بالعزم يتم تشكيل الحلقة المغلقة للتحكم بالسرعة كما في الشكل رقم (11). نستخدم في حلقة التحكم بالسرعة متحكم من النوع PI ويهمل الثابت الزمني الكهربائي لأنه صغير بالمقارنة مع الثابت الزمني الميكانيكي عند حساب المتحكم، ويعتبر العزم الميكانيكي T_{mec} اضطراباً ثابتاً.



ثانياً- التحكم الإضافي بالتهبيج للآلة المتوافقة ثنائية التهبيج:

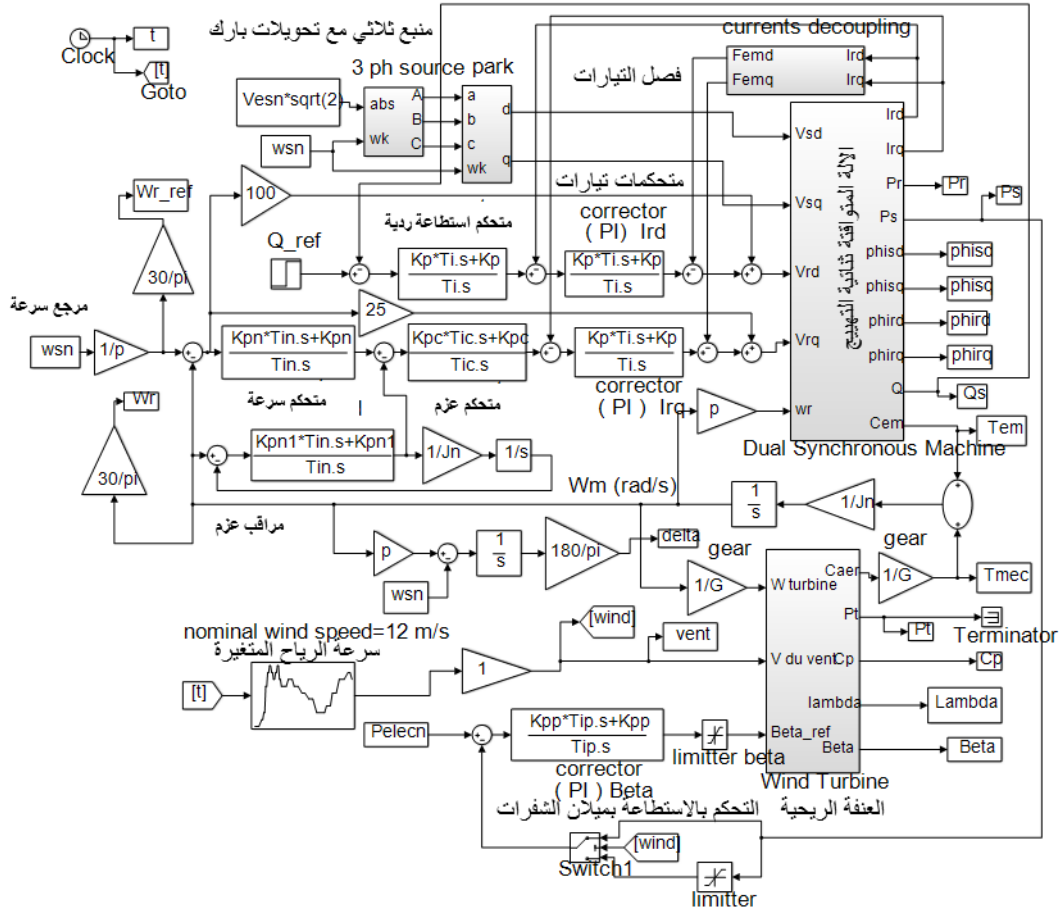
يتم التحكم الإضافي بالتهبيج عن طريق تغذية عكسية بخطأ السرعة حيث يكبر ذلك الخطأ بريح مناسب وتجمع الإشارتين الإضافيتين مع إشارات التحكم الشعاعي الأساسية كما في الشكل رقم (12). تم اختيار الريح بالتجريب.



يفيد التحكم الإضافي بالتهييج بالتخلص أو التخفيف من تذبذب الحالة العابرة للسرعة عند تنظيم السرعة في الحالات العابرة ذات التغير الفجائي.

نتائج محاكاة عمل الآلة المتوافقة ثنائية التهييج:

تم تنظيم النموذج الرياضي في Simulink في برنامج MATLAB وفق المخطط الموضح في الشكل رقم (13). نفترض للتبسيط: الجهود ثلاثية الطور متوازنة، الآلة مرتبطة مع شبكة لانهائية أي ذات جهد وتردد ثابتين، الدارة المغناطيسية غير مشبعة والإشباع لم يؤخذ بالاعتبار. ملفا الدائر متماثلان بالمواصفات، الضياعات المغناطيسية وضياعات الاحتكاك مهملة والضياعات فقط هي ضياعات نحاسية.



الشكل رقم (13): نمذجة العنفة مع المولد المتوافق ثنائي التهييج مع التحكم بهما

المعطيات:

معطيات المولدة المتوافقة، للتبسيط نعتبر ملفي التهييج متماثلين بالمواصفات:

$$P_e = 3 \times 10^5 (W), V_{eff} = 380 (V), N = 1500 (rpm),$$

$$f_n = 50 (Hz), L_m = L_r = 0.0116 (H),$$

$$L_s = 0.0118 (H), R_r = 0.0048 (\Omega), R_s = 0.0063 (\Omega).$$

معطيات العنفة:

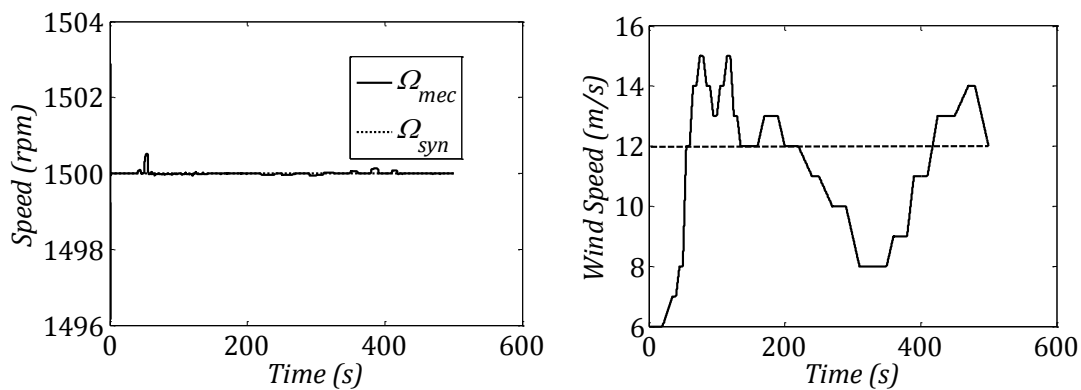
$$G = 23 (pu), v_{nom} = 12 (m/s), R = 14 (m), J = 50 (kg \cdot m^2), f = 0,$$

$$\rho = 1.22 \left(\frac{kg}{m^3} \right), \lambda_{opt} = 8.1, C_{Pmax} = 0.475, \tau_{\beta} = 0.2 (s).$$

أولاً- محاكاة التصدي لتغير العزم الميكانيكي لدائر العنفة الريحية:

تغير سرعة الريح:

تتغير عادة سرعة الريح ببطء ولكن من أجل تقليل زمن المحاكاة تم اقتراح التغير المبين في الشكل رقم (14). تبدأ المحاكاة من سرعة البدء للرياح $6(m/s)$ وتتراوح حول السرعة الاسمية للرياح $12(m/s)$ خلال $500(s)$. يبين الشكل رقم (15) تغير سرعة الدوران لمحور الآلة المتوافقة ثنائية التهيج إذ تم تثبيت قيمتها على سرعة التوافق بفضل التحكم المقترح على الرغم من تذبذب سرعة الرياح في الشكل رقم (14). يثبت ذلك فعالية الطريقة المقترحة في تنظيم السرعة سواء بالتحكم الشعاعي أو بالتحكم بزواوية ميل الشفرات. يلاحظ وجود نتوءات صغيرة في منحنى السرعة، الشكل رقم (15)، تؤثر بدورها على زاوية الموضع للدائر كما سنرى لاحقاً في الشكل رقم (22).



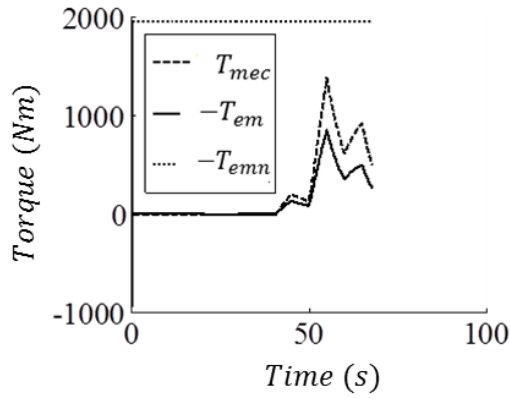
الشكل رقم (15): تغير سرعة الدوران الميكانيكية للمولد ثنائي التهيج

الشكل رقم (14): تغير سرعة الريح

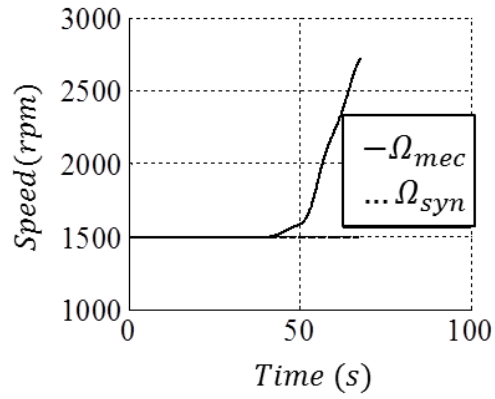
لبيان أهمية استخدام المولد المتوافق ثنائي التهيج دعونا نقارن مع المولد أحادي التهيج فقط في فقرة واحدة وهي الفقرة التالية.

تغير سرعة المولد المتوافق أحادي التهيج والعزم الكهرومغناطيسي:

يبين الشكل رقم (16) مقارنة بين السرعة المرجعية وسرعة الدائر للمولد أحادي التهيج عند نفس ظروف المولد ثنائي التهيج ونفس سرعة الريح في الشكل رقم (14). يلاحظ أن المولد المتوافق أحادي التهيج يتسارع بشكل كبير ما يعني فقدانه للتوافق بسبب أن العزم الكهرومغناطيسي غير كافٍ لموازنة العزم الميكانيكي، الشكل رقم (17). بالمقارنة مع الشكل رقم (15) نلاحظ مدى قدرة المولد المتوافق ثنائي التهيج على الحفاظ على التوافق بالمقارنة مع المولد أحادي التهيج.



الشكل رقم (17): تغير العزم للمولد أحادي التهييج

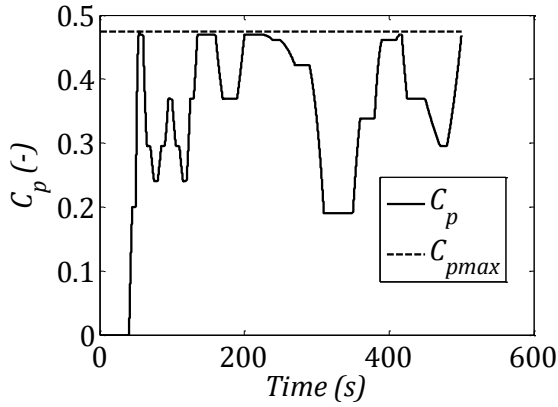


الشكل رقم (16): تغير سرعة الدوران الميكانيكية للمولد أحادي التهييج

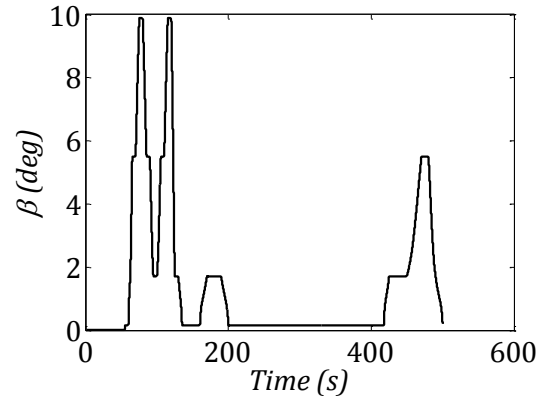
نعود ونكمل مع المولد ثنائي التهييج.

تغير زاوية ميل الشفرات وتأثيرها على معامل الاستطاعة للعنفة:

يسمح تغير زاوية ميل الشفرات، الشكل رقم (18)، بضبط العزم الميكانيكي على القيمة الاسمية عند زيادة سرعة الريح فوق قيمتها الاسمية وذلك قبل (s) 200 وبعد (s) 400 من زمن المحاكاة، الشكل رقم (23). والسبب أن مردود العنفة ينخفض بزيادة ميل الشفرات كما يوضح الشكل رقم (19). عند السرعات أقل من سرعة الريح الاسمية تحافظ زاوية ميل الشفرات على قيمتها الصغرى وهي الصفر. يفيد هذا التحكم بالحفاظ على جميع مقادير العنفة اسمية: كالسرعة والعزم والاستطاعة وغيرها مع أن سرعة الريح أعلى من قيمتها الاسمية.



الشكل رقم (19): تغير معامل الاستطاعة للعنفة

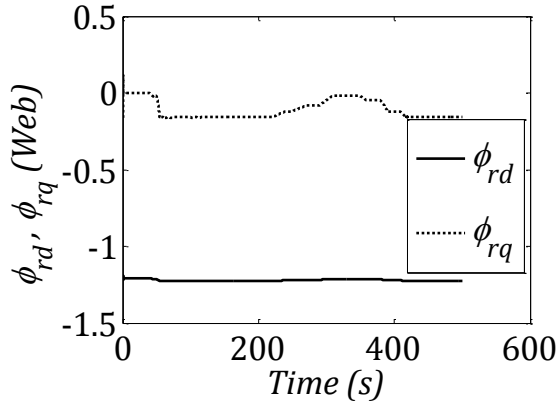


الشكل رقم (18): تغير زاوية ميل الشفرات

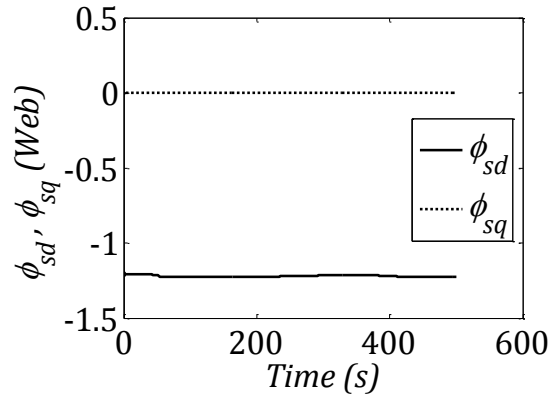
تغير الفيض في الثابت وتغير فيض الدائر:

يمكن في الشكل رقم (20) ملاحظة تغير فيض الثابت على المحور d وثباته على الصفر على المحور q كدليل على صحة تطبيق التحكم الشعاعي بتوجيه المحور d باتجاه الفيض الكلي للثابت. أيضاً في الشكل رقم (21) نلاحظ وجود تهييج في الدائر على محورين متعامدين d, q ما يؤمن تغير زاوية الحمولة لضبط الحقل المغناطيسي للثابت وضبط العزم الكهرومغناطيسي وبالتالي تثبيت سرعة الدوران. فيض الدائر على المحور d يساوي تقريباً فيض

الثابت على المحور نفسه. يمكن من الشكلين رقم (20,21) استنتاج أن هناك تهيج ثابت على المحور d وتهيج متغير على المحور q وهو فعلياً من يضبط العزم بالتالي سرعة الدوران والاستطاعة الفعالة.



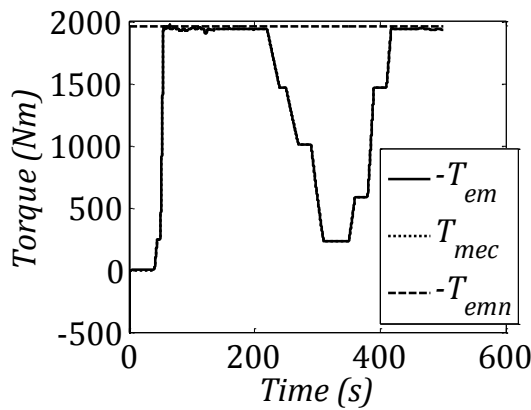
الشكل رقم (21): تغير الفيض المغناطيسي للدائر



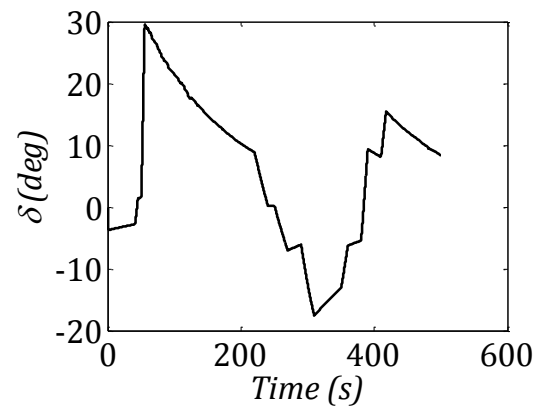
الشكل رقم (20): تغير الفيض المغناطيسي للثابت

تغير الزاوية بين فيض الدائر ومحور حذاء القطب وتغير العزم الكهرومغناطيسي:

يلاحظ في الشكل رقم (22) تغير زاوية الموضع للدائر مع الزمن حيث عند كل تغير (نتوء) في سرعة الدوران، الشكل رقم (15)، أو العزم الميكانيكي أو زاوية ميل الشفرات تتغير زاوية الموضع. وأصبحت زاوية الموضع محررة من قيود الاستقرار ومن العلاقة الجيبية المعروفة بمعادلة التآرجح في المولد المتواقت أحادي التهيج. وتتغير مع تغير الفيض وبقيّة البارامترات كالعزم والسرعة... إلخ. بينما يثبت الشكل رقم (23) ملاحقة تغيرات العزم الميكانيكي بمساعدة تغير تيارات التهيج على المحورين d, q . أي أن العزم الكهرومغناطيسي يساوي في كل وقت العزم الميكانيكي القادم من العنفة الريحية لأن عزم الاحتكاك المقاوم للوصلات الميكانيكية مهم. ولو لم يكن العزم مضبوطاً بشكل جيد لما استقرت سرعة الدوران على سرعة التواقت.



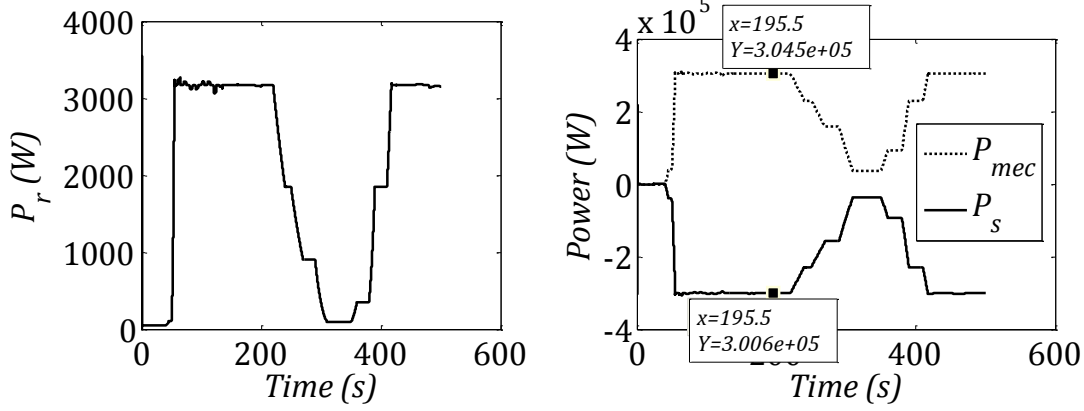
الشكل رقم (22): تغير الزاوية بين فيض الدائر ومحور القطب الشكل رقم (23): تغير العزمين الميكانيكي والكهرومغناطيسي



تغير الاستطاعة الفعالة وتغير استطاعة التهيج الفعالة (استطاعة تيار مستمر):

يبين الشكل رقم (24) مقدار استطاعة الخرج المولدة والاستطاعة الميكانيكية للعنفة عند تيار تهيج ثابت على الملف d حيث أن تيار التهيج على المحور q هو من يقوم بضبط الاستطاعة الفعالة. الاستطاعة الفعالة المولدة

سالبة اصطلاحاً وهي أقل بقليل من الاستطاعة الميكانيكية بالقيمة المطلقة عند نفس الزمن والفرق بينهما هو الضياعات الكهربائية النحاسية في ملفات الثابت. من أجل ملاحظة تغيرات العزم الميكانيكي للحفاظ على سرعة التوافق كان التأثير على ملفات التهيج لذلك فمن الطبيعي أن يتغير مجموع الاستطاعة الكهربائية لملفي التهيج كما يوضح الشكل رقم (25). وهي استطاعة موجبة أي مستهلكة (غير مولدة) في مقاومات الدائر.

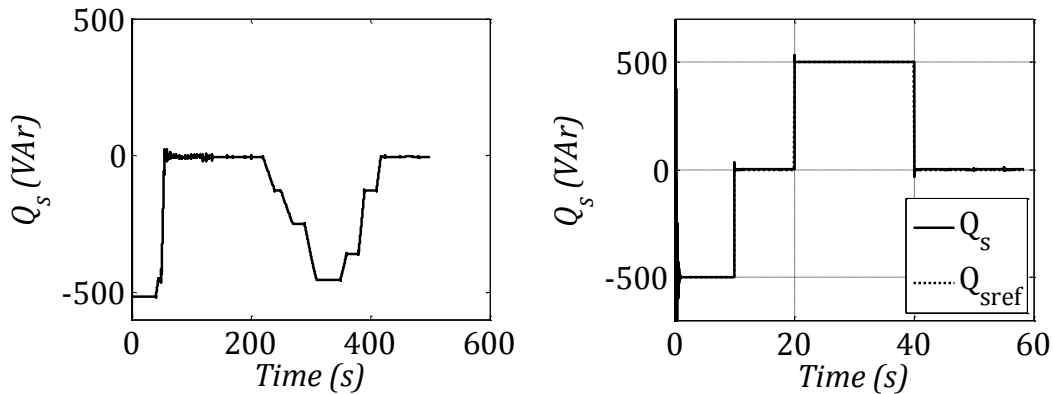


الشكل رقم (24): تغير الاستطاعة الفعالة للثابت والميكانيكية للدائر الشكل رقم (25): تغير استطاعة التهيج الفعالة

ضبط الاستطاعة الردية:

يوجد في المولد ثنائي التهيج إمكانية ضبط الاستطاعة الردية على قيمة مرغوبة وبشكل مستقل عن الاستطاعة الفعالة بفضل تيار التهيج على المحور d . يوضح الشكل رقم (26) هذه الميزة من ناحية تتبع الاستطاعة الردية لمراجع متغير بفضل حلقة التحكم بالاستطاعة الردية عن طريق تيار الملف على المحور d . يلاحظ أيضاً إمكانية العمل عند استطاعة ردية معدومة بالتالي التحكم بعامل الاستطاعة وجعله واحدياً حتى. الحالة العابرة بالبداية بسبب الاقلاع وبعد ذلك تكاد الحالة العابرة أن تكون معدومة. أي أن تزويد المزرعة الريحية بعنفات من هذا النوع يسمح بتعويض الاستطاعة الردية اللازمة لعمل المزرعة المعتمدة أساساً على مولدات تحريضية.

أجرينا المحاكاة أيضاً عند تهيج ثابت على المحور d فكانت الاستطاعة الردية تتغير مع تغير الاستطاعة الفعالة كما في الشكل رقم (27). يمثل الشكل رقم (27) تغير الاستطاعة الردية عندما تتغير سرعة الرياح كما في الشكل رقم (1) وهي سالبة اصطلاحاً أي أنها مولدة. التغيرات اللحظية بالاستطاعة الردية تحدث بسبب تغيرات العزم الميكانيكي القادم من العنفة بسبب سرعة الرياح المتغيرة أصلاً.



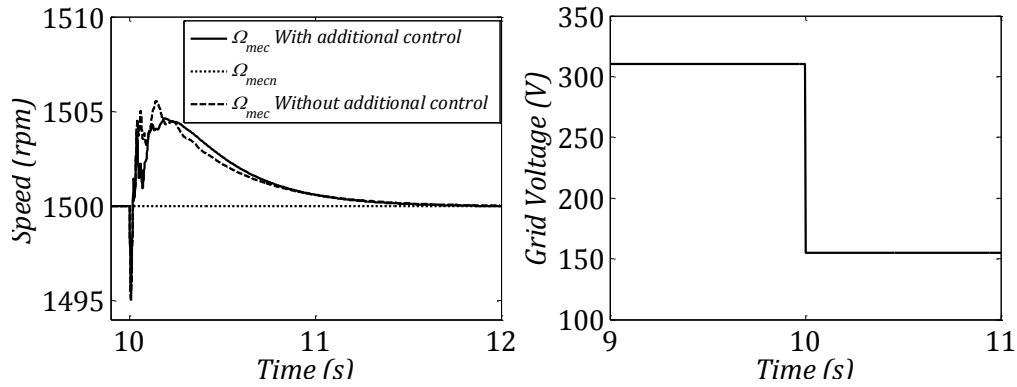
الشكل رقم (26): التحكم بالاستطاعة الردية للثابت الشكل رقم (27): تغير الاستطاعة الردية للثابت حالة تهيج ثابت على المحور d

ثانياً- محاكاة التغيرات الفجائية للجهد والعزم في المولد:

تم في هذا المقال العلمي اقتراح التحكم الإضافي في التهيج لمواجهة الحالات العابرة غير المرغوبة. لذلك فإن النتائج اللاحقة سنتثبت فعالية التحكم المقترح.

تغير الجهد الطرفي للمولد عند عزم ميكانيكي ثابت وتغير سرعة المولد ثنائي التهيج:

نحاكي فيما يلي تغير على شكل قفزة لمطال التوتر الطرفي لملفات الثابت إلى النصف كما في الشكل رقم (28) مع ثبات العزم الميكانيكي على قيمته الاسمية. نلاحظ في الشكل رقم (29) تغير السرعة الميكانيكية وعودتها لحالتها الأساسية ولكن بعد اهتزاز من دون التحكم الإضافي. أما مع التحكم الإضافي فيصبح المنحني أقل اهتزازاً. ويلاحظ أن انخفاض الجهد الطرفي إلى النصف لم يخرج النظام عن استقراره ما يثبت قدرة هذا النوع من المولدات بالمقارنة مع المولد أحادي التهيج الذي كان من الممكن جداً خروجه عن الاستقرار في هذه الحالة.

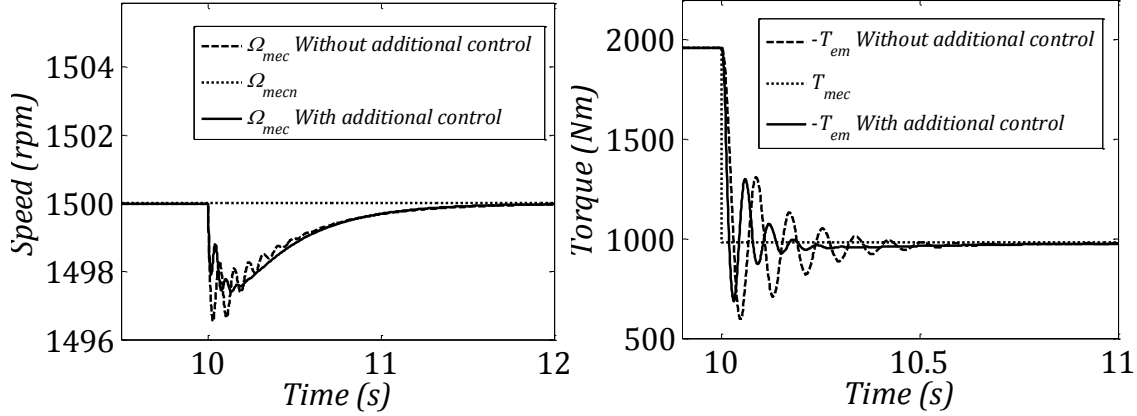


الشكل رقم (28): تغير الجهد الطرفي لملفات الثابت إلى النصف الشكل رقم (29): تغير السرعة للدائر مع وبدون تحكم إضافي

في الشكل رقم (29) تميل السرعة للزيادة لأن العزم الكهرومغناطيسي ينخفض بالنسبة للعزم الميكانيكي الثابت وذلك بسبب انخفاض الجهد الطرفي. إلا أن التحكم بالسرعة يعيدها لحالتها الثابتة بعد حين.

التغير الفجائي في العزم الميكانيكي عند تغذية ثابت وتغير سرعة المولد ثنائي التهيج:

نختار الآن تغيراً آخر على شكل قفزة في العزم الميكانيكي كما في الشكل رقم (30) مع ثبات الجهد الطرفي. نلاحظ تتبع العزم الكهرومغناطيسي لتغيرات العزم الميكانيكي لتبقى سرعة الدوران ثابتة. نلاحظ في الشكل رقم (31) تغير السرعة وعودتها لحالتها الأساسية ولكن بعد اهتزاز من دون التحكم الإضافي. أما مع التحكم الإضافي فيصبح المنحني أقل اهتزازاً. أي أن التحكم الإضافي حسن من سلوك الحالة العابرة للسرعة والعزم الكهرومغناطيسي.



الشكل رقم (31): تغير السرعة للدائر مع وبدون تحكم إضافي

الشكل رقم (30): تغير العزم الميكانيكي والكهرومغناطيسي

وجدنا فيما سبق مقارنة بين التحكم الشعاعي بدون ومع التحكم الإضافي حيث ظهرت أهمية استخدام التحكم الإضافي مع التحكم الشعاعي لأنه يزيل أو يخفف تذبذب السرعة في الحالات العابرة. في الشكل رقم (31) تميل السرعة للنقصان لأن العزم الميكانيكي ينخفض بالنسبة للعزم الكهرومغناطيسي، إلا أن التحكم بالسرعة يعيدها لحالتها الثابتة بتغيير العزم الكهرومغناطيسي ليساوي القيمة الجديدة للعزم الميكانيكي.

الاستنتاجات والتوصيات:

- تحقيق نتائج جيدة لتطبيق طريقة التحكم بتوجيه الفيض لضبط الاستطاعة الفعالة والاستطاعة الردية كل على حدى. ما يثبت فعالية التحكم المقترح.
 - ضبط السرعة الميكانيكية على السرعة المتوافقة على الرغم من تغير العزم الميكانيكي لعنفة الريحية بسبب تغير سرعة الرياح. ما يتيح استخدام المولدات المتوافقة مع عنفات ريفية دون الحاجة لمبدلات ترددية.
 - تخفيف تذبذب السرعة في الحالات العابرة عند تغير الجهد والعزم بإضافة تحكم تناسبي إلى التحكم الشعاعي بتوجيه الفيض.
 - الحفاظ على استقرار المولد المتوافقت ثنائي التهييج بفضل التحكم المقترح ومواجهته لجميع التغيرات حتى الحادة منها في الجهد والعزم. ما يثبت الاستقرار الكبير للمولد المتوافقت ثنائي التهييج.
 - إمكانية ضبط الاستطاعة الردية سعوية أو تحريضية أو حتى صفرية والتحكم بها مع الحفاظ على الاستقرار. هذه الخاصية تعني ضرورة تزويد المزارع الريحية بهذا النوع من العنفات لتعويض الاستطاعة الردية التي تستهلكها المولدات التحريضية. كل ذلك مع التزويد أيضاً بالاستطاعة الفعالة.
- نوصي بمحاولة استخدام هذه الطريقة في التحكم مخبرياً والتأكد من نتائج النمذجة والمحاكاة تجريبياً لأن استخدام هذا النوع من المولدات له مستقبل واعد في توليد الطاقة الكهربائية ومن العنفات الريحية بشكل خاص.

References:

- [1]. A. M. El-SERAFI and M. A. BADR. *Extension of the Under-Excited Stable Region of the Dual-Excited Synchronous Machine*. in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.(PAS-92) No.(1), Jan. 1973, 287-294.

[2]. H. C. AGARWAL and S. C. KAPOOR. *Power system dynamic studies for improved stability and minimum rotor heating via graph-theoretic modelling of a dual-excited synchronous generator*. in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.(94) No.(2) March 1975, 177-186.

[3]. A. R. DANIELS and Y. B. LEE. *Optimal and suboptimal excitation control of dual-excited synchronous generators*. in Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol.(123) No.(10) October 1976, 989-992.

[4]. J. NANDA and S. HURRY. *Self-excitation of dual-excited synchronous machines*. in Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol.(124) No.(7) July 1977, 607-612.

[5]. A. M. EL-SERAFI and M. A. BADR. *Per-Unit System for the Dual-Excited Synchronous Machine*. in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.(PAS-92) No.(1) Jan. 1973, 9-13.

[6]. Z. O. YONAH, A. M. EL-SERAFI and A. E. KRUSE. *Regulation of terminal voltage and output frequency of a variable-speed dual-excited synchronous generator by using a computer-based two-phase excitation system*. Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vancouver, BC, Canada, Vol.(2) 1993, 1165-1168.

[7]. Z. O. YONAH, A. M. EL-SERAFI and A. E. KRAUSE. *Performance of a computer-based two-phase excitation system for a variable-speed dual-excited synchronous generator*. IEEE WESCANEX 93 Communications, Computers and Power in the Modern Environment - Conference Proceedings, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 1993, 263-268.

[8]. J. HUANG, G. Y. TU, D. S. CHEN and T. S. CHUNG. *Improved nonlinear excitation control of dual-excited synchronous generators*. Fourth International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-97. Hong Kong Vol.(2) No.(450) 1997, 735-740

[9]. HUANG JIAN TU GUANGYU CHEN DESHU. *Nonlinear Optimal Excitation Control of Dual-Excited Synchronous Generators*. IFAC Proceedings Volumes, Vol.(30), No.(17) August 1997, 69-74.

[10]. H. CHEN, H. -B. JI, B. WANG and H. -S. XI. *Coordinated passivation techniques for the dual-excited and steam-valving control of synchronous generators*. in IEE Proceedings - Control Theory and Applications, Vol.(153) No.(1) Jan. 2006, 69-73.

[11]. L. PIEGARI, R. RIZZO and P. TRICOLI. *High Efficiency Wind Generators with Variable Speed Dual-Excited Synchronous Machines*. 2007 International Conference on Clean Electrical Power, Capri, 2007, 795-800.

[12]. H. JI, X. LI and B. WANG. *Nonlinear Robust Control of Dual-Excited Hydroturbine Generator based on Hamiltonian Energy Theory*. IEEE International Conference on Control and Automation, Guangzhou, 2007, 691-695.

[13]. B. WANG and W. LIN. *Bounded control of dual-excited synchronous generator by using a passivity-based approach*. 9th World Congress on Intelligent Control and Automation, Taipei, 2011, 85-90.

[14]. S. D'ARCO, L. PIEGARI and P. TRICOLI. *A novel control of Dual-Excited Synchronous machines for variable-speed wind turbines*. IEEE Trondheim Power Tech, Trondheim, 2011, 1-6.

[15]. A. A. REDDY, S. S. BDAT and R. T. UGALE. *Design and FEM analysis of dual excited synchronous generator*. National Power Electronics Conference (NPEC), Pune, 2017, 302-306.

[16]. G. XU and ALL. *The Relationship of Magnetomotive Force Under Different Excitation Modes of Dual-Excited Synchronous Generator*. in IEEE Transactions on Magnetics, Vol.(54) No.(3) March 2018, 1-4.

[17]. BERKOUNE K., BEN SEDRINE E., VIDO L., LE BALLOIS S. *Robust control of hybrid excitation synchronous generator for wind applications*. Mathematics and Computers in Simulation, Vol.(131) January 2017, 55-75.

[18]. NASIRI, MOJTABA & MILIMONFARED, JAFAR & FATHI, S. HAMID. *Modeling, analysis and comparison of TSR and OTC methods for MPPT and power smoothing in permanent*

magnet synchronous generator-based wind turbines. Energy Conversion and Management. Vol.(86) June 2014, 892–900.

[19]. ERRAMI, YOUSSEF & OUASSAID, MOHAMMED & MAAROUFI, MOHAMMED. *Optimal Power Control Strategy of Maximizing Wind Energy Tracking and Different Operating Conditions for Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Farm*. Energy Procedia. Vol.(74) 2015, 477-490.

[20]. MSEDDEI, AMINA & LE BALLOIS, SANDRINE & ALOUI, HELMI & VIDO, LIONEL. *Robust control of a wind conversion system based on a hybrid excitation synchronous generator: A comparison between $H \infty$ and CRONE controllers*. Mathematics and Computers in Simulation. Vol.(158) November 2018, 453–476.