

تحسين إخماد الاهتزازات في نظم الطاقة الكهربائية باستخدام مخمد اهتزاز يعتمد في عمله على التحكم العائم (fuzzy logic)

الدكتور محمد عبد الحميد*

الدكتورة بلسم عيد**

نسرین جدید***

تاريخ الإيداع 1 / 12 / 2009. قُبل للنشر في 24 / 5 / 2010

□ ملخص □

تم في هذا البحث تصميم متحكم عائم يعتمد في عمله على المنطق العائم من أجل تحسين إخماد الاهتزازات في نظم الطاقة الكهربائية من خلال التحكم الإضافي في أنظمة التهييج. تم استخدام تغيير السرعة ($\Delta\omega$) والتسارع ($\Delta\dot{\omega}$) للمولد المتواقت كإشارات دخل للمتحكم العائم المقترح، وكما هو معلوم، فإن هذه المتغيرات لها تأثير مهم على تخامد الاهتزازات الميكانيكية لمحور المولد. ومن ثم تم اختبار أداء المتحكم العائم المصمم من أجل حالات عمل مختلفة لنظام طاقة مؤلف من آلة متواقتة موصولة إلى قضيب تجميع لانهائي عبر خطي نقل، كما تم مقارنة أداء المتحكم العائم المصمم مع مخمد الاهتزازات التقليدي من خلال المحاكاة باستخدام برنامج الـ MATLAB. من تحليل الاستجابات الزمنية لمتحولات النظام تبين فعالية ومثانة المتحكم العائم المقترح في الحفاظ على استقرار النظام وإخماد الاهتزازات التي تنشأ عن الأعطال من أجل حالات عمل مختلفة للنظام، كما أظهرت النتائج أن أداء المتحكم العائم أفضل من مخمد الاهتزازات التقليدي.

الكلمات المفتاحية: مخمد الاهتزازات في أنظمة الطاقة، تصميم المتحكمات، المتحكمات العائمة، استقرار أنظمة الطاقة الكهربائية.

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

** مدرسة - قسم الحاسبات والتحكم . كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية . جامعة تشرين . اللاذقية . سورية.

*** طالبة دراسات عليا (ماجستير) - نظم القدرة الكهربائية . كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية . جامعة تشرين . اللاذقية . سورية.

Damping Oscillations Improvement in Electrical Power System By Using Power System Stabilizer Based on Fuzzy Logic

Dr. Mohammed Abed EL-Hamid *
Dr. Balsam Aeed **
Nisreen Jdeed***

(Received 1 / 12 / 2009. Accepted 24 / 5 / 2010)

□ ABSTRACT □

In this research, power system stabilizer based on fuzzy logic has been designed. This controller depended on fuzzy logic theory to improve damping oscillations in power system.

Speed deviation ($\Delta\omega$) and acceleration ($\Delta\dot{\omega}$) of a synchronous generator were taken as the input signals to the fuzzy controller. It is well known that these variables have significant effects on damping the generator's shaft mechanical oscillations.

The performance of the proposed fuzzy controller is compared with conventional power system stabilizer and its effectiveness is demonstrated for various operating conditions by detailed computer simulation with MATLAB program of a single machine infinite bus power system. The results show that the fuzzy logic controller performance is better than conventional power system stabilizer.

Key words: fuzzy logic controller, controller design, power system stabilizer, power system stability.

*Associate Professor, Department of Energy, Faculty of Mech & Elec Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria

**Assistant Professor, Department of Control and Computation, Faculty of Mech & Elec Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria

***Postgraduate Student, Department of Energy, Faculty of Mech & Elec Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria

مقدمة:

نتيجة لزيادة حجم وحدات التوليد واتجاه العالم نحو ربط أنظمة الطاقة الكهربائية ببعضها بعضاً لإنشاء نظام طاقة كبير مترابط مؤلف من عدد كبير من محطات التوليد والتحويل بأنواعها المختلفة وأماكن وجودها المتباعدة التي ترتبط فيما بينها بآلاف الكيلو مترات من خطوط النقل، شهدت العقود الماضية اهتماماً كبيراً بمسألة الاستقرار الديناميكي لأنظمة الطاقة [1].

معظم أنظمة الطاقة الحديثة تحتوي على أنظمة مؤلفة من خطوط نقل طويلة ومنابع تحكّم بالتوليد. مثل هذه الأنظمة تمتلك ممانعات تسلسلية كبيرة تسهم في إمكانية عدم استقرار النظام.

نظراً لأن نظام الطاقة هو عبارة عن مجموعة من الآلات المتوافقة. فإن استقرار المولدات المتوافقة يلعب دوراً كبيراً في استقرار أنظمة الطاقة الكهربائية. حيث يتأثر استقرار المولدات المتوافقة بعدة عوامل كضبط منظمات الجهد الأوتوماتيكية للمولد (Automatic Voltage Regulator) حيث إنّ الكثير من المولدات مزودة بمنظمات جهد (AVR) سريعة وذات ربح عالٍ للحصول على استقرار كبير نسبياً من خلال وضع المولد في حال توافقت مع نظام الطاقة خلال حالات العطل العابرة الكبيرة. على كل حال، تستطيع أنظمة التهيج ذات الربح العالي تقليل عزم التخادم للمولدات مؤدية إلى نظام غير محصن تجاه الاهتزازات غير المستقرة التي تنشأ أيضاً من ضعف خطوط النقل بين المولدات والأحمال، وعمل المولدات عند زاوية استطاعة كبيرة [2].

لقد تم الإشارة في العقدين الماضيين إلى متحكمات التهيج كمخدمات اهتزاز أنظمة الطاقة، حيث أضيفت إلى المولدات المتوافقة لتعديل أثر الـ (AVR) ذات الربح العالي ومنابع الاهتزازات السالبة الأخرى. إن مخمد اهتزازات نظام الطاقة (Power System Stabilizer) يقدم عزم تخادم موجب متفق بالطور مع تغيرات السرعة لإلغاء أثر عزم التخادم السالب للنظام [3]. وتصمم مخمدات الاهتزاز التقليدية (conventional power system stabilizers) اعتماداً على نظرية التحكم الخطية بحيث يتم تحويل نظام الطاقة إلى نظام خطي حول نقطة العمل (الاسمية)، ويتم ضبط بنية وبارامترات مخمد الاهتزاز التقليدي الـ (CPSS) من أجل نقطة عمل محددة حيث يكون قادراً على تقديم أداء أمثل للنظام من أجل هذه الحالة. كما هو معلوم، فإن أنظمة الطاقة بشكل عام هي أنظمة غير خطية. يمكن أن تتغير حالات عملها ضمن مجال واسع، لذلك فإن مخمد الاهتزاز التقليدي (ذو البارامترات الثابتة) غير قادر على تقديم أداء أمثل للنظام على كامل مجال العمل [4].

حديثاً تم اقتراح مجموعة من أنظمة التحكم البديلة التي تعتمد على الشبكات العصبونية (Neural networks) و/أو المنطق العائم أو المتحكمات ذاتية الضبط (Self-tuning control) أو المتحكمات ذي النمط المنزلق (Sliding mode control) والتحكم التكيفي (Adaptive control) ومخمدات الاهتزاز التي تعتمد القواعد (Rule-based stabilizers) لحل المشاكل المرافقة لاستخدام مخمدات الاهتزاز التقليدية [2].

أهمية البحث وأهدافه:

على الرغم من أن جميع أنظمة التحكم البديلة المقترحة قادرة على تقديم أداء ديناميكي للنظام أفضل من مخمد الاهتزاز التقليدي ذي البارامترات الثابتة. يظهر المتحكم العائم على أنه الطريقة البديلة الأكثر فعالية، ويعود ذلك لأعبائه الحسابية الأقل وسرعة المعالجة، ومثابته، وعدم الحاجة إلى النماذج الرياضية لوصف النظام المدروس عند استخدامه كما هو متعارف عليه عند تصميم المتحكمات وفق الطرق التقليدية، بالإضافة إلى سهولة تطبيقه وتعديله،

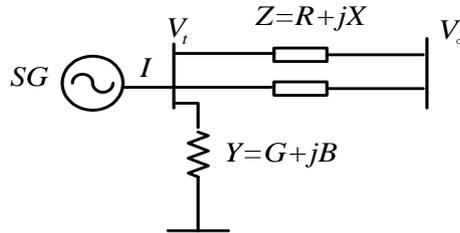
وكلفته المنخفضة. في بحثنا هذا سيتم تصميم محمد اهتزازات يعتمد المنطق العائم. حيث يهدف البحث إلى تحسين أداء نظام الطاقة الكهربائي من خلال التحكم الإضافي بالتهبيج عن طريق المتحكم العائم (FLC) الذي يعتمد على المنطق العائم (FUZZY LOGIC).

طرائق البحث ومواده:

تم في هذا البحث وضع النموذج الرياضي للنظام الكهربائي المدروس والمؤلف من آلة متوافقة موصولة إلى قضيب تجميع لانتهائي عبر خطي نقل. حيث تم وضع المعادلات اللازمة لحساب ثوابت النظام، والمعادلات المميزة للنظام. ثم تم التطرق إلى بنية المتحكم العائم وخطوات تصميم المتحكم العائم المقترح وبناء هذا المتحكم باستخدام الـ Fuzzy logic toolbox في برنامج الـ MATLAB.

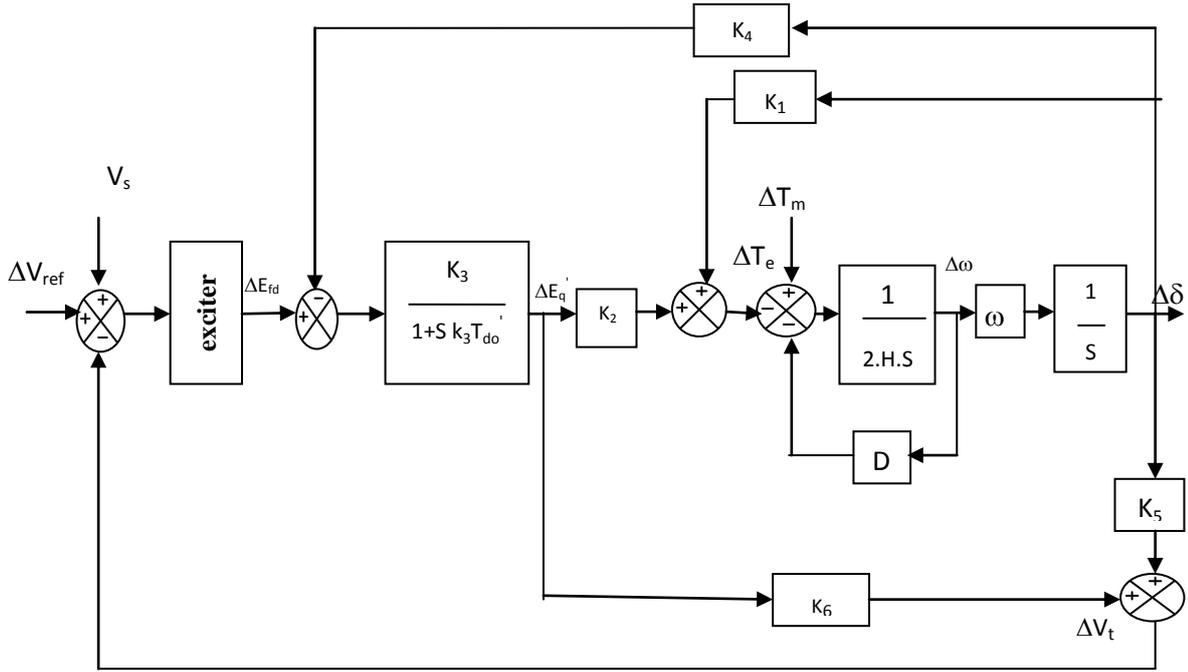
النموذج الرياضي للنظام المدروس:

تم وضع النموذج الرياضي لنظام طاقة كهربائي مؤلف من آلة متوافقة موصولة إلى قضيب تجميع لانتهائي. حيث يظهر الشكل (1) مخطط الخط الواحد لنظام مؤلف من آلة متوافقة موصولة إلى قضيب تجميع لانتهائي لانهائي جهده V_o ، وجهد خرج الآلة المتوافقة V_t عبر خطي نقل ممانعة خط النقل ومقاومته R, K على التوالي بينما B, G سماحية وقبولية خط النقل على التوالي.



الشكل (1) آلة متوافقة موصولة إلى قضيب تجميع لانتهائي عبر خط نقل.

كما يبين الشكل (2) المخطط الصندوقي لنظام طاقة كهربائية، كما يبين الشكل (2) المخطط الصندوقي لنظام طاقة كهربائية مؤلف من آلة متوافقة موصولة إلى قضيب تجميع لانتهائي. حيث نلاحظ وجود حلقتين أساسيتين الحلقة الميكانيكية والحلقة الكهربائية تحتوي الحلقة الميكانيكية على صندوقي نقل من اليسار إلى اليمين يعتمد الصندوق الأول على معادلة التآرجح بينما يعتمد الصندوق الثاني على العلاقة بين السرعة الزاوية (ω) و زاوية القدرة للمولد (δ) ، بينما تحتوي الحلقة الكهربائية على صندوقي نقل من اليمين إلى اليسار يمثل الصندوق الأول نظام التهبيج (exciter) الذي دخله عبارة عن إشارة التحكم الإضافية V_s مجموعة إليها إشارة الدخل المرجعي V_{ref} مطروحاً منهما التغير في الجهد ΔV_t وخرجه تغير جهد حقل التهبيج ΔE_{fd} . بينما يمثل الصندوق الثاني تابع النقل لدارة حقل التهبيج متأثرة برد فعل المتحرض بثابت زمني (T_{do}) وريح K_3 . ويمثل H, D ثابت التخادم وعزم عطالة الآلة على التوالي، بينما يمثل e_q القوة المحركة الكهربائية العابرة، بينما يشير الرمز Δ إلى تغيرات صغيرة حول قيم التشغيل.



الشكل (2) المخطط الصندوقي لنظام طاقة كهربائية مولف من آلة متواقتة موصولة إلى قضيب تجميع لانهازي

حساب ثوابت النظام:

لحساب الثوابت $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$, يجب أن تكون مركبات تيار المتحرض I_d, I_q معلومة ونكتب بالتالي المعادلات الآتية [5]:

$$(1) \Delta I = I_d + j \cdot I_q$$

$$(2) V_t = V_d + j \cdot V_q$$

يحدد الثابتين K_1, K_2 من العزم الكهربائي للآلة المتواقتة عند سرعة التوافق، يعطي العزم بالعلاقة الآتية:

$$(3) T_e \approx P_e = I_d \cdot V_d + I_q \cdot V_q$$

بتعويض البارمترات V_d, V_q, I_d, I_q بقيمها في المعادلة نجد:

$$(4) \Delta T_e = K_1 \cdot \Delta \delta + K_2 \cdot \Delta e'_q$$

حيث:

$$(5) \begin{bmatrix} 0 \\ I_{q^0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_d & F_q \\ Y_d & Y_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (X_q - X'_d) \cdot I_{q^0} \\ e'_{q^0} + (X_q - X'_d) \cdot I_{d^0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix}$$

أما K_3, K_4 فيحددان من تحويل معادلة توتر الحقل إلى المعادلة الخطية الآتية:

$$(6) (1 + s \cdot T'_{d^0}) \cdot \Delta e'_q = \Delta E_{Fd} - (X_d - X'_d) \cdot \Delta I_d$$

بتعويض ΔI_d بقيمتها نحصل على:

$$(7) (1 + s \cdot T'_{d^0} \cdot K_3) \cdot \Delta e'_q = K_3 \cdot (\Delta E_{Fd} - K_4 \cdot \Delta \delta)$$

$$(8) K_3 = \frac{1}{[1 + (X_d - X_d')Y_d]}$$

$$K_4 = (X_d - X_d') \cdot F_d \quad (9)$$

أما الثوابت K_5, K_6 فتحسب من علاقة التوتر الطرفي :

$$(10) V_t^2 = V_d^2 + V_q^2$$

$$\Delta V_t = \left(\frac{V_{d_0}}{V_{t_0}}\right) \cdot \Delta V_d + \left(\frac{V_{q_0}}{V_{t_0}}\right) \cdot \Delta V_q \quad (11)$$

بتعويض $\Delta V_q, \Delta V_d$ في المعادلة (11) :

$$(12) \Delta V_t = K_5 \cdot \Delta \delta + K_6 \cdot \Delta e_q'$$

$$\begin{bmatrix} K_5 \\ K_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_{q_0}}{V_{t_0}} \\ \frac{V_{d_0}}{V_{t_0}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_d & F_q \\ Y_d & Y_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -X_d' \cdot V_{q_0} \\ V_{t_0} \\ X_q \cdot V_{d_0} \\ V_{t_0} \end{bmatrix} \quad (13)$$

معادلات النظام:

انطلاقاً من المخطط الصندوقي للنظام المؤلف من آلة متوائمة موصولة إلى قضيب تجميع لانهائي والمبين في

الشكل (2) نكتب مجموعة المعادلات التفاضلية الواصفة للنظام كما يأتي:

$$* \frac{\Delta \delta}{\Delta \omega} = \frac{2\pi f}{s} ; \omega = 2\pi \cdot f \quad (14)$$

$$s \cdot \Delta \delta = 2\pi f \cdot \Delta \omega \quad (15)$$

$$\dot{\Delta \delta} = 2\pi f \cdot \Delta \omega \quad (16)$$

$$* \Delta T_e = K_1 \cdot \Delta \delta + K_2 \cdot \Delta E_q' \quad (17)$$

$$* \frac{\Delta \omega}{-D \cdot \Delta \omega + \Delta T_m - \Delta T_e} = \frac{1}{2 \cdot H \cdot s} \quad (18)$$

وبإصلاح المعادلة نجد:

$$2 \cdot H \cdot s \cdot \Delta \omega = -D \cdot \Delta \omega - K_1 \cdot \Delta \delta - K_2 \cdot \Delta E_q' + \Delta T_m \quad (19)$$

$$2 \cdot H \cdot \dot{\Delta \omega} = -D \cdot \Delta \omega - K_1 \cdot \Delta \delta - K_2 \cdot \Delta E_q' + \Delta T_m \quad (20)$$

$$\dot{\Delta \omega} = -\frac{K_1}{2 \cdot H} \cdot \Delta \delta - \frac{D}{2 \cdot H} \cdot \Delta \omega - \frac{K_2}{2 \cdot H} \cdot \Delta E_q' + \frac{1}{2 \cdot H} \cdot \Delta T_m \quad (21)$$

$$2 \cdot H \cdot \dot{\Delta \omega} = -D \cdot \Delta \omega - K_1 \cdot \Delta \delta - K_2 \cdot \Delta E_q' + \Delta T_m \quad (22)$$

$$\dot{\Delta \omega} = -\frac{K_1}{2 \cdot H} \cdot \Delta \delta - \frac{D}{2 \cdot H} \cdot \Delta \omega - \frac{K_2}{2 \cdot H} \cdot \Delta E_q' + \frac{1}{2 \cdot H} \cdot \Delta T_m \quad (23)$$

بنية المتحكم العائم fuzzy controller struction:

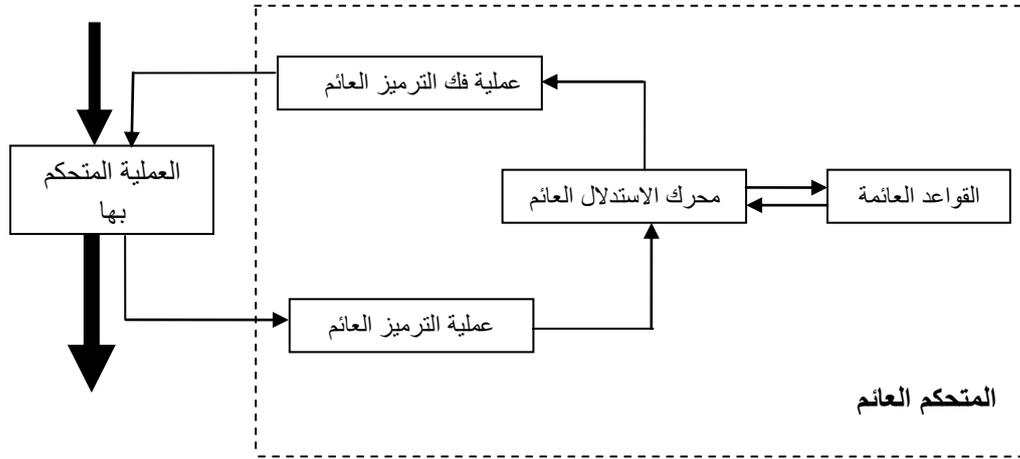
تُعدُّ المتحكمات العائمة نوعاً خاصاً من الأنظمة الخبيرة المبنية على المعرفة التي تم تطويرها خصيصاً لمحاكاة التفكير الإنساني في حل مشاكل التحكم. إن أنظمة التحكم العائمة تتغير بشكل أساسي وفقاً لطبيعة مشاكل التحكم التي يجب حلها والتي تتراوح بين المشاكل المعقدة التي تتطلب أفعال مترابطة عديدة وبين المشاكل البسيطة كالحفاظ على قيمة متغير ما عند قيمة محددة.

إن أنظمة التحكم العائمة تختلف عن أنظمة التحكم الكلاسيكية (المتحكمات الكلاسيكية) في كونها قادرة على الاستفادة من المعرفة المستخلصة من التفكير الإنساني (human operators). وهذا مفيد في مشاكل التحكم التي من الصعب وحتى من المستحيل بناء نماذج رياضية دقيقة لها، أو حتى النماذج التي يكون من الصعب والمكلف استخدامها، وهذه الصعوبات يمكن أن تنتج من اللاخطية الذاتية، والطبيعة المتغيرة مع الزمن للعمليات المتحكم بها، الاضطرابات الكبيرة التي لا يمكن التنبؤ بها، انحراف الحساسات أو صعوبات أخرى في الحصول على قياسات موثوقة ودقيقة، ومجموعة من العوامل الأخرى.

من الملاحظ أن عوامل الخبرة الإنسانية بشكل عام قادرة على الأداء بشكل جيد تحت هذه الظروف. إن عامل المعرفة للخبرة الإنسانية يمكن أن يستخدم كنموذج بديل ودقيق للعملية المتحكم بها. بينما هذه المعرفة من الصعب التعبير عنها بمصطلحات دقيقة.

التوصيف اللغوي غير الدقيق لطريقة التحكم عادةً يوضح من قبل العامل (operator) بسهولة نسبية. هذا التوصيف اللغوي يتألف من مجموعة من قواعد التحكم التي تستخدم فرضيات المنطق العائم [6].

يتألف المتحكم العائم بشكل عام من المكونات الأربعة الآتية: الترميز العائم، أساس القواعد العائمة، محرك الاستدلال العائم، فك الترميز العائم. والعلاقة بين هذه العمليات الأساسية والعملية المتحكم بها تظهر كما في الشكل الآتي:



الشكل (3) بنية التحكم العائم

وفيما يلي سيتم شرح العمليات الأربع الأساسية التي تشكل بنية المتحكم العائم.

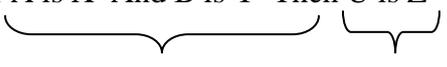
1- عملية الترميز العائم fuzzification:

عملية الترميز العائم هي العملية التي تقوم بتحويل معطيات إشارات الدخل من قيم حقيقية (crisp values) إلى قيم عائمة (fuzzy values) وتستخدم توابع الانتماء للوصف التخطيطي للحالة. يمثل الصندوق الأول من المخطط الصندوقي في الشكل (3) عملية الترميز العائم. حيث إن دخل عملية الترميز العائم هو متغيرات العملية المتحكم بها للحصول على الفعل التحكمي المناسب وهي قيم حقيقية أما خرج عملية الترميز العائم فمجموعات عائمة والتي هي دخل محرك الاستدلال العائم [7-8].

2- القواعد العائمة fuzzy rules:

تعد القواعد العائمة جوهر أنظمة التحكم العائمة. وهي العلاقة التي تحكم بين إشارات دخل المتحكم العائم وإشارات خرج المتحكم. توضع القواعد العائمة عادة من قبل خبير باعتماد المعرفة والتجربة والخبرة إما بالتعامل مع الوثائق أو التعامل مع الخبراء أنفسهم. فالطريقة الأولى تعتمد التعامل مع المقالات والإرشادات (التوجيهات) العلمية أو أي تعليقات أخرى وإعادة هيكلتها على شكل مجموعة من القواعد. أما الطريقة الثانية فتعتمد استجواب الخبراء المتمرسين أو العاملين في المجال عن طريق استبيان منظم. ومن أجل الحصول على أفضل النتائج يتم الدمج بين الطريقتين. وتصاغ هذه القواعد بأشكال مختلفة، وفي معظم أنظمة التحكم تصاغ على الشكل (if . then) الذي يتألف من القسم الشرطي if والقسم الاستنتاجي then كالآتي:

If A is X And B is Y Then U is Z



حيث :

A, B: هي متغيرات الحالة المراقبة للعملية.

U: هو الفعل التحكمي الذي يؤخذ من قبل المتحكم.

أما الصيغ المبهمة Z, Y, X فهي مصطلحات تعبر عن مجموعات ضبابية معرفة على المجموعة الشاملة لقيم

U, B, A على التوالي [8].

إن أنظمة التحكم المصاغة على الشكل (if-then) وما يستتبعها من تعريف بالمتغيرات المرتبطة بالحالة المراقبة للعملية وبالفعل التحكمي، وكذلك بالصيغ المبهمة، تدخل في إطار المبادئ الأساسية لنظرية الاحتمالات، خاصة مصطلح المجموعة الشاملة، ويمكن أن يضاف إليها مصطلح "مجموعة الطاقة" بحيث تندرج ضمن مفهومات القواعد العائمة.

3. محرك الاستدلال العائم fuzzy inference engine:

يقوم محرك الاستدلال العائم بتقييم القواعد العائمة باستخدام قيم الدخل المرمزة بشكل عائم من أجل الحصول على الخرج العائم المناسب من خلال تجميع القواعد الضبابية المفعلة.

4. عملية فك الترميز العائم defuzzification:

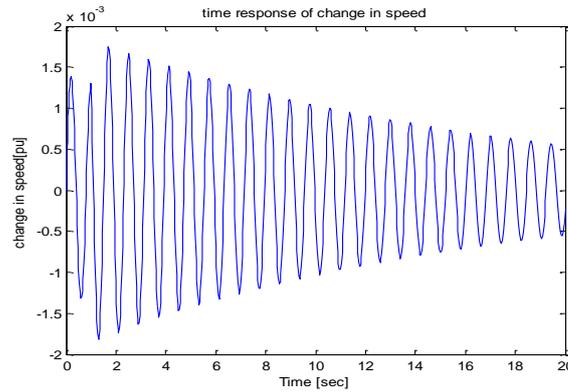
عملية فك الترميز العائم هي عملية التحويل الثانية في المتحكم العائم التي تقوم بتحويل إشارة الخرج العائمة (fuzzy output) التي هي إشارة خرج محرك الاستدلال العائم إلى إشارة خرج حقيقية (crisp output) وهناك عدة طرائق لعملية فك الترميز العائم [7].

تصميم المتحكم العائم المقترح:

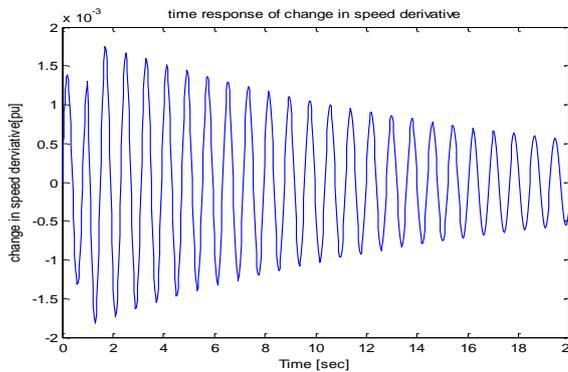
تمت عملية تصميم المتحكم العائم باستخدام الـ fuzzy logic toolbox في برنامج الـ MATLAB، والذي يسمح للمستخدم بالتصميم السريع، واختبار ومحاكاة وتعديل نظام الاستدلال العائم وفق الخطوات الآتية:

1. تعيين متغيرات (إشارات) الدخل والخرج للمتحكم العائم (FLC) ومجالات قيمها.

يستخدم المتحكم المصمم تغير السرعة ($\Delta\omega$) ومشتق تغير السرعة ($\Delta\dot{\omega}$) كإشارات دخل، بينما خرج المتحكم العائم المصمم (V_{ss}) والذي هو إشارة التحكم الإضافية لنظام تهبيج الآلة المتوافقة. وقد تم تحديد مجالات قيم كل من ($\Delta\omega$) و ($\Delta\dot{\omega}$) اعتماداً على رسم الاستجابة الزمنية لهما عند حدوث الاضطراب وعدم وجود المتحكم والمبينة بالأشكال (4)، (5) على التوالي:



الشكل (4) يبين الاستجابة الزمنية لتغير السرعة



الشكل (5) يبين الاستجابة الزمنية لمشتق تغير السرعة

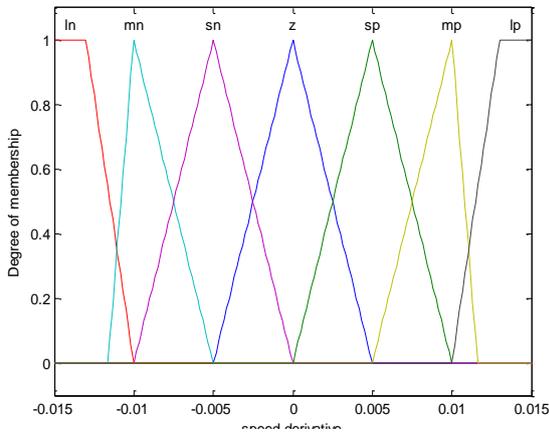
ويكون مجال قيم تغير السرعة $\Delta\omega$ هو $[-0.0035 \ 0.0035]$ ، أما مجال قيم مشتق تغير السرعة $\Delta\dot{\omega}$ فهو $[-0.015 \ 0.015]$.

وقد تم اعتماد المجال القياسي $[-0.36 \ 0.36]$ كمجال قيم خرج المتحكم المصمم (FLC). وباستخدام طريقة (trial and error) تم اختيار عامل قياس الخرج $K_{vss}=0.8$.

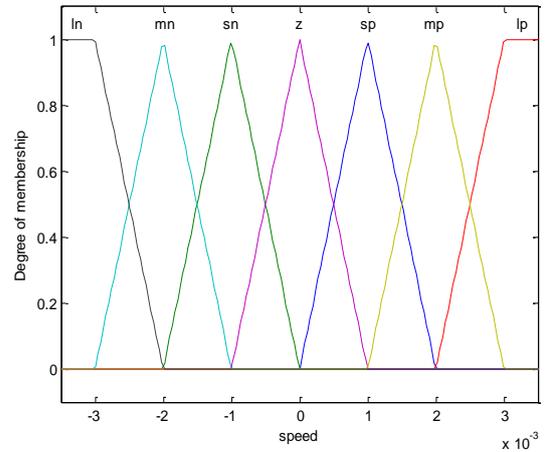
بعد ذلك تم اختيار المتغيرات اللغوية المناسبة لكل من دخلي المتحكم وخرجه (المتغيرات اللغوية التي تصف كل متغير). حيث تم استخدام سبعة متغيرات لغوية لكل من إشارتي دخل المتحكم ($\Delta\dot{\omega}, \Delta\omega$) وكذلك سبعة متغيرات لغوية لإشارة خرج المتحكم (V_{ss}) كالاتي (PL,PM,PS,Z,NS,NM,NL) والتي تشير إلى:

(Large positive, medium positive ,small positive, zero, small negative, medium negative, large negative) على التوالي. ومن ثم تم تمثيل المتغيرات اللغوية لإشارات المتحكم الثلاث باستخدام توابع الانتماء على كامل المجال. كما هو مبين في الأشكال (6)،(7)،(8).

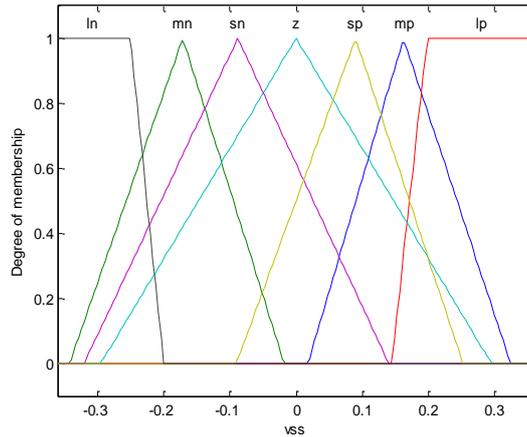
لقد تم توصيف المتغيرات اللغوية (NM, NS, Z, PS, PM) باستخدام توابع انتماء مثلثية الشكل (trimf)، بينما استخدمت توابع الانتماء شبه المنحرفة (trapmf) لتوصيف المتغيرات اللغوية (NL, PL).
2. وتم في الخطوة الثانية تم وضع القواعد الضبابية اللازمة لعمل لمتحكم المفروض، وهي الخطوة الأكثر صعوبة في عملية تصميم المتحكم العائم، حيث إنها تتطلب بعض المعرفة لديناميكية النظام. يبين الجدول (1) القواعد الضبابية المستخدمة في تصميم المتحكم المفروض.



الشكل (7) يبين تمثيل المتغيرات اللغوية لإشارة دخل المتحكم $\Delta \omega$ باستخدام توابع الانتماء



الشكل (6) يبين تمثيل المتغيرات اللغوية لإشارة دخل المتحكم $\Delta \omega$ باستخدام توابع الانتماء



الشكل (8) يبين تمثيل المتغيرات اللغوية لإشارة خرج المتحكم V_{ss} باستخدام توابع الانتماء

يحدد العدد الإجمالي للقواعد وفق العلاقة:

$$m^n = \text{العدد الإجمالي للقواعد}$$

حيث: m عدد المتغيرات اللغوية.

n عدد إشارات الدخل.

العدد الإجمالي للقواعد = $7^2 = 49$ قاعدة.

إذاً لدينا (49) قاعدة تحدد العلاقة بين متغيرات الدخل ($\Delta\omega$ ، $\Delta\dot{\omega}$) ومتغير الخرج (V_{ss}).

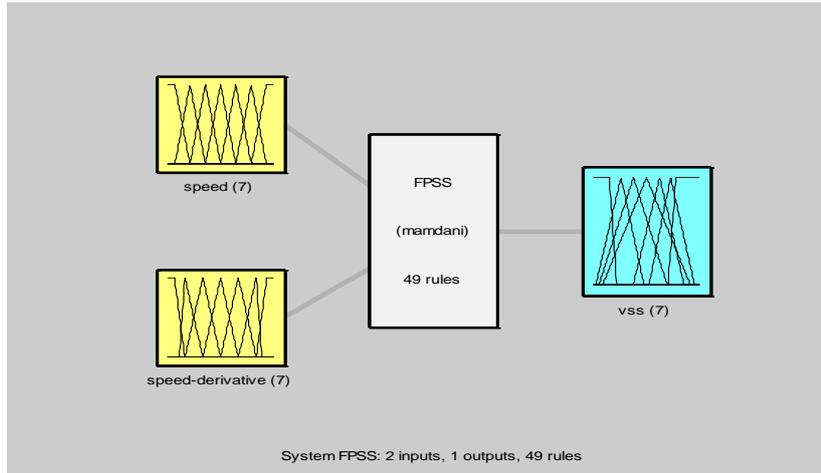
الجدول (1) القواعد الضبابية للمتحكم العائم FLC

| | | V_{ss} | | | | | | |
|---------------------------------------|----|----------|----|----|----|----|----|--|
| $\Delta\dot{\omega}$ \ $\Delta\omega$ | NL | NM | NS | Z | PS | PM | PL | |
| NL | NL | NM | NS | Z | PS | PM | PL | |
| NM | NL | NL | NL | NM | NM | NS | Z | |
| NS | NL | NM | NM | NM | NS | Z | PS | |
| Z | NL | NM | NS | NS | Z | PS | PM | |
| PS | NM | NM | NS | Z | PS | PM | PM | |
| PM | NM | NS | Z | PS | PS | PM | PL | |
| PL | NS | Z | PS | PM | PM | PM | PL | |

3. بعد ذلك تم تحديد العوامل المنطقية المستخدمة في عملية التفعيل (Implication) حيث تم استخدام العامل (AND) أو (minimum) الذي يأخذ القيمة الصغرى لتابعي الانتماء اللذين حصلنا عليهما بعد عملية الترميز الضبابي لمتغيري الدخل ($\Delta\omega$ ، $\Delta\dot{\omega}$) بعد ذلك تخصص هذه القيمة الصغرى كتابع انتماء إشارة الخرج من أجل القاعدة المفعلة، وبعد ذلك يتم تجميع كل توابع الانتماء التي تم الحصول عليها من أجل قواعد مستقلة مع بعضها البعض باستخدام العامل المنطقي (OR) أو (maximum).

4. في النهاية تم اختيار طريقة مركز الثقل لفك الترميز العائم (centroid of area defuzzification) للحصول على قيمة الخرج الحقيقية (crisp output).

وبعد انتهاء هذه الخطوات أصبح المتحكم العائم (FLC) جاهزاً للتطبيق ويبين الشكل (9) المتحكم المصمم باستخدام الـ (fuzzy logic toolbox) في برنامج الـ (MATLAB).



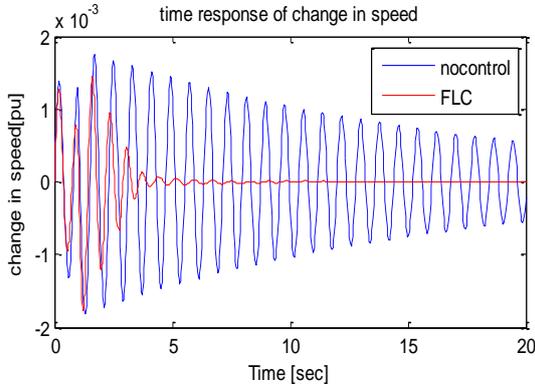
الشكل (9) يبين مخطط المتحكم العائم المصمم

النتائج والمناقشة:

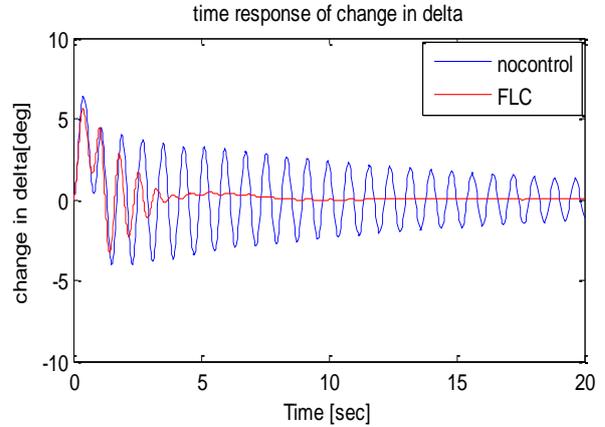
تم دراسة الأداء الديناميكي لنظام مولف من آلة متواقتة موصولة إلى قضيب تجميع لانهائي عبر خط نقل حيث إن الآلة المتواقتة مزودة بنظام تهبيج من النموذج [IEEE TYPE-1] وسنورد فيما يأتي ثوابت النظام:

| | | | |
|---------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------|
| $X_d = 0.973 \text{ pu}$ | $X_q = 0.55 \text{ pu}$ | $T_{do} = 7.76 \text{ pu}$ | ثوابت الآلة المتواقتة: |
| $X'_d = 0.19 \text{ pu}$ | $H = 4.63 \text{ S}$ | $D = 0$ | |
| $K_A = 25$ | $K_E = 0.654$ | $K_F = 0.063$ | ثوابت نظام التهبيج: |
| $T_A = 0.027 \text{ Sec}$ | $T_E = 0.314 \text{ Sec}$ | $T_F = 0.35 \text{ Sec}$ | |
| $R = -0.034 \text{ pu}$ | $XL = 0.4 \text{ pu}$ | $f = 50 \text{ HZ}$ | ثوابت خط النقل: |
| $b = 0.262 \text{ pu}$ | $g = 0.249 \text{ pu}$ | $X_{eq} = 0.2 \text{ pu}$ | |
| $P_G = 1 \text{ pu}$ | $Q_G = 0.2 \text{ pu}$ | $V_{10} = 1.05 \text{ pu}$ | ثوابت حالة التشغيل: |
| $K_1 = 1.8033$ | $K_2 = 1.3794$ | $K_3 = 0.3410$ | ثوابت النظام |
| $K_4 = 1.2525$ | $K_5 = -0.035$ | $K_6 = 0.4638$ | |

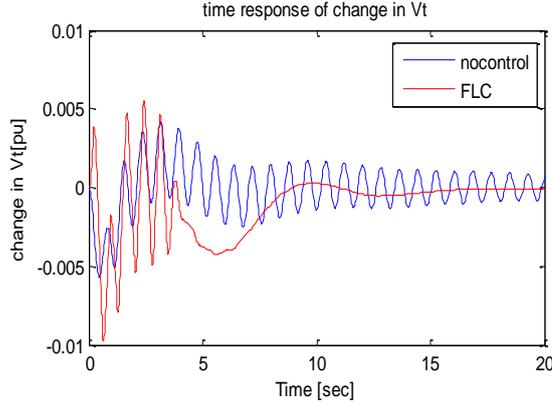
1. تم دراسة أداء النظام عند استخدام إشارة خرج المتحكم العائم FLC كإشارة تحكم إضافية بنظام التهبيج، وذلك من أجل حالات عمل مختلفة للنظام. لقد تم إحداث عطل عبارة عن تغير في العزم الميكانيكي بمقدار (10%)، ورسمت الاستجابة الزمنية لمتغيرات النظام $\Delta\omega$ ، $\Delta\delta$ ، ΔV_t ، وذلك من دون وجود متحكم ومع وجود المتحكم العائم كما هو مبين في الأشكال الآتية:



الشكل (11) الاستجابة الزمنية لتغير سرعة دوار المولد



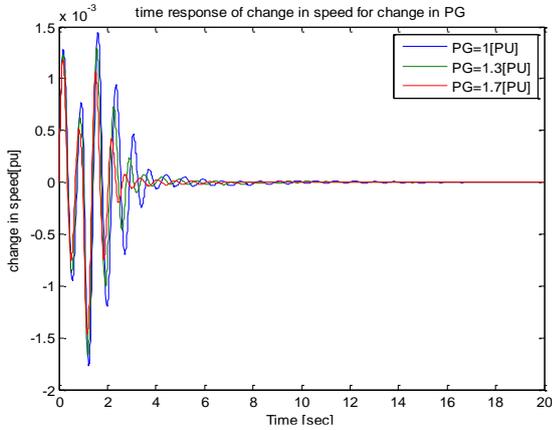
الشكل (10) الاستجابة الزمنية لتغير زاوية القدرة



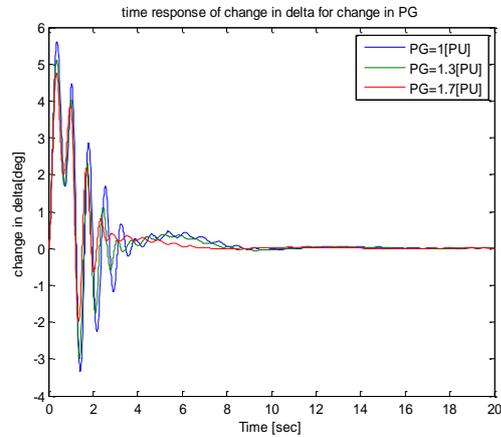
الشكل (12) الاستجابة الزمنية لتغير الجهد الطرفي

بينت المنحنيات أنه يوجد تأثير إخماد جيد للاهتزازات مع وجود الـ *FLC* ، حيث لا يعود النظام إلى الحالة المستقرة خلال الزمن المدروس للاختبار بدونه.

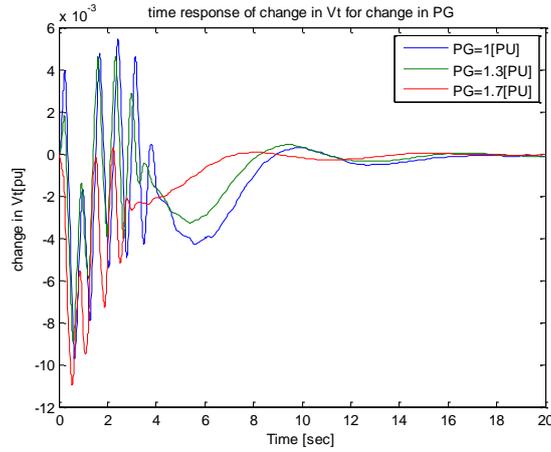
أولاً: تم اختبار أداء المتحكم *FLC* في حالة زيادة التحميل وتم رسم الاستجابة الزمنية للمتغيرات $\Delta\omega$ ، $\Delta\delta$ ، ΔV_t من أجل قيم تغير الاستطاعة الفعلية P_G الآتية: ($P_G=1[pu]$ ، $P_G=1.3[pu]$ ، $P_G=1.7[pu]$) ، وتم الحصول على المنحنيات المبينة في الأشكال (13)، (14)، (15) والتي تمثل الاستجابة الزمنية للمتغيرات ΔV_t ، $\Delta\omega$ ، $\Delta\delta$ على التوالي.



الشكل (14) الاستجابة الزمنية لتغير سرعة دوار المولد



الشكل (13) الاستجابة الزمنية لتغير زاوية القدرة



الشكل (15) الاستجابة الزمنية لتغير الجهد الطرفي

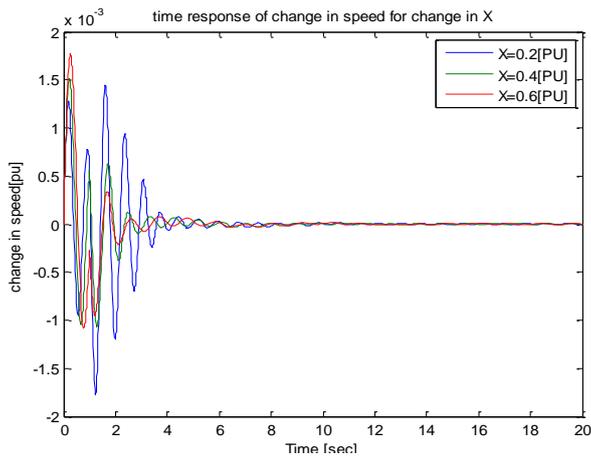
الجدول (2) يبين المقارنة بين أداء النظام بوجود المتحكم FLC

من حيث زمن الاستقرار والتجاوز الأعظمي من أجل حالات تحميل مختلفة

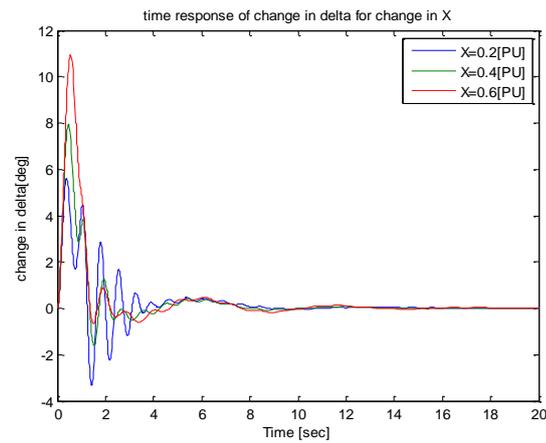
| الاستجابة الزمنية لتغير الجهد الطرفي للمولد ΔV_t | الاستجابة الزمنية لتغير سرعة الدوران $\Delta \omega$ | الاستجابة الزمنية لتغير زاوية القدرة $\Delta \delta$ | نوع الاستجابة الزمنية قيم P_G | |
|--|--|--|------------------------------------|---------------------|
| 11.78 | 5.5 | 7.5 | 1 | زمن الاستقرار [sec] |
| 10.7 | 4 | 7.1 | 1.3 | |
| 7 | 3.5 | 5 | 1.7 | |
| -0.0096 | -0.0017 | 5.592 | 1 | التجاوز الأعظمي |
| -0.0091 | -0.0017 | 5.109 | 1.3 | |
| -0.01 | -0.0014 | 4.708 | 1.7 | |

من مناقشة الجدول نجد مقدرة المتحكم العائم على الحفاظ على استقرار النظام من أجل حالات تحميل مختلفة، وأن المتحكم العائم يقدم أداء أفضل للنظام مع زيادة التحميل حيث يقل الزمن اللازم للوصول إلى الاستقرار، وكذلك يقل مطال التجاوز الأعظمي مع زيادة التحميل.

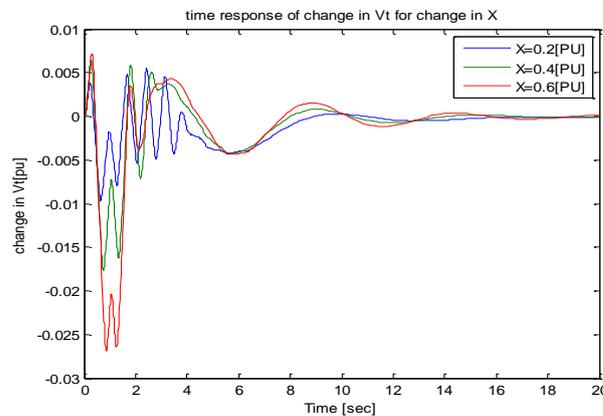
ثانياً: اختبار أداء المتحكم FLC من أجل تغير قيمة المفاعلة المكافئة لخطي النقل ورسم الاستجابة الزمنية للمتغيرات ΔV_t ، $\Delta \omega$ ، $\Delta \delta$ من أجل القيم التالية للمفاعلة المكافئة: $(X=0.2[PU], X=0.4[PU], X=0.6[PU])$ وحصلنا على المنحنيات المبينة في الأشكال (16)، (17)، (18) التي تمثل الاستجابة الزمنية للمتغيرات ΔV_t ، $\Delta \omega$ ، $\Delta \delta$ على التوالي.



الشكل (17) الاستجابة الزمنية لتغير سرعة دوار المولد



الشكل (16) الاستجابة الزمنية لتغير زاوية القدرة



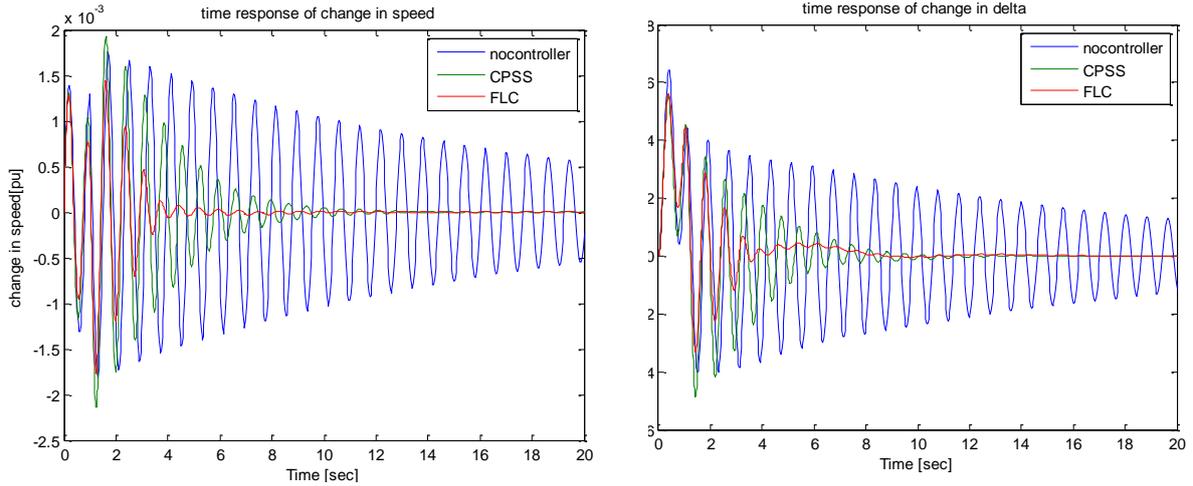
الشكل (18) الاستجابة الزمنية لتغير الجهد الطرفي للمولد

من مناقشة الجدول (3) نجد مقدرة المتحكم العائم على الحفاظ على استقرار النظام من أجل جميع قيم X المدروسة، حيث يتم الوصول إلى الاستقرار عند زمن الانستقرار نفسه تقريباً، وذلك لجميع الحالات المدروسة.

الجدول (3) يبين المقارنة بين أداء النظام بوجود المتحكم FLC عند قيم مختلفة لـ X

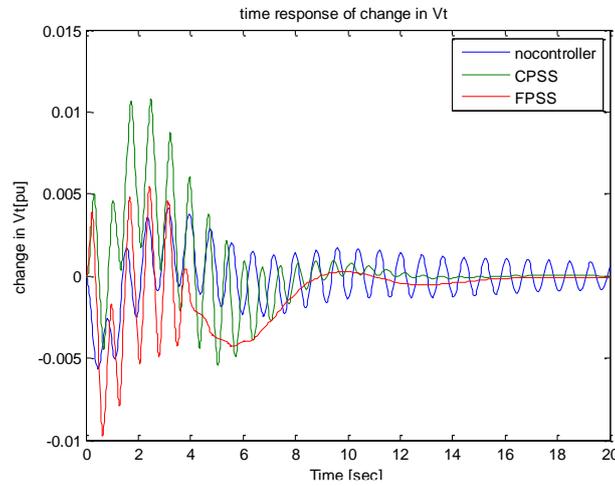
| الاستجابة الزمنية لتغير الجهد الطرفي للمولد ΔV_t | الاستجابة الزمنية لتغير سرعة الدوار $\Delta \omega$ | الاستجابة الزمنية لتغير زاوية القدرة $\Delta \delta$ | نوع الاستجابة الزمنية | |
|--|---|--|-----------------------|---------------------|
| | | | قيم X | |
| 11.78 | 5.5 | 7.287 | 0.2 | زمن الاستقرار [sec] |
| 12.25 | 5.5 | 7.625 | 0.4 | |
| 12.5 | 5.5 | 7.625 | 0.6 | |
| -0.01 | -0.00177 | 5.655 | 0.2 | التجاوز الأعظمي |
| -0.017 | 0.0015 | 7.903 | 0.4 | |
| -0.26 | 0.0017 | 10.93 | 0.6 | |

2. ومن ثم تمت مقارنة أداء النظام بوجود المتحكم العائم (FLC) مع أداء النظام بوجود محمد الاهتزازات التقليدي (CPSS) الذي تم الحصول على بارامتراته التالية باستخدام طريقة الخطأ والتجربة $(trial\ and\ error)$ ($T_1 = 0.3, T_2 = 0.05, T_3 = 0.3, T_4 = 0.05, T_W = 10, K_W = 50$) من أجل حالة العمل ($P_G=1, Q_G=0.2, X_G=0.2$) وتم الحصول على المنحنيات الآتية:



الشكل (20) الاستجابة الزمنية لتغير سرعة دوار المولد

الشكل (19) الاستجابة الزمنية لتغير زاوية دوار المولد



الشكل (21) الاستجابة الزمنية لتغير الجهد الطرفي للمولد

تظهر الأشكال السابقة فعالية أداء المتحكم العائم مقارنة مع أداء محمد الاهتزازات التقليدي حيث يتم الوصول إلى الحالة المستقرة عند زمن أقل و تجاوز أعظمي أقل بوجود المتحكم العائم .

الاستنتاجات والتوصيات:

من دراستنا السابقة وتحليل النتائج يمكن أن نستنتج ما يأتي:

- * فعالية نظام التهييج في تحسين الاستقرار الديناميكي لنظام الطاقة ولكن هذه الفعالية مقيدة بالتأخير الزمني لاستجابته بالإضافة إلى القيم المرتفعة لمفاعلات المولدات. لذلك نجد أنه من المفيد جداً العمل على تطوير أنظمة التهييج بشكل جيد، وذلك تم تصميم المتحكم العائم لتفادي مشكلة التأخير الزمني .
- * إن التحكم الإضافي في نظام التهييج بوساطة المتحكمات العائمة يزيد من إمكانية تحسين الاستقرار الديناميكي بتقليل مطال الاهتزازات الناشئة عن الأعطال وتقليل زمن التخادم، وذلك عن طريق تقديم إشارة جهد إضافية الى دخل نظام التهييج تقارن مع إشارة الجهد المرجعية والجهد الطرفي للمولد.
- * فعالية المتحكم المصمم من أجل جميع حالات العمل المدروسة والتي تتراوح ضمن مجال واسع من حالات عمل النظام.
- * فعالية نظام التحكم FLC من أجل حالات زيادة التحميل.
- * أداء المتحكم العائم يعتمد على ضبط بارمتراته وإشارات الدخل المختارة، وهذا ما يفتح أمامنا مجالاً واسعاً للبحث عن المتحكم العائم الأفضل .
- واعتماداً على نتائج البحث يمكن وضع المقترحات الآتية:
- * اعتماد هذا البحث كنقطة انطلاق في دراسة المتحكمات العائمة واستخدام المنطق الضبابي في تحسين استقرار أنظمة الطاقة الكهربائية.
- * الاستفادة من هذا البحث في تحسين استقرار نظام متعدد الآلات باستخدام المتحكم العائم.
- * البحث في فائدة استخدام إشارات دخل أخرى للمتحكم العائم كالجهد الطرفي للمولد و زاوية القدرة.
- * البحث في أنظمة التحكم العائمة التي تستخدم إشارات دخل متعددة وإشارات خرج متعددة.
- * العمل على تطبيق المتحكمات العائمة في الواقع العملي واستخدامها في تحسين استقرار نظام الطاقة الكهربائي السوري.

المراجع:

- [1] ANDERSON, P.M.; FOUAD, A.A. *Power System Control & Stability*. IOWA State University Press, USA,1986,796.
- [2] TOLIYAT, H.A.; SADEH, J.; GHAZI, R. *Design Of Augmented Fuzzy Logic Power System Stabilizers to Enhance Power System Stability*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.11, No.1,1996,97-103.
- [3] HOANG, P.; TOMSOVIC, K. *design and analysis of an adaptive power system stabilizer*. IEE Transactions on Energy Conversion, Vol.11, No. 2, 1996, 455-461.
- [4] EL-METWALLY, K.A.; MALIK, O.P. *Fuzzy Logic Power System Stabiliser*. IEEE Proc-Gener.Transm.Distrib, Vol.142, No.3,1995, 277-281.
- [5] YAO, N. *Electric power system Dynamics*. Academi press, INC. New York, 1983, 255.
- [6] KLIR, G.J.; YUAN, B. *fuzzy sets and fuzzy logic theory and applications*. Prentice Hall PTR, New Jersey,1995,574.
- [7] CIRSTEANU, M.N.; DINU, A.; KHORRAMABADI, J.G.; MCCORMICK, M. *Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems*. Newnes, India, 2002, 399.
- [8] REZNIK, L . *Fuzzy Controllers*. NEWNES, Australia,1997, 287.