

نمذجة ومحاكاة المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم باستخدام MATLAB & Simulink

محمود منى*

(تاريخ الإيداع 13 / 3 / 2014. قُبل للنشر في 14 / 10 / 2014)

□ ملخص □

منذ أن تم اختراع المنطق الضبابي والتحكم الضبابي حظي الأخير بانتشار واهتمام متزايدين في تطبيقات متنوعة وفي الأجهزة المختلفة في مختلف نواحي الحياة. ولعل ذلك لسهولة تطبيق نظام التحكم الضبابي ولابعاده غالباً عن تعقيدات العلاقات الرياضية. حتى لو لم تكن نعلم نموذج النظام موضوع التحكم، يستطيع المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم (SOFC) تحسين استجابة متحكم ضبابي خطي موجود أو بناء جدول تحكم من الصفر، من خلال تقييم أداء المتحكم الحالي وتعديل جدول التحكم بناءً على ذلك. يقدم هذا البحث مادة بسيطة توضح كيفية تصميم واستخدام المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم. من خلال عملية نمذجة ومحاكاة باستخدام Matlab & Simulink® حيث تم فيها استخدام المتحكم لتنظيم سرعة محرك كهربائي مستمر عند حمولات متغيرة. وأظهرت المحاكاة قدرة المتحكم على تقديم استجابة جيدة وتقليل خطأ السرعة بشكل ملحوظ عند تغير الحمولة. يعد البحث مادة نصية يمكن أن يرجع إليها طلبتنا والباحثون المهتمون في مجال التحكم التكيفي عامة، والتحكم الضبابي ذاتي التنظيم خاصة.

الكلمات المفتاحية: تحكم ضبابي، تحكم تكيفي، تنظيم ذاتي، التأخير في الجراء.

* قائم بالأعمال معاون - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - قسم هندسة الميكاترونك - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

Modeling and Simulation of a Self-Organizing Fuzzy Controller Using MATLAB & Simulink

Mahmoud Mouna*

(Déposé le 13 / 3 / 2013 . Accepté 14/10/2013)

□ ABSTRACT □

Since the invention of Fuzzy logic and fuzzy control, the latter has been growing in spread and importance in many applications and devices in many life aspects. This maybe due to the easy use of a fuzzy control system, and for being far of math complications. Even if the plant model is unknown, a self-organizing fuzzy controller (SOFC) can improve the response of an already exist linear control table, or even can build a control table from scratch, by assessing current performance of the controller and adjusting the control table accordingly. This paper provides a simple article that shows how to design and use a self-organizing fuzzy controller, through a simulation example using MATLAB & Simulink® in which a variable torque loaded DC motor speed regulation is done. The simulation showed the ability of the controller to provide a good response and decrease speed error by a notable amount at load torque changing times. This paper can be used as textbook material for students or researchers interested in the field of adaptive control, especially self-organizing fuzzy control.

Keywords: Fuzzy control, adaptive control, self-organizing, delay-in-penalty.

* A business associate in the Faculty of mechanical and electrical engineering, Mechatronics Engineering Department, Tishreen university, e-mail:mahmood.mouna@gmail.com.

مقدمة:

منذ أن تم اختراع المنطق الضبابي (Fuzzy Logic) والتحكم الضبابي (Fuzzy control) حظي بانتشار واهتمام متزايدين في تطبيقات متنوعة وفي الأجهزة المختلفة في مختلف نواحي الحياة. لعل ذلك يعود لسهولة تطبيق نظام التحكم الضبابي ولإبتعاده غالباً عن تعقيدات العلاقات الرياضية، فكما أن المنطق الضبابي يوصف بأنه "الحساب بالكلمات بدلاً من الأرقام"، فإنه يمكن وصف التحكم الضبابي بأنه "التحكم بالجمل بدلاً من المعادلات".

من المعلوم أنه عند تصميم المتحكم التقليدي يجب علينا أن نمتلك نموذجاً رياضياً دقيقاً لموضوع التحكم (Plant)، كمثال نموذجي، فعند تصميم المتحكم التقليدي التناسبي-التفاضلي-التكاملي (PID) يجب أن يكون لدينا تابع النقل ذو الدرجة الأولى أو الثانية، والذي لا يكون متوفراً في غالب الأحيان. فعلى سبيل المثال:

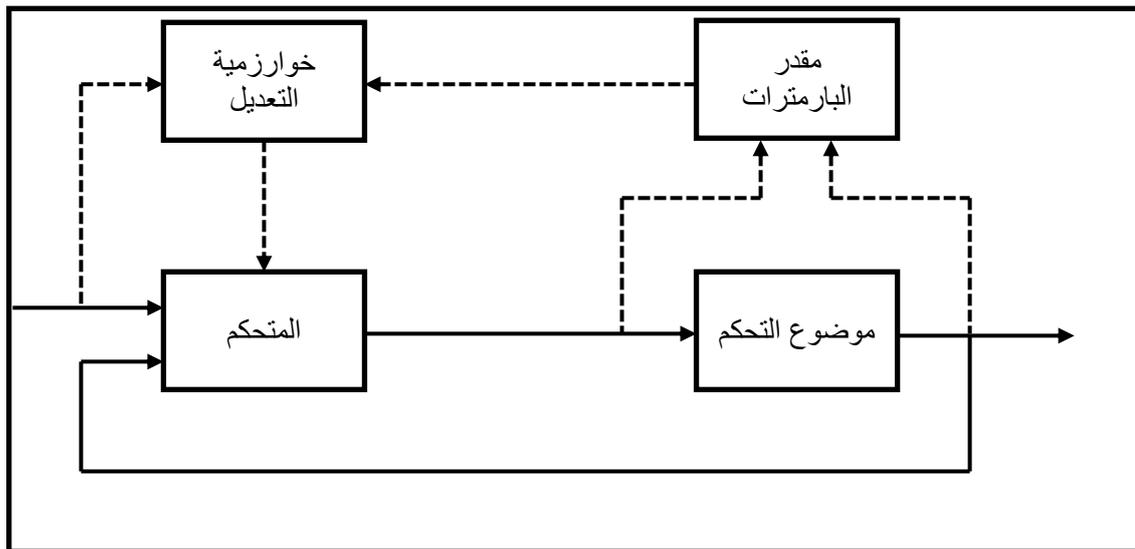
• في الروبوتات (Robotics): إن عزم العطالة المؤثرة على محركات القيادة تتغير بتغير موقع المؤثر النهائي (End Effector) وكتلة الحمولة. الأمر الذي يعني أن النموذج الديناميكي يتغير بتغير وضعية الروبوت.

• في المفاعلات الكيميائية (Chemical Reactors): تتغير توابع النقل بتغير مزيج الكواشف والمحفزات في الوعاء والذي يتغير مع تقدم التفاعل.

• مع الناس: كسب التابع الذي يربط الغيبوبة مع كمية المادة المخدرة يعتمد على أبيض المريض [1].

أما في تصميم المتحكم الضبابي فإننا يمكننا أن نفترض أن النموذج الرياضي مجهول جملة وتفصيلاً [2]، إذ إنه يمكننا الاعتماد على معرفة الخبراء بعملية التحكم لبناء مجموعة من القواعد التي نستطيع من خلالها بناء نظام تحكم ضبابي، أما في الحالات الأكثر تعقيداً كحالات اللاخطية (nonlinearity) والعمليات المتغيرة زمنياً (time-variable) فتبرز الحاجة للمتحكم التكيفي (adaptive control) والذي هو بالتعريف "المتحكم الذي يمتلك بارامترات قابلة للتعديل وآلية لتعديل تلك البارامترات" [3].

إن للمتحكم التكيفي الهيكلية العامة المبينة في الشكل (1) بحيث يتكون من حلقتين رئيسيتين، حلقة التحكم (الخط المستمر) وحلقة التحديث (الخط المنقطع).



الشكل (1): الهيكلية العامة للمتحكم التكيفي.

بعد المتحكم الضبابي الذاتي التنظيم (self-organizing fuzzy controller) من أنظمة التحكم التكيفي، إذ إنه يمتلك آلية لتعديل نظام التحكم خاصته باستخدام مقياس للأداء يقيّم أداء المتحكم ويقوم بتعديله بناءً على ذلك. لقد تم القيام بعدة تصاميم للمتحكم الضبابي ذاتي التنظيم، منها ما اعتمد على تعديل قواعد التحكم مع تحديد العدد لأعظمي لها [4]، كما تم الاعتماد على عمليات تعديل معاملات التنسيب (Scaling Factors) [5]، [6]، ومنها ما اعتمد على الخوارزميات الجينية (Genetic Algorithms) [7]، كما تم استخدام طرق تعلم الشبكات العصبونية (Neural-Networks) في عملية تعديل المتحكم الضبابي [8]، إلا أن هذه الخوارزميات تحتاج إلى استطاعة حسابية عالية مما يجعلها صعبة التطبيق. وفي اتجاه آخر تم تطبيق خوارزميات بسيطة منها ما يعتمد على النمط الانزلاقي (Sliding mode) [9]، ومنها ما يعتمد على التأخير في الجزاء (delay-in-penalty) [10]، [11]، وهو ما تم اعتماده في هذا البحث.

أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية هذا البحث نظراً لأهمية التحكم التكيفي وتطبيقاته المتزايدة يوماً بعد يوم. يقدم هذا البحث مادة بسيطة يوضح فيها كيفية تصميم واستخدام المتحكم الضبابي الذاتي التنظيم. من خلال عملية نمذجة ومحاكاة باستخدام Matlab & Simulink®، حيث تمت هذه الدراسة في جامعة تشرين سنة 2013. ليكون مادة نصية يرجع إليها طلبتنا والباحثون المهتمون في مجال التحكم التكيفي عامة، والتحكم الضبابي ذاتي التنظيم خاصة.

منهجية البحث:

سنقوم هذا البحث بتصميم متحكم ضبابي ذاتي التنظيم (SOFC) للتحكم بسرعة محرك كهربائي مستمر ونمذجة ومحاكاة النظام في بيئة المحاكاة Simulink®، لاختبار أداء المتحكم في تحسين استجابة جدول التحكم الخطي، أو بناء جدول تحكم انطلاقاً من جدول تحكم فارغ، وسنقوم بمقارنة النتائج مع المتحكم PID كمثال عن التحكم التقليدي من خلال دراسة استجابة النظام لدخل دالة الخطوة وفق سيناريو تشغيل محدد.

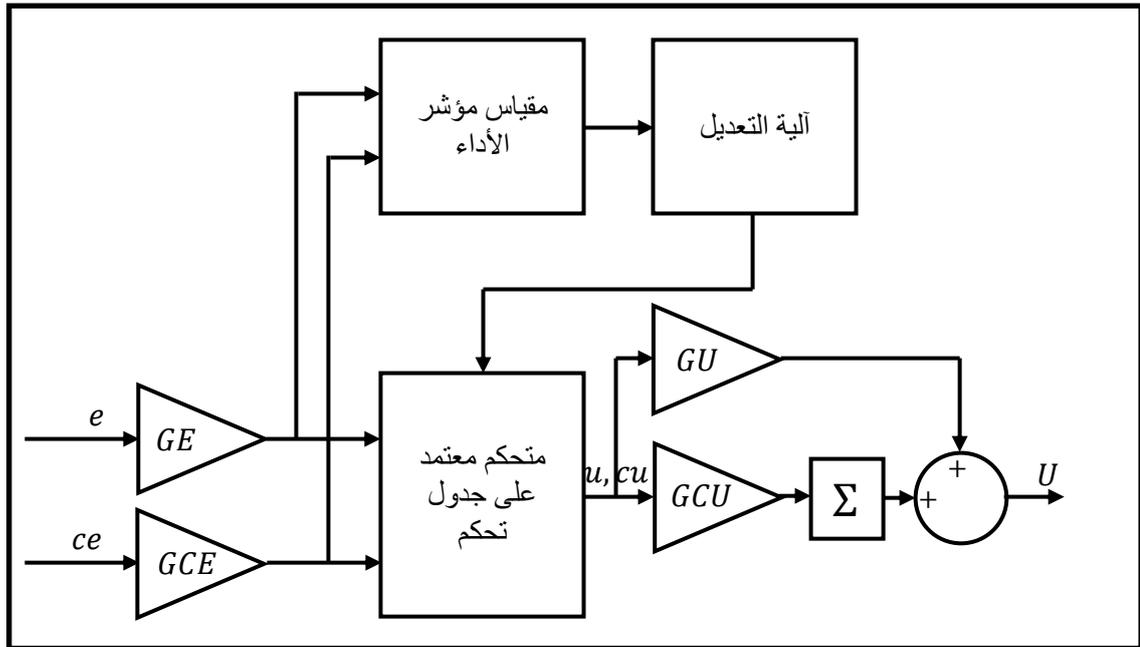
1 المتحكم الضبابي الذاتي التنظيم:

يمتلك المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم البنية الهيكلية المبينة في الشكل (2)، والتي تتألف الحلقة الداخلية فيها من متحكم ضبابي يقوم على جدول تحكم، حيث أن كل خلية فيه تعبر عن قاعدة تحكم، أما الحلقة الخارجية فتعبر عن آلية التعديل (باصطلاح التحكم التكيفي). إن الفكرة من التنظيم الذاتي هي أن نسمح لآلية التعديل أن تغير القيم في جدول التحكم، بالاعتماد على الأداء الحالي للمتحكم. ففي حال كان أداء المتحكم سيئاً فإن الخلية في جدول التحكم التي يعتقد أنها المسؤولة يفرض عليها قيمة جزائية، ليكون مؤشر الأداء في المرة التالية التي يتم فيها زيارة الخلية قريباً أو مساوياً للصفر.

1-1 المتحكم الضبابي المستخدم:

المتحكم المستخدم عبارة عن متحكم مختلط يتكون من متحكم تراكمي رقمي (Digital Incremental Controller) بالإضافة إلى متحكم تناسبي (Proportional Controller)، يقوم المتحكم التراكمي بإضافة التغير في إشارة التحكم C_n في الوقت الحالي n إلى إشارة التحكم في اللحظة الزمنية السابقة U_{n-1} ، والذي يظهر كإشارة مجموع في الشكل (2)، ثم يتم جمعها إلى إشارة التحكم U_n . يشبه هذا المتحكم جمع متحكمي (PI+PD) [12].

مداخل المتحكم هي الخطأ e وتغير الخطأ ce ، ثم يتم ضربهما بربحين GE و GCE على التوالي لملاءمة القيم. ثم تمرر هذه القيم إلى جدول التحكم F الذي يضم مجموعة قواعد التحكم والذي يمكن أن يكون مستنتجاً من قواعد لغوية مكتوبة. القيمة الناتجة عن المتحكم، تعبر عن قيمة إشارة التحكم u التي يتم جداولها بالربح GU لتصبح U وعن التغير في إشارة التحكم cu في نفس الوقت والتي يتم جداولها بالربح GCU ثم يتم مكاملتها رقمياً وجمعها مع U لتنتج إشارة التحكم.



الشكل (2): البنية الهيكلية للمتكم الضبابي ذاتي التنظيم.

لتمثيل فضاء الدخل والذي يتمثل بالخطأ e ومعدل تغير الخطأ ce المضروبين بربحي المواهمة GE و GCE على الترتيب ليصبحان E و CE . تم استخدام توابع انتماء مثلثية يرمز لها كما يلي:

$$E_i ; i = -6, -5, \dots, 5, 6 \quad (1)$$

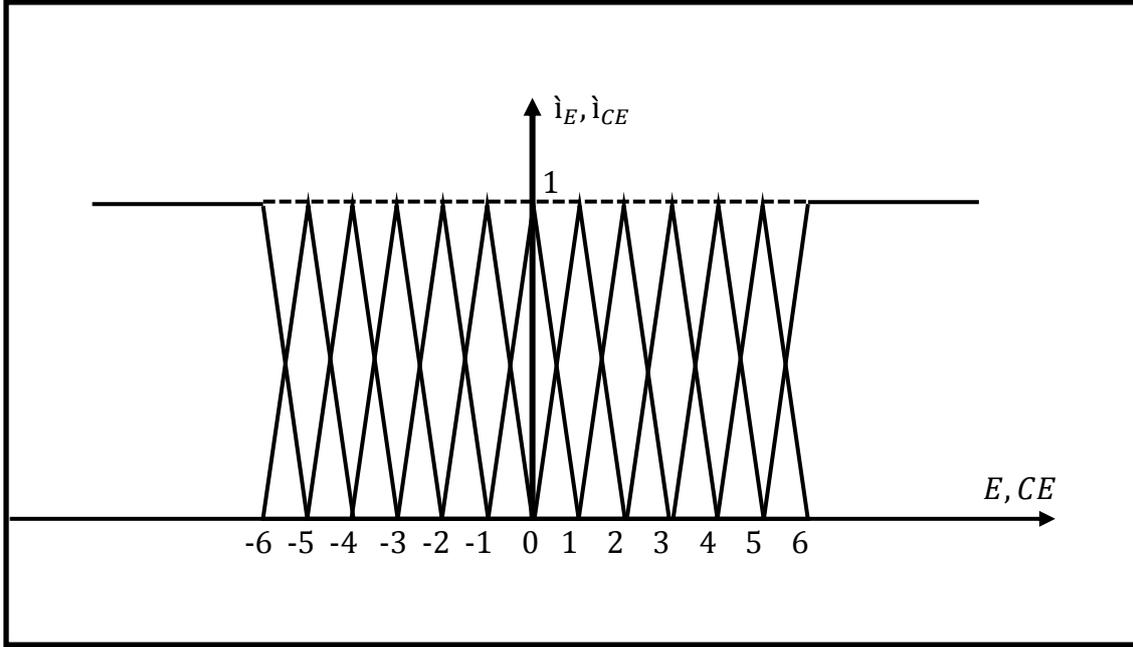
$$CE_j ; j = -6, -5, \dots, 5, 6 \quad (2)$$

حيث إن $\mu_{E_i}(E)$ و $\mu_{C_j}(CE)$ تمثل قيمة تابع الانتماء ويتم التعبير عنها رياضياً كما يلي:

$$\mu_{E_i} = \begin{cases} 1 - |E - i| & ; i - 1 < E < i + 1 \\ 0 & ; otherwise \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{CE_j} = \begin{cases} 1 - |CE - j| & ; j - 1 < CE < j + 1 \\ 0 & ; otherwise \end{cases} \quad (4)$$

ويبين الشكل (3) تمثيل توابع انتماء فضاء الدخل:



الشكل (3): توابع انتماء فضاء الدخل.

إن المتحكم المبني على الجدول يعبر عن مجموعة قواعد تحكم ضبابية تتحكم بإشارة الخرج من أجل متغيرات الدخل الحالية. ويمكن التعبير عن هذه القواعد بشكل عام كما يلي:

R_{ij} : IF E is E_i AND CE is CE_j THEN u is $F(i, j)$ (Error! Bookmark not defined.)

ونظرياً فإن القيمة $F(i, j)$ الموجودة في جدول التحكم لا تعبر بالضرورة عن القيمة المحددة التي ستطبق على الخرج (مدخل المكامل والمضخم التناسبي)، وإنما يتم حساب هذه القيمة باستخدام علاقة المتوسط المثقل المعروفة في التحكم الضبابي [2]، ويمكن التعبير عنها كما يلي:

$$u, cu = \frac{\sum_i \sum_j [\mu_{E_i}(E) \times F(i, j) + \mu_{CE_j}(CE) \times F(i, j)]}{\sum_i \sum_j [\mu_{E_i}(E) + \mu_{CE_j}(CE)]} \text{ (Error! Bookmark not defined.)}$$

2-1 مقياس الأداء:

يأخذ مقياس الأداء (أو جدول الجزاء) P (Penalty table) شكل جدول مماثل في حجمه لحجم جدول التحكم F ويتكون من قيم موضوعة مسبقاً تعبر عن ما هو مرغوب، أو ما ليس مرغوباً، في الاستجابة العابرة بالاعتماد على القيم الحالية لمتغيرات الدخل E و CE . يمكن استخدام نفس مقياس الأداء في أكثر من عملية "موضوع التحكم" دون معرفة مسبقة عن العملية، طالما أنه يعبر عن الاستجابة المرغوبة للحالة العابرة. فمهما كان شكل نموذج النظام يمكن فرض شكل الاستجابة العابرة مشابهة لاستجابة النظام من المرتبة الأولى أو الثانية. يمكن بناء مقياس الأداء باستخدام قواعد مكتوبة، إلا أنه غالباً تتم كتابة قيمه يدوياً، وفيما يلي الجدول (1) والجدول (2) مثالان لمقياس الأداء يستخدمان لتقييم الأداء في المتحكمات ذاتية التنظيم.

الجدول (1): جدول تقييم الأداء [10]

CE

	6-	5-	4-	3-	2-	1-	0	1	2	3	4	5	6
6-	6-	6-	6-	6-	6-	6-	6-	0	0	0	0	0	0
5-	6-	6-	6-	6-	6-	6-	6-	3-	2-	2-	0	0	0
4-	6-	6-	6-	6-	6-	6-	6-	5-	4-	2-	0	0	0
3-	6-	5-	5-	4-	4-	4-	4-	3-	2-	0	0	0	0
2-	6-	5-	4-	3-	2-	2-	2-	0	0	0	0	0	0
1-	5-	4-	3-	2-	1-	1-	1-	0	0	0	0	0	0
0	4-	3-	2-	1-	0	0	0	0	0	1	2	3	4
1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	3	4	5
2	0	0	0	0	0	0	2	2	2	3	4	5	6
3	0	0	0	0	2	3	4	4	4	4	5	4	6
4	0	0	0	2	4	5	6	6	6	6	6	6	6
5	0	0	0	2	2	3	6	6	6	6	6	6	6
6	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	6	6

الجدول (2): جدول تقييم الأداء [11]

CE

	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	6-	6-	6-	6-	6-	6-	6-	5-	4-	3-	2-	1-	0
-5	6-	6-	6-	6-	5-	4-	4-	4-	3-	2-	1-	0	0
-4	6-	6-	6-	5-	4-	3-	3-	3-	2-	1-	0	0	0
-3	6-	6-	5-	4-	3-	2-	2-	2-	1-	0	0	1	2
-2	6-	5-	4-	3-	2-	1-	1-	1-	0	0	1	2	3
-1	5-	4-	3-	2-	1-	1-	0	0	0	1	2	3	4
0	5-	4-	3-	2-	1-	0	0	0	1	2	3	4	5
1	3-	2-	1-	0	0	0	0	1	1	2	3	4	5
2	2-	1-	0	0	0	1	1	1	2	3	4	5	6
3	1-	0	0	0	1	2	2	2	3	4	5	6	6
4	0	0	0	1	2	3	3	3	4	5	6	6	6
5	0	0	1	2	3	4	4	4	5	6	6	6	6
6	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6	6	6

3-1 آلية التعديل:

بالنظر إلى الجدولين السابقين نجد، بشكل بديهي، أنه عندما يكون مؤشر الأداء $P(i, j) = 0$ فإن الحالة الموافقة لمتحولات الدخل (E, CE) تمثل حالة مقبولة، أما إذا كان مقياس الأداء مغايراً للصفر فإن حالة النظام الموافقة تمثل حالة غير مرغوبة وبدرجة خطورة تتناسب مع قيمة مؤشر الأداء، فالقيمة الموجبة لمقياس الأداء تخبر آلية التعديل أن إشارة التحكم بحاجة إلى زيادة، والقيمة السالبة تفترض العكس، لذا فإنه من الضروري أنه عندما يراد زيادة خرج العملية أن يتم ذلك بزيادة إشارة التحكم والعكس بالعكس.

تقوم آلية التعديل في أثناء تدريب المتحكم بتعديل قيم جدول التحكم F للحصول على الاستجابة المرغوبة، ففي اللحظة الزمنية n تقوم آلية التعديل بما يلي:

1- حساب انحراف حالة النظام في الوقت الحالي عن الحالة المرغوبة.

2- تعديل جدول التحكم F بالشكل المناسب.

لا يمكن أن تكون إشارة التحكم الحالية هي المسؤولة عن الأداء السيئ للنظام، طالما أن إشارة التحكم تتطلب وقتاً لتؤثر على خرج العملية موضوع التحكم، لذا فلن تكون الخلية الحالية هي التي يجب أن يتم تعديلها. إن خوارزمية التعديل بسيطة إلى حد ما، وتقضي بأن يتم العودة في الزمن d عينة إلى الوراء لتعديل إشارة تحكم فائتة. لذا فإن آلية التعديل يجب أن يتم تزويدها بالتأخير الزمني الذي يميز النظام. عدد العينات d يجب أن يتوافق مع هذا التأخير وهو ما يسمى التأخير في الجزاء، لذا فإن عملية التعديل المحددة ستكون:

$$U_{n-d} \leftarrow U_{n-d} + P_n \quad (5)$$

وبدلالة جدول التحكم F ومقياس الأداء P يمكن كتابة علاقة التعديل كما يلي:

$$F(i, j)_{n-d} \leftarrow F(i, j)_{n-d} + P(i, j)_n \quad (6)$$

الدليل الزمني n يدل على العينة في الوقت الحالي، وبالتالي فإن مقياس الأداء يمكن تفسيره بأنه القيمة التي كان يجب أن تضاف إلى إشارة التحكم في سبيل دفع عملية التحكم إلى حالة ذات قيمة جزاء (مقياس أداء) صفرية. يمكن للمتحكم أن يبدأ من جدول تحكم فارغ، ولكنه سيصل بسرعة أكبر نحو جدول مستقر إذا تم تجهيزه بأرقام منطقية للبدء بها.

مثال على عملية التعديل: لنفترض أن $d = 2$ والمتغيرات كما هي مبينة في الجدول 3 بعد تطبيق تغير خطوة في نقطة التوضع. في اللحظة الزمنية $t = 5$ تتغير إشارة الخطأ ليشير إلى تجاوز (overshoot)، وذلك أدى إلى أن يشير مقياس الأداء إلى $P_5 = -1$ ، وبما أن $d = 2$ فإن الخلية التي يجب أن يتم تعديلها في جدول التحكم F هي الموافقة للحظة الزمنية $t = n - d = 5 - 2 = 3$ وفي تلك اللحظة الزمنية كانت حالة النظام تشير إلى $(E_3, CE_3) = (1, -2)$ والعنصر الموافق $F_3 = F(1, -2)$ كانت قيمته $u_3 = -1$ ستصبح بعد التعديل $u_3 = -2$ وهذه القيمة يجب أن يتم إدخالها في الخلية $F(1, -2)$.

الجدول (3): بيانات المثال آنفاً.

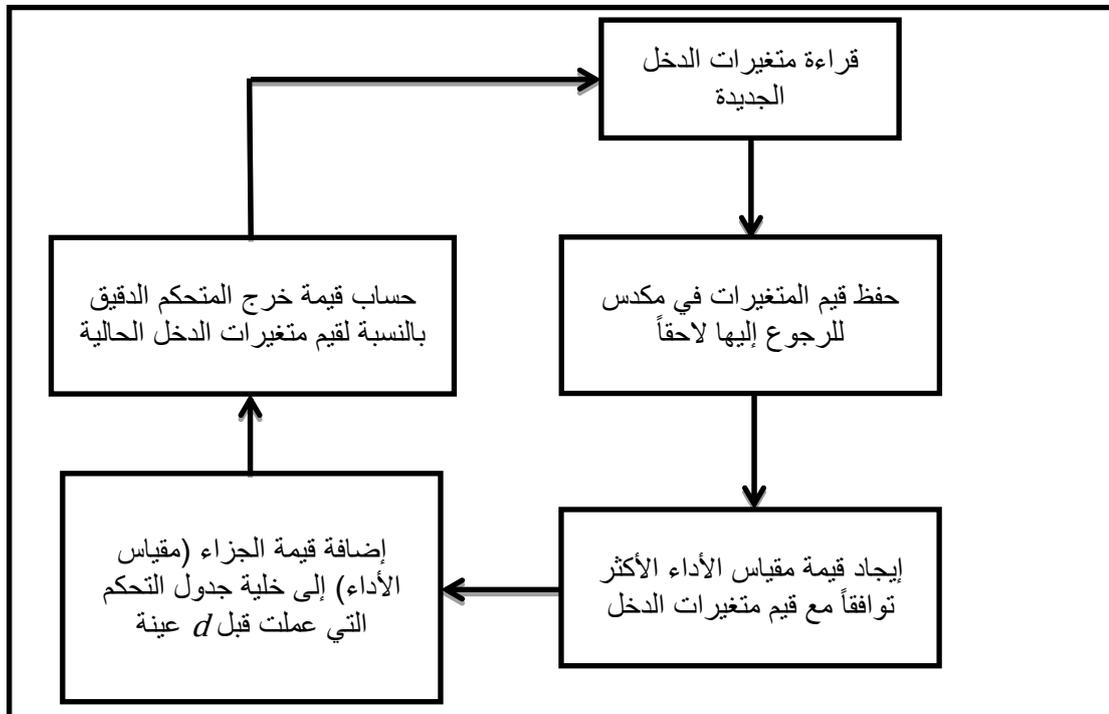
الزمن t المتغير	1	2	3	4	5
E	6	3	1	0	-1
CE		-3	-2	-1	-1
u		0	-1	-1	-2
P		0	0	0	-1

2 النمذجة واعتبارات عملية:

لقد تم بناء نموذج للتحكم الضبابي ذاتي التنظيم بناء على المبادئ النظرية التي تم عرضها في القسم السابق، ويبين الشكل (4) مخططاً تدقيقياً يصف الخوارزمية التي تم الاعتماد عليها في بناء النموذج. ويجدر التنويه هنا إلى أنه تمت الاستعاضة عن القيمة المحددة لمقياس الأداء بعلاقة المتوسط المتكفل لحساب قيمة الجزء من الخلايا الأربع ذات الصلة بالقيم الدقيقة لمتغيري الدخل E, CE والعلاقة هي على الشكل التالي:

$$Penalty = \frac{\sum_i \sum_j [\mu_{E_i}(E) \times P(i,j) + \mu_{CE_j}(CE) \times P(i,j)]}{\sum_i \sum_j [\mu_{E_i}(E) + \mu_{CE_j}(CE)]} \text{ (Error! Bookmark not defined.)}$$

حيث أفادت هذه العملية بالتخلص من حالة الركود التي تعتري المعدل بسبب قلة عدد مستويات تكمير متغيري الدخل من دون زيادتها وتعقيد عملية النمذجة.



الشكل (4): خوارزمية التحكم والتعديل التي تم اعتمادها في النموذج.

1-2 توليف متغيرات المتحكم:

لتوليف بارامترات المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم نحتاج لبعض الإجراءات المبدئية:

- 1- التأخير في الجزء d : لتوليف هذا المتغير نستخدم جدول تحكم خطي بربح كبير نسبياً مما يؤدي إلى ظهور اهتزازات في استجابة النظام. نقوم بقياس الزمن τ الفاصل بين قمتين متتاليتين من إشارة التحكم واستجابة النظام. وقياس هذا الزمن يكون d :

$$d = \text{round} \left(\frac{\tau}{T_s} \right) \text{ (Error! Bookmark not defined.)}$$

إلا أنه من الممكن عملياً اختيار قيم أصغر من ذلك.

- 2- المتغيرات $GE, GCE, GU, \text{ و } CU$ يمكن توليف هذه المتغيرات يدوياً للحصول على استجابة مقبولة مع جدول تحكم خطي، غير أن القيم المحددة لهذه المتغيرات ليست بذات الأهمية التي هي عليها بالنسبة للتحكم الضبابي التقليدي. إذ إنه، على سبيل المثال، إذا تم اختيار كسب الخرج صغيراً نسبياً فإن آلية التعديل ستقوم بالتعويض عن طريق إنتاج قيم أكبر في جدول التحكم، والعكس أيضاً صحيح. وتم الاعتماد هنا على الطريقة المقترحة من قبل [12]، بجعل ربحي الدخل GE, GCE يتناسبان مع مجال قيم متحولي الدخل في جدول التحكم، مع التنويه إلى أن قيمة GCE ترتبط بقيمة ميل الاستجابة المرغوب طالما أن القيمة الحدية في مقياسي الأداء اللذين تم عرضهما تقع ضمن مجال القيم المرغوبة، فمن المستحسن توليفه لجعل الميل المرغوب في مجال هذه القيمة. أما ربحا الخرج GU, GCU فيجب أن يتناسبوا مع القيم التشغيلية للنظام موضوع التحكم.
- 3- تم ربط مقياس الأداء بالمتغير G_p ليصبح بالإمكان التحكم بقيم جدول الجزء على الشكل التالي:

$$P = G_p * \frac{\text{Penalty table}}{6} \text{ (Error! Bookmark not defined.)}$$

حيث إنه بزيادة قيمة هذا المتغير تصبح عملية بناء أو تعديل جدول التحكم تتم بشكل أسرع، إلا أن زيادته بشكل كبير جداً يمكن أن تجعل عملية التدريب غير مستقرة. ويمكن القول أن قيمة هذا المتغير يجب أن تكون أصغر أو تساوي 20% من قيمة المجال التشغيلي للخرج.

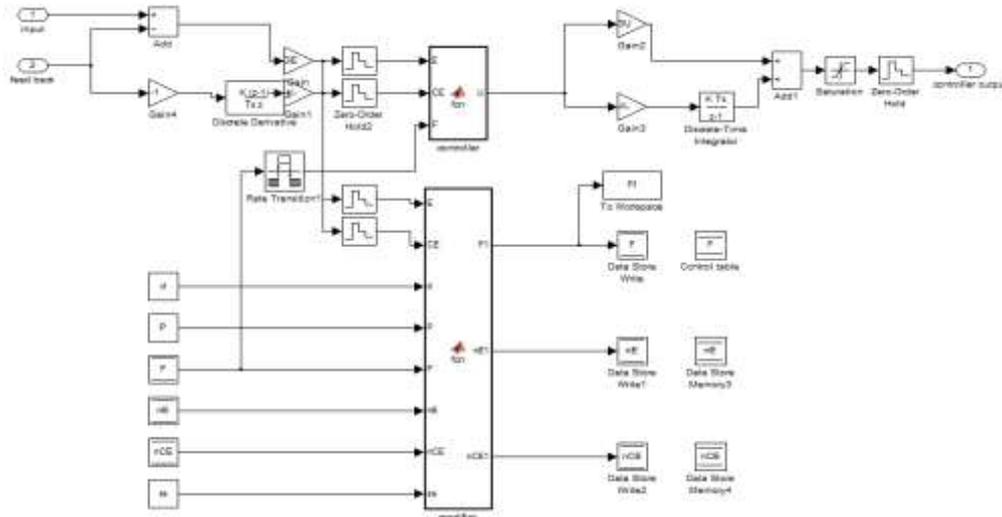
- 4- إن تتابع عمليات تعديل جدول التحكم يمكن أن يعطي أثراً سلبياً إذا تم بشكل سريع. ربما لم يتوافق التعديل الحالي مع الأثر الناتج عن التعديل السابق بسبب زيادة دور عملية التعديل وعدم تحديد زمن التأخير بدقة. فلذلك من الأفضل إعطاء آلية التعديل وقتاً كافياً بعد كل عملية تعديل على جدول التحكم لتراقب أثر ذلك على استجابة النظام لجعل عملية ضبط البارامترات أقل حساسية، وذلك يتم بإيقاف آلية التعديل عن عملها لمدة d عينة بعد كل تعديل.

وفي النهاية لا بد من التنويه أنه يجب عزل الخلية $F(0,0)$ عن عملية التعديل لأنها تمثل الحالة المستقرة ولا بد أن تبقى بمعزل عن أي تعديل.

النتائج والمناقشة:

سيتم في هذا القسم تصميم المتحكم وتوليفه من أجل جدول تحكم خطي. ثم بدء عملية التنظيم الذاتي من دون تعديل المتغيرات وسنرى إن كان التنظيم الذاتي سيحسن الاستجابة أم لا، كما سيتم اختبار المتحكم انطلاقاً من جدول

فارغ لنرى قدرته على بناء جدول تحكم يعطي استجابة مقبولة. تمت عملية المحاكاة باستخدام Simulink® حيث تم تنفيذ نموذج المتحكم الضبابي الذاتي التنظيم، وبين الشكل (5) مخطط نموذج المتحكم الضبابي الذاتي التنظيم الذي تم تنفيذه.

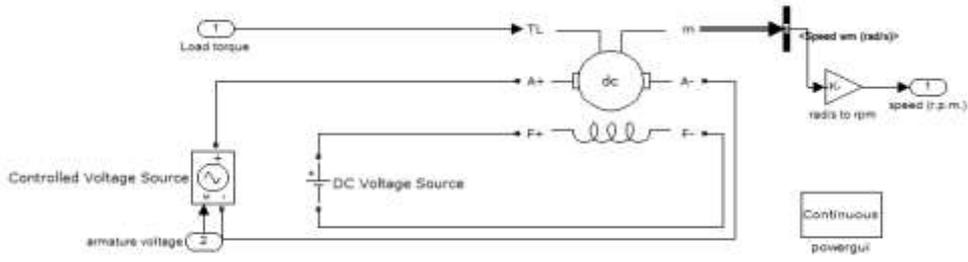


الشكل (5): مخطط نموذج المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم في Simulink®.

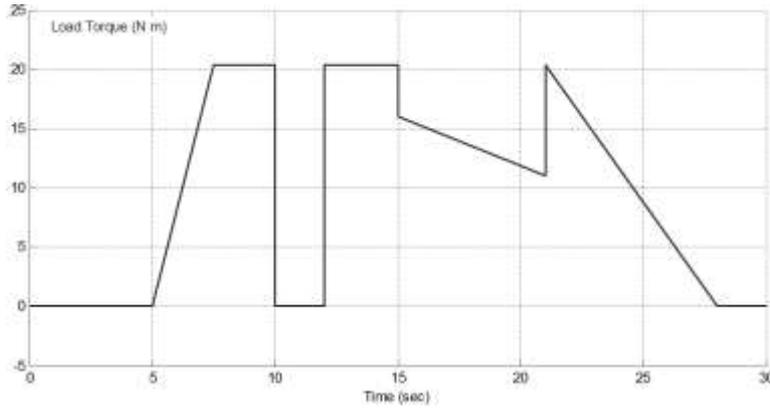
لقد تم استخدام المتحكم لتنظيم سرعة محرك كهربائي مستمر ذي تهييج مستقل يمتلك المواصفات التالية (5HP, 1750r.p.m., 240V, 300V Field)، حيث إن سيناريو العمل هو تنظيم السرعة عند قيمة 1000r.p.m. وسيتم تشغيل المحرك في البداية على فراغ لمدة خمس ثوان ثم يتم ربط الحموله بعدها حيث أن الحموله ذات قيم متغيرة. يمتلك المحرك المجال التشغيلي $[-240 +240]$ أما بالنسبة لمتغيرات المتحكم فتم توليفها وفقاً لما أوردناه كما يلي:

$$\begin{aligned} E &= 0.006 \\ CE &= 0.00015 \\ GU &= 1.5 \\ GCU &= 20 \\ G_p &= 20 \\ T_s = T_o &= 0.01 \text{ s} \\ d &= 1 \text{ sample} \end{aligned}$$

حيث أن T_s و T_o زمن التعيين لكل من المعدل والمتحكم على التوالي. لقد تم استخدام جدول الجزء المقدم من قبل [11]، وتم الاختبار ابتداءً بجدول فارغ أولاً ثم ابتداءً بجدول خطي. وتم اختبار استجابة المحرك وفقاً لسيناريو العمل الذي سبق تبيانه.

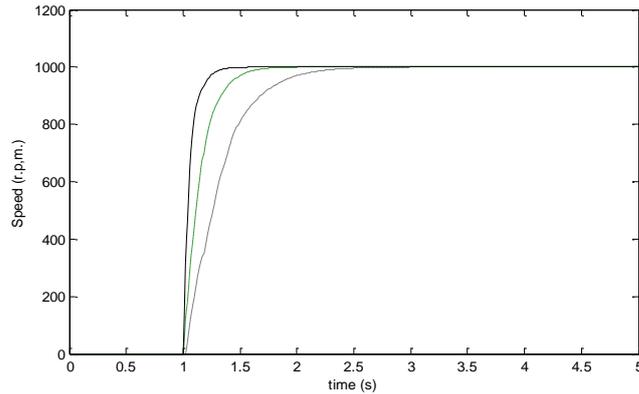


الشكل (6): نموذج المحرك المستخدم في عملية المحاكاة.

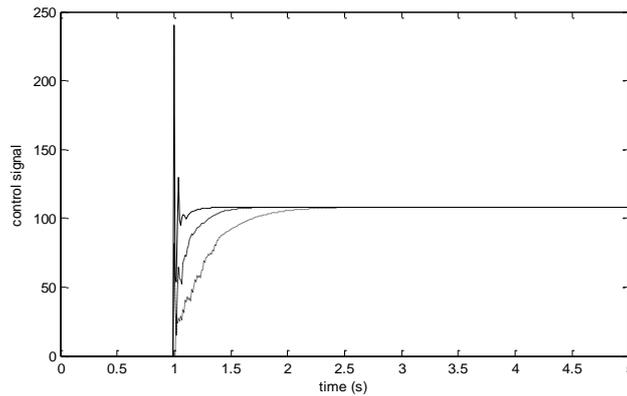


الشكل (7): الحمولة المتغيرة على محور المحرك.

الاستجابة انطلاقاً من جدول تحكم فارغ:

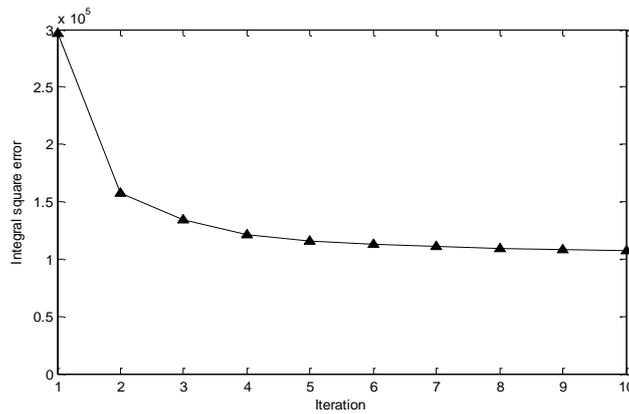


الشكل (8): استجابة المحرك لدخل خطوة ابتداءً بجدول تحكم صفري، المنحني المنقط للمرور الأول، والمتقطع للمرور الثاني، أما المستمر فللمرور العاشر.

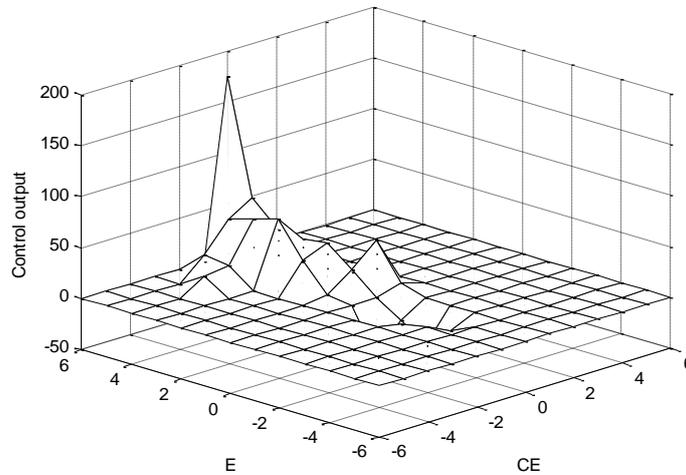


الشكل (9): إشارة التحكم الموافقة للحالة السابقة، المنحني المنقط للمرور الأول، والمنقطع للمرور الثاني، أما المستمر فللمرور العاشر.

إن الفرق بين منحنيات الاستجابة واضح مع تقدم عملية التدريب، ولكن من أجل تقييم عددي لتحسن أداء المتحكم مع تقدم التنظيم الذاتي تم استخدام تكامل مربع الخطأ (Integral square error) كمؤشر لأداء المتحكم.

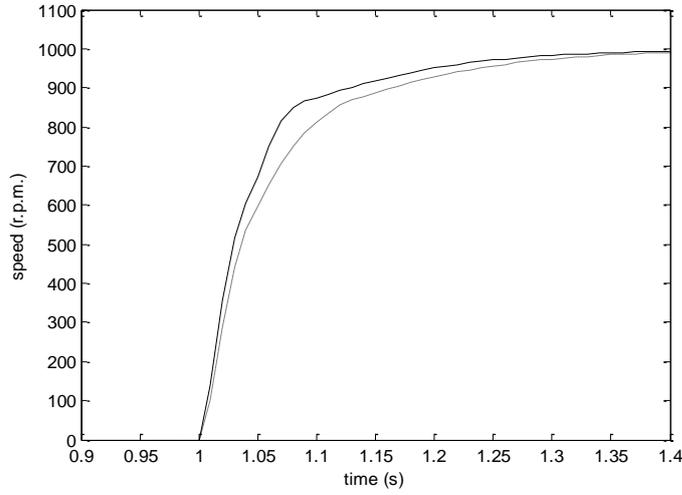


الشكل (10): تغير تكامل مربع الخطأ مع تقدم التنظيم الذاتي انطلاقاً من جدول تحكم فارغ.

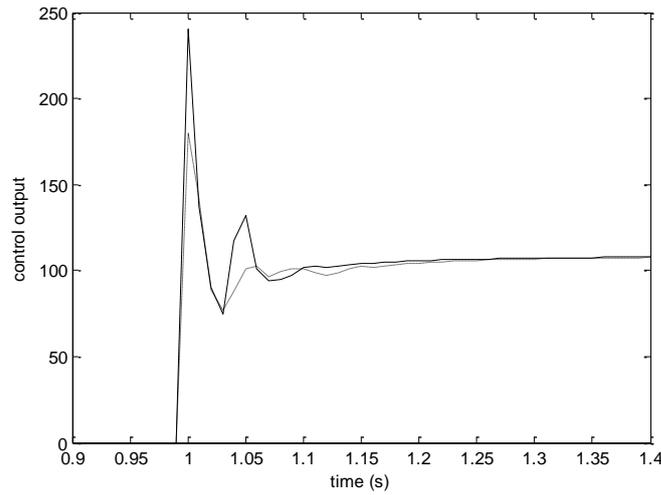


الشكل (11): جدول التحكم الناتج انطلاقاً من جدول فارغ (لاحظ أحادية الجانب).

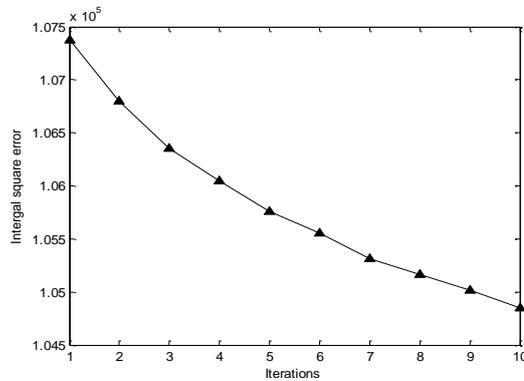
الاستجابة انطلاقاً من جدول تحكم خطي:



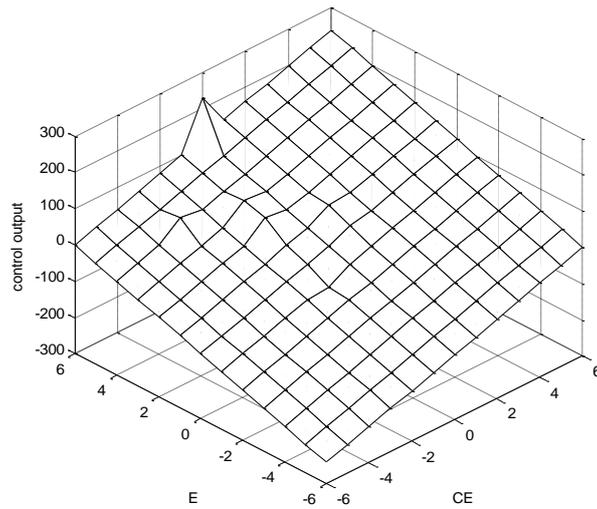
الشكل (12): استجابة المحرك لدخل الخطوة ابتداءً بجدول تحكم خطي، المنحني المنقط للمرور الأول، أما المستمر فللمرور العاشر.



الشكل (13): إشارة التحكم الموافقة للحالة السابقة، المنحني المنقط للمرور الأول، أما المستمر فللمرور العاشر.



الشكل (14): تغير تكامل مربع الخطأ مع تقدم التنظيم الذاتي انطلاقاً من جدول تحكم خطي.

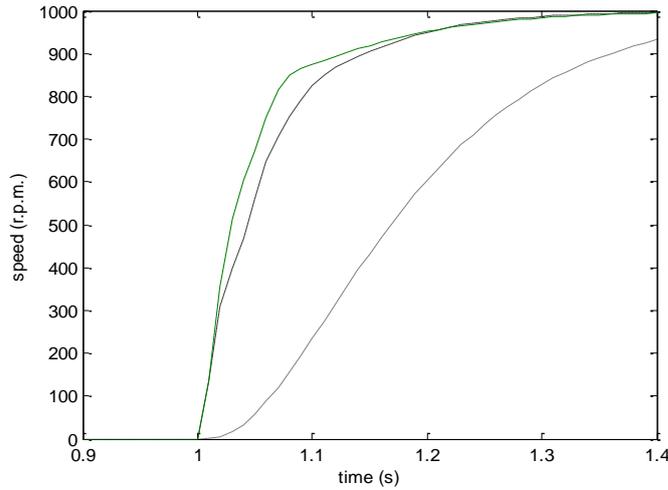


الشكل (15): جدول التحكم الخطي بعد تعديله من قبل آلية التعديل.

إن ملاحظة تحسن الاستجابة في هذه الحالة بالنظر إلى منحنيات الاستجابة أمر من الصعوبة بمكان، لذلك باستخدام تكامل مربع الخطأ (ISE)، الشكل (14)، يمكننا ملاحظة التغير بشكل أفضل في أداء المتحكم مع تقدم التنظيم الذاتي.

نلاحظ أن المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم قدم أداءً جيداً في كلتا الحالتين إلا أنه في الحالة الثانية تم الانطلاق من حيث الانتهاء من الحالة الأولى. لذا فإنه من المستحسن البدء بجدول غير فارغ لتجنب إطالة فترة التدريب. في كلتا الحالتين وجدنا أن التعديل اقتصر على جانب ضيق من جدول التحكم، الشكل (11، 15) وذلك بسبب محدودية الدخل وقلة الحالات التي اعترت النظام في أثناء عملية التدريب، وعليه، فلبناء جدول تحكم ناضج من أجل حالات مختلفة فلا بد من زيادة تنوع إشارة الدخل في عملية التدريب. أما إذا كان دخل النظام عملياً محدوداً ومعروفاً فإن إجراء عملية التدريب عليه سيكون كافياً على الرغم من نقص جدول التحكم.

ولتقييم أداء المتحكم بشكل عام تم استخدام متحكم PID متقطع بنفس زمن التعيين ($T_s = 0.01$) للتحكم بالمحرك لمقارنة النتائج، حيث أنه تم توليف المتحكم تلقائياً بواسطة أداة التوليف المقدمة من قبل MATLAB من أجل أسرع استجابة ممكنة دون حدوث تجاوز لنقطة التوضع، فكانت النتائج كما يلي:



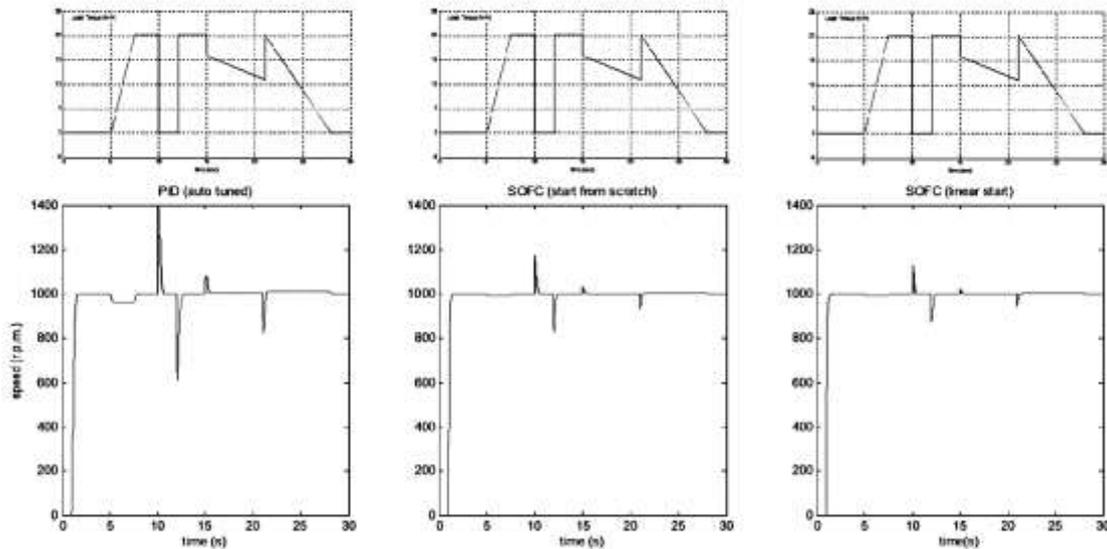
الشكل (16): استجابة المحرك لدالة الخطوة، المنحني المنقط لمتحكم PID، والمنحني المتقطع لمتحكم SOFC انطلاقاً من جدول فارغ (المرور العاشر)، والمنحني المستمر لمتحكم SOFC انطلاقاً من جدول خطي (المرور العاشر).

الجدول (4): مؤشر الأداء ISE للمتحكمين.

SOFC ²	SOFC ¹	PID	المتحكم
104846	107319	237006	ISE

نلاحظ من الشكل (16) أن المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم في كلا الحالتين حقق زمن استجابة أقل من المتحكم التناسبي-التفاضلي-التكاملي، أما بالنسبة لتكامل مربع الخطأ، الجدول (4)، فإن المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم قدم تحسناً بنسبة 45% على المتحكم PID، وبالعودة إلى الشكل (10) نجد أن المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم تجاوز عتبة PID بالنسبة لمؤشر تكامل مربع الخطأ منذ المرور الثاني انطلاقاً من جدول تحكم فارغ، ويبين الشكل (17) استجابة المحرك لسيناريو التشغيل الكامل باستخدام كل من المتحكمين، حيث يتبين منه الفرق في قيم اختلال السرعة بين المتحكمين عند تغيير الحمولة (زيادة السرعة عن السرعة المرجعية عند تناقص عزم الحمولة، وتناقص السرعة عن السرعة المرجعية عند زيادة عزم الحمولة).

1 في المرور العاشر انطلاقاً من جدول تحكم فارغ.
2 في المرور العاشر انطلاقاً من جدول تحكم خطي.



الشكل (17): استجابة المحرك لسيناريو التشغيل الكامل، باستخدام متحكم PID (يسار)، وباستخدام SOFC ابتداءً بجدول صفري (وسط)، وباستخدام SOFC ابتداءً بجدول خطي (يمين)، لاحظ الفرق في قيم قمة السرعة في الحالات العابرة.

الاستنتاجات والتوصيات:

لقد تم تصميم متحكم ضبابي ذاتي التنظيم بالاعتماد على خوارزمية التأخير في الجزء للتحكم بمحرك كهربائي مستمر دون التعرض لنموذج المحرك، حيث تمت محاكاة النظام في بيئة $^{\circ}$ Simulink. لقد أظهرت المحاكاة قدرة المتحكم على تنظيم سرعة المحرك عند السرعة المرجعية مع تغير عزم الحموله على محور المحرك. على الرغم من أن جدول قواعد المتحكم كان فارغاً ابتداءً إلا أن آلية التعديل استطاعت بعد عدد محدود من تكرارات التدريب من تكوين جدول تحكم أعطى استجابة جيدة. كما استطاع المتحكم تخفيض قيم التغير الأعظمي في السرعة في الحالات العابرة لحظة تغير الحموله بشكل أفضل من المتحكم التقليدي PID الذي تم توليفه تلقائياً، الشكل (17)، كما أن الانطلاق من جدول تحكم خطي أعطى نتائج أفضل من الانطلاق من جدول فارغ.

بعد المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم من المتحكمات البسيطة في التصميم. إذ يمكن تطبيق المتحكم رقمياً باستخدام المتحكمات الرقمية، إذ إن آلية التعديل بسيطة إلى حد ما. مما يجعل المتحكم الضبابي متحكماً جيداً سهل التوليف وسهل التطبيق، كما أظهرت المحاكاة قدرة المتحكم الضبابي ذاتي التنظيم على تحسين استجابة المتحكم بجدول تحكم خطي، وأيضاً الحصول على استجابة جيدة انطلاقاً من جدول تحكم فارغ، مع عملية توليف بسيطة للمتغيرات.

يمكن أن تكون عملية التدريب طويلة إلى حد ما إذا أردنا الحصول على أفضل النتائج من المتحكم. كما أن تنوع عينات التدريب (إشارات الدخل) ضروري لبناء جدول تحكم واضح قابل للتعامل مع حالات العمل المختلفة، ولإعطاء نتائج عملية قريبة من نتائج عملية التدريب، لذا فإنه من الأفضل أن يتم بدء عملية التدريب انطلاقاً من جدول تحكم معد مسبقاً وفق المعلومات المتوفرة عن النظام لتجنب إطالة فترة التدريب، ولتجنب الحصول على جدول تحكم خامل في بعض الحالات التي لم يتم التدريب عليها؛ كما أنه من المفيد اختبار المتحكم مع أنظمة أكثر تعقيداً لاختبار كفاءة آلية التعديل ومدى إمكانية استخدام هذا المتحكم، كما أنه من الجيد أن يتم تطبيق هذا المتحكم عملياً على أنظمة مخبرية لاختبار أدائه عملياً.

المراجع:

1. Levine, William S. *The Control Handbook*. Florida : CRC press, 2000. p. 1564. ISBN 81-7224-785-0.
2. Chen, G. and Pham, T. T. *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems*. New York : CRC Press, 2001. p. 316.
3. Åström, Karl J and Björn, Wittenmark. *Adaptive Control*. 2nd edition. Amsterdam : Addison Wesley, 1995. p. 589.
4. Matos D, Joana, Duorado C, António. *A self-organizing fuzzy controller with a fixed maximum number of rules and an adaptive similarity factor*. Informatic Engineering, Universidade de Coimbra. Coimbra : s.n., 1999. p. 44.
5. Lee, Chien H. ; Wang, Sheng D. *A self-organizing adaptive fuzzy controller*. 80, 1996, Fuzzy Sets and Systems, pp. 295-313.
6. Ju, M. S. ; D. L., Yang. *Design of adaptive fuzzy controls based on natural control laws*. 81, 1996, Fuzzy Sets and Systems, pp. 191-202.
7. Karr, C. A.; Gentry, E J. Fuzzy Control of PH using genetic algorithms. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*. 1993, 1, pp. 46-53.
8. Jang, J. S. Self-learning fuzzy controllers based on temporal back propagation. *IEEE Trans. on Neural Networks*. 1992, 3, pp. 714-723.
9. Ting, C. S.; Li, T.H.S.; Kung, F. C. *An approach to systematic design of the fuzzy control system*. 77, 1996, Fuzzy Sets and Systems, pp. 151-166.
10. Procyk, T. J.; Mamdani, E. H. *A linguistic self-organizing process controller*. 15, 1979, Automatica, pp. 15-30.
11. Yamazaki, T. *An improved algorithm for a self-organizing controller and its experimental analysis*. Electrical and Electronic Engineering, Queen Mary College. London, 1982. p. 152, PhD thesis.
12. Jantzen, Jan. *Tuning-Rules for Fuzzy Controllers*. Istanbul, 1990. IEEE International Workshop on Intelligent Motion Control. pp. 83-86.