مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
Damascus University Journal for engineering sciences
المجلد42 العدد (2) – 2026: 364-381
Vo 42 number (2) -2026: 364-381

مقارنة خوارزميات المنظم ذاتي التوليف من أجل التحكم بنظام المفاعل الكيميائي ذي التقليب المستمر اللاخطي

مروه الصفدي*[1] هيام خدّام[2]

*[1]. طالبة ماجستير، مهندسة، قسم هندسة الحواسيب والأتمتة، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، اختصاص تحكم وأتمتة.
m.alsafadi@damascusuniversity.edu.sy

[2]. دكتور، عضو هيئة تدريسية، قسم هندسة الحواسيب والأتمتة، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، الاختصاص تحكم رقمي.
h.khaddam@damascusuniversity.edu.sy

الملخص:

يعيق السلوك اللاخطي للنظام عملية التحكم والقدرة على التنبؤ بالسلوك الديناميكي للنظام، ولتحقيق أداء أفضل يتم إدخال مفاهيم التحكم التكيفي لضبط بارامترات المتحكم.

يتناول البحث التحكم بدرجة حرارةنظام المفاعل الكيميائي ذي التقليب المستمر باستخدام خوارزمية المنظم ذاتي التوليف بشكليها الصريح والضمنيوالمقارنة بينهما من حيث الأداء.تُضبط بارامترات النظام بطريقتي مخمن التربيع الأصغري ومخمن التربيع الأصغر يالعودي، وتُضبط بارامترات المتحكم باستخدام طريقة توضع الأقطاب.

أثبت البحث أن خوارزمية المنظم ذاتي التوليف الضمنية تحقق نفس أداءالخوارزمية الصريحة عند التحكم بدرجة جرارة المفاعل الكيميائي ذي التقليب المستمر بدون الحاجة لتمثيل النظام بنموذج رياضي وبالتالي تقليل عدد العمليات الحسابية.

الكلماتالمفتاحية: التحكم التكيفي، المنظم ذاتي التوليف، الخوارزمية الصريحة، الخوارزمية الضمنية، مخمن التربيع الأصغري، مخمن التربيع الأصغريالعودي، طريقة توضع الأقطاب.

تاريخ الإيداع: 2023/6/15
تاريخ القبول: 2023/8/28

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

Comparing Self-tuning Regulator algorithms for controlling a nonlinear Continuous Stirred TankReactor

.**MarwaAlsafadi[*1]Hiyam Khaddam[2]**
[*1]. MSC student, Eng - Department of Control and Automation Engineering - The Faculty of Mechanical and Electrical Engineering – Damascus University- (m.alsafadi@damascusuniversity.edu.sy)
[2].Dr,A memberof the faculty teaching staff - Department of Automation and Computers Engineering - The Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Damascus University– major: Digital Control- (h.khaddam@damascusuniversity.edu.sy)

Received: 15/6/2023
Accepted: 28/8/2023

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a
CC BY- NC-SA

Abstract:

Nonlinearity obstructsthe control and predictability of systemdynamic behavior.In order to attain successful controlperformance, adaptive control concepts are introduced to adjust the controller parameters.

The research addressesthe control of continuous stirred tank reactor temperature using explicit and implicit forms of Self-Tuning Regulator algorithm(STR). The system parameters areadjusted using Least Square Estimation algorithm(LSE) and the Recursive Least Square Estimation algorithm(RLSE). And controller parametersareadjusted using pole placement.

The research provesthat the implicit self-tuning regulator algorithm achieves the same performance as the explicit algorithm when controlling the temperature of the continuous stirring tank reactor without the need to represent the system with a mathematical model, thus reducing the number of calculations.

Keywords: Adaptive Control, Self-tuning Regulator, Explicit Algorithm, Implicit Algorithm, Least Square Estimation, Recursive Least Square Estimation, Pole Placement method.

المقدمة:

معظم النظم الفيزيائية الحقيقية هي نظم لا خطية ومتغيرة في الزمنلذلك لا يمكن تمثيلها بنموذج رياضي ثابت. ويصعب التحكم بها بسبب تغيرات بارامتراتها وبسبب تغيرات البيئة المحيطة ولكي يكون أداؤها دقيقاً كان من الضروري تصميم متحكم بمواصفات دقيقة وإمكانيات ضبط عالية.لذلك تم التوجهإلى التحكم المتكيف لتصميم متحكم تتكيف بارامتراته مع هذه التغيرات.

يقوم المفاعل الكيميائي بدور مهم في تفاعل المركبات الكيميائية ذات التركيبات المختلفة لزيادة عملية الإنتاج. وهو يسمح بخلط المواد المتفاعلة بشكل فعال لتوليد منتج مرغوب فيه جيد التصنيع بمعدل إنتاج محدد. كما ويسمح بالتفاعل الطارد للحرارة الذي يطلق طاقة حرارية تسبب زيادة درجة حرارة المفاعل بسرعة كبيرة. نظرًا لإنتاج زيادة كبيرة في درجة الحرارة، وتؤثر الحرارة المتولدة في المفاعل نتيجة انتاج زيادة كبيرة في درجة الحرارة بشكل كبير على التشغيل السليم وعمر المفاعل.و يكون لدرجة حرارة المفاعل الطارد للحرارة خصائص غير خطية، لذلك كان لابد من التحكم بارتفاع درجة الحرارة جيدًا عن طريق تطبيق آلية تحكم مناسبة لإعطاء خرج أكثر استقرارًا. (Mitiku،shoga، وBharatiraja،2018)

تتمتع خوارزمية المنظم ذاتي التوليف وهي إحدى خوارزميات التحكم التكيفي بالقدرة على الاستجابة للنظم ذات الخصائص الديناميكية غير الخطية.

فيهذاالبحث تم استخدام هذه الخوارزمية بشكليها الصريح والضمنيوالمقارنة بينهما للتحكم في درجة حرارة المفاعل بشكل صحيح بحيث يتم حسابابارامترات النظام باستخدام مخمن التربيع الأصغري العوديRLSE ومن ثم تصميم بارامترات المتحكم بطريقة توضع الأقطاب.

1. الدراسات المرجعية:

فيما يلي أهم الدراسات التي تناولت خوارزمية المنظم ذاتي التوليف وتطبيقها على النظم اللاخطية:

طوّرShoga وزملاؤه في بحثهم نموذج المنظم المتتالي ذاتي التوليف للتحكم بدرجة حرارة المفاعل بالرجوع إلى نموذج توازن المواد والطاقة لمفاعل الخزان الطارد للحرارة، حيث يسمح مفاعل الخزان الطارد للحرارة بالتفاعل لإطلاق الحرارة بسبب خلط المواد. إن إطلاق الحرارة بسبب العملية الطاردة للحرارة في المفاعل يجعل النظام غير خطي وغير مؤكد مالم يتم تنظيمه بشكل صحيح. تم استخدام متحكم PI في الحلقة الثانوية للتحكم بمعدل التدفق في حجرة التبريد. كما تممقارنةدرجةحرارةالمفاعلمعالقيمة المرغوبة في الحلقة الرئيسية. ومن أجل التحكم في درجة الحرارة بشكل لحظي يتم تخمين بارامترات وحدة التحكم بطريقة توضع الأقطاب وتم تمثيل نظام المفاعل بنموذج رياضي من الدرجة الثالثة كما تم تخمين بارامترات النظام بطريقة مخمن التربيع الأصغر يالعودي.(2018، Bharatiraja ، Mitiku، shoga)

اقترحR. Reshmi وزملاؤه مخطط تحكم تكيفي يعتمد على المنظم ذاتي التوليف(STR)، لمواجهة حالات عدم اليقين والصعوبات في سلوك التحكم للأنظمة غير الخطية.

ثمّ استخدام مخمن التربيع الأصغري العودي لتخمين بارامترات النظام كما تم استخدام طريقة توضع الأقطاب بحساب بارامتراتالمتحكم.يتم تطبيق خوارزمية التحكم المقترحة على النظام غير الخطي وغير المستقر الممثل بنموذج رياضي من الدرجة الثالثة.

(Reshmi، Gnanasoundharam، Kotteeswaran،2018)

كما اقترح Ayten وزملاؤه خوارزمية للتحكم في نظام المفاعل الكيميائي باستخدام المنظم ذاتي التوليف الذي يستخدم غالبًا فيا لصناعة. تم استخدام نموذج الانحدار الأسي مع نموذج خارجي كنموذج العملية السائلة مع تنفيذ التحكم في المنظم ذاتي التوليف من أجل تتبع مسارات مستوى الخزان

المرغوبة. كان توحدة التحكم في المنظم ذاتي التوليف المصممة حساسة لتغيرات البارامترات لنظام المفاعل غير الخطي. يتم تحديث بارامترات وحدة التحكم المقترحة دورياً أثناء العملية باستخدام مخمن التربيع الأصغري العودي. وبهذه الطريقة، يتم التخلص من اختلافات البارامترات والاضطرابات غير المرغوب فيها للنظام في تطبيق الزمن الحقيقي. ولإثبات كفاءة تقنية المنظم ذاتي التوليف للتحكم في النظام، تم تنفيذ دراسات الزمن الحقيقي. أظهرت النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها أن وحدة التحكم المقترحة تعطي أداء أفضل في تتبع المسار وقيمة أصغر للتجاوز مقارنةً بوحدات التحكم التقليدية. (Ayten ، Dumlu ،و Kaleli ، 2018)

قام JONATHAN وزملاؤه بتطبيق خوارزمية التحكم التكيفي ذي النموذج المرجعي MRAC للمفاعل الكيميائي ذي التقليب المستمر بناء على قاعدة MIT، تم تحليل أداء خوارزمية التحكمMRAC من حيث خطأ التربيع التكاملي ISE والخطأ المطلق التكاملي IAEوالخطأ المطلق الزمني التكاملي ITAE. (JONATHAN OKORONKWO، PHILLIPS، AKIN،EMMANUEL ، 2019)

وقام كل من chen وزملائه بتصميم خوارزمية تحكم تكيفية متينة لنظام الطائرات غير الخطي لحل مشكلة عدم اليقين في إشارة التحكم.

حيث تُعرف خوارزمية التحكم التكيفي ذي النموذج المرجعي بأنها طريقة فعالة للتعامل مع عدم اليقين لكن عادة ما تكون هنا كحاجة إلى سرعة في التكيف وهذا يؤدي إلى تذبذب عالي التردد في إشارة التحكم وقد يسبب عدم استقرار للنظام لذلك تم اقتراح تعديل لخوارزمية التحكم ذي النموذج المرجعي من خلال التحكم المتين للتخلص من الترددات العالية في إشارة التحكم.

تم تطبيق طريقة التحكم المقترحة على التحكم في الحركة بالاتجاه الطولي لنظام الطائرات غير الخطي. بينت نتائج محاكاةا لطيران أن الطريقة التكيفية المتينة المقترحة كانت قادرة على تحقيق التكيف السريع بدون اهتزازات عالية التردد. (Weihong Wang, Jiangyun Wang Chen 2020)

وقدّم zhang وزملاؤه دراسة جديدة حول مشكلة التحكم في تتبع التغذيةا لخلفية للحالا التكيفية للأنظمة غير الخطية غير المؤكدة المتقطعة في شكل عام غير قانوني. تؤدي عمليات التقدم الزمني إلى إخراج مثل هذه الأنظمة إلى أن تكون ديناميكية الخرج غير خطية معتمدة على إشارة التحكم والمعاملات غير المعروفة، مما يؤدي إلى ثلاث قضايا فنية: الدرجة النسبية الضمنية، ومعاملات غير خطية، وإشارة تحكم غير نهائية. ولمعالجة هذه القضايا، استخدمت هذه الورقة في البداية خطية التغذية الراجعة ونظرية الوظيفة الضمنية لبناء شكل عادي يعتمد على الدرجة النسبية، ثم اقترحت طريقة قائمة على إعادة بناء البارامترات التكيفية للتعامل في نفسا لوقت مع عدم اليقين الخطي وغير الخطي في ديناميكية الخرج، وأخيرًا تم بناء معادلة دالة ضمنية رئيسية لاشتقاق قانون تحكم تكيفي فريد يضمن استقرارا لحلقة المغلقة وتتبع الخرج. كما واقترحت قانونا لتحكم التكيفي القائم على الحل التكراري بشكل صريح لضمان استقرار الحلقة المغلقة وتتبع الخرج في أي درجة من الدقة. (Zhang، Feng Zhang، و Liu ،2021)

قام Kernot وزملاؤه باقتراح آلية روبوتية جديدة لطريقة لقبض غير التعاوني وذلك لمكافحة مشكلة الحطام المداري الذي يشكل تهديدً المستقبل رحلات الفضاء، وكان النموذج المعتمد في هذه الآلية هو ذراع روبوتية تحركها الأوتار وكانت آلية الالتقاط هي نموذج أولي لقابض ثنائي الوصلة متماثل يتم تشغيله بواسطة آلية نقل ذات غمد مفتوحا لطرف. ونظرًا لأن آلية نقل ذات الغمد عبارة عن نظام غير خطي متغير بمرور الوقت، فقد تمت مقارنة استراتيجيتين منفصلتين للتحكم التكيفي مع الأداء غير المتحكم فيهل لقابض في الحلقة المغلقة. على

وجها لتحديد، تم استخدام طريقة تحكم غير مباشرة وطريقة تحكم مباشرة، بينتا لنتائج التجريبية أن وحدات التحكم التكيفية تظهر أداء تتبع أفضل على الحالات التي يتم التحكم فيها بين ما تعمل وحدةا لتحكم المباشرة بشكل أفضل في ظل الظروف الديناميكية، وتعمل وحدة التحكم غير المباشرة بشكل أفضل في حالةا لاستقرار(Kernot، Ulrich ،2022).

قام Derakhshannia وزملاؤه بالتحقيق في مشكلة التحكم المتين في المفاع لذات التقليب المستمر. تعدCSTR واحدة من أكثر المفاعلات أهمية في العمليات الكيميائية، والتي تجعل من لصعب للغاية التحكم في آثار الاضطرابات الديناميكية غير الخطية.

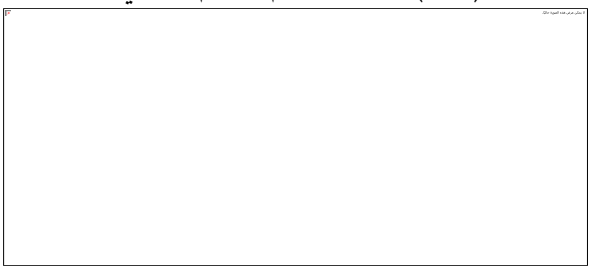
أولاً، تم تقديم تحكم جديد في وضع الانزلاق لوقت محدود يزيل تأثيرات الاضطراب ويضمن تتبع الوقت المحدود. ثانيًا، للتعويض بشكل أفضل عن الاضطرابات ولتحسين أداء المتحكم، تم تطوير مراقب اضطرابا لوقت المحدود. أخيرًا، تم تقديم طريقة تحكم قوية تكيفية بناءً على التحكم في وضع الانزلاق المقترح ومراقب الاضطراب. تم إجراء تحليل الاستقرار للتحقيق في تتبع الوقت المحدود لنظاما لحلقة المغلقة تحت وحدات التحكم المقترحة. إلى جانب ذلك، لتحسين أداء وحدات التحكم المقترحة، تم ضبط معلمات التصميم بواسطة خوارزمية التحسين الجيني. تم إجراء نتائجا لمحاكاة لتأكيد كفاءة الطرق المقترحة من حيث تتبع الأخطاء ومعدلات التقارب. أظهر التحكم المقترح في وضع الانزلاق فيا لوقت المحدد والتحكم التكيفي في وضعا لانزلاق في الوقت المحدد مع أوقات استقرار تبلغ 1.73 ثانيةو1.71 ثانية وكذلكIAEمن 0.509 و0.4843،علىالتوالي، أداء مرغوبًا أكثر من وحدات التحكم الأخرى.

(Derakhshannia، Moosapour، Sajjad، 2022)

2. التحكم التكيفي:

يعد التحكم التكيفي أحد أشكال التحكم غير الخطي يتم فيه تعديل بارامترات المتحكم تلقائيًا للتكيف مع بارامترات النظام المتغيرة مع الزمن أو غير الدقيقة وذلك للحصول على أداء أفضل. (Astrom ،و Wittenmark، 1994)

يبيّن الشكل (3−1) المخطط العام للتحكم التكيفي



الشكل (1) المخطط العام للتحكم التكيفي

يوجد العديد من خوارزميات التحكم التكيفي أهمها:

المنظم ذاتي التوليف:

يعتمد المنظم ذاتي التوليف على تصميم آلية لضبط بارامترات المتحكم وذلك لأن التغيرات التي تحدث في النظام تنعكس على قيم بارامترات المتحكم.

لدينا شكلين للمنظم ذاتي التوليف: الشكل الأول يعتمد على إيجاد بارامترات المتحكم من خلال إيجاد بارامترات النظام ويسمى المنظم ذاتي التوليف الصريح (غير المباشر) بينما الشكل الثاني يعتمد على إيجاد بارامترات المتحكم من خلال قراءات الدخل والخرج بشكل مباشر دون إيجاد بارامترات النظام ويسمى المنظم ذاتي التوليف الضمني(المباشر). (Astrom ،وWittenmark، 1994)

هناك عدة مراحل لتصميم المنظم ذاتي التوليف:

1- تعريف الجملة(System Identification) وتخمين بارامتراتها وبناء على هذه البارامترات يمكن تصميم قانون التحكم، وتتم على مرحلتين:

تحديد النموذج الرياضي للجملة ببارامترات مجهولة كما هو موضح بالمعادلة التالية:

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \cdots + a_n y(k-n) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \cdots + b_m u(k-m-d) \quad (1)$$

حيث:

y: خرج النظام

u: دخل النظام

n: درجة النظام (مقام تابع التحويل)

m: درجة بسط تابع التحويل

k: رقم العينة

d: تأخير زمني

$a1,a2\ldots a_n,b0,\ldots b_m$:بارامترات تابع تحويل النظام

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k-d) \quad (2)$$

حيث:

B: بسط تابع تحويل النظام

A: مقام تابع تحويل النظام

2- تحديد البارامترات المجهولة بإحدى الطريقتين:

مخمن التربيع الأصغري:(LSE)

يتم تجميع بيانات الدخل والخرج ويتم حساب البارامترات دفعة واحدة ولهذه الطريقة سيئات كالحاجة إلى حجم ذاكرة كبير وقد تكون بعض القراءات خاطئة أو غير دقيقة .

تبين المعادلة (3) معادلة مخمن التربيع الأصغري:

$$Y = U\theta \quad (3)$$

Y: قراءات الخرج وكل القراءات الثابتة وهي مصفوفة معروفة

U: القراءات المتعلقة بالدخل وهي مصفوفة معروفة

θ: شعاع البارامترات وهو مجهول ويتم حسابه من العلاقة التالية:

$$\hat{\theta} = (U^T U)^{-1} U^T Y \quad (4)$$

مخمن التربيع الأصغريالعودي: (RLSE)

يتم حساب البارامترات في كل لحظة بالاعتماد على القياسات باللحظة السابقة وبالاعتماد على الدخل والخرج وميزة هذه الطريقة إنها لا تحتاج لذاكرة بالإضافة إلى إمكانية حساب الخطأ من أجل كل قياس واستبعاد القياس الخاطئ.

خطوات حساب البارامترات باستخدام RLSE:

1- نفرض القيم الابتدائية$\theta_0 = [0]k=0, P_0 = \mu I$,

2- نحسب θ_{k+1}, P_{k+1} من العلاقات التالية:

$$P_{k+1} = P_k - \frac{P_k U_{k+1} U_{k+1}^T P_k}{1 + U_{k+1}^T P_k U_{k+1}} \quad (5)$$

$$E_{k+1} = Y_{k+1} - U_{k+1}^T \theta_k \quad (6)$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k + P_{k+1} U_{k+1} E_{k+1} \quad (7)$$

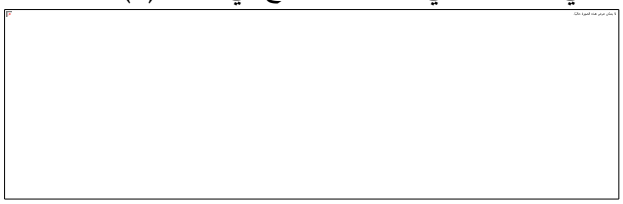
3- K=K+1

4- نعود إلى الخطوة 2

القيم الابتدائية لـ θ,P:

إذا فرضنا إن $\theta_0 = [0]$ وبالتالي بما إن P تعبر عن مدى تباعد θ عن الوسطي فأن θ_0 ستكون في البداية بعيدة عن الوسطي ، لذلك نختار P_0 كبيرة ولتكن $P_0 = \mu I$ حيث μ عدد كبير يكون عادة بين 10 و 1000

المتحكم: هناكعدةأنواعللمتحكم أشهرها متحكم أمامي خلفي STRيتم فيه تقسيم المتحكم إلى مرحلتين أو قسمين أحدهما أمامي والآخر خلفي كما هو موضح في الشكل(2):



الشكل (2) المخطط الصندوقي للجملة مع متحكم أمامي خلفي STR

يمكن استنتاج معادلة التحكم للمتحكم STR من الشكل (2):

$$u(k) = \frac{T}{R} u_c(k) - \frac{S}{R} y(k) \quad (8)$$

حيث:

u: دخل النظام

y: خرج النظام

uc: الإشارة المرجعية

S,T,R: كثيرات الحدود للمتحكم

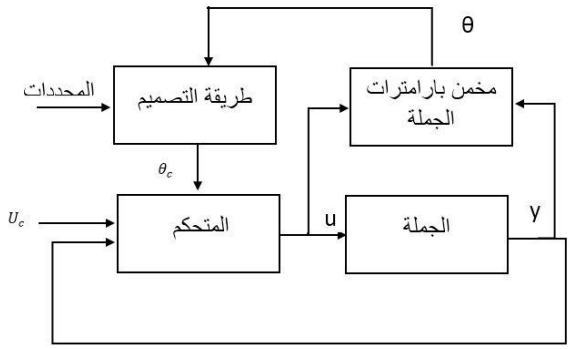
طريقة تصميمالمتحكم: هناك عدة طرق لتصميم المتحكم منها طريقة توضع الأقطاب وتعتمد هذه الطريقة على توضع الأقطاب المرغوبة في الحلقة المغلقةالتي يتم تحديدها من المواصفات أو المحددات المطلوبة من النظام.

ذكرنا سابقاً أن المنظم ذاتي التوليف لديه شكلان وبالتالي تختلف طريقة تصميم بارامترات المتحكم حسب كل شكل ولذلك لدينا خوارزميتين لحساب هذه البارامترات:

1- خوارزمية المنظم ذاتي التوليف الصريحة Explicit Algorithm (غير المباشرة):

تعتمد خوارزمية المنظم ذاتي التوليف الصريحة على تخمين بارامترات النظام وذلك من خلال قياس كل من الدخل والخرج للنظام، ثم استخدام تقنية تخمين بارامترات للحصول على بارامترات النظام وذلك لأن التغيرات التي تحدث في النظام تنعكس على قيم بارامترات المتحكم، لذلك يتم في هذا النوع من التحكم الحصول على بارامترات المتحكم كتابع لبارامترات النظام المراد التحكم به.

يبيّن الشكل (3) المخطط الصندوقي للمنظم ذاتي التوليف الصريح (غير المباشر)



الشكل (3) المخطط الصندوقي للمنظم ذاتي التوليف الصريح (غير المباشر)

ولذلك سميت بالطريقة غير المباشرة لأنه تم حساب بارامترات المتحكم من بارامترات الجملة أي توجد مرحلة وسيطة

$$(u, y) \rightarrow \theta(B, A) \rightarrow \theta_c(T, R, S)$$

بفرض أن تابع تحويل النظام المرغوب H_m، وهو يكافئ تابع تحويل النظام بالحلقة المغلقة:

$$G_{cl} = \frac{y}{u_c} \equiv \frac{B_m}{A_m} = H_m \textbf{(9)}$$

من الشكل (2)، يمكن ان نكتب:

$$\frac{y}{u_c} = \frac{\frac{B}{A}}{1+\frac{BS}{AR}} \cdot \frac{T}{R} = \frac{B.T}{A.R+B.S} \equiv \frac{B_m}{A_m} \textbf{(10)}$$

حيث:

B_m: بسط تابع التحويل المرغوب

A_m: مقام تابع التحويل المرغوب

غالباً ما يكون النظام المرغوب من الدرجة الثانية لأنه من السهل دراسة سلوك وخصائص نظام من الدرجة الثانية وبالتالي حتى لو كان النظام المدروس من الدرجة الرابعة مثلاً فيجب تصميم متحكم بحيث يكون سلوك النظام المدروس يكافئ سلوك نظام من الدرجة الثانية، ويتم ذلك من خلال إيجاد T,R,S بحيث تحقق اختصار أصفار مع أقطاب للوصول إلى نظام من الدرجة الثانية يكافئ النظام المرغوب ويمكن تحقيق ذلك بتجزئة كثير الحدود B إلى اصفار مستقرة واصفار غير مستقرة بحيث يمكن اختصار الاصفار المستقرة. يجب أن يكون الصفر المختصر هو صفر مستقر لأنه عند الاختصار سيتم اختصار صفر مع قطب وفي حال اختصار قطب غير مستقر أصبح هذا القطب خارج السيطرة ولا يمكن التحكم به ومهما كان التصميم دقيق لا يمكن التحكم بالنظام.

$$B = B^+ . B^- \textbf{(11)}$$

B^+: مجموعة الأصفار المستقرة

B^-: مجموعة الأصفار غير المستقرة

بعد أنتمتجزئة Bلدينا بعض الفرضيات لتصميم كثيرات الحدود المطلوبة(T,R,S):

1- لا يوجد أقطاب مشتركة بين A وB لأنه في حال وجود أقطاب مشتركة فسيتم اختصارها من تابع تحويل الحلقة المفتوحة$\frac{B}{A}$

2- من علاقة تابع تحويل النظام في الحلقة المغلقة نلاحظ أنه حتى نستطيع اختصار أصفار مع أقطاب فحتماً يوجد أقطاب مشتركة بين R وB وبالتالي يمكن تصميم R كالتالي:

$$R = B^+ . R' \textbf{(12)}$$

نعوض المعادلات (11) (12) بالمعادلة (10):

$$\frac{y}{u_c} = \frac{B^+.B^-.T}{A.B^+.R'+B^+.B^-.S} = \frac{B^-.T}{A.R'+B^-.S} \equiv \frac{B_m}{A_m}.\frac{A_0}{A_0} \quad (13)$$

A_0 : المعادلة المميزة لنظام الراصد في حال كان شعاع الحالة غير قابل للقياس ويتم حسابه دون أن يدخل في تصميم بارامترات المتحكم.

3- يتم تصميم T من العلاقة التالية:

$$B^-.T = B_m.A_0 \rightarrow T = \frac{B_m.A_0}{B^-} \quad (14)$$

وإذا لم تعطى B_m يتم حسابها كما يلي:

$$B_m = A_m(1)Z^{d_0} \quad (15)$$

حيث d_0: الدرجةالنسبية (الفرق بين درجة البسطودرجةالمقام)

$$d_0 = \deg(A) - \deg(B) \quad (16)$$

4- يتم تحديد درجة كثيرات الحدود R', A_0, S بحيث تحقق قانون السببية من العلاقات التالية:

$$\deg(A_0) \geq 2\deg(A) - \deg(A_m) - \deg(B^+) - 1$$
$$\deg(R') = \deg(A_0) + \deg(A_m) - \deg(A)$$
$$\deg(S) = \deg(A \quad (17$$

بعد حساب درجة كثيرات الحدود نعوض بالمعادلة التالية:

$$A.R' + B^-.S = A_m.A_0 \quad (18)$$

وتسمى هذه المعادلة بمعادلة بيزوت

وبذلك نكون قد صممنا بارامترات المتحكم المطلوب ولكن يوجد مشكلة في هذه الطريقة وهي كيف يمكن تجزيئ B وذلك بسبب أن بارامترات الجملة مجهولة ويتم حسابها باستخدام RLSE وبالتالي لا يمكن معرفة الأصفار المستقرة وغير المستقرة ولذلك نلجأ إلى معالجة المشكلة من خلال حالتين للأنظمة:

أنظمة ذات طور أصغري Min-phase وأنظمة ذات طور غير أصغري وNon min-phase.

عندما تكون جميع حلول كثير الحدود Bمستقرة تسمى هذه النظم بنظم ذات طور أصغري Min-phase

أما عند وجود حلول غير مستقرة تسمى بنظم ذات طور غير أصغري Non min-phase

وهكذا يتم تجزئة B كالتالي:

1- نظام ذو طور أصغري:

كما ذكرنا في هذا النظام تكون جميع الأصفار مستقرة ويتم حساب كثيرات الحدود R, S من العلاقات التالية:

$$B = B^+$$
$$B^- = 1$$
$$A.R' + S = A_m \quad (19)$$
$$R' = \frac{A_m.A_0}{A}$$

S: باقي القسمة

2- نظام ذو طور غير أصغري:

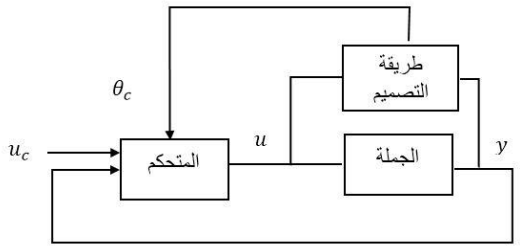
في هذا النظام تكون جميع الأصفار غير مستقرة ويتم حساب كثيرات الحدود R, S من العلاقات التالية:

$$B = B^-$$
$$B^+ = 1$$
$$R' = R \quad (20)$$
$$A.R + B.S = A_m.A_0$$

2- خوارزمية المنظم ذاتي التوليف الضمنيةImplicit Algorithm (المباشرة):

يتم حساب بارامترات المتحكم بشكل مباشر من قراءات الدخل والخرج دون حساب بارامترات الجملة بشكل صريح لكن يتم حسابها ضمنياً ويتم حساب البارامترات عن طريق LSE أو RLSE غالباً

$$(u, y) \rightarrow \theta_c(T, R, S)$$



الشكل (4) المخطط الصندوقي للمنظم ذاتي التوليف الضمني (المباشر)

يتم حساب البارامترات R,S من المعادلة(16) دون الحاجة إلى حساب A,Bلذلك نلجأ إلى تابع تحويل النظام في الحلقة المفتوحة:

$$\frac{y}{u} = \frac{B}{A} \rightarrow y.A = u.B \quad (21)$$

ثم يتم تعويض المعادلة (21) في معادلة بيزوت(18)ويتم إجراء بعض العمليات الرياضية للوصول للشكل النهائي (ضرب الطرفين بـ y):

$$y.A.R' + y.B^{-}.S = y.A_0.A_m$$
$$u.B.R' + y.B^{-}.S = y.A_0.A_m$$
$$u.B^{-}.B^{+}.R' + y.B^{-}.S = A_0.A_m$$
$$uB^{-}R + y \quad (22) \quad A_0A_m$$
$$B^{-}(uR + yS) = yA_0A_m$$

نلاحظ أنه لدينا كثير الحدود B^- لم نستطيع التخلص منها لذلك نلجأ إلى حل المسالة من خلال النظم ذات الطور الأصغري وغير الأصغري

1- حالة النظم ذات الطور الأصغري:

كما ذكرنا في هذا النظام تكون جميع الأصفار مستقرة أي $B^- = 1$

وبالتالي تصبح المعادلة الأخيرة من مجموعة المعادلات (22) كالتالي:

$$uR + yS = yA_0A_m \quad (23)$$

ثم يتم حساب درجة كل من A_0 (إذا لم يكن معطى) و S و Rكالتالي:

$$\deg(A_0) = d_0 - 1$$
$$l = \deg(s) = \deg(R) = \deg(A_0.A_m) - \quad (24)$$

بعد حساب درجة كثيرات الحدود R,S تصبح من الشكل التالي:

$$S = s_0 + s_1Z^{-1} + s_2Z^{-2} + \cdots + s_lZ^{-l}$$
$$R = r_0 + r_1Z^{-1} + r_2Z^{-2} + \cdots + r_lZ^{-l} \quad (25)$$

إن نظام الراصد من الدرجة الأولى والنظام المرغوب من الدرجة الثانية تصبح لدينا:

$$A_0A_m = a_0 + a_1Z^{-1} + a_2Z^{-2} + a_3Z^{-3} \quad (26)$$

نعوض المعادلات (25)، (26) في المعادلة(23):

$$(r_0 + r_1Z^{-1} + r_2Z^{-2} + \cdots + r_lZ^{-l})u + (s_0 + s_1Z^{-1} + s_2Z^{-2} + \cdots + s_lZ^{-l})y = (a_0 + a_1Z^{-1} + a_2Z^{-2} + a_3Z^{-3})y \quad (27)$$

حيث:

$r_0, r_1, \cdots, r_l, s_0, s_1, \cdots s_l$ بارامترات المتحكم وهي مجهولة يجب تحديد قيمتها.

a_0, a_1, a_2, a_3 ثوابت معروفة

نحول المعادلة (27) إلى مستوي الزمن:

$$r_0u(k) + r_1u(k-1) + r_2u(k-2) + \cdots + r_lu(k-l) + s_0y(k) + s_1y(k-1) + s_2y(k-2) + \cdots + s_ly(k-l) = a_0y(k) + a_1y(k-1) + a_2y(k-2) + a_3y(k-3) \quad (28)$$

تتم كتابة المعادلة(28) بشكل مصفوفي بحيث يمكن تطبيقخوارزمية LSE(3) عليها:

$$a_0y(k) + a_1y(k-1) + a_2y(k-2) + a_3y(k-3) =$$
$$[u(k) \quad \cdots \quad u(k-l) \quad y(k) \quad \cdots \quad y(k-l)] \begin{bmatrix} r_0 \\ \vdots \\ r_l \\ s_0 \\ \vdots \\ s_l \end{bmatrix} \quad (29)$$

2- حالة النظم ذاتالطور غير الأصغري:

كما ذكرنا في هذا النظام تكون جميع الأصفار غير مستقرة أي $B^- = B$

وبالتالي تصبح المعادلة الأخيرة من مجموعة المعادلات (22) كالتالي:

$$BRu + BSv = y.A_0.A_m$$
$$R_1u - \quad (30) \quad y.A_0.A_m$$

يتم حساب R_1, S_1 بنفس الطريقة ثم نستنتج R,S بحذف العامل المشترك بين R_1 و S_1

بعد حساب R,S يتم حساب Tمن العلاقة(14)

4.تصميم المنظم ذاتي التوليف بخوارزميات مختلفة:

بعد أن تم التمهيد للأسس النظرية للبحث، سيتم عرض نتائجتنجيز إحدى الدراسات السابقة وعرض النتائج العملية المرتبطة بتطبيق الخوارزمية الصريحة والضمنية على نظام المفاعل الكيميائي (CSTR)، ومن ثم مقارنة نتائج الخوارزمية الصريحة مع الخوارزمية الضمنية، تم تنفيذ الإجراء العملي باستخدام برنامج MATLAB.

1.4. تنجيز الدراسة المرجعية(shoga،Mitiku،وBharatiraja،2018):

تـم اختيـار هـذه الدراسـة لوضـوح طريقـة نمذجـة الخوارزميـة الصريحة حيث تم في هذه الدراسة تصميم متحكم أمامي خلفي بطريقـة توضـع الأقطـاب لنظـام لا خطـي ممثـل بمعادلـة مـن الدرجة الثالثة.

$$G_{ol}(Z) = \frac{0.198Z^2-0.012Z-0.0323}{Z^3-1.727Z^2+1.302Z\pm0.521} \equiv \frac{B}{A} \quad (31)$$

تم حساب بارامترات المتحكم باستخدام طريقة توضع الأقطاب حيث نحصل على الاستجابة المرغوبة المحددة بتابع التحويل

$$G_m(Z) = \frac{0.158Z^2-0.005Z-0.0253}{Z^3-1.687Z^2+1.102Z-0.2873} \equiv \frac{B_m}{A_m} \quad (32)$$

ولنـتمكن مـن حسـاب بـارامترات المـتحكم لابـد مـن تحديـد نـوع الجملة حسب حلول كثير الحدود B (أصفار النظام):

حلول B:(0.4353;-0.3747) الأصفار مستقرة (داخل الدائرة الواحديـة) وبالتـالي الجملـة ذات طـور أصـغري ومنـه نقـوم بحساب بارامترات المتحكم من المعادلة (19)،

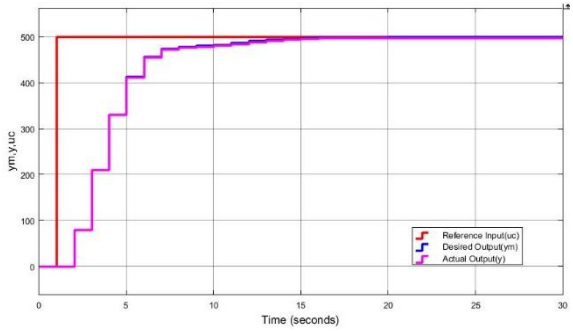
كما تم حساب المعادلة المميزة لنظام الراصد A_0=1

يبيّن الجدول (1) بارامترات المتحكم STR لاختبار الخوارزمية الصـريحة مـن أجـل تـابع تحويـل المسـتخدم فـي الدراسـة المرجعية(Mitiku،shoga،وBharatiraja،2018) من الدرجة الثالثة باستخدام المخمن LSE:

الجدول(1) بارامترات المتحكم STR لاختبار الخوارزمية الصريحة للدراسة المرجعية (Mitiku،shoga،وBharatiraja،2018)

parameters	S			T			R		
	s0	s1	s2	t0	t1	t2	r0	r1	r2
	0.04	-0.2	0.2337	0.158	-0.005	0-0.0253	0.198	-0.012	-0.0323

ننتقل لتنفيذ الخوارزميـة علـى تـابع التحويـل الممثـل بالمعادلـة (31) حيث كانت الاستجابة كما هي موضحة بالشكل (5):

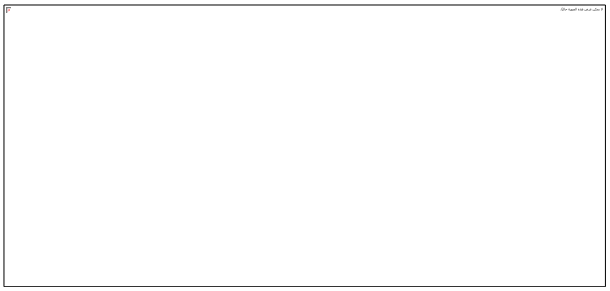


الشكل(5) استجابة نظام من الدرجة الثالثة باستخدام الخوارزمية الصريحة والمخمن LSE

2.4. النظام المدروس (نظام المفاعل الكيميائي ذي التقليب المستمرCSTR):

نظـام CSTRاللاخطـي يسـمح بإنتـاج الطاقـة الحراريـة أثنـاء التفاعل مما يؤدي إلى ارتفاع الحرارة بشكل كبير. وذلك يؤثر علـى التشـغيل المناسـب للنظـام وعلـى عمـره ومـن الممكـن أن يسبب خسارة غير متوقعة للمنتج. وبالتالي يجب إيجاد طريقة للتحكم بدرجة حرارة المفاعل المستمر من خلال تبريد مناسب للنظـــــام عـــــن طريـــــق حجـــــرة التبريد.(Mitiku،shoga،وBharatiraja،2018)

حيث يظهر الشكل (6) مداخل ومخارج النظام وهي ثلاث مـــداخل ومخـــرجين.(Seborg ، Edgar ،و Mellichamp، 2004)



الشكل (6) نظام المفاعل الكيميائي ذو التقليب المستمر

الـدخل الأول: تركيـز المـادة A فـي مجـرى التغذيـة CfFeed Concentration $[\frac{kgmol}{m^3}]$

الـدخل الثـاني: درجـة حـرارة مجـرى التغذيـة TfFeed Temperature[k]

الدخل الثالث: درجة حرارة حجرة التبريد TcJacket coolant temperature[k]

الخـــــرج الأول: تركيـــــز المـــــادة A فـــــي المفاعل CrResidualConcentration $[\frac{kgmol}{m^3}]$

الخـرج الثـاني: درجـة حـرارة المفاعـل TrReactor temperature[k]

تم اختبار الخوارزميات من أجل الدخل الثالث (درجة حرارة حجرة التبريد Tc) والخرج الثاني (درجة حرارة المفاعل Tr)

حيث تم فرض القيمة المرغوبة لدرجة حرارة المفاعل [uc=500 K] أما بقية المداخل تم اعتبارها قيم ثابتة Tf=298.2 و Cf=10(Seborg، Edgar و Mellichamp، 2004)

3.4. تصميم المنظم ذاتي التوليف لنظام المفاعل الكيميائي ذي التقليب المستمر بخوارزميات مختلفة:

تم اعتماد نظام المفاعل الكيميائي لاختبار خوارزمية المنظم ذاتي التوليف بالطريقتين الصريحة والضمنية وتم اقتراح تمثيل لنظام المفاعل الكيميائي بتابع تحويل من الدرجة الثانية وتابع تحويل من الدرجة الثالثة وتم تحديد بارامترات النظام من خلال خوارزمية LSE وخوارزمية RLSE.

1.3.4. خوارزمية المنظم ذاتي التوليف الصريحة (غير المباشرة):

تم اختبار الخوارزمية بأربع حالات:

1- اختبار الخوارزمية الصريحة بحالة نظام المفاعل الكيميائي من الدرجة الثانية والمخمن LSE:

لاختبار الخوارزمية لا بد من تحديد النموذج الرياضي للجملة المدروسة وتخمين بارامتراتها، حيث تم تحديد النموذج الرياضي للجملة المدروسة بتابع تحويل من الدرجة الثانية كما في المعادلة:

$$\frac{B}{A}=\frac{b_0Z+b_1}{Z^2+a_1Z+a_2} \quad (33)$$

ثم تم تخمين بارامترات النظام باستخدامالمخمنLSEحيث تم تحديد شعاع البارامترات كالتالي:

$$\theta=[-a_1;\ -a_2;\ b_0;\ b_1] \quad (34)$$

ثم حساب قيمة الشعاع من المعادلة (4) المذكورة في الفصل الثالث كما يظهر في الجدول (2):

الجدول (2) بارامترات نظام المفاعل الكيميائي من الدرجة الثانية باستخدام المخمن LSE

parameters	b0	b1	a1	a2
	0.1771	-0.0431	-1.0658	0.2194

بعدما تم تخمين بارامترات الجملة ننتقل لحساب بارامترات المتحكم باستخدام طريقة توضع الأقطاب حيث نحصل على الاستجابة المرغوبة المحددة بتابع التحويل (35):

$$\frac{Bm}{Am}=\frac{0.35Z}{Z^2-0.8Z+0.15} \quad (35)$$

ولنتمكن من حساب بارامترات المتحكم لابد من تحديد نوع الجملة حسب حلول كثير الحدود B (أصفار النظام):

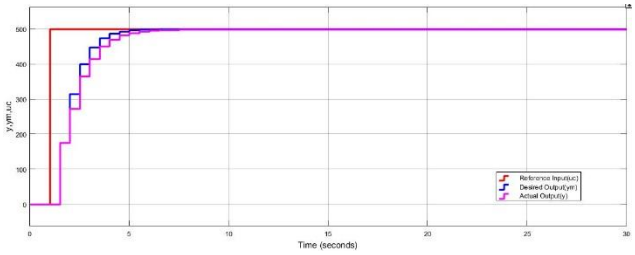
حلول B:(0.2434) الأصفار مستقرة (داخل الدائرة الواحدية) وبالتالي الجملة ذات طور أصغري ومنه نقوم بحساب بارامترات المتحكم من المعادلة (19) كما هو موضح بالجدول (3).

الجدول (3) بارامترات المتحكم STR لاختبار الخوارزمية الصريحة من أجل نظام المفاعل الكيميائي من الدرجة الثانية باستخدام المخمن LSE

parameters	r0	r1	s0	s1	t0
	0.1771	-0.0431	0.2658	-0.0694	0.35

كما تم حساب المعادلة المميزة لنظام الراصد $A_0=1$

بعد حساب بارامترات المتحكم ننتقل لتنفيذ الخوارزمية على تابع التحويل (33) الذي يمثل النموذج الرياضي لنظام المفاعل الكيميائي حيث كانت الاستجابة كما هي موضحة بالشكل (7):



الشكل (7) استجابة النموذج الرياضي (تابع تحويل من الدرجة الثانية) لنظام المفاعل الكيميائي باستخدام الخوارزمية الصريحة والمخمن LSE

نلاحظ أن قيم المتحكم STR المذكورة في الجدول (3) أعطت نتائج دقيقة عند تطبيقها على النموذج الرياضي لنظام المفاعل الكيميائي كما هو موضح بالشكل (7).

ثم نعيد تنفيذ الخوارزمية من أجل النموذج الفيزيائي لنظام المفاعل الكيميائي CSTR ونلاحظ وجود خطأ ساكن كما هو

موضح بالشكل (8) ونعلل ذلك بأن الخوارزمية تعمل بحالة Offline بسبب أن المخمن المستخدم LSE

الشكل (8) استجابة نظام المفاعل الكيميائي الممثل بتابع تحويل من الدرجة الثانية باستخدام الخوارزمية الصريحة والمخمن LSE

2- اختبار الخوارزمية الصريحة بحالة نظام المفاعل الكيميائي من الدرجة الثانية والمخمن RLSE:

حددنا بالحالة السابقة النموذج الرياضي للنظام بتابع تحويل من الدرجة الثانية وفرضنا شعاع البارامترات بالمعادلة (34) ولحساب قيم شعاع البارامترات باستخدام المخمن RLSE يجب تحديد قيمة ابتدائية للشعاع وفرضناها القيم الناتجة من المخمن LSE كما هو موضح بالجدول (2) وتحديد قيمة μ=100 ومصفوفة التباعد p هي مصفوفة حيادية من الدرجة الرابعة وذلك لأن شعاع البارامترات من الدرجة الرابعةكما تم تحديد زمن التقطيع 1Sec وبالتالي يتم تحديث قيم بارامترات النظام كل ثانية من المعادلات (5)،(6)،(7) ونعرض عينة من البارامترات في الجدول(4):

الجدول (4) عينة من بارامترات نظام المفاعل الكيميائي من الدرجة الثانية باستخدام المخمن RLSE

كما يتم تحديث بارامترات المتحكم حسب بارامترات النظام ونعرض عينة من البارامترات في الجدول (5):

الجدول (5) عينة من بارامترات المتحكم STR لاختبار الخوارزمية الصريحة من أجل نظام المفاعل الكيميائي من الدرجة الثانية باستخدام المخمن RLSE

نلاحظ إنه لا يوجد قيم كثير الحدود T وذلك لأن الجملة ذو طور أصغري كما ذكرنا سابقاً وبهذه الحالة T لا علاقة لها ببارامترات النظام وهي ثابتة لا تتغير كما في المعادلة (14).

يظهر الشكل (9) استجابة النظام خلال 30Sec:

الشكل (9) استجابة نظام المفاعل الكيميائي الممثل بتابع تحويل من الدرجة الثانية باستخدام الخوارزمية الصريحة والمخمن RLSE

نلاحظ استقرار النظام وإلغاء الخطأ الساكن دون الوصول للاستجابة المرغوبة بدقة لذلك ننتقل إلى إعادة الخوارزمية من أجل نموذج رياضي من الدرجة الثالثة لنظام المفاعل الكيميائي

3- اختبار الخوارزمية الصريحة بحالة نظام المفاعل الكيميائي من الدرجة الثالثة والمخمن LSE:

تم إعادة الخوارزمية من أجل نموذج الرياضي من الدرجة الثالثة كما في المعادلة (36):

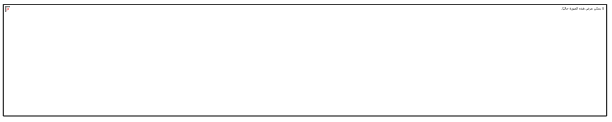
$$\frac{B}{A}=\frac{b_0Z^2+b_1Z+b_2}{Z^3+a_1Z^2+a_2Z+a_3} \quad (36)$$

ثم تم تخمين بارامترات النظام باستخدامالمخمنLSEحيث تم تحديد شعاع البارامترات كالتالي:

$$\theta=[-a1;\ -a2;\ -a3;\ b0;\ b1;\ b2] \quad (37)$$

ثم حساب قيمة الشعاع من المعادلة (3) كما يظهر في الجدول (6):

الجدول (6) بارامترات نظام المفاعل الكيميائي من الدرجة الثالثة باستخدام المخمن LSE



بعدما تم تخمين بارامترات الجملة ننتقل لحساب بارامترات المتحكم باستخدام طريقة توضع الأقطاب حيث نحصل على الاستجابة المرغوبة المحددة بتابع التحويل (4-8):

$$\frac{Bm}{Am}=\frac{0.158Z^2-0.005Z-0.0253}{Z^3-1.687Z^2+1.102Z-0.2873} \quad (38)$$

ولنتمكن من حساب بارامترات المتحكم لابد من تحديد نوع الجملة حسب حلول كثير الحدود B (أصفار النظام):

حلول B:(0.0059 ± 0.5437i) الأصفار مستقرة (داخل الدائرة الواحدية) وبالتالي الجملة ذات طور أصغري ومنه نقوم بحساب بارامترات المتحكم من المعادلات (19) كما هو موضح بالجدول (7):

الجدول (7) بارامترات المتحكم STR لاختبار الخوارزمية الصريحة من أجل نظام المفاعل الكيميائي من الدرجة الثالثة باستخدام المخمن LSE

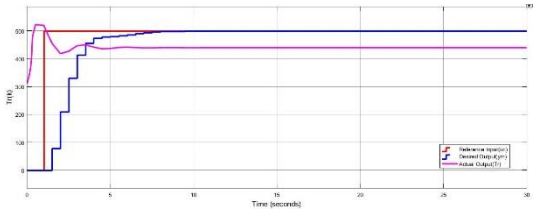
parameters	r0	r1	r2	s0	s1	s2	t0	t1	t2
	0.3558	-0.0042	0.1052	-1.1257	0.9226	-0.1952	0.158	-0.005	-0.0253

كما تم حساب المعادلة المميزة لنظام الراصد $A_0 = 1$

بعد حساب بارامترات المتحكم ننتقل لتنفيذ الخوارزمية على تابع التحويل (36) الذي يمثل النموذج الرياضي لنظام المفاعل الكيميائي حيث كانت الاستجابة كما هي موضحة بالشكل (10):

الشكل (10) استجابة النموذج الرياضي (تابع تحويل من الدرجة الثالثة) لنظام المفاعل الكيميائي باستخدام الخوارزمية الصريحة والمخمن LSE

نلاحظ أن قيم المتحكم STR المذكورة في الجدول (7) أعطت نتائج دقيقة عند تطبيقها على النموذج الرياضي لنظام المفاعل الكيميائي كما هو موضح بالشكل (10). ثم نعيد تنفيذ الخوارزمية من أجل النموذج الفيزيائي لنظام المفاعل الكيميائي CSTR ونلاحظ وجود خطأ ساكن كما هو موضح بالشكل (11) ونعلل ذلك بأن الخوارزمية تعمل بحالة Offline بسبب أن المخمن المستخدم LSE



الشكل (11) استجابة نظام المفاعل الكيميائي الممثل بتابع تحويل من الدرجة الثالثة باستخدام الخوارزمية الصريحة والمخمن LSE

كما نلاحظ من الشكل (11) إن استخدام نموذج رياضي من الدرجة الثالثة أدى إلى حصول تجاوز في الاستجابة

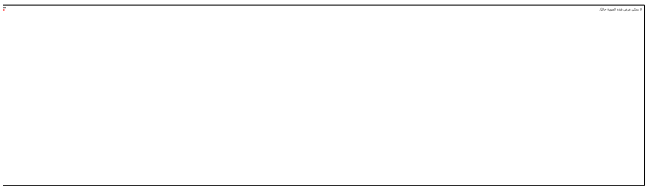
4- اختبار الخوارزمية الصريحة بحالة نظام المفاعل الكيميائي من الدرجة الثالثة والمخمن RLSE:

حددنا بالحالة السابقة النموذج الرياضي للنظام بتابع تحويل من الدرجة الثالثة وفرضنا شعاع البارامترات بالمعادلة (37) ولحساب قيم شعاع البارامترات باستخدام المخمن RLSE يجب تحديد قيمة ابتدائية للشعاع وفرضناها القيم الناتجة من المخمن LSE كما هو موضح بالجدول (6) وتحديد قيمة μ=100 ومصفوفة التباعد p هي مصفوفة حيادية من الدرجة السادسة وذلك لأن شعاع البارامترات من الدرجة السادسةكما تم تحديد زمن التقطيع 0.5Sec وبالتالي يتم تحديث قيم بارامترات النظام كل نصف ثانية من المعادلات (5)،(6)،(7) ونعرض عينة من البارامترات في الجدول(8):

الجدول (8) عينة من بارامترات نظام المفاعل الكيميائي من الدرجة الثالثة باستخدام المخمن RLSE

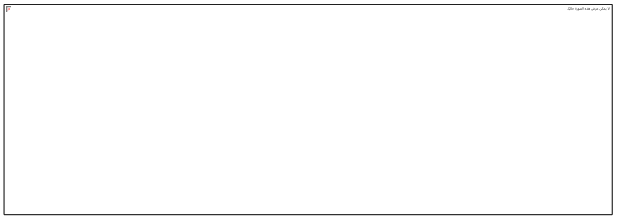
كما يتم تحديث بارامترات المتحكم حسب بارامترات النظام ونعرض عينة من البارامترات في الجدول (9):

الجدول (9) عينة من بارامترات المتحكم STR لاختبار الخوارزمية الصريحة من أجل نظام المفاعل الكيميائي من الدرجة الثالثة باستخدام المخمن RLSE



نلاحظ إنه لا يوجد قيم كثير الحدود T وذلك لأن الجملة ذو طور أصغري كما ذكرنا سابقاً وبهذه الحالة T لا علاقة لها ببارامترات النظام وهي ثابتة لا تتغير كما في المعادلة (14).

يظهر الشكل (12) استجابة النظام خلال 30Sec:



الشكل (12) استجابة نظام المفاعل الكيميائي الممثل بتابع تحويل من الدرجة الثالثة باستخدام الخوارزمية الصريحة والمخمن RLSE

نلاحظ من الشكل (12) استقرار النظام وإلغاء الخطأ الساكن لكن لم نتمكن من إلغاء التجاوز وبالتالي تم تعقيد النموذج الرياضي والعمليات الحسابية للخوارزمية دون الوصول للاستجابة المرغوبة بدقة.

2.3.4. خوارزمية المنظم ذاتي التوليف الضمنية (المباشرة):

ذكرنا سابقاً أن الخوارزمية الضمنية تعتمد على إيجاد بارامترات المتحكم بشكل مباشر من قيم دخل وخرج الجملة دون الحاجة إلى إيجاد بارامترات الجملة، حيث تم اختبار الخوارزمية بثلاث حالات بفرض إن الجملة ذو طور أصغري وقيمة الدرجة النسبية $d_0 = 1$:

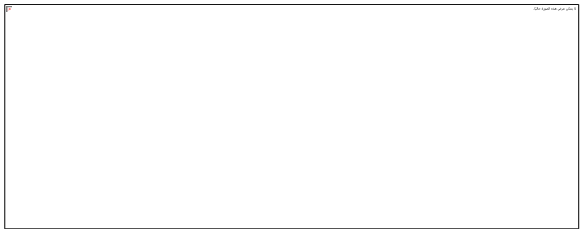
1- اختبار الخوارزمية الضمنية بحالة تابع التحويل المرغوب من الدرجة الثانية والمخمن RLSE:

تم اختبار الخوارزمية بفرض أن تابع التحويل المرغوب من الدرجة الثانية كما هو موضح بالمعادلة (35) وبالتالي نحدد شعاع بارامترات المخمن من المعادلة (24) كالتالي:

$$\theta = [s_0; s_1; r_0; r_1] \quad (39)$$

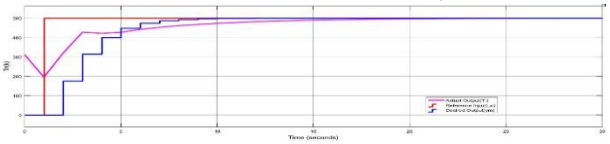
ولحساب قيم شعاع البارامترات باستخدام المخمن RLSE يجب تحديد قيمة ابتدائية للشعاع وفرضناها القيم الناتجة من الخوارزمية الصريحة بحالة نظام المفاعل الكيميائي من الدرجة الثانية والمخمن LSE كما هو موضح بالجدول (3) وتحديد قيمة $\mu=100$ ومصفوفة التباعد p هي مصفوفة حيادية من الدرجة الرابعة وذلك لأن شعاع البارامترات من الدرجة الرابعة كما تم تحديد زمن التقطيع 1Sec وبالتالي يتم تحديث قيم بارامترات النظام كل ثانيةمن المعادلات (5)، (6)، (7) ونعرض عينة من البارامترات في الجدول (10):

الجدول (10) عينة من بارامترات المتحكم STR لاختبار الخوارزمية الضمنية من أجل نظام تابع التحويل المرغوب من الدرجة الثانية باستخدام المخمن RLSE



كما ذكرنا سابقاً تم حساب قيمة T من المعادلة (14) وهي ثابتة ليس لها علاقة بقيم دخل وخرج النظام.

تم تنفيذ الخوارزمية على نظام المفاعل الكيميائي حيث كانت الاستجابة كما هي موضحة بالشكل (13):



الشكل (13) استجابة نظام المفاعل الكيميائي باستخدام الخوارزمية الضمنية والمخمن RLSE وتابع التحويل المرغوب من الدرجة الثانية

نلاحظ من الشكل (13) استقرار النظام دون الوصول للاستجابة المرغوبة بدقة.

2- اختبار الخوارزمية الضمنية بحالة تابع التحويل المرغوب من الدرجة الثالثة والمخمن RLSE:

تم إعادة اختبار الخوارزمية بفرض أن تابع التحويل المرغوب من الدرجة الثالثة كما هو موضح بالمعادلة (38) وبالتالي نحدد شعاع بارامترات المخمن من المعادلة (24) كالتالي:

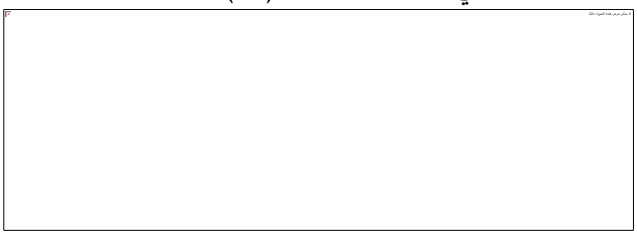
$$\theta = [s_0; s_1; s_2; r_0; r_1; r_2] \quad (40)$$

ولحساب قيم شعاع البارامترات باستخدام المخمن RLSE يجب تحديد قيمة ابتدائية للشعاع وفرضناها القيم الناتجة من الخوارزمية الصريحة بحالة نظام المفاعل الكيميائي من الدرجة الثالثة والمخمن LSE كما هو موضح بالجدول (7) وتحديد قيمة $\mu=100$ ومصفوفة التباعد p هي مصفوفة حيادية من 1) الدرجة السادسة وذلك لأن شعاع البارامترات من الدرجة السادسةكما تم تحديد زمن التقطيع 0.5Sec وبالتالي يتم تحديث قيم بارامترات النظام كل نصف ثانيةمن المعادلات (5)، (6)، (7) ونعرض عينة من البارامترات في الجدول (11):

الجدول (11) عينة من بارامترات المتحكم STR لاختبار الخوارزمية الضمنية من أجل نظام تابع التحويل المرغوب من الدرجة الثالثة باستخدام المخمن RLSE

تم حساب قيمة T من المعادلة (14) وهي ثابتة ليس لها علاقة بقيم دخل وخرج النظام

تم تنفيذ الخوارزمية على نظام المفاعل الكيميائي حيث كانت الاستجابة كما هي موضحة بالشكل (14):



الشكل (14) استجابة نظام المفاعل الكيميائي باستخدام الخوارزمية الضمنية والمخمن RLSE وتابع التحويل المرغوب من الدرجة الثالثة

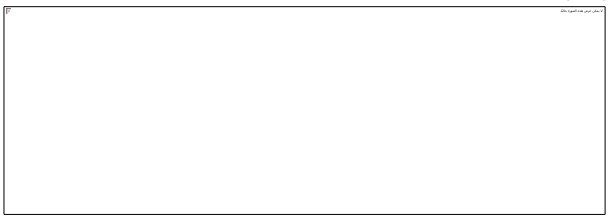
نلاحظ من الشكل (14) استقرار النظام مع وجود تجاوز وبالتالي تم تعقيد النموذج الرياضي والعمليات الحسابية للخوارزمية دون الوصول للاستجابة المرغوبة بدقة.

3- اختبار الخوارزمية الضمنية بحالة تابع التحويل المرغوب من الدرجة الثانية والمخمن RLSE مع وجود ضجيج:

تم إضافة ضجيج غاوسي للإشارة المرجعية uc لاختبار كفاءة الخوارزمية الضمنية بحالة تابع التحويل المرغوب من الدرجة الثانية، حيث تم القيام بالتجربة من أجل قيمتين للتباين:

1) إضافة ضجيج بتباين قيمته 10:

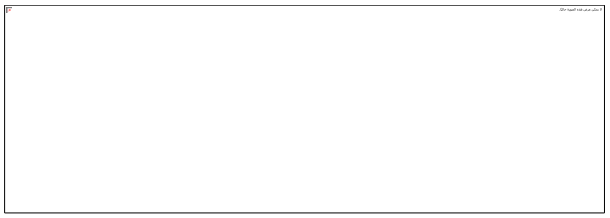
تم إضافة ضجيج غاوسي بتباين قيمته 10على نظام المفاعل الكيميائي حيث كانت الاستجابة كما هي موضحة بالشكل (15):



الشكل (15) استجابة نظام المفاعل الكيميائي باستخدام الخوارزمية الضمنية والمخمن RLSE وتابع التحويل المرغوب من الدرجة الثانية بوجود ضجيج قيمته 10

2) إضافة ضجيج بتباين قيمته 100:

تم إضافة ضجيج غاوسي بتباين قيمته 100على نظام المفاعل الكيميائي (30Sec) حيث كانت الاستجابة كما هي موضحة بالشكل (16):



الشكل (16) استجابة نظام المفاعل الكيميائي باستخدام الخوارزمية الضمنية والمخمن RLSE وتابع التحويل المرغوب من الدرجة الثانية بوجود ضجيج قيمته 100

بالمقارنة بين الشكلين (15) و (16) نلاحظ ملاحقة الخوارزمية للدخل المرجعي للحفاظ على الاستقرار نسبياً لكن بحالة قيمة التباين 100 كان الخطأ أكبر.

5. النتائج والمناقشة:

تم التحكم بدرجة حرارة المفاعل الكيميائي ذي التقليب المستمر باستخدام خوارزمية المنظم ذاتي التوليف الصريحة حيث تم تمثيل النظام بنموذج رياضي من الدرجة الثانية وتابع التحويل المرغوب من الدرجة الثانية وتابع التحويل المرغوب من الدرجة الثالثة وتم تخمين بارامترات النظام باستخدام طريقة LSE ثم طريقة RLSEولكن لم يحقق النظام الاستجابة المرغوبة لذلك تم اقتراح نموذج رياضي من الدرجة الثالثة وتابع التحويل المرغوب من الدرجة الثالثة وكذلك تم تخمين بارامترات النظام بطريقة LSE ثم طريقة RLSE ولكن تم تعقيد النموذج الرياضي دون الوصول للاستجابة المرغوبة.

ومن ثمّ تم التحكم بدرجة حرارة المفاعل الكيميائي ذي التقليب المستمر باستخدام خوارزمية المنظم ذاتي التوليف الضمنية

- بفرض أن النظام ذو طور أصغري والدرجة النسبية $d_0=1$ وتابع التحويل المرغوب من الدرجة الثانية وتم تخمين بارامترات المتحكم بطريقة RLSE ولكن لم يحقق النظام الاستجابة المرغوبة لذلك تم اقتراح تابع التحويل المرغوب من الدرجة الثالثة وكذلك تم تخمين بارامترات المتحكم بطريقة RLSE ولكن تم تعقيد النموذج الرياضي دون الوصول للاستجابة المرغوبة.

وقد تم إضافة ضجيج للنظام في حالة استخدام خوارزمية

- المنظم ذاتي التوليف الضمنية لاختبار متانة المتحكم.

تمت مقارنة أداء النظام المدروس في حالة الخوارزمية الصريحة مع أدائه في حالة الخوارزمية الضمنية بجميع الحالات المدروسة من خلال معايير المقارنة (الخطأ الساكن، التجاوز، زمن الوصول، زمن الاستقرار) وكانت النتائج كما هي موضحة بالجدول (12):

الجدول (12) مقارنة نتائج الخوارزمية المقترحة مع الخوارزمية الصريحة والضمنية

6. الاستنتاجات:

تم التحكم بدرجة حرارة المفاعل الكيميائي ذي التقليب المستمر باستخدام خوارزمية المنظم ذاتي التوليف الصريحة والضمنية والمقارنة بينهما ونستنتج ما يلي:

تخمين البارامترات باستخدام LSE لا يؤدي إلى الغاء الخطأ الساكن بينما تخمين البارامترات باستخدام RLSE يؤدي إلى الغاء الخطأ الساكن لذلك لا داعي لاستخدام هذه الطريقة في الخوارزمية الضمنية.

تأثير زمن التقطيع على استجابة النظام حيث تم تجريب عدة قيم واستخدام القيمة التي تعطي أفضل استجابة، حيث تم اختيار قيمة زمن التقطيع 0.5sec بالخوارزمية الصريحة وزمن التقطيع1sec بالخوارزمية الضمنية.

تم تمثيل النظام بنموذج رياضي من الدرجة الثانية والدرجة الثالثة للوصول إلى أفضل نموذج ولكن النموذج الرياضي من الدرجة الثالثة أدى إلى تعقيد رياضي بالإضافة إلى وجود تجاوز في استجابة النظام.

خوارزمية المنظم ذاتي التوليف الضمنية حققت الأداء نفسه التي حققته الخوارزمية الصريحة ودون كلفة إيجاد نموذج رياضي للنظام.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

III"Process Dynamics and Control", Addison Wiley, 2004, ,2ed

:References

1. 1-T. Shoga, C. Bharatiraja, A. Thelkar ,S.Mitiku and Y. Adedayo, "Self-tuning Regulator Based Cascade Control for Temperature of Exothermic Stirred Tank Reactor" , FME Transactions ,vol. 47,No. 1, pp. 202-211,December. 2018
2. 2- R.Reshmi, J.Gnanasoundharam, K.Kotteeswaran, "Design of Self-Tuning Regulator for Non-Linear Unstable System" International Journal of Pure and Applied Mathematics , Vol.118, No. 20 ,pp. 61-66,2018.
3. 3- KaganKorayAyten ,AhmetDumlu, and AlirizaKaleli,"Real-time implementation of self-tuning regulator control technique for coupled tank industrial process system",Volume 232, Issue 8,2018
4. 4- EZE P. C., JONATHAN, A. EMMANUEL , OKORONKWO, EMMANUEL A.,AKIN, M.
5. 5- PHILLIPS ,"Improving the Transient Response Performance of CSTR Using MRAC" , IRE Journals, Volume 3 Issue 1, ISSN: 2456-8880,2019
6. Jiao Chen, Jiangyun Wang and Weihong Wang , "Robust Adaptive Control for Nonlinear Aircraft System with Uncertainties",Appl. Sci. ,Vol 10, 4270,2020
7. 6- Yanjun Zhang, Ji-Feng Zhang, Xiao-Kang Liu،"Implicit function based adaptive control of non-canonical form discrete-time nonlinear systems",AutomaticaVol 129 ,2021
8. 7- Justin E. Kernot and Steve Ulrich, "Adaptive Control of a Tendon-Driven Manipulator for Capturing Non-Cooperative Space Targets" ,JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS ,Vol. 59, No. 1, 2022
9. 8- Derakhshannia, MehranMoosapourand SeyyedSajjad, "Finite-Time Sliding Mode Control for Continuous Stirred Tank Reactors Based on Disturbance Observer" ,Iran. J. Chem. Chem. Eng,Vol. 41, No. 11, 2022

   9- K. J.AstromandB.Wittenmark, "AdaptiveControl",Addison-Wesley,1989,2ed .

   1994

   10- Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar, Duncan A. Mellichamp, Francis J. Doyle