

دراسة تحليلية ومحاكاة نظام للتحكم بمنظومة تعليق مغناطيسي لرفع الأجسام الحديدية

د. أحمد كردي*

(الإيداع: 24 تموز 2024، القبول : 22 آيلول 2024)

الملخص:

في الآونة الأخيرة، توجّهت أنظار الدّراسات البحثيّة إلى أنظمة التعليق المغناطيسي لما له من تطبيقات صناعية هائلة في حمل الأجسام المعدنية الثقيلة ذات الأشكال المختلفة في الارتفاعات الثقيلة، بالرغم من وجود العديد من الدّراسات المرجعية بأنظمة التعليق المغناطيسي، إلّا أن أغلبها قد اعتبر في دراسته على وجود تابع نقل محدد يمثل النظام دون الدخول في تفاصيله ومكوناته وتأثيراتها على استقرار النظام بشكله النهائي. في هذا النظام تبرز المشاكل المتعلّقة بعدم الاستقرار نظراً لكون الحقول المغناطيسية المتشابكة مع الجسم الهدف ستكون متغيّرة بحسب الطبيعة الفيزيائية للجسم الهدف، وهنا لا بدّ من اللجوء إلى نظام تحكم يمكن من خلاله تأمين درجة معيّنة من الاستقرار كافية لجعل الأجسام المعدنية المحمولة معلقة بوضع مستقر. من أجل ذلك فقد تمّ إجراء دراسة تحليلية والتوصل لنموذج رياضي التعليق ومحاكاته في بيئة Matlab/Simulink. قادت الدراسة التحليلية للنظام الكهرومغناطيسي إلى تحديد تحديد البارامترات الكهربائية والميكانيكية المؤثرة على عمل واستقرار النظام. من جهة أخرى، تم تحديد النموذج الرياضي لنظام الرفع المغناطيسي بوجود متحكم ذكي أمثلي من نوع المنظم التربيعي الخطي التكاملية INTEGRAL-LQR للتحكم بموضع الجسم المعلق لتحقيق التوازن المستقر بين قوة الجذب الكهرومغناطيسية وقوة الثقل للجسم المعلق.

الكلمات المفتاحية: نظام تعليق مغناطيسي، المتحكم الأمثلي، المنظم التربيعي الخطي.

An Analytical Study and Simulation of a Magnetic Suspension Control System for Levitation Metal Objects

Dr. Ahmad Kurdi*

(Received: 24 July 2024, Accepted: 22 September 2024)

Abstract:

At recent years, studies have focused on magnetic suspension systems due to their important roles in industrial applications, such as carrying heavy metal objects of various shapes. Despite the many researches in the field of magnetic suspension systems, most of them were focused on exist a determined function transfer without explain its components effects.

In this system, problems are arising to instability because the magnetic fields entangled with the target body will be variable according to the physical nature of the target body, and here it is necessary to resort to a control system through which a certain degree of stability can be ensured, sufficient to make the portable metal objects suspended in a stable position. For this purpose, an analytical study and a mathematical model of the magnetic levitation system was derived and an optimized INTEGRAL–LQR controller was designed to control the position.

The analytical study of the electromagnetic system led to the determination of the electrical and mechanical parameters affecting the operation and stability of the system.

Thanks to the use of INTEGRAL–LQR to control the position of the suspended body, it achieves a stable balance between the electromagnetic attraction force and the gravitational force of the suspended body.

1- مقدمة:

التعليق المغناطيسي هو طريقة نستطيع من خلالها جعل جسماً معدنياً معلقاً بالهواء بدون أي وسيلة ميكانيكية وإنما باستخدام الحقل المغناطيسي. تكمن الصعوبة في توازن الجسم المعلق ويستخدم قانون التربيع العكسي الذي وضع أسسه العالم Samuel Earnshaw في عام 1842 [A]. تثبت نظرية Earnshaw أن شحنة نقطية لن تكون مستقرة وبوضع التوازن إلا عندما تطبق القوة الساكنة وفق قانون التربيع العكسي. هذه النظرية قابلة للتطبيق على القوى المغناطيسية الناتجة عن المغناطيس الدائمة. قام العالم Werner Braunbeck في عام 1939 بتوسيع التحليل إلى الأجسام العازلة والتي لا تملك شحنة كهربائية مع الحقول الساكنة والأجسام المغناطيسية مع الحقول الساكنة. نفس التحليل قدم بواسطة العالم Papa عام 1977. تمت الملاحظة أنه بالنسبة للمواد (diamagnetic material) ستصبح فائقة الناقلية وأجسام ناقلة مع التيارات الأعاصرية المتحيزة عليهم يمكن أن تملك نقطة توازن مستقرة [B].

إن نظام الرفع المغناطيسي (MLS: Magnetic Levitation System) يعمل على رفع وتعليق العناصر المغناطيسية الحديدية باستخدام مبدأ الكهرومغناطيسية. تلغي تقنية MLS الاتصال الميكانيكي بين الجزء الفعال ذو المغناطيس الكهربائي والعنصر الهدف ذو المادة الحديدية المطلوب رفعها وبالتالي منع الاحتكاك. كما يوفر هذا النظام العديد من المزايا مثل انخفاض مستوى الضجيج، العمل على منصات تحديد المواقع عالية الدقة. يعمل نظام MLS بشكل عام على ثلاثة أنواع من القوى وهي قوة الدفع والرفع والتوجيه [C]. قوة الدفع لدفع الجزء المتحرك إلى الأمام (حالة القاطرات الكهربائية)، قوة الرفع لرفع الجزء الأجسام المعدنية، وقوة التوجيه لتجنب الانحراف عن مساره. إذا كانت القوة المغناطيسية قوة جذب إذن هي تخص التعليق المغناطيسي بينما القوة النافرة مسؤولة عن الرفع المغناطيسي.

نظراً للتطبيقات الصناعية الهامة لموضوع الرفع والتعليق المغناطيسي وخصوصاً في الارتفاعات الثقيلة والمخصصة لرفع الأجسام الحديدية ذات الأشكال العشوائية دون حدوث احتكاك مع القاعدة المجهزة لعمليات الرفع والتعليق، يقدم بحثنا هذا دراسة تحليلية ومحاكاة باستخدام برنامج Matab/Simulink لنظام التعليق المغناطيسي القادر على حمل كتلة معدنية ثقيلة لاستخدامه في تطبيقات الارتفاعات. يتضمن هذا النظام متحكم أمثلي للسيطرة والتحكم في رفع وتعليق الأجسام المعدنية في الهواء أثناء حملها.

2- أنواع الرفع المغناطيسي:

يمكن تصنيف أنظمة الرفع المغناطيسي بحسب نوع المغنطة إلى:

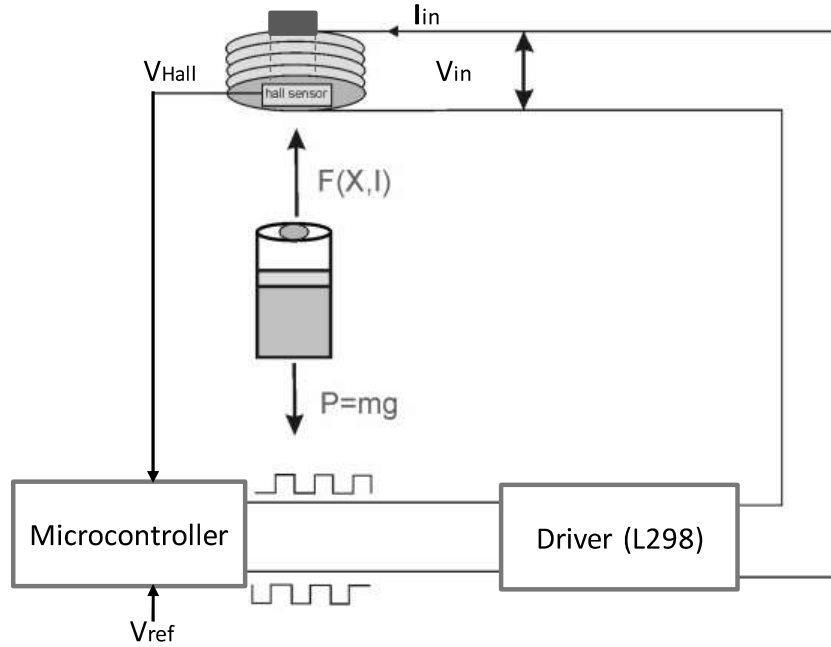
- 1- الرفع بالجذب المغناطيسي: ويتم هذا المبدأ عند وضع مغناطيسين بقطبين متعاكسة مقابل بعضهما البعض.
- 2- الرفع بالتنافر المغناطيسي: ويتم هذا المبدأ عن وضع مغناطيسين ذات قطبية متماثلة مقابل بعضهما البعض. كما ذكرت بعض المراجع [D] تصنيفات أخرى لحالات الرفع المغناطيسي مع تفصيل هذه الحالات وهي:
 - a- الرفع المغناطيسي بالقوة الدافعة بين المغناطيس ذات الشدة الثابتة.
 - b- الرفع المغناطيسي بالحقل المغناطيسي في المواد اللامغناطيسية (diamagnetic materials)
 - c- الرفع المغناطيسي بالناقلية الفائقة للأسطح المتقابلة.
 - d- الرفع المغناطيسي بالتيارات المتحيزة المتولدة على الأسطح الناقلة بفعل الحقل المغناطيسي.
 - e- الرفع المغناطيسي بالقوة المؤثرة على الناقل الحامل للتيار بفعل الحقل المغناطيسي.
 - f- الرفع المغناطيسي بالتغذية بالتيار المستمر DC أو بالتغذية بالتيار المتناوب AC لملف كهرومغناطيسي متحكم بتياره من خلال خوارزمية تحكم محددة.

2- أهمية البحث

إجراء دراسة تحليلية مع نمذجة لنظام رفع مغناطيسي لاستخدامه في حمل الأجسام المعدنية ذات الأشكال غير المتجانسة والعشوائية، ومحاكاته مع نظام القيادة والتحكم في بيئة Matlab-Simulink. وذلك من خلال دراسة النموذج الرياضي لنظام الرفع المغناطيسي، وتصميم متحكم أمثلي للتحكم بالموضع، عبر إجراء عدة اختبارات لقيم مصفوفات التثقل R ، لحساب ثوابت ريج المتحكم الأمثل للوصول لأفضل أداء ديناميكي بخطأ ستاتيكي يساوي الصفر وزمن استجابة صغير جداً بدون وجود تجاوز للهدف المحدد، ودراسة استقرار النظام ومقارنته مع المتحكمات التقليدية.

3- البنية المرجعية والنموذج الرياضي لنظام التحكم

نبين على الشكل (1) البنية العامة لنظام التحكم المقترح لنظام التعليق الكهرومغناطيسي:



الشكل (1) الشكل العام لنظام التحكم

يمكن وصف النظام من خلال المعادلتين التاليتين: المعادلة الأولى تصف العلاقة بين التيار والجهد في الملف الكهربائي وفق قانون كيرشوف، أما المعادلة الثانية تصف ديناميكية النظام حيث تنتج من تطبيق قانون نيوتن للقوى $[E]$:

$$V_{in} = R \cdot I + L \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

$$m \cdot \ddot{x} = m \cdot g - F(x, I) \quad (2)$$

حيث أن:

R : مقاومة الملف (Ω).

L : محارضة الملف (H).

V_{in} : الجهد المطبق على طرفي الملف (V).

I : التيار المار في الملف (A).

m : كتلة الجسم المعلق (Kg).

g : ثابت الجاذبية الأرضية.

$F(x, I)$: تمثل القوة كتابع لمسافة التعليق والتيار ضمن الملف، وهي تعطى وفق العلاقة التالية:

$$F(x, I) = i^2 \cdot F(x) \quad (3)$$

بالاعتماد على المعادلتين (2-3)، (3-3) نحصل على المعادلة (4):

$$m \cdot \ddot{x} = m \cdot g - i^2 \cdot F(x) \quad (4)$$

عند نقطة التوازن يكون تسارع الجسم المعلق مساوياً للصفر أي: $\ddot{x} = 0$ ، وبالتعويض في العلاقة (4) نحصل على:

$$F(x) = m \cdot g / (i^2) \quad (5)$$

هنا يتوجب علينا ايجاد القوة المؤثرة $F(x)$ عند كل موضع للجسم المعلق، وهذا يتطلب معرفة التيار المار في الملف، وهذا الأمر يحتاج إلى سلسلة كبيرة من التجارب، لذلك يمكننا إجراء القياس عند نقطة معينة يكون فيها الجهد المطبق على الملف يساوي نصف الجهد الأعظمي الذي يتحملة الملف وذلك لأن هذه النقطة تتيح لنا التحكم بالاتجاهين وبنفس النسبة. في واقع الأمر يوجد طريقتين لحساب القوة المغناطيسية: الطريقة الأولى تعتمد على تحويل الطاقة بالاستناد إلى مبادئ الترموديناميك (Thermodynamic Argument)، والطريقة الثانية تعتمد على حساب الحقل المغناطيسي وفق مؤشر ماكسويل (Maxwell's field Tensor) [F].

في طريقة مؤشر ماكسويل سيتم اعتبار أن النظام مصون (Conservative System)، أي طاقة دخل النظام تساوي طاقة خرج النظام. في نظام الحقل المغناطيسي سيكون الدخل كهربائي بينما سيكون الخرج ميكانيكي (حركة الجسم المعلق). حيث أنه لن يكون هناك طاقة ضائعة على شكل حرارة أو احتكاك. وستكون الطاقة مختزنة بالحقل المغناطيسي، وهذه الطاقة المختزنة بالحقل تعتمد على عنصرين هما الفيض المغناطيسي (φ) أو التيار الكهربائي (I) وعلى الموضع أو مسافة التعليق (x).

يمكننا أن نعبر عن استطاعة الدخل الكهربائية للنظام بالعلاقة:

$$P_e = V \cdot i = i \frac{d\varphi}{dt} \quad (6)$$

أما استطاعة خرج النظام الميكانيكية يمكن أن تكتب بالعلاقة التالية:

$$P_m = F_{em} \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

حيث أن:

P_m : تمثل الاستطاعة الميكانيكية.

P_e : تمثل الاستطاعة الكهرومغناطيسية.

إن الفرق بين الاستطاعتين يعطينا مقدار التغير في الطاقة كتابع للزمن:

$$\frac{dW_m}{dt} = P_e - P_m \quad (8)$$

بالتعويض (6)، (7) في العلاقة (8):

$$\frac{dW_m}{dt} = i \frac{d\varphi}{dt} - F_{em} \frac{dx}{dt} \quad (9)$$

إذا أردنا أخذ تغير النظام من حالة إلى أخرى، يمكن أن نكتب ذلك بالطريقة التالية:

$$W_m(a) - W_m(b) = \int_a^b I \cdot d\varphi - F_{em} \cdot dx \quad (10)$$

حيث أن الحالتين (a)، (b) هما: $a = (\varphi_a, x_a)$ ، $b = (\varphi_b, x_b)$

وبالتالي يمكننا أن نكتب علاقة الطاقة المختزنة في النظام كتابع لتغير كلا المتغيرين معاً (φ) و (x):

$$dW_m = \frac{dW_m}{d\varphi} d\varphi + \frac{dW_m}{dx} dx \quad (11)$$

بمقارنة العلاقة (9) والعلاقة (11)، نحصل على علاقة القوة الكهرومغناطيسية (12):

$$F_{em} = - \frac{dW_m}{dx}$$

وعلاقة التيار المار في الملف:

$$I = - \frac{dW_m}{d\varphi}$$

من أجل مجموع الحدود الكهربائية والميكانيكية يمكن أن نكتب:

$$dW_m = \sum_k I_k \cdot d\varphi_k - F_{em} dx = \int I \cdot d\varphi - F_{em} dx$$

من أجل تبسيط المسألة، نعتبر أن المحاضرة هي تابع فقط لمسافة التعليق (x) فقط، وبالتالي:

$$\varphi(x) = L(x) \cdot i$$

بإجراء التكامل للعلاقة (14) من $\varphi = 0$ إلى $\varphi = \varphi$ ومن أجل ($dx = 0$)، نحصل على العلاقة:

$$W_m = \int_0^\varphi I_k d\varphi$$

ومن العلاقة (15)، نحصل على العلاقة التالية:

$$W_m = \int_0^\varphi \frac{\varphi(x)}{L(x)} = \frac{1}{L(x)} \int_0^\varphi \varphi(x) \cdot d\varphi(x) = \frac{1}{L(x)} \cdot \frac{\varphi^2(x)}{2}$$

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot L(x)$$

بتعويض العلاقة (12) بالعلاقة (18) نجد:

$$F_{em} = - \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{L(x)}{dx}$$

يمكن أن نعبر عن المحاضرة الكلية لنظام التعليق بالعلاقة:

$$L(x) = L_1 + L_0 \frac{x_0}{x}$$

حيث أن:

x_0 : تمثل وضع التوازن للنظام.

L_0 : المحارضة التزايدية للجسم المعلق.

L_1 : محارضة الملف الكهرومغناطيسي.

من العلاقتين (19)، (20) نحصل على العلاقة التالية:

(21)

$$F_{em} = \frac{i^2}{2} \cdot L_0 \cdot x_0 \frac{1}{x^2} = k \cdot \frac{i^2}{x^2}$$

حيث أن k : هو ثابت يعتمد على النظام.

بناءً على المعادلتين (2) و (21)، نستطيع أن نعبر عن النظام بالحالة الديناميكية:

(22)

$$\ddot{x} = g - \frac{k \cdot I^2}{m x^2}$$

3- دراسة استقرار نظام التعليق المغناطيسي

لدراسة استقرار النظام يجب إيجاد تابع النقل في الحلقة المفتوحة، حيث يتم تقريب النموذج اللاخطي إلى نموذج خطي حول نقطة التوازن المرغوبة، وهذا التقريب مناسب عند معرفة نقطة الوصول الهدف أي عندما يكون المسار محدداً، من جهة أخرى إن عدم اتباع طريقة تقريب النظام إلى الشكل الخطي سوف يزيد من تعقيد النظام مما يضطرنا إلى تقبل زمن معالجة أكبر قد لا يكون مسموح في تطبيقات سرعة الانجاز العالية.

تعطى معادلة الحالة للنظام كما يلي :

(23)

$$f(i, x) = \ddot{x} = A \cdot x + B \cdot i$$

وباعتماد نقطة العمل التالية كنقطة توازن مرغوبة (وهي تشير إلى أقل قيمة للتيار تحقق الوصول إلى موضع بدقة عالية يمكن استخدامه في تطبيقات الدقة الجيدة لإعادة تموضع الرأس الحامل للجسم المعدني):

$$i_0 = 0.8 \text{ A}$$

$$x_0 = 0.009 \text{ m}$$

حيث أن:

$$A = \left. \frac{\partial f(i, x)}{\partial x} \right|_{\substack{i=i_0 \\ x=x_0}} = 2 \cdot \frac{K}{m} \cdot \left(\frac{i_0^2}{x_0^3} \right) = K_x$$

$$B = \left. \frac{\partial f(i, x)}{\partial i} \right|_{\substack{i=i_0 \\ x=x_0}} = -2 \frac{K}{m} \cdot \frac{i_0}{x_0^2} = K_u$$

K_x ، K_u : هي ثوابت تتعلق بتيار وموضع نقطة التوازن للنظام.

مع العلم أن في الحالة المستقرة يتحقق ما يلي:

(24)

$$\frac{K}{m} \cdot \frac{i_0^2}{x_0^2} = g$$

وبالتالي نجد الثوابت K_u ، K_x :

$$K_x = 2 \cdot \frac{g}{x_0} = 2180$$

$$K_u = 2 \cdot \frac{g}{i_0} = -24,525$$

باجراء تحويل لابلاس على المعادلة (23) نجد:

$$s^2 \cdot x = K_x \cdot x + K_u \cdot i \quad (25)$$

بالإصلاح وتعويض قيم البارامترات نحصل على:

$$\frac{x}{i} = \frac{-24,525}{s^2 - 2180} \quad (26)$$

نلاحظ أن النظام غير مستقر حيث يمتلك قطبين أحدهما موجب والآخر سالب. لذلك سنلجأ إلى تقنية التحكم الأمثل بالنظام.

4- تصميم نظام التحكم الأمثل بنظام التعليق المغناطيسي

بناءً على نتائج التحليل السابقة، فإن النظام غير مستقر ولذلك لن يكون هناك إمكانية لاستخدام متحكمات PID تقليدية للتحكم بالنظام، ولذلك سيتم الاعتماد هنا على نظرية التحكم الأمثل من خلال تطبيق المنظم التربيعي الخطي LQR لتصميم نظام التحكم.

يوفر المنظم التربيعي الخطي إمكانية تغيير مواضع أقطاب النظام من خلال إضافة ثوابت التغذية العكسية للحالة، بما يضمن تحويل النظام الغير مستقر إلى نظام مستقر [H].

يعطي قانون المتحكم التربيعي الخطي كما يلي:

$$u_{LQR} = -K_{LQR}X \quad (27)$$

حيث: K_{LQR} شعاع ربح التغذية العكسية للحالة الذي يؤمن استقرار النظام ويصغر تابع الكلفة التالي:

$$J = \int_{t_n}^{t_f} [x(t)^T Q(t)x(t) + u^T(t)R(t)u(t)] dt \quad (28)$$

يعطى شعاع الربح K_{LQR} وفق العلاقة التالية:

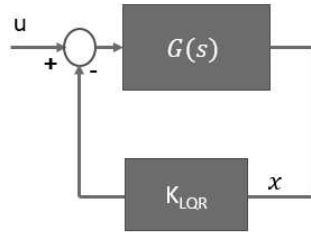
$$K_{LQR} = R^{-1}B^TP \quad (29)$$

حيث أن المتغير P يمثل معادلة ريكاتي الجبرية التالية:

$$A^TP + PA - PBR^{-1}B^TP + Q = 0 \quad (30)$$

حيث Q, R مصفوفات تثقيل قطرية موجبة.

بعد اختيار قيم مناسبة لهاتين المصفوفتين يتم باستخدام كود الماتلاب الحصول على قيم شعاع الربح K_{LQR} . يبين الشكل (2) المخطط الصندوقي لجملة التحكم بوجود المنظم التربيعي الخطي LQR.



الشكل رقم (2): المخطط الصندوقي لجملة التحكم بوجود المنظم التربيعي الخطي LQR

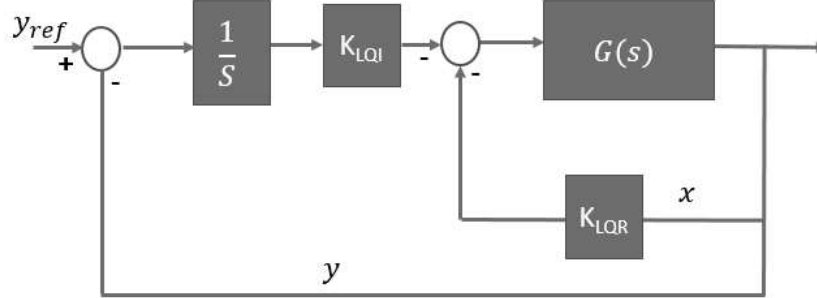
من أجل ملاحظة قيمة مرجعية محددة، يمكن توسيع فضاء الحالة للنظام وإضافة متحول حالة جديد لتنظيم الموضع، حيث نفرض متحول الحالة الجديد على النحو الآتي:

$$\gamma = \int (x_{1_{ref}} - x_1) dt \quad (31)$$

وبالتالي يصبح فضاء الحالة للنظام على النحو الآتي:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{y} \end{bmatrix} = [a] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_u \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} x_{1_ref} \quad (32)$$

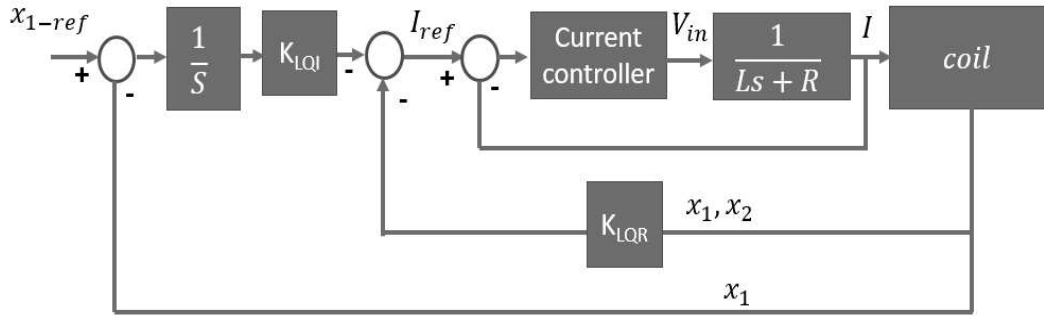
المخطط الصندوقي لنظام التحكم سيكون كما هو مبين في الشكل (3).



الشكل رقم (3): المخطط الصندوقي للنظام بوجود المنظم التربيعي الخطي التكاملي Integral-LQR

5- نتائج المحاكاة لنظام التحكم:

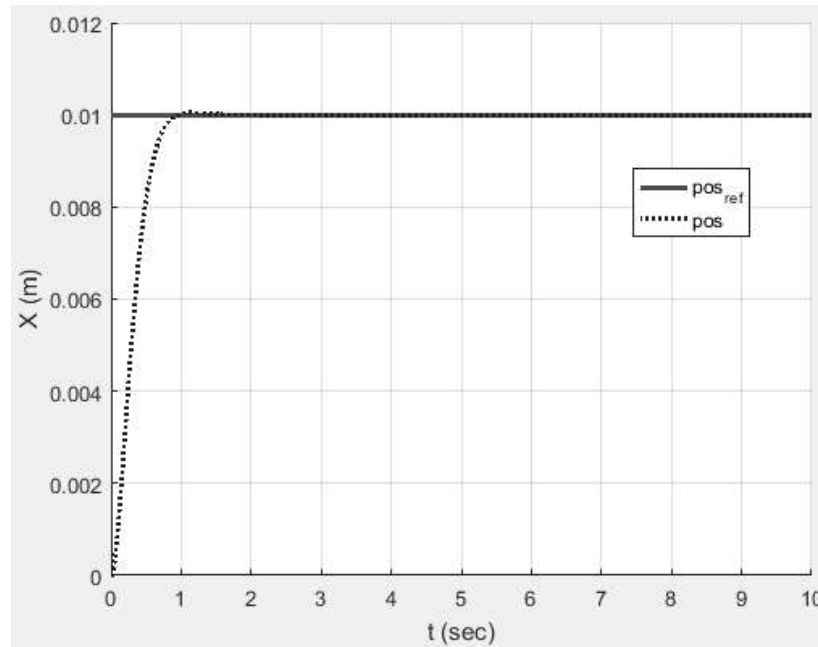
يوضح الشكل (4) المخطط الصندوقي لنظام التحكم، حيث تم في الحلقة الخارجية استخدام متحكم أمثل لتنظيم الموضع، مع استخدام متحكم PI لتنظيم التيار في الحلقة الداخلية، حيث تم حساب ثوابت هذا المتحكم باستخدام طريق حذف صفر مع قطب.



الشكل رقم (4): المخطط الصندوقي الكامل للتحكم بالنظام

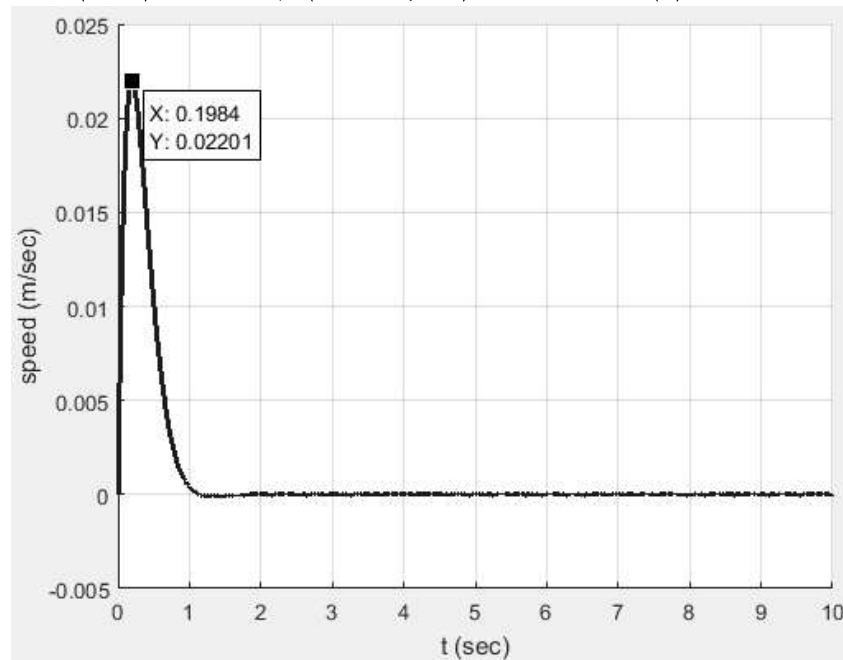
تتعلق استجابة نظام التحكم الأمثل بقيم ثوابت الريح والتي تتضمن كما هو موضح بالشكل (3) ثوابت تغذية عكسية للحالة وثابت التغذية الأمامية الذي يمثل الحد التكاملي في قانون التحكم بقيم مصفوفات التثقيل. فمن أجل قيم مختلفة لكل من مصفوفات التثقيل Q,R يتم الحصول على قيم مختلفة لثابت الريح المتحكم الأمثل وبالتالي تعتمد استجابة النظام على القيم المختارة لهما.

الحالة الأولى: من أجل $R=0.3; Q=\text{diag}([100 \ 100 \ 82000])$ ، فإن نتائج المحاكاة الموضحة على الشكل (5) تظهر استجابة النظام من أجل تنظيم الموضع، حيث تم ضبط الموضع عند قيمة 1cm، بينما يوضح الشكل (6) استجابة السرعة، بينما يوضح الشكل (7) استجابة التيار في الحلقة الداخلية ويوضح الشكل (3) إشارة الجهد ويبين الشكل (9) القوة الناتجة عن الملف المغناطيسي.

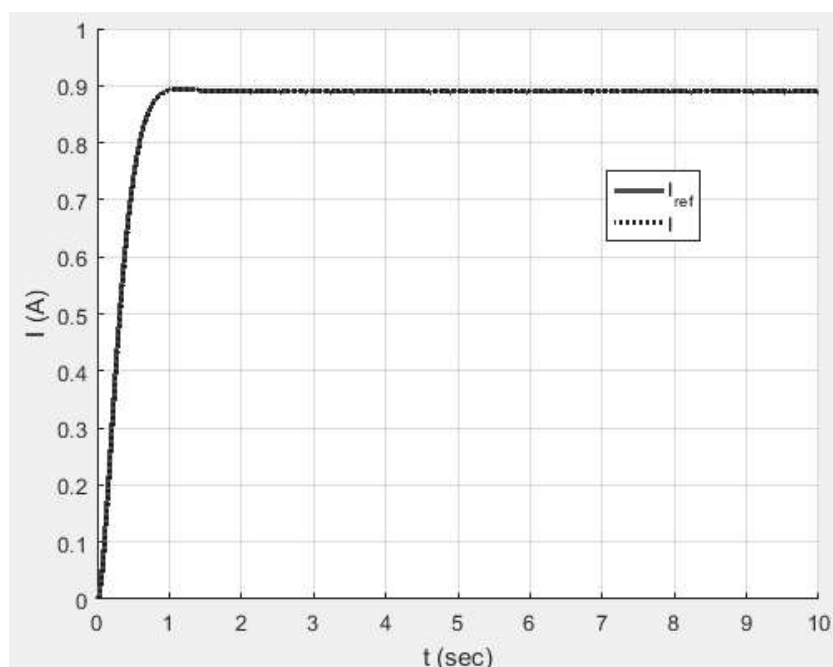


الشكل رقم (5): استجابة النظام لتنظيم الموضع

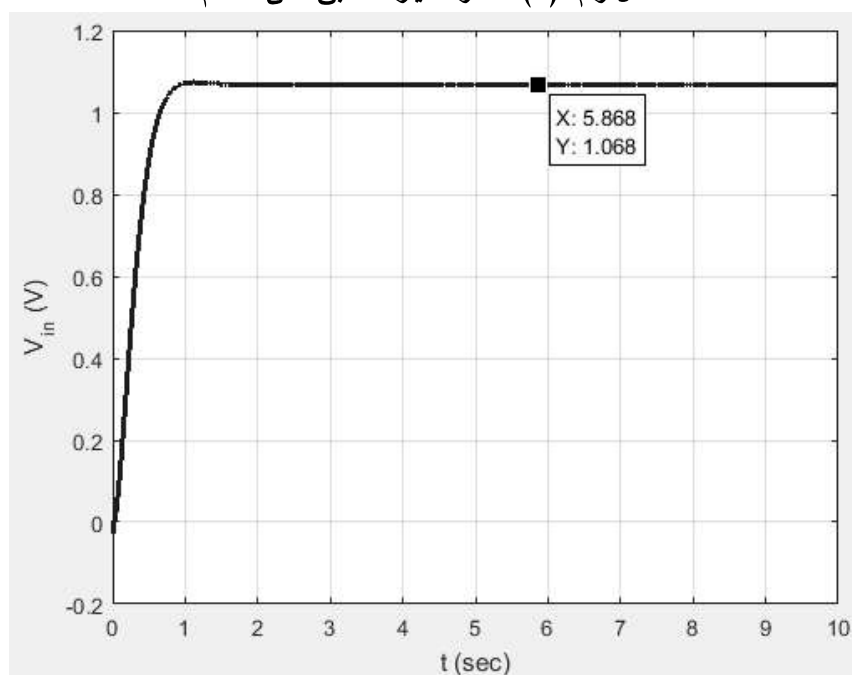
نلاحظ على الشكل (5) أن هناك تطابق تام بين الموضع الهدف الذي تم تحديده (pos_{ref}) والموضع الذي استقر عنده النظام (pos)، وذلك بعد زمن (0.8sec)، تعتبر هذه النتيجة مناسبة تماماً لعمل أجهزة الرفع والتعليق لحمل الأجسام المعدنية. بينما يظهر على الشكل (6) أن سرعة الانتقال (0.022m/sec) وبرمن أقل من (1sec).



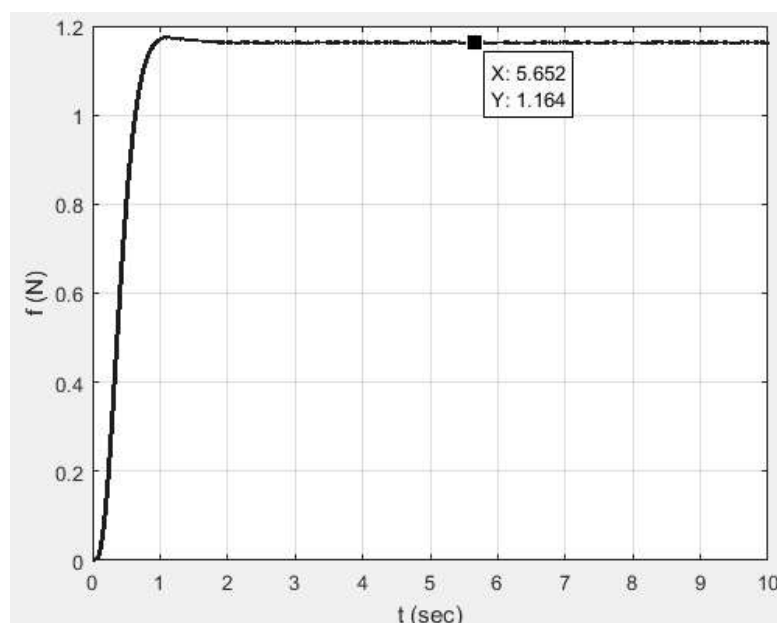
الشكل رقم (6) : شكل استجابة السرعة



الشكل رقم (7): إشارة التيار المطبق على النظام



الشكل رقم (8): إشارة الجهد المطبق على النظام

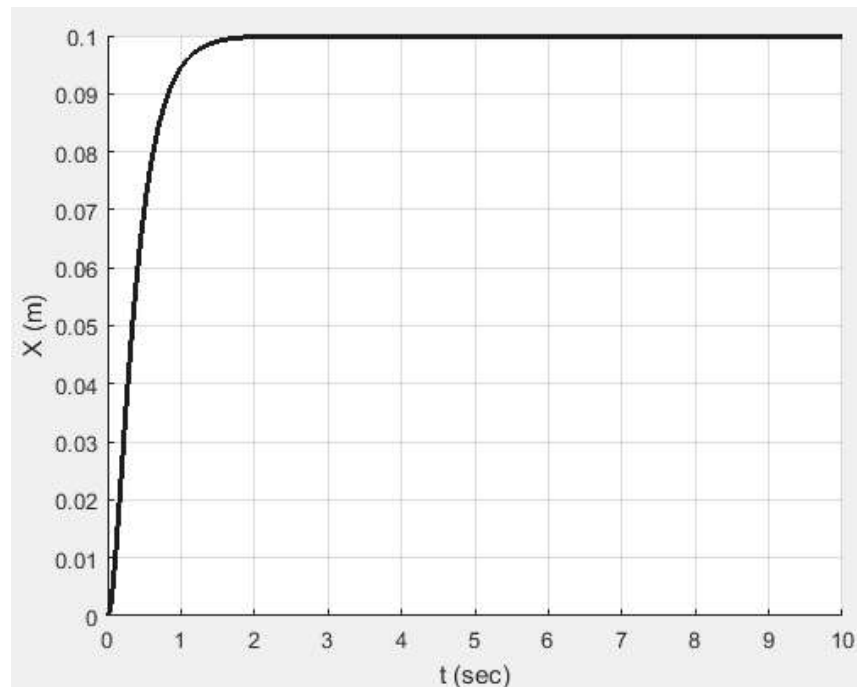


الشكل رقم (9): إشارة القوة الناتجة عن الملف المغناطيسي

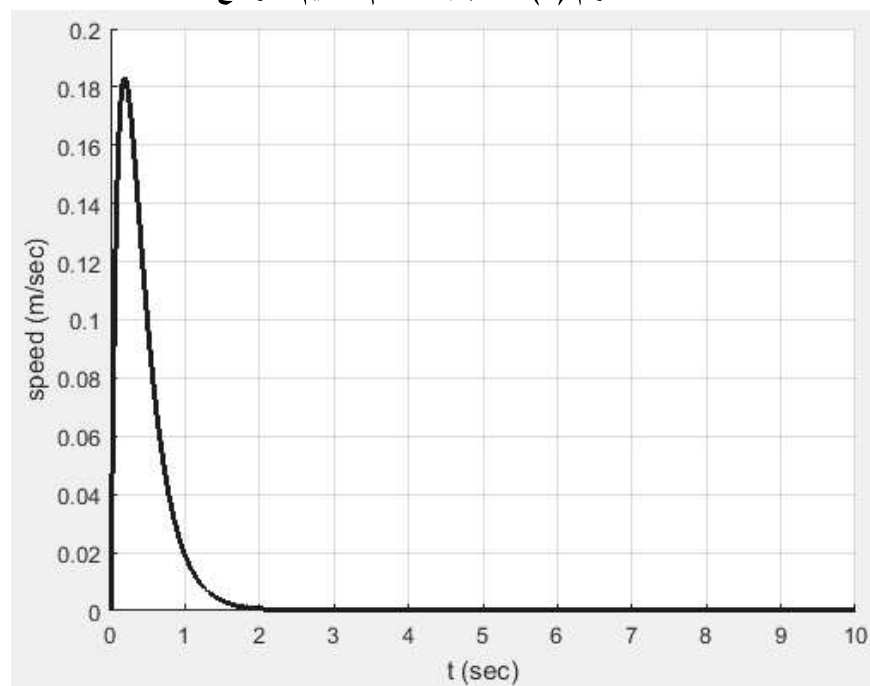
يمكننا أن نلاحظ من الشكل (5) أن النظام يحقق أداءً ديناميكياً جيداً بخطأ ستاتيكي يساوي الصفر، وتجاوز للهدف بمقدار 0.5%، وبزمن استقرار 1.65sec. أما النتيجة الموضحة على الشكل (6) فتبين أن السرعة تصل لقيمة 0.022m/sec لحظة بدء التشغيل ثم تعود للصفر بعد ثبات إشارة الموضع.

يمكن أن نلاحظ من الشكلين (7) و(3) أن التيار والجهد المطلوبان لعمل المنظومة هما 0.89A و 1.06v على الترتيب، أما القوة المطلوبة فهي تصل لـ 1.2N، كما بين الشكل (3)، وهذه القيم (تيار-جهد-قوة) هي ضمن القيم الاسمية.

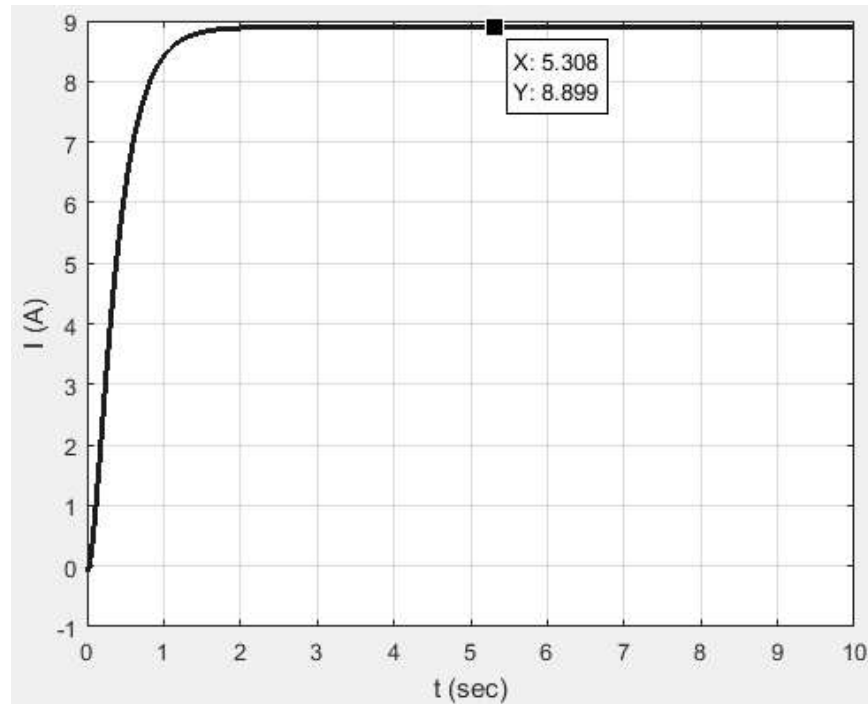
من أجل $R=1; Q=\text{diag}([100 \ 1000 \ 82000])$ ، فإن الشكل (7) يوضح استجابة النظام لتنظيم الموضع، حيث تم ضبط الموضع عند قيمة 0.1m، بينما يوضح الشكل (8) استجابة السرعة، وأخيراً يوضح الشكل (9) موجة التيار المطبق على النظام (إشارة التحكم).



الشكل رقم (7): استجابة النظام لتنظيم الموضع

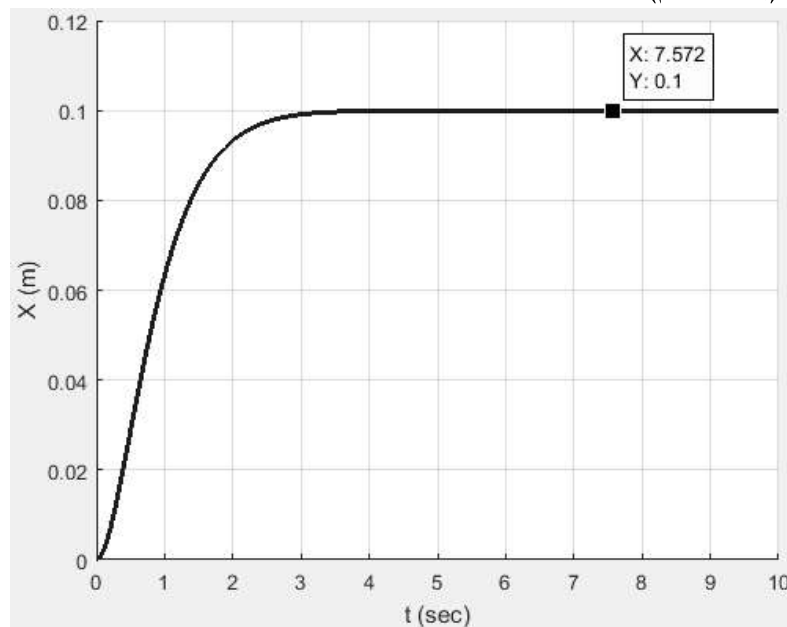


الشكل رقم (8): شكل استجابة السرعة

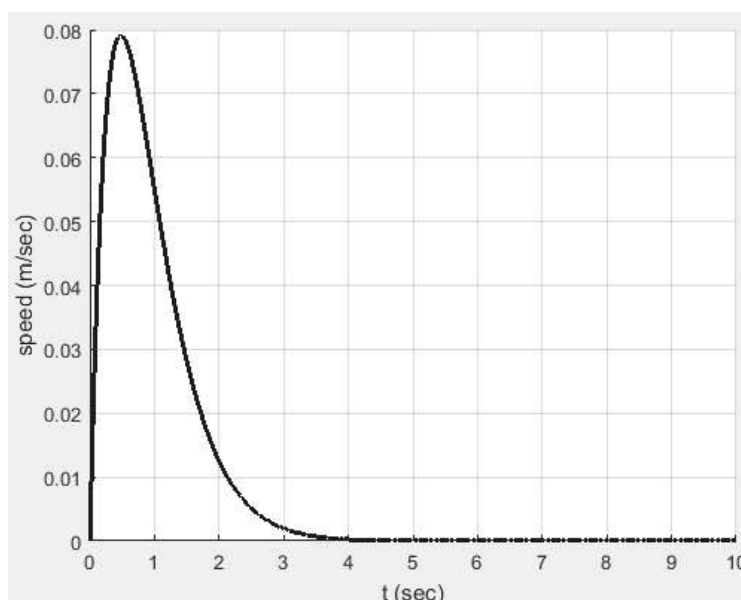


الشكل رقم (9): إشارة التيار المطبق على النظام

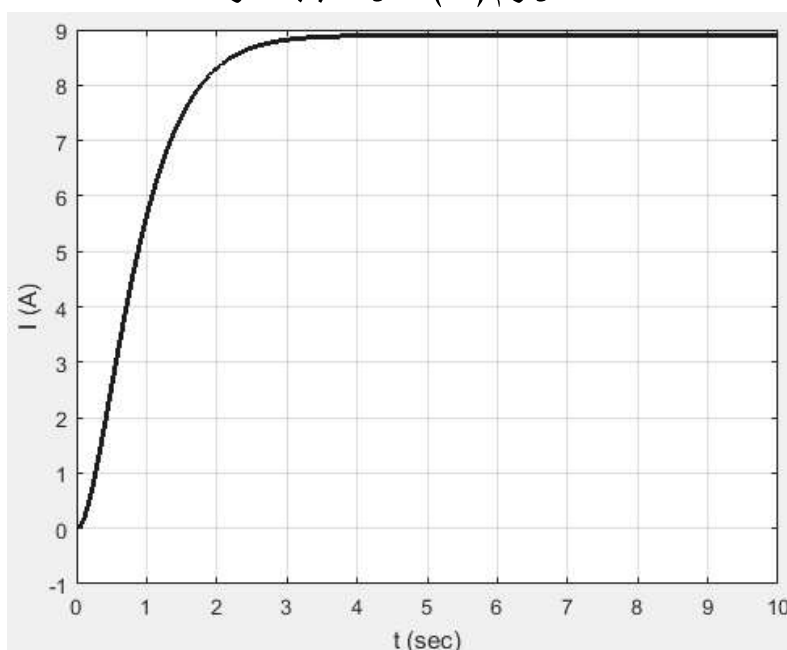
يمكن من الشكل (7) ملاحظة أن النظام يحقق أداء ديناميكي جيد بخطأ ستاتيكي يساوي الصفر، وتجاوز هدف 0%، وبزمن استقرار 1.6sec. من الشكل (8) يلاحظ أن السرعة تصل لقيمة 0.0185m/sec لحظة بدء التشغيل ثم تعود للصفر بعد ثبات إشارة الموضع، وأخيراً يلاحظ من الشكل (9) أن التيار المطلوب لعمل لم تتغير قيمته. من أجل $R=1; Q=diag([100 \ 1000 \ 20000])$ ، فإن الشكل (10) يوضح استجابة النظام لتنظيم الموضع، حيث تم ضبط الموضع عند قيمة 0.1m ، بينما يوضح الشكل (11) استجابة السرعة، وأخيراً يوضح الشكل (12) موجة التيار المطبق على النظام (إشارة التحكم).



الشكل رقم(10) استجابة النظام لتنظيم الموضع

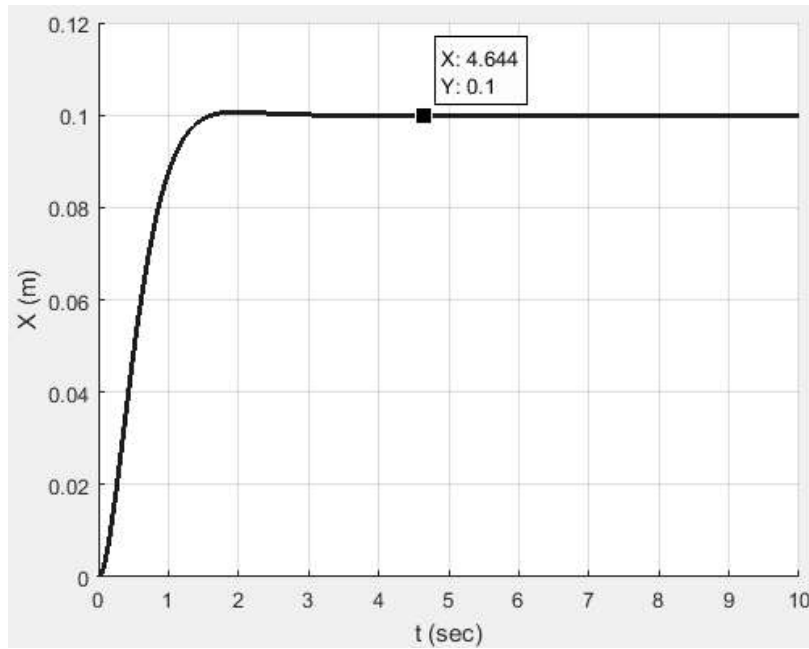


الشكل رقم (11): شكل استجابة السرعة



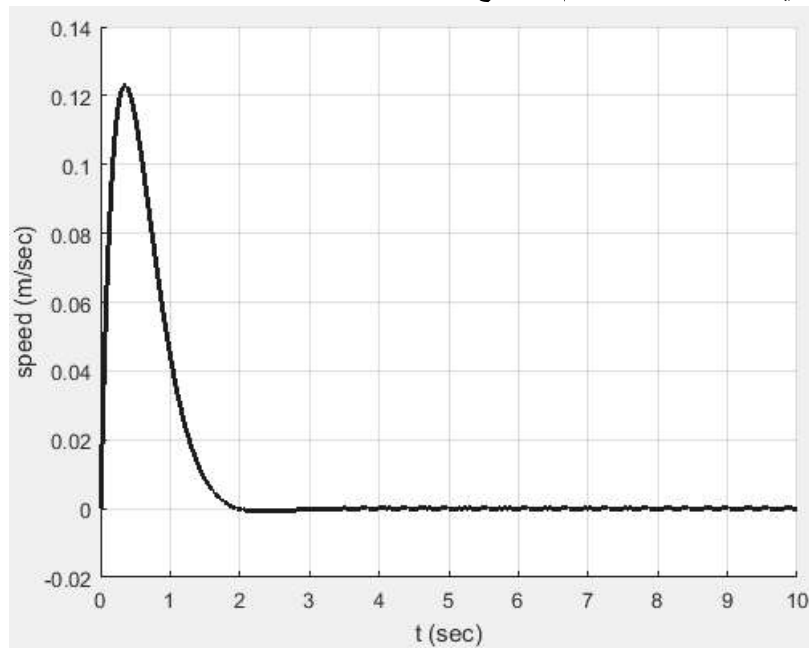
الشكل رقم (12): موجة التيار المطبق على النظام

يمكن من الشكل (10) ملاحظة أن النظام يحقق أداء ديناميكي بخلاً ستاتيكي يساوي الصفر، وتجاوز هدف 0%، وبزمن استقرار 3.1sec. من الشكل (11) يلاحظ أن السرعة تصل لقيمة 0.085m/sec لحظة بدء التشغيل ثم تعود للصفر بعد ثبات إشارة الموضع، بينما يلاحظ من الشكل (12) أن التيار المطلوب لعمل لم تتغير قيمته. من أجل $R=1; Q=\text{diag}([1 \ 1000 \ 20000])$ ، فإن الشكل (13) يوضح استجابة النظام لتنظيم الموضع، حيث تم ضبط الموضع عند قيمة 0.1m، بينما يوضح الشكل (14) استجابة السرعة، وأخيراً يوضح الشكل (15) موجة التيار المطبق على النظام (إشارة التحكم).

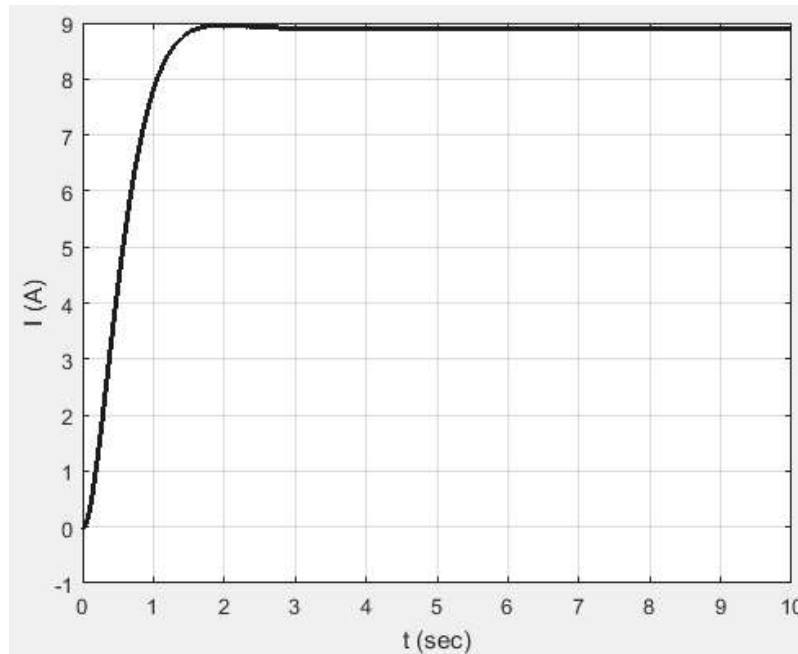


الشكل رقم (13): استجابة النظام لتنظيم الموضع

نلاحظ من الشكل (13) أن النظام يحقق أداءً ديناميكياً بخطأ ستاتيكي يساوي الصفر، وتجاوز هدف 0.1%، وبزمن استقرار 1.6sec. أي أنه حصلنا على تنظيم للموضع بدقة جيدة، لكن مازال الزمن كبير نسبياً.



الشكل رقم (14): شكل استجابة السرعة



الشكل رقم (15): موجة التيار المطبق على النظام

من الشكل (14) يلاحظ أن السرعة تصل لقيمة 0.12m/sec لحظة بدء التشغيل ثم تعود للصفر بعد ثبات إشارة الموضع، بينما يلاحظ من الشكل (15) أن التيار المطلوب لعمل (9A) لم تتغير قيمته بعد زمن الاستقرار والذي بلغ (1.5sec).

بناءً على النتائج السابقة وجد أن تغيير قيم مصفوفات التثقيل يغيّر من أداء نظام التحكم، غير أن إشارة التحكم المطلوبة للنظام ستبقى نفسها في الحالة المستقرة من أجل مختلف قيم مصفوفات التثقيل.

يمكن القول أنه من أجل قيم ثابتة للمصفوفة R، فإن اختيار قيم كبيرة للحد الأخير من القطر الرئيس للمصفوفة Q تزيد سرعة الاستجابة دون وجود تجاوز هدف، بينما زيادة الحد الأول من القطر الرئيس تساهم بزيادة سرعة الاستجابة لكن وجود تجاوز للهدف، ومع تغيير قيم المصفوفة R سوف تتغير أيضاً استجابة النظام ويجب عندها إعادة معايرة المصفوفة Q من جديد.

يمكن القول أن أفضل نتيجة تم الحصول عليها هي من أجل $R=1; Q=\text{diag}([100 \ 1000 \ 82000])$ حيث كان زمن الاستقرار 1.6sec وتجاوز الهدف 0%.

6- النتائج العامة:

في هذا البحث قمنا بإجراء دراسة تصميمية وتحليلية لنظام رفع كهرومغناطيسي قادت إلى تحديد العلاقة الحاكمة لقوة الرفع الكهرومغناطيسي كنابع لمجموعة من البارامترات الكهربائية والمغناطيسية (عدد اللفات، تيار الملف، مسافة التعليق، السماحية المغناطيسية لمعدن القلب الحديدي من جهة والجسم الهدف المطلوب رفعه من جهة أخرى).

فيما يتعلق بنظام التحكم للسيطرة على استقرار الجسم الهدف فقد تم استنتاج تابع النقل للنظام الكهرومغناطيسي ودراسته وتبين أن النظام غير مستقر ويحتاج إلى متحكمات قوية تؤمن استقراره، لذلك تم استخدام المنظم التريبيعي الخطي التكاملي INTEGRAL-LQR، حيث يوفر هذا المنظم إمكانية تغيير مواضع الأقطاب من خلال إضافة ثوابت التغذية العكسية لمتحولات الحالة، قمنا أيضاً بإجراء عدة اختبارات لقيم مصفوفات التثقيل R, Q لحساب ثوابت ربح المتحكم الأمثل، حتى الوصول لأفضل نتيجة ممكنة، حيث تم تحقيق أداء ديناميكي بخطأ ستاتيكي يساوي الصفر وزمن استجابة أقل من 1sec،

بدون وجود تجاوز للهدف. إن انقاص زمن الاستجابة يعتبر من البارامترات المهمة المميزة للنظام ولكن هذا الأمر يجب أن يتم دون تجاوز لنقطة الهدف.

المراجع العلمية

[A] Alex H. T; Rafael B. C; Bruno L. S; Fabio J., (2020)-"**Design, simulation and development of a magnetic levitation system (MAGLEV)** ", ScienceDirect journal, 17 (2020) .

[B] Gandhi RV, Adhyaru DM (2016)," **Feedback linearizatuon based optimal control design for electromagnetic levitation system** ". ICCICCT.

[C] Ghosh et al (2014), "**Design and implementation of a 2–DOF PID compensation for magnetic levitation system**", ISA Trans pp 1216–1222.

[E] DIPAK M., A. Pandey (2022),"Control techniques for electromagnetic levitation system a literature review", Dynamic and control.

[F] Peter B., Ya–shenglu, (2020),"Design and Evaluation of state and Disturbance observers for a Multivariable Magnetic levitation system", IEIE Journal Research.

[I] Vanaja, D.S. *et al.* (2021), '**Investigation and validation of solar photovoltaic–fed modular multilevel inverter for marine water–pumping applications**', *Electrical Engineering*, 104(3), pp. 1163–1178. doi:10.1007/s00202–021–01370–x.

[H] Mundher H.A. Yaseen and Haider J. Abd (2017) , "**Modeling and control for a magnetic levitation system based on SIMLAB platform in real time**",Gaziantep. University,Electrical & Electronics Engineering Department, Gaziantep, Turkey.