

## بناء نظام قيادة لمحرك خطوي هجين ذي طورين بهدف التحكم الدقيق بالموضع

د. ياسر الحسون، د. أحمد كردي

أستاذ مساعد في قسم هندسة القيادة الكهربائية، كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية، جامعة حلب

عضو هيئة تعليمية في قسم تقنيات الحاسوب، الكلية التطبيقية، جامعة حماة

E-mail:alhassounyasser418@yahoo.com , Mob:0966532922

### 1- مقدمة:

تستخدم المحركات الخطوية الهجينة في تطبيقات كثيرة مثل أنظمة الروبوت والطابعات والـ CNC وآلات الليزر. ويعتبر المحرك الخطوي الهجين ذي دوران ناعم ولسلس لامتلاكه خطوة دوران صغيرة تصل إلى 0,9 درجة.

إن الكثير من تطبيقات المحرك الخطوي الهجين تستخدم نظام الحلقة المفتوحة للتحكم عند القيم الاسمية للعزم. في دارة التحكم الكلاسيكي (الحلقة المفتوحة)، حيث لا يوجد تغذية عكسية من الموضع إلى المتحكم أي أن المتحكم لا يملك أي معلومات حقيقية عن موضع الدوار، وبالتالي في هذه الحالة يجب أن يستجيب الدوار لكل تغير في التهيج وإذا كانت سرعة التغير في التهيج عالية جداً فإن المحرك الخطوي سوف يفقد استقراره وقد تضعف عدة خطوات وبالنتيجة لن يتمكن المحرك من التحرك إلى الموضع المطلوب الجديد، مما ينتج خطأ دائماً بين موضع الحمل والموضع الذي يتوقعه المتحكم. كل هذه المساوئ يمكن التغلب عليها في الحلقة المغلقة للتحكم. في هذه الحالة يتطلب المحرك حساس لموضع الدوار لتأمين تسلسل تبديل مناسب وموثوق وهذا ما أشار اليه الباحثين ( P. Acarnley (2002)، (A. Molar (2003).

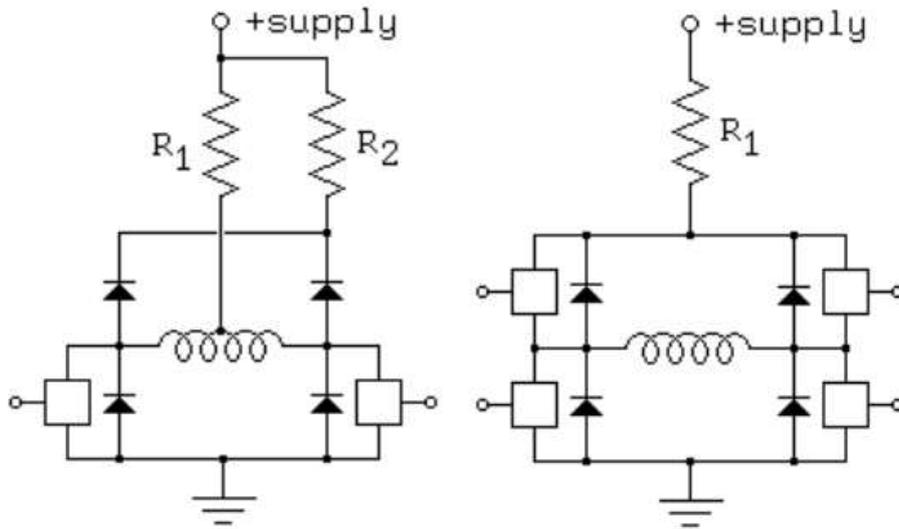
### 2- الدراسة المرجعية:

في عام 2010 قام الباحثين M. Zaky, E. M. Ismaeil, and M. Khater بنشر مقالاً حول تصميم نظام تحكم لمحرك خطوي هجين مستخدمين متحكم الإشارة الرقمية (DSP)، يتلخص هدف المقال في تحسين أداء عمل المحرك الخطوي الهجين عند العمل في مجال السرعات العالية والعزم العالي وهذا يتطلب العمل بنظام الحلقة المغلقة وهنا تبرز مشكلة الاهتزازات في منحنى العزم وخصوصاً عند الانتقال من مرحلة السرعات المنخفضة إلى السرعات العالية وهذا ينتج عنه ضجيج في عمل العمل وأحياناً ظاهرة خروج المحرك عن التوافق وانهايار عمله (hunting motor).

في المحركات الصغيرة مثل تلك المستخدمة في تحريك رأس الموضع في سواقات الأقراص الليزرية في الحاسب، وهي عادةً ما تقاد بجهود منخفضة والتيار خلال الملف يحدد من خلال المقاومة الداخلية للملف نفسه. أما في مجال المحركات ذات العزوم الأعلى وخصوصاً تلك المستخدمة في آلات التحكم المبرمج بآلات التشغيل (CNC) فتظهر الحاجة لعزوم مرتفعة نسبياً (أكثر من 2N.m) وهنا يصبح من الضروري استخدام إحدى طرق تحديد التيار المعتمدة على المنظمات ومنها المتحكم البطائي (hysteresis controller). قام الباحث Ricardo PICATORSTE (2007) بالعمل على تصميم نظام قيادة لمحرك خطوي هجين بدون حساس للموضع. استخدم فيه تقنية Extended Kalman Filter لتخمين موضع الدوار والحصول على السرعة وبسبب المشاكل المتعلقة بإشباع الدارة المغناطيسية وتأثير ذلك على بارامترات المحرك ومنها الفيض وبالتالي المحارضة والتي لم تعد ثابتة ومتعلقة بشدة إشباع المحرك مما يستدعي عملية تخمين تعتمد مبدأ الزمن الحقيقي (Estimation in real-time) وهذا يتطلب استخدام معالج الإشارة الرقمية (DSP) وهذا أعطى نتائج جيدة ولكن

ترتب عليه تعقيد في دارة التحكم وكلفة اقتصادية لا يمكن تجاهلها ولذلك ينحصر استخدام المحرك مع نظام القيادة هذا في التطبيقات الحساسة جداً وهو ما اعتمده الباحث Ricardo في بحثه حيث كان التطبيق موجه لأغراض التحكم في المفاعل النووي حيث الإشعاعات أعظمية ودقة الحركة بالغة الأهمية.

في لأونة الأخيرة أجريت عدة دراسات في مجال قيادة المحركات الخطوية بالخطوة الميكروية مثل Xinda Hu. University of Arizona (2013) كانت النتائج تحسن واضح بالأداء ولكن على حساب تعقيد دارة القيادة. من الدارات النموذجية التي تستخدم للتحكم بالتيار المار في الملفات للمحرك الخطوي الهجين الداريتين الموضحتين بالشكل(1):



الشكل(1) دارتين قيادة لمحرك خطوي هجين للتحكم بالتيار

بناءً على ماسبق فقد اعتمدنا في بحثنا على تصميم نظام قيادة للمحرك الخطوي الهجين على متحكمات تقليدية (متحكمات PI ومتحكمات بطائية Hysteresis controller) كانت تستخدم لمحركات التيار المستمر وطبقناها على المحرك الخطوي الهجين ثم أجرينا مقارنة بين النتائج حيث اعتبرنا أن التطبيق الموجه في حالتنا يختص بآلات (CNC).

## 2- أهمية البحث

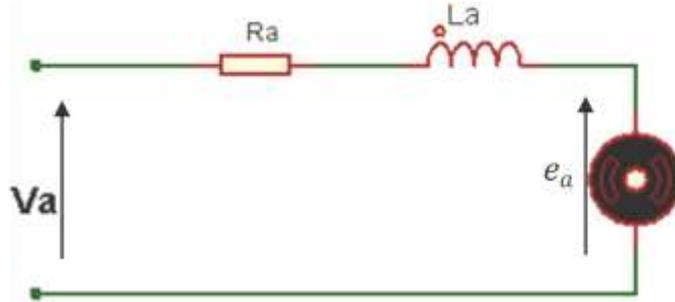
تتلخص أهمية البحث في إيجاد نظام قيادة مستقر شبه خالٍ من أي اضطرابات في عمل المحرك الخطوي الهجين (HSM) باستخدام تقنيات التحكم المختلفة مثل المتحكم التناسبي التكاملي PI controller والمتحكم البطائي Hysteresis controller ومقارنة هذه النتائج مع نتائج العمل بالحلقة المفتوحة، وخصوصاً فيما يتعلق باهتزازات استجابة الموضع وذلك للحصول على نظام عالي الدقة مع ديناميكية عالية لاستخدامه في تطبيقات التحكم المبرمج (CNC Machines)

## 3-النموذج الديناميكي لمحرك الخطوي الهجين:

سنعمد إلى إيجاد النموذج الرياضي الديناميكي لمحرك خطوي هجين اعتماداً على الدارة المكافئة للطور الأول ثم الطور الثاني ومن ثم نوجد الدارة المكافئة لطورين معاً وبالتالي الحصول على الموديل الرياضي الذي

يصف السلوك الكهربائي للمحرك بعد الجزء الكهربائي ننطلق إلى معادلات القسم الميكانيكي للحصول على الموديل الرياضي الميكانيكي الذي يصف سلوك المحرك الميكانيكي.

سنبدأ من الدارة الكهربائية المكافئة للطور A موضحة بالشكل (2).



الشكل(2): الدارة الكهربائية المكافئة للطور A

بهدف تبسيط النمذجة، نفترض أن الدارة المغناطيسية خطية (لا يوجد إشباع) والمحاكاة المغناطيسية المتبادلة بين الأطوار مهمة وهذه الفرضية لن تسبب أخطاء تذكر نظراً لصغر استطاعة المحرك وهذا ما أقره الباحثين (Rubaii, A. and Kotaru, R., 2001). من الدارة المكافئة للطور A نجد أن:

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (1)$$

وكذلك الأمر بالنسبة للطور B نجد أن:

$$v_b = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (2)$$

حيث أن  $v_b$  ( $v_a$ ) الجهد المطبق على طرفي الملف و  $L_b$  ( $L_a$ ) محارضة الملف و  $i_b$  ( $i_a$ ) التيار المار في الملف و  $e_b$  ( $e_a$ ) القوة المحركة الكهربائية العكسية. كما أنه تم إهمال رد فعل المغناطيس الدائم على فيض الملف بسبب صغر قيمة شعاع المغنطة.

بسبب الممانعة المغناطيسية الكبيرة للشغرة الهوائية فإن المحارضة في الملفات الأطوار الناتجة عن المغناطيس الدائم لدوار المحرك الخطوي الهجين يمكن اعتبارها مستقلة عن موضع الدوار وهذا ماتمت الإشارة إليه في مقال الباحثين (Rusu, C., Birou I., and Szoke, E., 2008). والقوة المحركة الكهربائية العكسية هي تابع جيبي لموضع الدوار.

$$e_a(\theta) = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\phi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

$$e_b(\theta) = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\phi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

$$e_a = -N\phi_m \omega \sin(N\theta) \quad (5)$$

$$e_b = N\phi_m \omega \cos(N\theta) \quad (6)$$

حيث N عدد أسنان الدوار و  $\phi_m$  هو التدفق المغناطيسي الأعظمي ويفرض أن  $k_m = N\phi_m$  يصبح لدينا:

$$e_a = -k_m \omega \sin(N\theta) \quad (7)$$

$$e_b = k_m \omega \cos(N\theta) \quad (8)$$

نلاحظ أنه عند الموضع المرجعي هو  $\theta=0$  يكون القطب الشمالي للدوار على اصطفاك كامل (fully aligned) مع محور الطور A، لذلك فإن القوة المحركة الكهربائية العكسية back EMF على الطور A تساوي الصفر بينما على الطور B تكون أعظمية بالتعويض (7) و (8) في المعادلتين الأساسيتين للجهود (1) و (2) نحصل على معادلتين للجهود لمحرك خطوي هجين ذي طورين:

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} - k_m \omega \sin(N\theta) \quad (9)$$

$$V_b = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + k_m \omega \cos(N\theta) \quad (10)$$

من المعادلتين (9) و (10) نجد:

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a} (V_a - R_a i_a + K_m \omega \sin(N\theta)) \quad (11)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L_b} (V_b - R_b i_b - K_m \omega \cos(N\theta)) \quad (12)$$

تمثل المعادلتين (11) و (12) معادلتين المحرك التفاضليتان لتياري المحرك الخطوي الهجين (HSM) ذي طورين. ننتقل إلى القسم الميكانيكي للمحرك، حيث أن العزم الكهرومغناطيسي الذي ينتجه طوري المحرك الخطوي الهجين يساوي إلى مجموع العزوم الناتجة عن تفاعل تيارات الأطوار مع التدفق المغناطيسي الذي يولده المغناطيس الدائم وعزم الراحة الذي ينتج عن بروز في الدوار وهذا ما أشارت إليه دراسة الباحث (Ricardo Picatoste R.). يمكننا أن نعبر عن العزم الذي ينتجه التيار  $i_a$  والذي يمر في الملف A بالعلاقة (13):

$$T_a = -k_m i_a \sin(N\theta) \quad (13)$$

والعزم الذي ينتجه التيار  $i_b$  الذي يمر في الملف B هو:

$$T_b = k_m i_b \cos(N\theta) \quad (14)$$

أما عزم الراحة فيعبر عنه بالعلاقة (15):

$$T_d = T_{dm} \sin(2N\theta) \quad (15)$$

يساوي العزم الكهرومغناطيسي الكلي إلى العزم الذي ينتجه التيار  $i_a$  الذي يمر في الملف A مضافاً إليه العزم الذي ينتجه التيار  $i_b$  الذي يمر في الملف B بالإضافة إلى عزم الراحة:

$$T_e = T_a + T_b + T_d \quad (16)$$

$$T_e = -k_m i_a \sin(N\theta) + k_m i_b \cos(N\theta) - T_{dm} \sin(2N\theta) \quad (17)$$

انطلاقاً من المعادلة الميكانيكية العامة:

$$T_e - B_m - T_l = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (18)$$

حيث إن  $B_m$  عزم الاحتكاك اللزج ويساوي إلى  $B_m = K_v \omega$  و  $K_v$  هو يمثل ثابت اللزوجة .

من المعادلة (18) نستنتج المعادلة التفاضلية للسرعة الزاوية للدوار وهي:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - K_v \omega - T_l) \quad (19)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (20)$$

بتعويض المعادلة (17) في (19) نجد:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (-k_m i_a \sin(N\theta) + k_m i_b \cos(N\theta) - T_{dm} \sin(2N\theta) - k_v \omega - T_l) \quad (21)$$

#### 4-بناء نموذج للمحرك الخطوي الهجين في بيئة Matlab/Simulink:

سننطلق من المعادلتين الكهربائيتين لطوري المحرك الخطوي الهجين A&B (1) و(2) وسنأخذ كل طور

على حدى ونقوم بإجراء تحويل لابلاس لها نجد:

$$V_a = R_a i_a + L_a i_a s - k_m \omega \sin(N\theta) \quad (22)$$

$$V_a + k_m \omega \sin(N\theta) = i_a (L_a s + R_a) \quad (23)$$

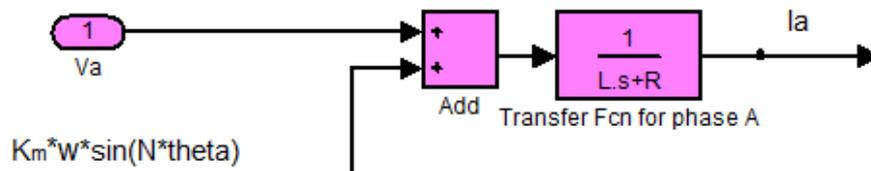
وبالتالي تابع الانتقال للطور A هو:

$$H = \frac{i_a}{V_a + k_m \omega \sin(N\theta)} = \frac{1}{(L_a s + R_a)} \quad (24)$$

ومنه نستنتج  $I_a$ :

$$i_a = \frac{V_a + k_m \omega \sin(N\theta)}{(L_a s + R_a)} \quad (25)$$

شكل (3) يوضح الموديل الديناميكي لتيار الطور A ضمن بيئة Matlab/Simulink



الشكل (3): الموديل الديناميكي لتيار الطور A للمحرك (HSM) ضمن بيئة Matlab/Simulink.

والآن سننتقل إلى الطور B من المعادلة (2) نقوم بإجراء تحويل لابلاس نجد:

$$V_b = R_b i_b + L_b i_b s + k_m \omega \cos(N\theta) \quad (26)$$

$$H = \frac{i_b}{V_b - k_m \omega \cos(N\theta)} = \frac{1}{(L_b s + R_b)} \quad (27)$$

ومنه نجد  $i_b$  :

$$I_b = \frac{V_b - k_m \omega \cos(N\theta)}{(L_b s + R_b)} \quad (28)$$

والآن سنأخذ الجزء الميكانيكي من المعادلة الميكانيكية (19) نقوم بإجراء تحويل لابلاس نجد:

$$\omega s = \frac{1}{J} (T_e - k_v \omega - T_l) \quad (29)$$

$$J \omega s = T_e - k_v \omega - T_l \quad (30)$$

$$\omega (J s + k_v) = T_e - T_l \quad (31)$$

ومنه نجد تابع الانتقال:

$$H = \frac{\omega}{T_e - T_l} = \frac{1}{(J s + k_v)} \quad (32)$$

وبالتالي معادلة السرعة الزاوية هي:

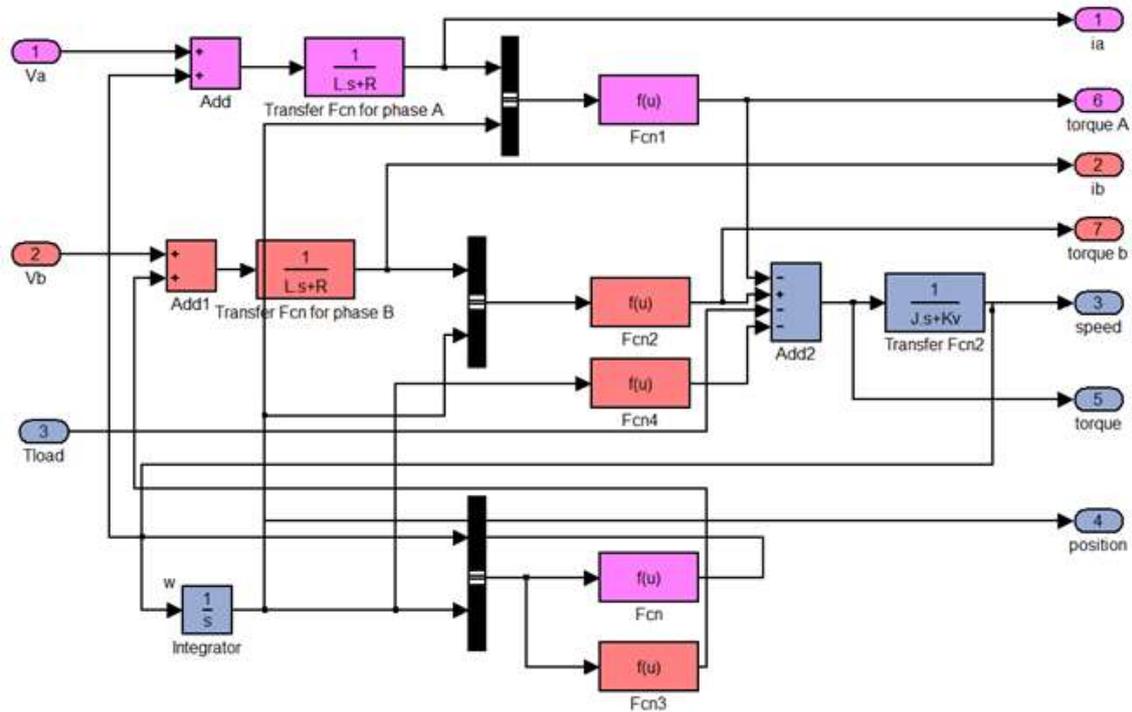
$$\omega = \frac{T_e - T_l}{(J s + k_v)} \quad (33)$$

أما بالنسبة للزاوية  $\theta$  نجد أن:

$$\frac{d\omega}{dt} = \theta \quad (34)$$

$$\theta = \frac{\omega}{s} \quad (35)$$

الموديل الديناميكي للمحرك الخطوي الهجين (HSM) ذي طورين في بيئة Matlab/Simulink موضحة في الشكل (4).



الشكل (4): الموديل الديناميكي للمحرك (HSM) ضمن بيئة Matlab/Simulink.

وقد أجرينا الدراسة في بيئة Matlab/Simulink على محرك خطوي هجين ذي طورين مواصفاته موضحة في الجدول (1).

الجدول(1): مواصفات المحرك الخطوي الهجين المدروس

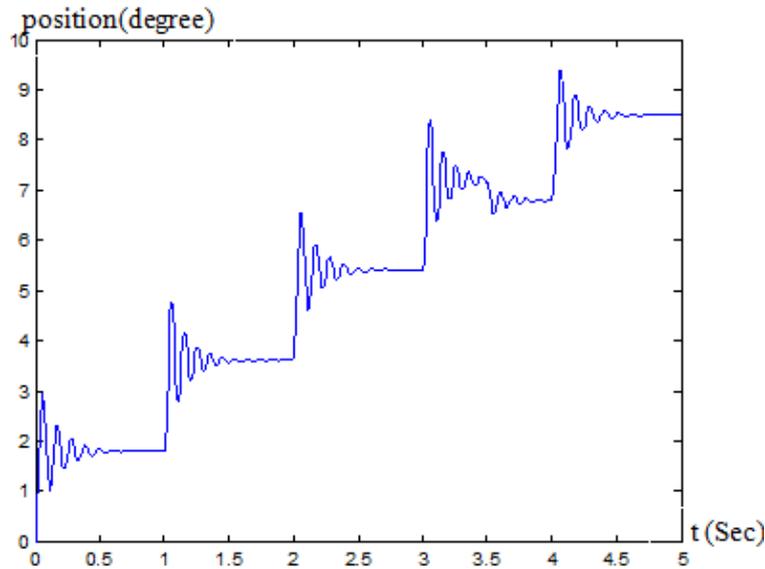
نوع المحرك	14PM-M204
الخطوة بالدرجات	1.8
الجهد الاسمي	12 Volt
التيار الاسمي	0.18 Amp
مقاومة الملفات	65 Ohm
محاوضة الملفات	24 mH
عزم المسك الاسمي	330g.cm <sup>2</sup>
عزم عطالة الدوار	11 g.cm <sup>2</sup>
عزم الراحة	50 g.cm <sup>2</sup>

5-دراسة المحرك الخطوي الهجين في بيئة Matlab/Simulink في نظام الحلقة المفتوحة:

في البداية سنلجأ إلى التحكم في نظام الحلقة المفتوحة بخطوة كاملة full step open loop control ، سندرس مميزات النظام ونوضح تأثير تغيير البارامترات على أداء المحرك.

### 5-1- تأثير تغير الحمل على أداء المحرك:

بعد تحميل المحرك بحمولته الاسمية  $323.598 \times 10^{-4} Nm$  عند لحظ 3.5sec حصلنا على المنحني الموضح بالشكل(5):



الشكل (5): استجابة الموضع لخطوات المحرك مع الزمن

نلاحظ أنه عند زيادة الحمولة يزداد خطأ الانزياح الزاوي عندما كان المحرك غير محمل كانت الخطوة 1.8 درجة والانزياح الزاوي صفر تقريباً وعندما أصبحت حمولته كاملة زاد الانزياح الزاوي بمقدار 0.5 درجة أي 28% من قيمة الخطوة.

### 5-2- تأثير تغيير مقاومة الملفات على أداء المحرك:

نلاحظ زيادة الانزياح الزاوي في الموضع عند زيادة المقاومة عند الحمولة الاسمية حيث إنه عندما تكون  $R=65ohm$  ينتج انزياح زاوي قيمته 0.5 درجة أي 28% من قيمة الخطوة الكاملة وعندما تزداد المقاومة بنسبة 20% أي عند  $R=78ohm$  ينتج انزياح زاوي قيمته 0.637 درجة أي 35.38% من قيمة الخطوة الكاملة أي الانزياح قد زاد بنسبة 7.38% وإذا زادت قيمة المقاومة إلى حد كبير فإن المحرك سيفشل في الدوران كما هو موضح بالشكل(6). ويعود سبب زيادة الانزياح الزاوي مع زيادة المقاومة إلى نقصان التيار مع زيادة المقاومة وبالتالي نقصان العزم الكهرومغناطيسي المتولد وإذا استمرت المقاومة بالزيادة يستمر العزم بالتناقص حتى ينهار عزم المحرك.

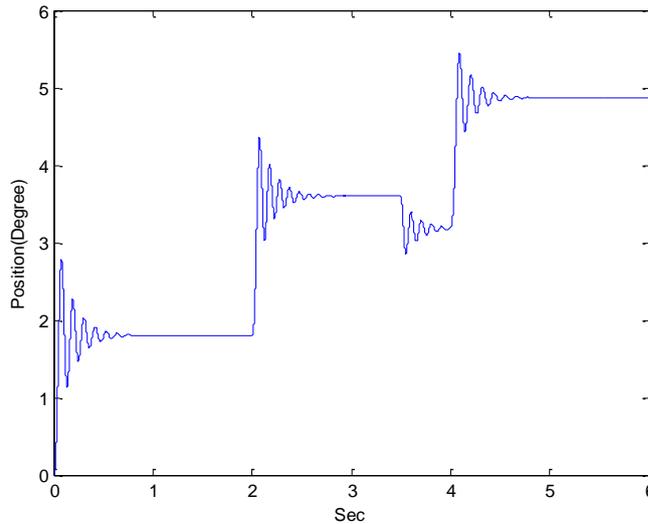
نستنتج أن التحكم بنظام الحلقة المفتوحة ذو فعالية ضعيفة, عندما تكون مقاومة ملفات الثابت غير ثابتة. وفي الواقع قد تتغير مقاومة ملفات الثابت بسبب الحرارة. عندما تزداد مقاومة الملف وينقص التيار، وبالتالي ينقص



عمدنا إلى طريقة حذف قطب بصفر من أجل إيجاد بارامترات المنظم التناسبي التكاملي zero poles cancelation من الموديل الديناميكي للمحرك (HSM) من علاقتي تابع الانتقال لطوري المحرك (24) و(27) نقوم بوضع منظم PI controller لكل طور باستخدام طريقة zero poles cancelation نستنتج العلاقة :

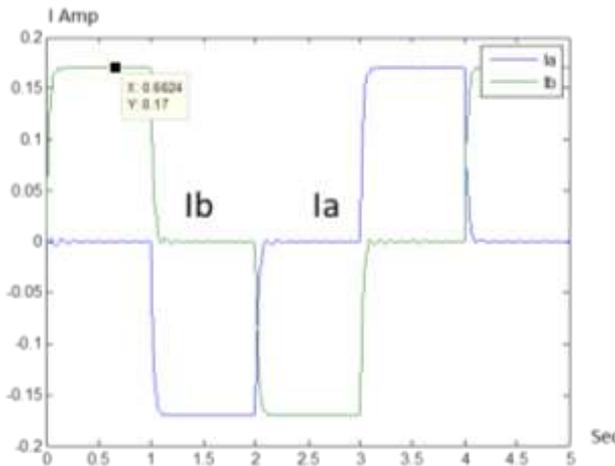
$$K_i = \frac{R}{L} K_p \quad (36)$$

حيث  $(K_p)$  ثابت المنظم تناسبي و  $(K_i)$  ثابت المنظم التكاملي افترضنا قيمة مبدئية ل  $(K_p)$  ثم قمنا بحساب  $(K_i)$  حتى حصلنا على أفضل استجابة. قمنا بتحميل المحرك بحمولته الاسمية عند لحظة 3.5 sec فوجدنا زيادة في الانزياح الزاوي للموضع كما هو واضح في الشكل (8).



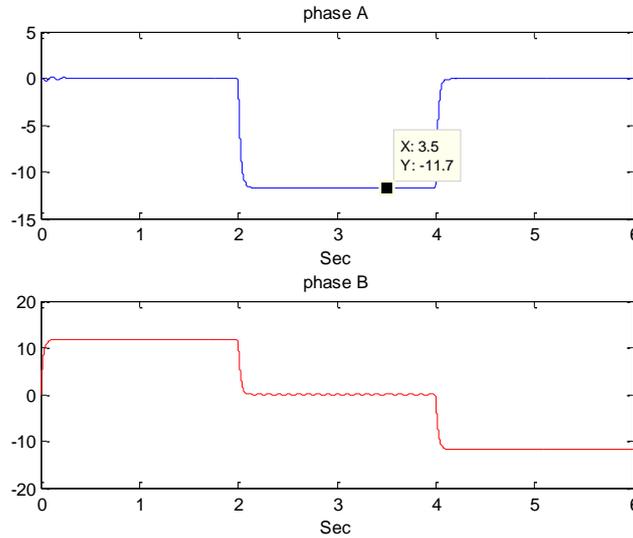
الشكل (8) منحنى استجابة الموضع مع الزمن عند استخدام طريقة PI controller

أما بالنسبة للتيار نجد أن النظام يلاحق قيمة التيار المرجعية واستجابة التيار سلسلة لا تحوي اضطرابات ومستقرة، حيث أن القيمة المرجعية للتيار هي 0.17A. فيما يتعلق بتوليد القيمة المرجعية للتيار فقد استخدمنا برمجية بـ(C-Code) حسب تسلسل وتوارد تغذية الملف.



الشكل (9): منحنى استجابة التيار مع الزمن عند استخدام طريقة PI controller

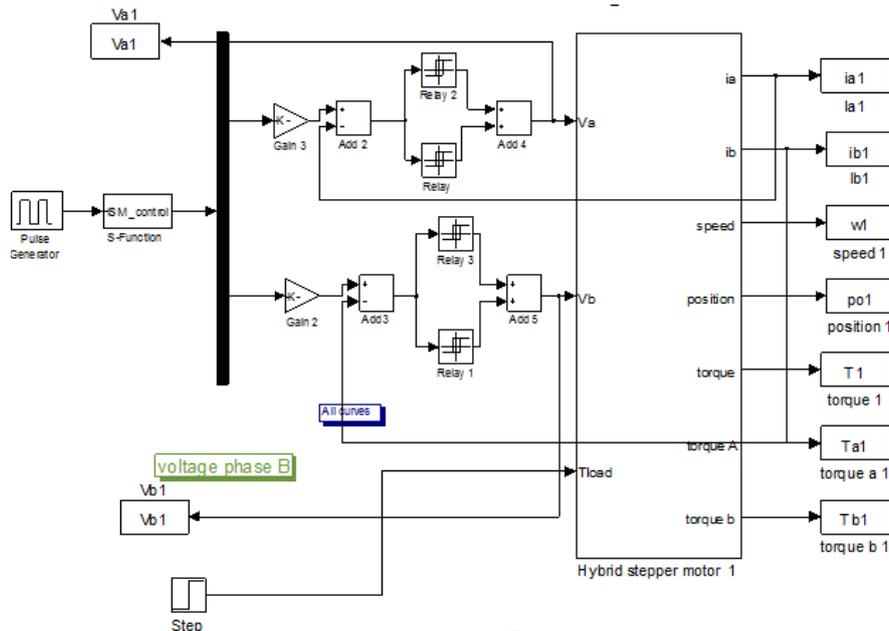
في الشكل (9) نجد شكل استجابة التيار ونلاحظ أن النظام حافظ على القيمة المرجعية للتيار أثناء التحميل أما الجهود فتظهر في الشكل (10). بما أن حلقة التيار عبارة عن تابع انتقال من المرتبة الأولى، وبالتالي لا نجد تجاوز للهدف (Over shoot) في منحنى استجاب التيار.



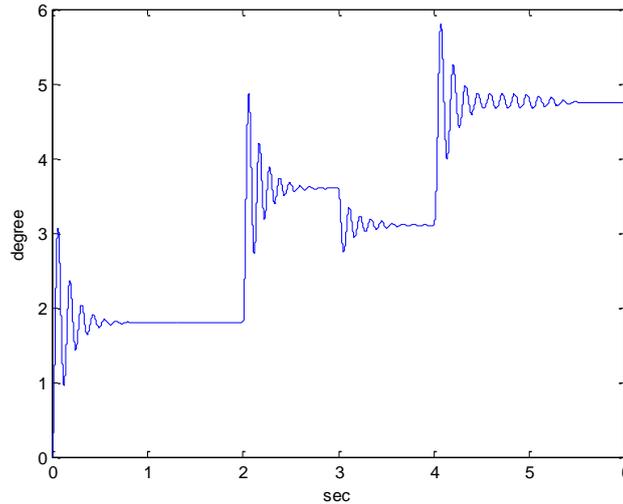
الشكل (10): منحنى استجابة الجهود للطورين A&B مع الزمن عند استخدام طريقة PI controller

#### 7- تنظيم تيار المحرك الخطوي الهجين (HSM) بطريقة المتحكم البطائي Hysterisis controller :

من أهم ميزات تنظيم تيار المحرك الخطوي الهجين (HSM) بطريقة المتحكم البطائي هي بساطة هذا المتحكم، حيث لا نحتاج إلى معرفة بارامترات المحرك، ويمكن تطبيق إشارة خرج المتحكم مباشرة على المبدلة التي تغذي المحرك كما في الشكل (11)، حيث إن إشارة خرج المنظم عبارة عن نبضات وصل و فصل المبدلة.



الشكل (11): المخطط الصندوقي لتنظيم تيار المحرك HSM بطريقة Hysterisis controller

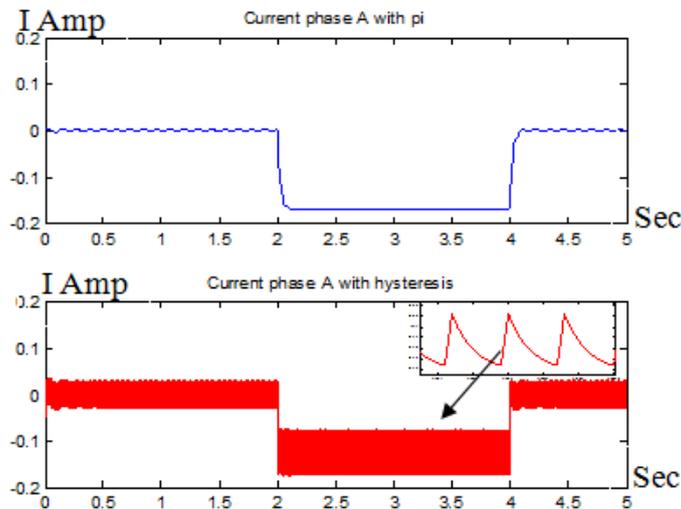


الشكل (12): استجابة الموضع لخطوات المحرك بطريقة Hysteresis controller

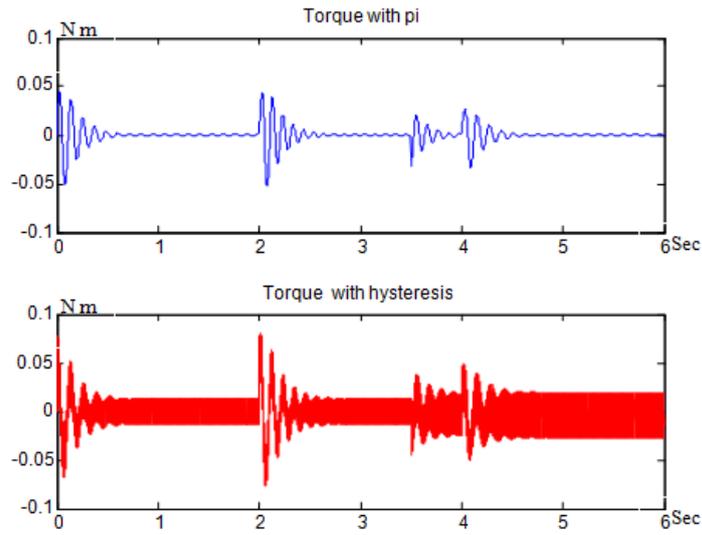
قمنا بتحميل المحرك بحمولته الاسمية عند اللحظة 3 sec تظهر استجابة المحرك على الشكل (12)، حيث أن المحرك عاد الى وضعية الاستقرار 0.30sec وبالتالي تعتبر الاستجابة سريعة واستقرار جيد للمحرك.

#### 8- المقارنة بين تنظيم التيار باستخدام المنظم PI وتنظيم التيار باستخدام المنظم البطائي:

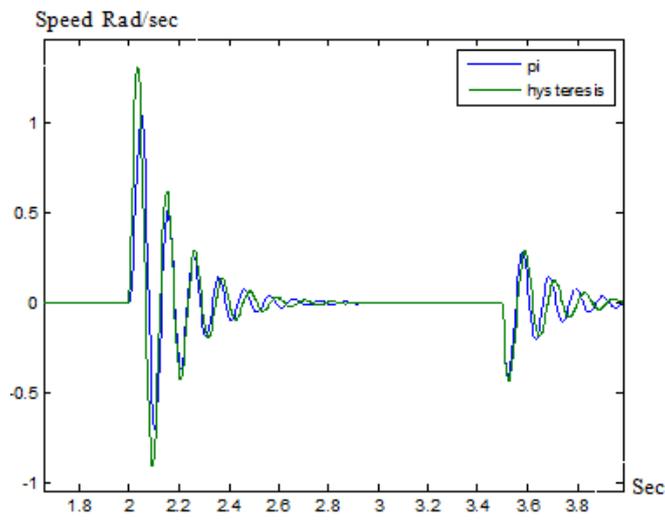
عند تنظيم التيار بطريقة PI controller نجد أن المتحكم يعرف بالضبط قيمة الجهد الذي يجب تطبيقه على المحرك وذلك من خلال معدلات المحرك، فنرى شكل إشارة التيار المطبق تكون سلسلة وذات ديناميكية عالية وبما أن تابع انتقال حلقة التيار من المرتبة الأولى فلا يوجد تجاوز للهدف أبداً، أما عند استخدام طريقة Hysteresis controller نجد أن النظام يطبق كامل الجهد مباشرة على المحرك على شكل نبضات، فإشارة خرج المنظم إما تطبيق كامل الجهد أو عدم تطبيقه هذا يؤدي إلى خشونة في منحنى التيار وتكون إشارة التيار مهتزة ولكنها ذات ديناميكية أعلى من التيار عند استخدام منظم الـ PI، كما هو موضح في الشكل (13) هذا الاهتزاز يؤدي إلى اهتزاز في العزم، أما استجابة السرعة نجد أنها أكثر ديناميكية في منظم الـ PI.



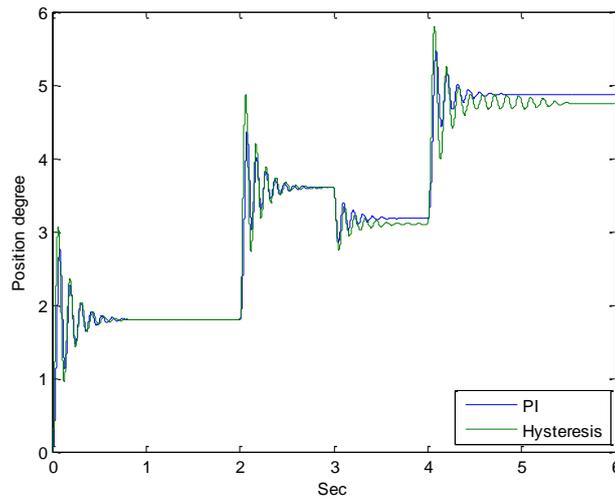
الشكل (13): منحنى استجابة التيار



الشكل (14): منحنى استجابة العزم



الشكل (15): منحنى استجابة السرعة



الشكل (16): منحنى استجابة الموضع

من الشكل (16) نلاحظ أن خطأ الموضع عند التحميل باستخدام متحكم البطائي يساوي 0.6510 درجة، حيث إن طول الخطوة الكاملة 1.8 درجة أي أن الخطأ الستاتيكي يساوي 36.1667% من الخطوة الكاملة بينما خطأ الموضع عند التحميل باستخدام متحكم الـ PI لتنظيم التيار يساوي 0.53 درجة أي أن الخطأ الستاتيكي يساوي 29.44% من الخطوة الكاملة ويعود ذلك إلى تموج واهتزازات التيار الكبير في المتحكم البطائي الناتجة عن عرض النافذة ولا توجد هذه الاهتزازات والتموجات في PI.

## 9- نتائج ومقترحات:

نستطيع القول أنه في هذا البحث تم إعداد نموذج لنظام تحكم بمحرك خطوي هجين ذي طورين (HSM) ومحاكاته في بيئة Matlab/Simulink وذلك بطريقتي تحكم طريقة المتحكم التناسبي التكامل PI Controller وطريقة المتحكم البطائي Hysteresis Controller. أظهرت النتائج أن طريقة المتحكم التناسبي التكامل PI Controller قد أبدت أداءً أفضل من طريقة المتحكم البطائي Hysteresis Controller من حيث الديناميكية العالية وسرعة الاستجابة بالإضافة إلى نعومة وسلاسة الدوران. من ناحية أخرى وجدنا أن الانزياح الزاوي في الموضع الناتج عن الحمل الاسمي في المتحكم التناسبي التكامل PI Controller أقل بنسبة 7% من المتحكم البطائي Hysteresis Controller ، وأن هذا الانزياح ناتج عن تحميل المحرك ولذلك يجب توخي الحذر بعدم زيادة الحمل فوق الحمولة الاسمية لأن ذلك سيفقد المحرك توافقه مع نبضات القيادة، وهنا يمكن اللجوء الى تقنية جديدة المعتمدة على الخطوة الميكروية لزيادة تحسين الأداء عند الحمل الكامل.

## المراجع العلمية

- [A] Rusu, C., Birou I., and Szoke, E (2008). **Model Based Design Controller for the Stepper Motor**, IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR).
- [B] Acarnley, P. (2002). **Stepping motors-a guide to theory and practice**, 4th Edition, the Institution of Electrical Engineering, London.
- [C] Molar, A., (2003). **Stepper Motor Model for Dynamic Simulation**, Department of Electrical Engineering, University of Targu-Mures, Romania.
- [D] Zaky, M., M.Ismail, E. and M.Khater, M. (2010). **DSP-Based Real-Time Control of a Two Phase Hybrid Stepping Motor**, Dept. Of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Minoufiya University ,Egypt. Vol 51, Number 2.
- [E] AL- Sabbagh, S., Sabah-Mahdi, A. (2010). **PULSE WIDTH MODULATION FOR HIGH PERFORMANCE HYBRID STEPPER MOTOR**, Faculty of Engineering, University of Baghdad, Iraq- Baghdad.
- [F] Rubaai, A. and Kotaru, R. (2001). **Adaptation Learning Control Scheme for a High-Performance Permanent-Magnet Stepper Motor Using Online Random Training of Neural Networks**, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 2, pp: 495-502.
- [G] Ricardo Picatoste R., 2004 – **Accuracy Positioning Systems Used in Radioactive Environments**, thesis of (Ph.D). Center of Electronic Industrial, Spanch.