

## نظام قيادة لمحرك خطي ذي ممانعة مغناطيسية متغيرة LSRM باستخدام المتحكم الصغري

\*د. أحمد الكردي

(الإيداع: 19 تموز 2018 ، القبول: 10 أيلول 2018)

### الملخص:

في هذه المقالة نقدم دراسة ونمذجة ومحاكاة لمحرك خطي ذي ممانعة مغناطيسية متغيرة LSRM وكذلك عرضاً للنتائج التجريبية ومن ثم المقارنة مع نتائج المحاكاة للتحكم بسرعة وموضع المحرك LSRM ثلاثي الطور ذي المواصفات التالية: 250N ، 250W ، 24V ، 6/4-pole. في الدراسة التجريبية والمحاكاة فإن السرعة المرجعية تكون ثابتة وذلك اعتماداً على الموضع والزمن حيث يتم التحكم بسرعة الجزء المتحرك بواسطة تقنية التحكم ذو المنطق العائم FLC والتحكم باستخدام المتحكم التكامل التناوبي PI. لقد تم استخدام المعالج الصغري PIC18F452 وذلك بسبب تكلفته المنخفضة للتحكم بسرعة المحرك وفق تقنية التحكم بالمنظم PI وتم مقارنة النتائج مع نتائج المحاكاة لسرعة المحرك باستخدام الطريقة المتحكم العائم FLC. وقد وجدنا أن المعالج الصغري PIC18F452 قد كان كافياً للتحكم بسرعة المحركات LSRM، كما وجدنا أن تموجات السرعة في طريقة FLC تكون أقل مما هي عليه في طريقة PI، وكذلك حصلنا على سرعة استجابة للسرعة أفضل مع طريقة FLC مقارنة مع طريقة PI، مما يؤكد على أهمية طريقة FLC للتحكم بسرعة والموضع للتطبيقات التي تحتاج سرعة في الاستجابة ودقة في الموضع مثل التطبيقات الطبية وفي المصاعد الكهربائية.

**الكلمات المفتاحية:** المحرك الخطي ذي الممانعة المتغيرة، التحكم بالموضع والسرعة، متحكم المنطق العائم.

\*عضو هيئة فنية في قسم تقنيات الحاسوب، الكلية التطبيقية، جامعة حماة

## Drive system of a Linear Switched reluctance Motor Using Microcontroller

\*Dr. Ahmad Kurdi

(Received: 19 July 2018, Accepted: 10 September)

### Abstract:

In this article, we present a study, modeling and simulation of a linear switched reluctance motor LSRM, as well as a presentation of the experimental results comparing with the simulation results to control the speed and position of the three-phase LSRM motor which have the following specifications: 4/6 poles, 24V, 250W, 250N.

In the experimental study and simulation, reference velocity is constant depending on the position and the time. The velocity of the moving part is controlled by FLC and PI control methods.

The PIC18F452 microcontroller was used because of its low cost for controlling the motor velocity according to the PI control technology. The results were compared with the simulation results of the motor velocity using the FLC method. We proved that the PIC18F452 microcontroller was sufficient to control the velocity of the LSRM motor. We are also investigating that the response of velocity in the FLC method were better than in the PI method concerning the response of velocity and the precision of position. So that it's preferred for applications that require fast response and accuracy in as medical applications and elevators systems.

**Keywords:** Modeling & simulation LSRM Motor, Fuzzy Controller, Microcontroller PIC.

---

\* Dept. of Computer Technicals, Applied Faculty, University of Hama

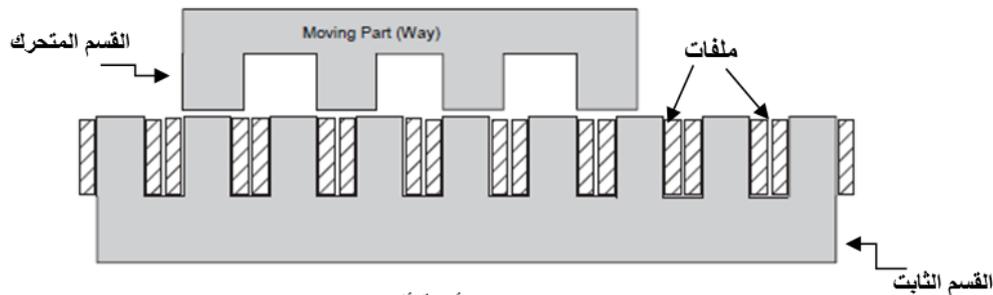
## 1- المقدمة:

تعتبر محركات ال LSRM هي نوع جديد من المحركات الخطية التي تم تطويرها اعتماداً على دراسة المحركات ذات المغناطيسية المتغيرة SRM، وهي تجمع بين مزايا محركات SRM والمحركات الخطية التقليدية [A]. تمتلك محركات ال LSRM خاصيتين رئيسيتين: الخاصة الأولى؛ يتم توصيل محركات ال LSRM مباشرة إلى الحمل دون الحاجة إلى وسيط تحويل دوراني-خطي مما يقلل من الضياعات ويخفض تكاليف نظام القيادة، الخاصة الثانية: يتم وصل ملفات المحرك إلى دارة تبديل الكترونية والتي تستخدم تقنيات الإلكترونيات الإستطاعية الحديثة وهكذا فإن محركات ال LSRM تمتلك قدرة عالية على التحميل الزائد ومجال واسع للسرعة وغيرها من المميزات. مقارنة مع المحركات الخطية المتناوبة الأخرى فإن محركات ال LSRM تمتلك افاق تطبيق واسعة في التجهيزات العالية الدقة ونقل الإستطاعات العالية. بالإضافة إلى ذلك تكون هذه المحركات ذات موثوقية عالية وقد تم تطبيقها بنجاح في أنظمة النقل والأبواب المنزلقة [B].

تمتلك محركات LSRM نفس خصائص المحركات الخطية الأخرى الا انها تتميز ببنية بسيطة ومتينة ومنخفضة التكلفة ويمكن التحكم بها بسهولة من حيث الموضع والسرعة لذلك فإنها تكون خيار جيد لتحديد الموضع والتحكم بالسرعة [C]. لسوء الحظ فإن الاستخدام الكافي والواسع لهذه المحركات في التطبيقات الصناعية لم يؤخذ بعين الاعتبار بسبب الخصائص غير المعروفة لهذه المحركات ولأن مواصفات المتحكمات لم تكن كافية في أنظمة قيادتها. هناك بعض الدراسات حول تحديد الأبعاد الهندسية لمحركات ال LSRM [D] والتحكم بالسرعة والموضع باستخدام المنطق العائم وتطبيقات المصاعد باستخدام LSRM.

إن الآلة LSRM بشكلها العام عبارة عن آلة ذات أقطاب بارزة مضاعفة، وحيدة التهيج، أي أن الأسنان توجد على كلٍ من الأولي (الثابت) والقسم المتحرك. يجب أن يكون عدد هذه الأسنان غير متساوٍ بين الثابت والمتحرك، وذلك لضمان أن القسم المتحرك لا يمكن أن يقع في موضع تكون فيه القوة الخطية معدومة (هو الموضع الذي تكون فيه كل أقطاب القسم المتحرك متطابقة مع كل أقطاب الأولي).

لا توجد ملفات أو مغناط أو قفص على القسم المتحرك لهذه الآلة، حيث أنه مكوّن من تكديس صفائح من الفولاذ أو الحديد المشاب بنسبة من السيلكون التي تشكل أقطاباً بارزة. إن النمط الذي سنجري الدراسة عليه هو محرك LSRM له (4) أقطاب على القسم المتحرك و(9) أقطاب على الثابت (الأولي)، والأولي هو الذي يحوي الملفات كما في الشكل (1).



الشكل رقم (1): بنية محرك LSRM بأربعة أقطاب على القسم المتحرك

**2-الهدف من البحث:**

تصميم نظام قيادة لمحرك خطي ذي ممانعة مغناطيسية متغيرة LSRM لاستخدامه في مجال تطبيقات التحكم بالموضع بما يحقق تخفيف اهتزاز القوة الخطية وذلك باستخدام عدة منظمات (المنظم التناسبي - التكاملي، المنظم ذو المنطق العائم) وتطبيقه بمساعدة المعالج الصغري.

في اطار هذه الدراسة يتم نمذجة المحرك ومحاكاته مع نظامي قيادة في بيئة Matlab/Simulink باستخدام المتحكم التناسبي التكاملي PI والمتحكم العائم ومن ثم مقارنة نتائج المحاكاة اعتماداً على سرعة الاستجابة ودقة التحكم بالموضع.

**2- دراسة تحليلية ورقمية للمحرك الخطي ذي الممانعة المغناطيسية المتغيرة****2-1- التحليل الرقمي للمحرك:**

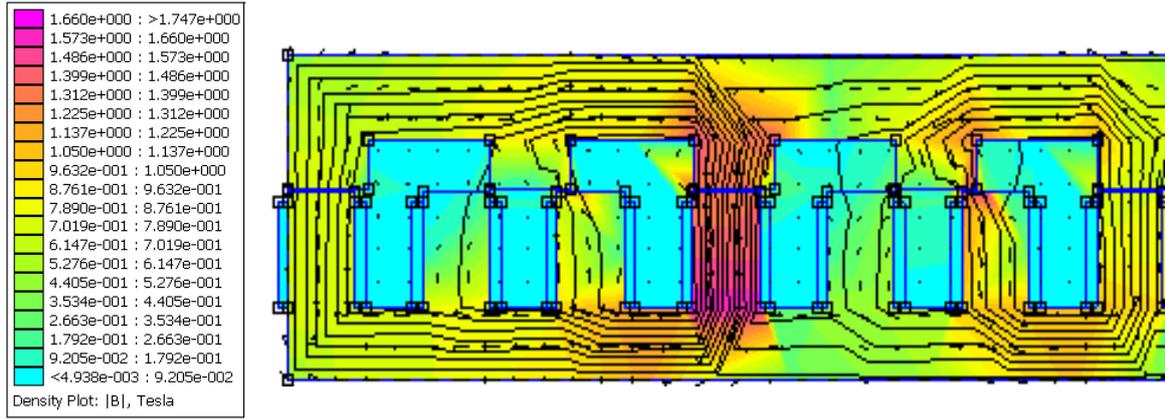
يعتبر تحديد المحارضة للطور الواحد للمحرك عنصر مهم في معرفة تغير هذه المحارضة كتابع لموضع الجزء المتحرك وإن القيمة الدنيا لتحريضية الطور تحدد بـ 0.002mH والحد الأقصى لقيمة تحريضية الطور تكون 0.012mH عند التيار الاسمي 8A. تحدد الخصائص الكهربائية للمحرك كما يلي: استطاعة المحرك 250W ، جهد تغذية على دخل المبدلة 24Vdc ، التيار الاسمي 8A وجميع بارمترات المحرك تعطى بالجدول التالي:

**جدول رقم (1): الخصائص الكهربائية والميكانيكية للمحرك**

الرمز	البارمترات المصممة	القيمة
L	طول الفعال للمحرك LSRM	0.8m
$v_m$	أقصى سرعة خطية	1m/s
$t_a$	زمن التسارع	0.167s
m	كتلة المتحرك	25Kg
F	قوة السحب	250N
P	استطاعة ال LSRM	250W
I	التيار	8A

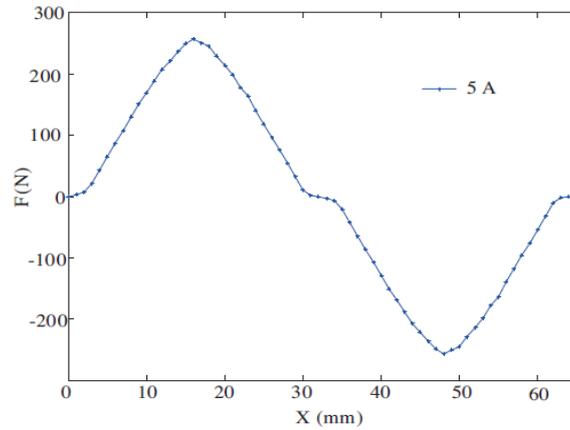
بالاعتماد على هذه البارمترات تم حساب الأبعاد الهندسية للمحرك بالاعتماد على طريقة حساب القوة وبالاعتماد على جملة من المعادلات التحليلية، ثم تم رسم الشكل الهندسي للمحرك بواسطة برامج تصميم Fem-lab والذي يسمح بإجراء محاكاة لسلوك المحرك وسنحصل على توزيع للتحييض للحقل المغناطيسي في مختلف أجزاء المحرك، حيث تظهر بشكل واضح النقاط شديدة الإشباع المغناطيسي وبالتالي ذات السخونة العالية. يظهر في الشكل (2) هذا التوزيع بحسب الألوان المرافقة للشكل مع القيم الموافقة لكل لون [F].

نلاحظ من الشكل (2) أن المعدل الوسطي لقيمة التحييض هي بحدود 1.2 تسلا وهو ضمن المجال الطبيعي لعمل المحرك، حيث أن المحرك لا يعمل في منطقة الإشباع الزائد. كما في الشكل (2):



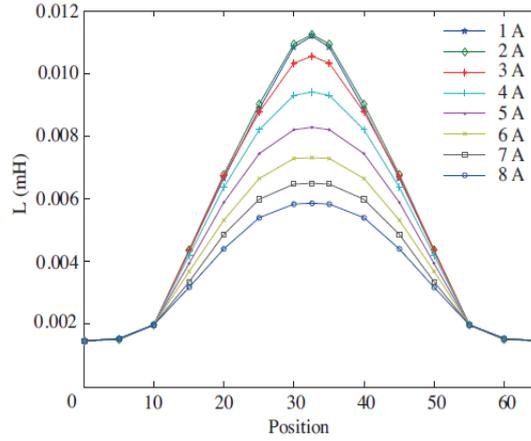
الشكل رقم (2): توزيع الفيض المغناطيسي في الجزء الثابت والمتحرك

وقد تم الحصول على القوة الكهرومغناطيسية المتحرضة والتدفق المغناطيس وكثافة التدفق وشعاع كثافة التدفق لهذا التصميم والقيم التي تم الحصول عليها هي توابع دورية وذلك لأنها تتغير وفقاً لموضع الدوار والتدفق. إن المتغيرات في التحليل المغناطيسي للمحرك هي موضع الدوار والتيارات الملف. يقوم برنامج المحاكاة بتكوين سطح محدد للمحرك وذلك اعتماداً على موضع المحرك ثم يقوم بحساب بارمترات الخرج الأساسية. بغرض التحليل المغناطيسي للمحرك المصمم تم تطبيق تيار بقيمة 8A وتحريك المحرك في هذه الحالة فإن القوة المولدة في المحرك كتابع لتغير الموضع ستظهر في الشكل (3):



الشكل رقم (3): تغير القوة كتابع لموضع للجزء المتحرك بطريقة Fem-lab

وفي نفس الوقت نحصل على تغير المحارضة من أجل عدة قيم للتيار (1-8A) حيث تكون الآلة غير مشبعة مغناطيسياً عند التيارات المنخفضة لتظهر حالة الاشباع عند التيارات العليا.



الشكل رقم (4): تغير التحريضات وفقاً للموضع والتيارات

### 3- التحليل الديناميكي للمحرك الخطي ذي الممانعة المتغيرة LSRM:

من أجل إنشاء نموذج ذو سلوك حقيقي للمحرك LSRM فمن الضروري معرفة جميع البارامترات المتعلقة به، حيث أن مجموع أشعة الفيض المغناطيسي للمحرك  $\lambda^T = [\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3]$  تعطى كما يلي [G]:

$$\lambda = L(x)i \quad (1)$$

وشعاع التيار  $i^T = [i_a \ i_b \ i_c]$  متضمناً تيارات الأطوار الثلاثة،  $x$  يمثل الموضع المتحرك بالنسبة للثابت، وتعطى مصفوفة المحارضات بالشكل التالي:

$$L(x) = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

.  $c$  ،  $b$  ،  $a$  : المحارضات الذاتية للأطوار  $L_{cc}$  ،  $L_{aa}$  ،  $L_{bb}$

.  $L_{cb}$  ،  $L_{ab}$  ،  $L_{ac}$  : المحارضات المتبادلة بين الأطوار الثلاثة.

من نظرية تحويل الطاقة الكهرومغناطيسية يمكن كتابة معادلة الجهد للمحرك كما يلي:

$$V = Ri + l(x) \frac{di}{dt} + v \frac{dl(x)}{dt} \quad (3)$$

حيث  $v$  هي سرعة الإنزلاق، وشعاع الجهد  $V^T = [v_1 \ v_2 \ v_3]$  متضمناً منبع الجهد لكل طور و  $V$  هي نفسها لكل الأطوار وتعطى مصفوفة المقاومات كما يلي:

$$R = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

.  $R_c$  ،  $R_b$  ،  $R_a$  : مقاومة الطور  $c$  ،  $b$  ،  $a$  على الترتيب.

يمكن تحديد القوة العامة للآلات الكهربائية كما في المعادلة التالية:

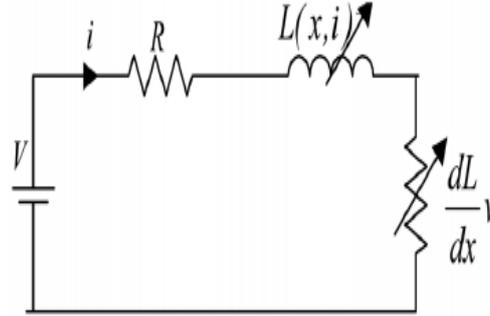
$$F = \frac{1}{2} i^T \frac{dL(x)}{dx} i \quad (5)$$

عند إهمال التحريضيات المتبادلة (نظراً لصغرهما) لا SRM فإن القوة المتحرّضة بواسطة المحرك F في المعادلة (5) تصبح كما يلي:

$$F = \frac{1}{2} \left[ i_a^2 \frac{dL_{aa}}{dx} + i_b^2 \frac{dL_{bb}}{dx} + i_c^2 \frac{dL_{cc}}{dx} \right] \quad (6)$$

.c, b, a : تيارات الأطوار الثلاثة  $i_a, i_b, i_c$ .

يظهر الشكل (5) الدارة المكافئة لطور واحد للمحرك ال LSRM حيث أن تحريضية الطور تختلف حسب موضع الدوار والتيار المار في الملف.



الشكل رقم (5): الدارة المكافئة الكهربائية لطور واحد

إن الحسابات الديناميكية والمعادلات الكهربائية للمحرك تتضمن مشتقات من الدرجة الثانية، ولمحاكاة السلوك الديناميكي للمحرك باستخدام طريقة اويلر أو طريقة رونج كوتا من الدرجة الرابعة فإننا نحتاج إلى معادلات فضاء الحالة وذلك من الأطوار الثلاثة للمحرك حتى تصبح من الدرجة الأولى وبالتالي لتخفيض المعادلات الديناميكية إلى معادلات من الدرجة الأولى نقوم بكتابة المعادلات التالية:

$$K_{aa} = R_a + v \frac{dL_{aa}}{dx} \quad (7)$$

$$K_{bb} = R_b + v \frac{dL_{bb}}{dx} \quad (8)$$

$$K_{cc} = R_c + v \frac{dL_{cc}}{dx} \quad (9)$$

لا يكتمل نموذج المحرك LSRM بدون كتابة معادلة تصف السلوك الديناميكي للمحرك ال LSRM، ويمكن كتابة المعادلات الحركية للجزء المتحرك كما يلي:

$$T = j \frac{dw}{dt} + Bw + T_l \quad (10)$$

حيث T يمثل العزم الذي يولده المحرك و B معامل التخامد، و  $T_l$  هي عزم الحمولة،  $w$  يمثل السرعة الزاوية. يمكن الحصول على معادلات فضاء الحالة الديناميكية لل LSRM حيث أن جميع البارامترات تكون موجودة في المعادلة (11):

$$\begin{bmatrix} v' \\ i'_a \\ i'_b \\ i'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_{aa}}{L_{aa}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_{bb}}{L_{bb}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{cc}}{L_{cc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{aa}} \\ 0 & \frac{1}{L_{bb}} \\ 0 & \frac{1}{L_{cc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (F - F_L) \\ V \end{bmatrix} \quad (11)$$

هذا النموذج لا يأخذ بعين الاعتبار آثار المحارضاات المتبادلة والتباطؤ والضياعات وتعتمد دقة هذا النموذج على دقة قيم المحرضاات، حيث أن العلاقات التي تحدد هذه المحارضاات تعطى كما يلي:

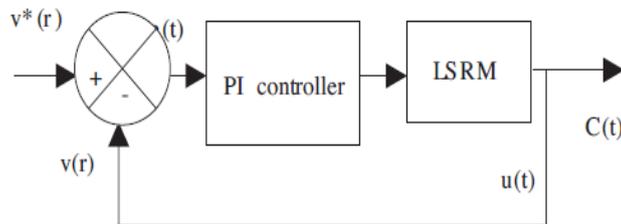
$L_1 = (L_{max} + L_{min})/2$	(12)
$L_2 = (L_{max} - L_{min})/2$	(13)
$L_{aa} = L_1 + L_2 \cos 4x$	(14)
$L_{bb} = L_1 + L_2 \cos(4x + 2\pi/3)$	(15)
$L_{cc} = L_1 + L_2 \cos(4x - 2\pi/3)$	(16)

يتم اشتقاق مختلف المحارضاات للأطوار الثلاثة مع الموضع الزاوي وفقاً لطريقة Cosine.

#### 4- التحكم بسرعة محركاات الـ LSRM باستخدام متحكم PI:

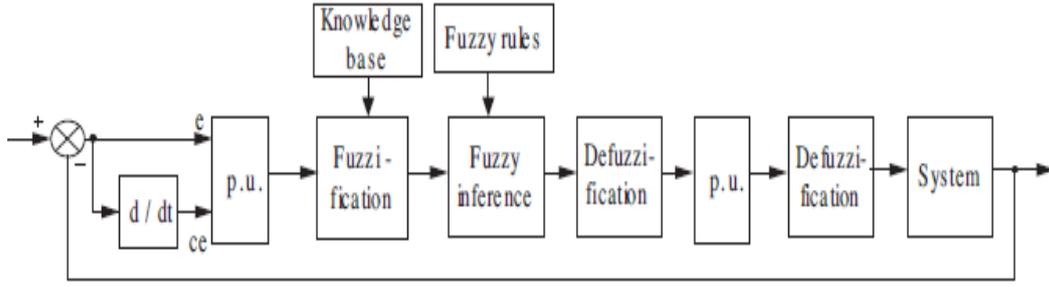
في الشكل (6) مخطط لخوارزمية التحكم باستخدام تقنية الـ PI حيث أنه في هذا النظام يتم نقل الخطأ بعد المعالجة على الخرج ويتم ضرب إشارة الخطأ  $e(t)$  بربح النظام ثم تتم مكاملتها ويقوم المتحكم PI بتنظيم قيمة الخرج وفقاً لقيمة  $e(t)$  وتعطى معادلة المتحكم PI كما يلي:

$$u(t) = KP(e(t) + \frac{1}{Ti} \int_0^t e(t) dt) \quad (17)$$

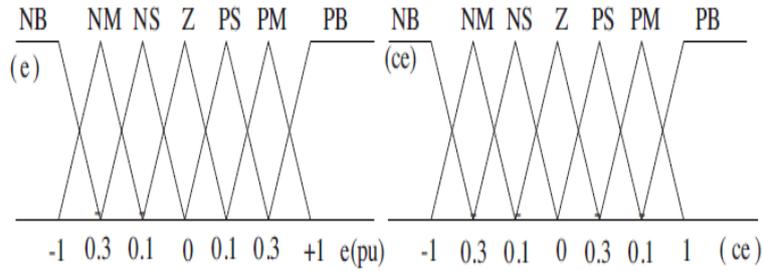


الشكل رقم (6): نظام التحكم باستخدام الـ PI

يتم استخدام المتحكم العائم للتحكم بسرعة محركاات الـ LSRM حيث أن متحويلات الدخل للنظام في المنطق العائم تحدد بـ  $e(t)$  وخطأ السرعة  $(ce)$ ، ويتم تحويل الخطأ وتغيير هذا الخطأ الذي تم الحصول عليه إلى القيم الواحديية. عن المجموعات المثلثية التي استخدمت لحساب هذه القيم تظهر في الشكل (7) [H].



الشكل رقم (7): نظام التحكم باستخدام المتحكم العائم



الشكل رقم (8): قيم المجموعات للمنطق العائم

إن خرج المنطق العائم يشير إلى تيار المحرك وقد تم التحكم بسرعة المحرك بهذه الطريقة، تعطى متحولات الدخل للنظام كما يلي:

$$e(K) = vr^*(K) - vr(K)$$

$$ce(K) = e(k) - e(K - 1) \quad (18)$$

حيث  $e(K)$  هي قيمة الخطأ في اللحظة  $K$  و  $ce(K)$  هو تغير الخطأ في اللحظة  $(K-1)$  و  $vr^*(K)$  هي السرعة المرجعية في اللحظة  $K$  و  $vr(k)$  هي السرعة الحقيقية في اللحظة  $K$  و  $e(K-1)$  هو الخطأ في اللحظة  $(K-1)$  وبالتالي فإن إشارة التحكم المرسل إلى ال LSRM يمكن ان تعطى كما يلي:

$$e(pu) = e(K)/GE$$

$$ce(pu) = ce(K)/GC \quad (19)$$

ويعرف خرج المتحكم العائم كما يلي:

$$IK = I(K - 1) + Gu * du(pu) \quad (20)$$

حيث  $I_K$  هي قيمة خرج المتحكم في العينة  $K_{th}$  و  $I(K-1)$  هي قيمة خرج المتحكم في اللحظة السابقة من زمن أخذ العينات و  $K_{th} \cdot Gu \cdot du$  هو رد فعل الخرج للعينة  $K_{th}$ . القيم التي تم الحصول عليها هي قيم التيارات المرجعية وهذه القيم هي التي تستخدم للتحكم بسرعة المحرك LSRM.

### 5- تنفيذ وحدة التحكم بالسرعة:

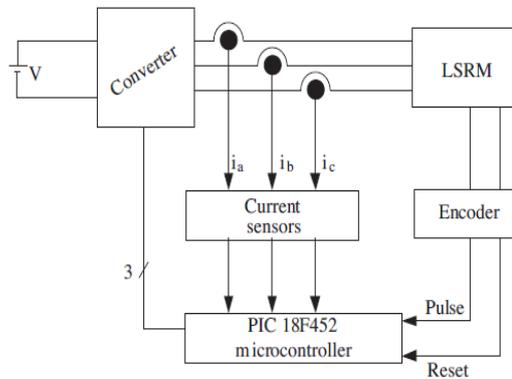
عندما يتم تهيج أقطاب المتحرك فإن قوة المحرك تكون في الاتجاه الذي سيقبل من الممانعة المغناطيسية وبالتالي يتم سحب أقرب قطب للدوار من الموضع غير المطابق إلى الموضع المطابق لحقل المتحرك وعندما يتحرك الدوار إلى الموضع المطابق فإن قوة السحب/دفع تولد مقدار من المغناطيسية المتغيرة ، يكون تيار الملف هو البارمتر الإضافي الذي يؤثر على قوة السحب/الدفع للمحرك وهذه القوة تكون متناسبة مع مربع التيار وبالتالي تكون باتجاه التيار وعندما يتغير تسلسل تبديل الأطوار فإنه يتم تغيير اتجاه حركة المحرك لذلك فإن مميزات المبدلة يمكن أن تؤثر على أداء المحرك.

الطاقة المتبقية في الملفات هي النقطة الأكثر أهمية في تصميم دائرة القيادة للمحرك LSRM حيث أنه إذا كان هناك طاقة متبقية في الملفات بينما يتحرك القسم المتحرك نحو الموضع عدم التطابق فسوف تتولد قوة عكسية ولمنع هذه المشكلة يجب أن يتم فصل التيار قبل الوصول إلى موضع التطابق وزمن الفصل هذا يحدد باستخدام الموضع ومعلومات السرعة للمحرك وذلك باستخدام المعالج الصغري PIC.

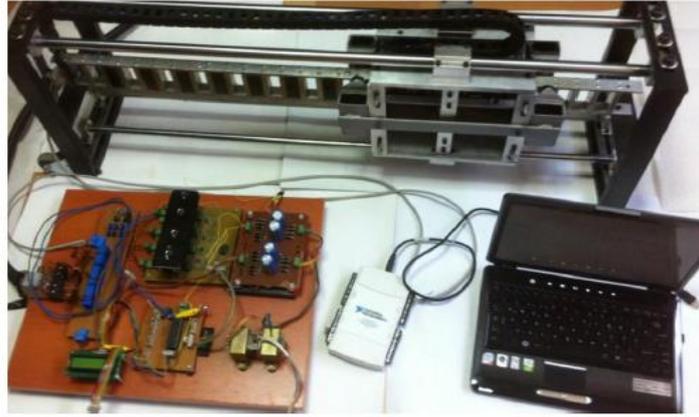
يظهر الشكل (9) مخطط التحكم بالمحرك LSRM حيث يتم تحسس معلومات الموضع وقيمة التيار بواسطة المعالج الصغري واعتماداً على هذه المعلومات فإن المعالج الصغري PIC يقوم بإنتاج إشارة تعديل عرض نبضة PWM وذلك لتغذية المبدلة الخافضة للجهد وتحديد تسلسل أطوار الملفات وإشارة PWM هي التي تتحكم بسرعة المحرك [E].

يجب تهيج الطور المناسب وذلك من أجل قيادة المحرك، إن برنامج التحكم الذي تم تحميله إلى المعالج الصغري PIC هو الذي يقرر أي قطب يجب تشغيله وذلك تبعاً للموضع، ويتم تحريض ملف الطور التالي مع معلومات الموضع. إن قيمة التيار المرجعي يستخدم للحد من أقصى قيمة لتيار الملفات وإن قيم دخل المعالج المصغر PIC هي موضع المحرك  $x$  والقيمة الحالية.

إن تيار الطور للـ LSRM تقاس كقيمة تشابهية تنتجها حساسات التيار ويتم إدخالها إلى المعالج الصغري بمستوى من 0-5V ، ويتم استخدام حساس تيار واحد لقياس تيار كل طور وهذه القيم التشابهية تحول إلى قيمة رقمية 10bit وتيار الطور يقتصر على القيمة المرجعية [I]. من أجل تحسس موضع أقطاب القسم المتحرك يستخدم المشفر التزايد الخطي والذي ينتج نبضات مربعة كل 62.5um فضلاً عن تصغير الإشارة كل 0.5m.m ، يتم تحسس نبضة التصفير (إعادة التهيئة) بواسطة قطب المقاطعة الخارجية ذو الأولوية العالية. الشكل (9) يوضح دائرة التحكم والقيادة.



الشكل (9) مخطط التحكم بـ LSRM

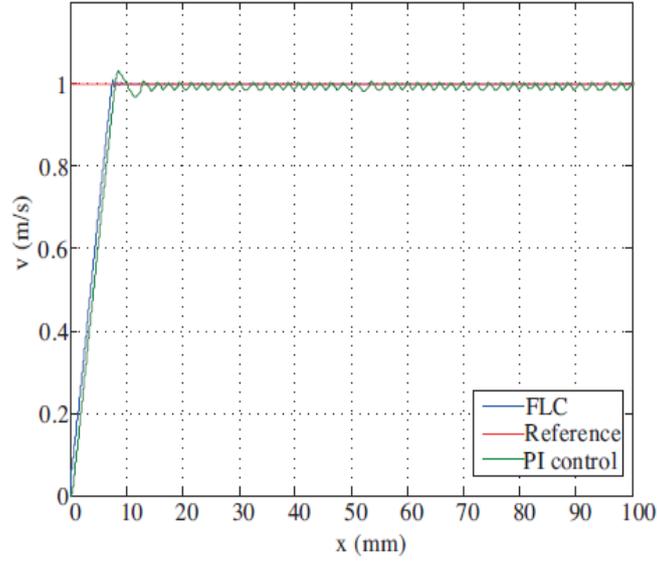


الشكل رقم (10): التنفيذ المخبري للمحرك LSRM مع دائرة القيادة

#### 6- نتائج المحاكاة:

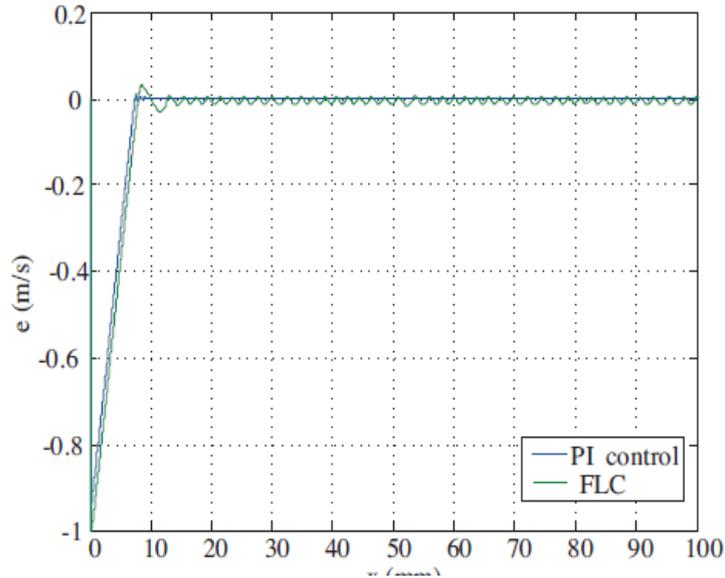
إن المحرك LSRM المستخدم في المحاكاة هو محرك ثلاثي الطور يملك المواصفات التالية: 250W، 24V، 6/4pole ،  $m=25\text{Kg}$  ،  $8\text{A}$  ،  $B=0.0012$  ، ويتم التحكم بسرعة المحرك LSRM وفق تقنية المنطق العائم وكذلك باستخدام المنظم PI. وإن تغير زاوية تيار الطور يكون على أساس أن لا يتم توليد قوة سالبة حتى لا تنقل من القيمة الوسطية للقوة المحصلة. يتم تحديد مناطق تغير تيارات الأطوار وفقاً لموضع المترجم للمحرك وذلك من منحنى المحارضة وتيارات الأطوار الثلاثة للمحرك LSRM تحسب بطريقة رونج كوتا من الدرجة الرابعة وفي المحاكاة لا يتم تحميل المحرك بشكل كامل ولا يكون التيار في قيمته الأعظمية.

أولاً: يتم تحديد السرعة المرجعية الثابتة بمقدار  $1\text{m/s}$  بعد ذلك يتم التحكم بالمحرك باستخدام المتحكم PI حيث أن قيم الثوابت المستخدمة في المتحكم هي  $K_i=1$  و  $K_p=6$  تم تعيينها بطريقة تجريبية. يبين الشكل (11) أن المحرك يصل إلى السرعة  $1\text{m/s}$  بعد  $8\text{m.m}$  وبالتالي فإنه يتسارع بالمسافة بين  $0-8\text{m.m}$  ثم يتحرك المحرك بسرعة ثابتة  $1\text{m/s}$  حتى يصل إلى  $100\text{m.m}$  وعند استخدام خوارزمية FLC فإن المحرك يصل إلى سرعة  $1\text{m/s}$  عند الموضع  $6\text{m.m}$  ، منحنيات استجابة السرعة للمحرك LSRM عند استخدام التحكم بطريقة PI و FLC نوضحها على الشكل (11)، يمكن ملاحظة أن استجابة السرعة في طريقة FLC تكون أقرب إلى السرعة المرجعية من طريقة PI وإن المنحنى الذي تم الحصول عليه باستخدام طريقة FLC يصل إلى السرعة المرجعية بشكل أسرع من المنحنى الذي تم الحصول عليه بطريقة PI. في الشكل (12) يمكننا أن نرى منحنيات خطأ السرعة للقسم المتحرك وذلك عند استخدام التحكم بطريق ال PI و FLC. يبين الشكل 13 تيارات الطور في المحرك LSRM مع طريقة المنظم PI ، الشكل (13-b) يبين تيارات الأطوار مع طريقة المنطق العائم FLC. يتحرك الجزء المنزلق بسرعة ثابتة  $1\text{m/s}$  مع حمل ثابت  $25\text{N}$  وذلك من  $0-10\text{m.m}$  لأن سرعة الجزء المتحرك من المحرك التي تكون أكبر من السرعة المرجعية ، عند حمل قدره  $25\text{N}$  فإن تيارات الأطوار تكون أقل من التيار الأعظمي وبالتالي لا يوجد تقطيع للتيار وعندما تكون سرعة المتحرك أكبر من السرعة المرجعية يتم فصل المفاتيح الإلكترونية وذلك لإجبار سرعة المتحرك على العودة إلى القيم المرجعية، ويتم رسم إشارة السرعة بينما يتم تحميل المحرك بحمولات مختلفة كما هو موضح بالشكل (14).

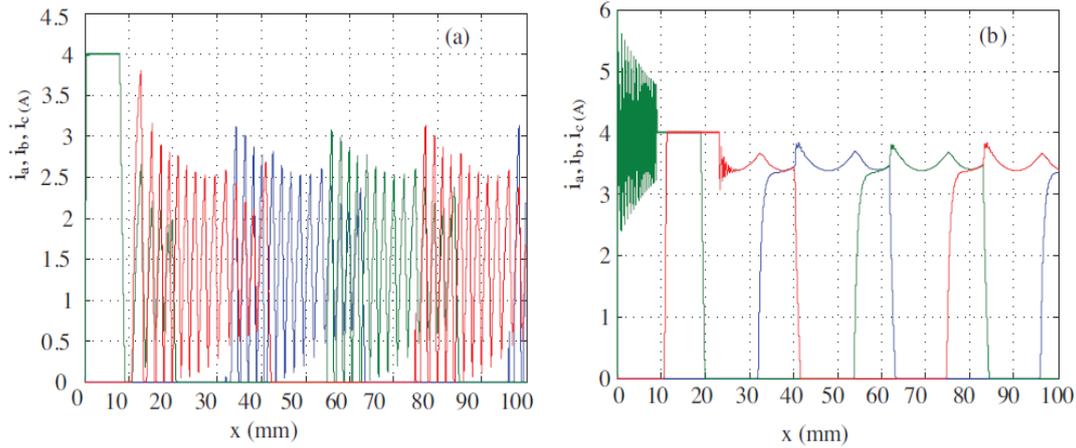


الشكل رقم (11): منحنيات سرعة القسم المتحرك بطريقة PI و FLC

إن خطأ السرعة عند التحكم باستخدام الـ PI يكون سالب في حين أن خطأ السرعة عند استخدام طريقة الـ FLC يكون موجب وعلى الرغم من أن خطأ السرعة هو قيمة صغيرة جداً فإن خطأ السرعة باستخدام الـ FLC أصغر مما هو عليه في طريقة الـ PI.



الشكل رقم (12): منحنيات خطأ السرعة للمتحرك بطريقة PI و FLC

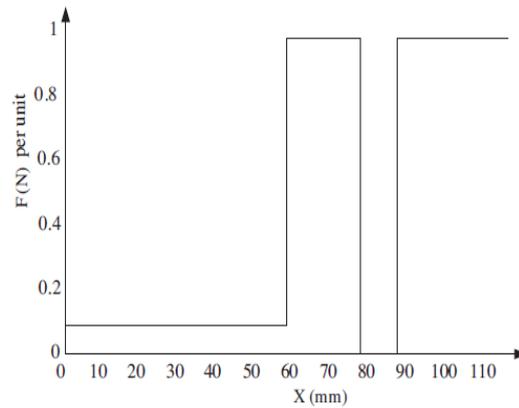


الشكل رقم (13): تيارات الأطوار بطريقة الـ PI و FLC

a: التيارات بطريقة PI

b: التيارات بطريقة FLC

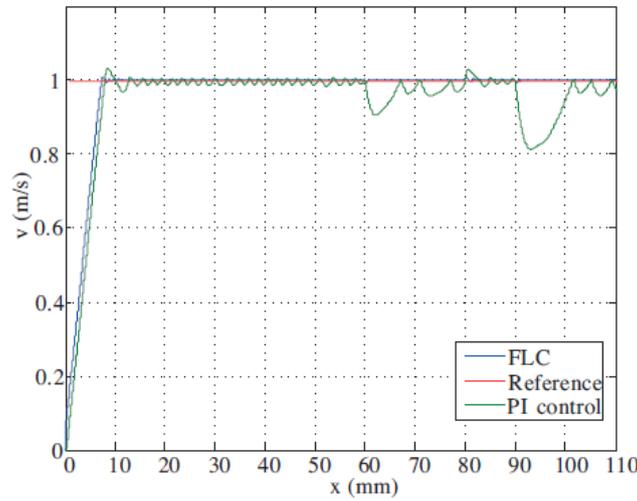
تعتبر خوارزمية التحكم بطريقة PI أبسط وأكثر سهولة في التطبيق من خوارزمية FLC. ويلاحظ الاهتزاز واضح في إشارة التيارات مع خوارزمية PI بينما هل أقل مع خوارزمية FLC.



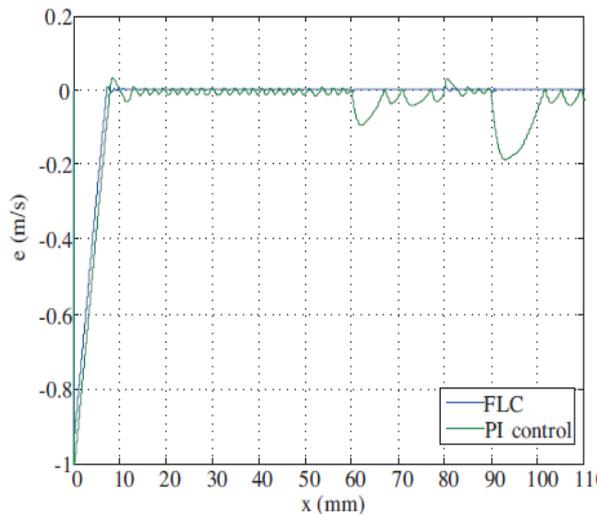
الشكل رقم (14): تغيرات الحمولة للمحرك بطريقة الـ PI و FLC

يوضح الشكل (15) منحنيات السرعة للمتحرك في ظل ظروف تحميل متزايدة وذلك باستخدام طريقة الـ PI و FLC حيث يتم تحميل المتحرك بحمولة 25N ضمن المسافة 0-60m.m وبحمولة 250N بين 60-80m.m وتتم إزالة الحمولة بين 80-90m.m وفي المرحلة الأخيرة يتم تحميل المحرك بحمولة 250N بين 90-100m.m. يبين الشكل (15) أن أداء المحرك ، فيما يتعلق بسرعة الاستجابة، عند استخدام طريقة FLC يكون أفضل مما هو عليه عند استخدام طريقة PI ، حيث أنه مع استخدام خوارزمية الـ PI تصل سرعة المحرك إلى السرعة المرجعية عند الموضع 8m.m أما في طريقة FLC فتصل سرعته إلى السرعة المرجعية عند الموضع 7.8m.m ، بالإضافة لذلك فإن منحنيات خطأ السرعة للخوارزميات الـ PI و FLC مع الشروط السابقة تظهر في الشكل (16) حيث أن خطأ السرعة في استراتيجية FLC في الحالة المستقرة تكون قريبة من الصفر حتى عندما يكون المحرك محملاً بشكل كامل. يبين الشكل 16 خطأ السرعة للقسم المتحرك تحت الحمولة مع الـ PI و FLC.

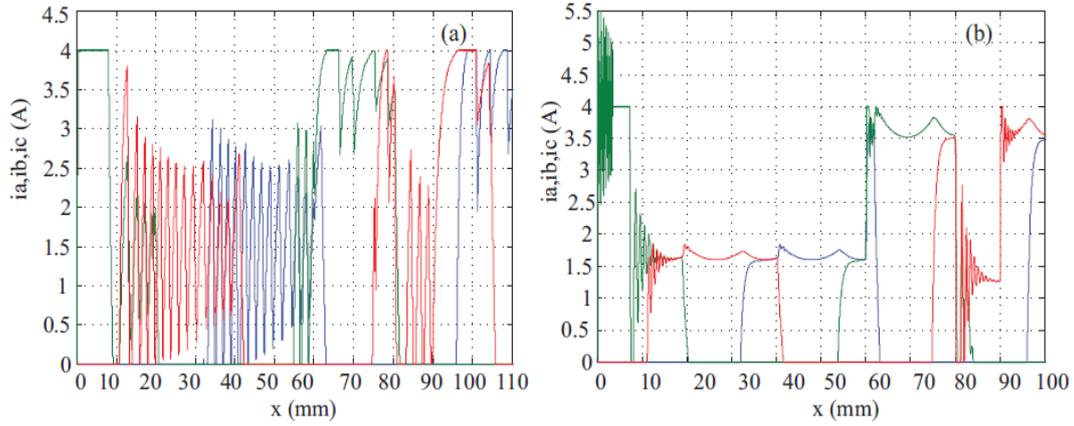
يبين الشكل 17 تيارات الأطوار لل LSRM خلال التسارع كما يبين استجابة المحرك لتغير الحمل. إن المحرك يبدأ بحمولة 25N ويصل إلى سرعة ثابتة 1m/s عند 8m.m واثاء تحرك بالسرعة الثابتة وعند 60m.m فإن الحمل تزداد إلى 250N وعند 80m.m فإن الحمل تكتمل وبعد ذلك عند 90m.m فإنه يتم إعادة تحميل المحرك بحمل 25N ويكون هناك تقطيع لتيار الطور للمحرك بعد ان تصل سرعة المحرك على القيمة المرجعية. إن قيمة التيار في الحالة المستقرة للمحرك مع شرط عدم التحميل وباستخدام طريقة ال PI تكون اقل منه عند التحميل ب 25N كما هو موضح بالشكل (16)، كما ان قيمة التيار للمحرك في الحالة المستقرة مع شرط عدم التحميل وباستخدام طريقة ال FLC تكون اقل منه عند التحميل ب 25N كما هو موضح بالشكل (17-b). يمكن القول انه إذا كان المحرك محمل على الفور بأي حمولة فإن طريقة FLC تكون كافية وطريقة PI غير كافية ونتيجة لذلك يمكننا القول ان التغيرات في التيار تعني أن هناك تغيرات في القوة وبالتالي فإن الاستجابة في طريقة FLC تكون أفضل من الاستجابة في PI.



الشكل رقم (15): منحنى السرعة للمتحرك تحت الحمل باستخدام طريقة PI و FLC



الشكل رقم (16): منحنى خطأ السرعة للمتحرك تحت الحمل باستخدام طريقة PI و FLC



الشكل رقم (17): تيارات الأطوار للمحرك كتابع للموضع بطريقة PI (a) و FLC (b).

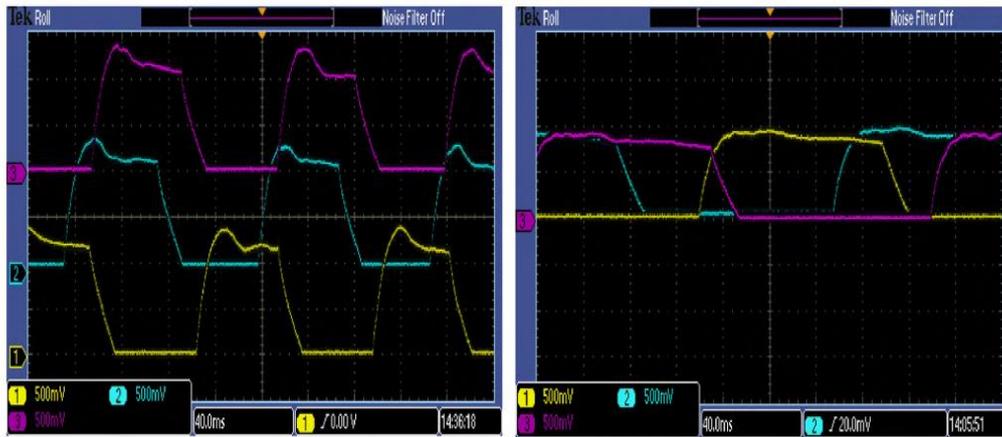
#### 7- النتائج التجريبية:

لقد تم جمع بيانات المتعلقة بتغير محارضة الطور للمحرك المصمم بطريقة العناصر المنتهية FEM وذلك باستخدام برنامج FEM-CAD، في المحاكاة استخدمنا طريقة الـ Cosine لأنها أكثر سهولة من الطرق الأخرى وقمنا برسم منحنى المحارضة للطور A من المحرك مع البيانات المستخلصة تجريبياً كما في الشكل (18) مع المقارنة بينهما، بالنتيجة فإن الرسومات البيانية كانت متقاربة جداً.

يمكن أن نلاحظ في الشكل 19-a والشكل 19-b تيارات الأطوار للمحرك مأخوذة من راسم الإشارة، وفي محاكاة الأطوار فإن التيارات تتأثر بالتسلسل حيث لا يبدأ التيار التالي قبل أن ينتهي تيار الطور الذي قبله.

في الشكل 20 تم استخلاص البيانات التجريبية لمنحنى السرعة كتابع للموضع وتم رسم هذه البيانات باستخدام Microsoft Excel ويتم حفظها باستخدام برنامج LABVIEW.

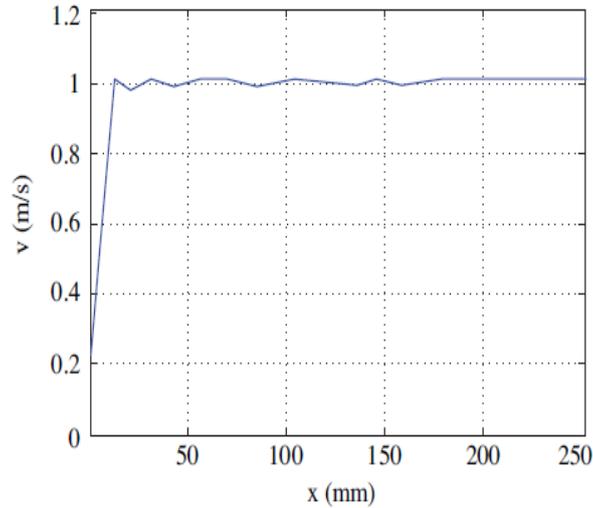
الشكل رقم (18): الرسم البياني لمحارضة طور واحد للمحرك باستخدام طريقة FEM و LABVIEW



(a)

(b)

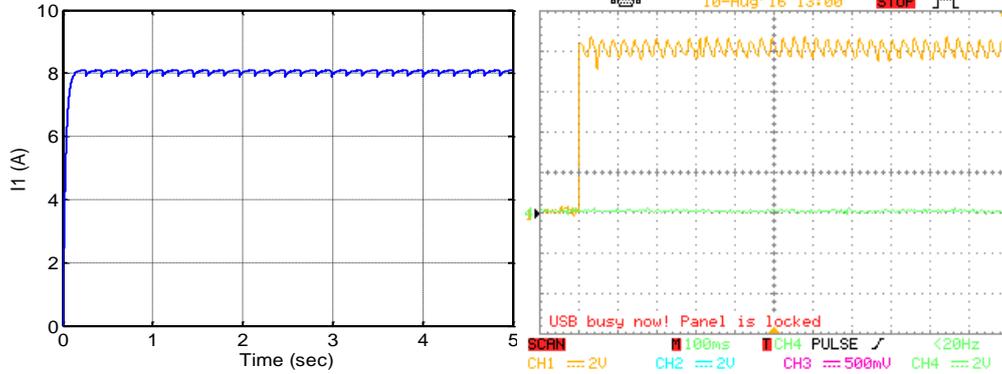
الشكل رقم (19): تيارات الأطوار المختلفة



الشكل رقم (20) اشكال خرج السرعة كتابع للموضع مخبرياً

#### 4-5 تنظيم التيار والقوة الخطية باستخدام منظمات PID في الحالة العملية

باستخدام منظمات الـ PI نستطيع تنظيم التيار لكل طور في كل قطاع للمحرك LSRM، الشكل (A-21) يظهر التيار الكلي للمحرك بعد تنظيم التيار من أجل تيار مرجعي 8A، نلاحظ تحسن شكل التيار حيث أصبح عرض العروة التيار لا تتجاوز 4% كما هو موضح في الشكل (B-21) من القيمة الأسمية، أما في حالة النمذجة الرياضية فقد كان عرض العروة حوالي 2.5%.



A(محاكاة)

B(مخبرياً)

#### الشكل رقم (21) منحنى التيار في حالة التنظيم باستخدام المنظم PI حول قيمة مرجعية 8A

#### 8-الخاتمة:

تم في هذه الدراسة نمذجة ومحاكاة واختبار نظام قيادة لمحرك خطي ذي ممانعة مغناطيسية متغيرة LSRM بطريقة بطريقتين: المنظم PI وطريقة المتحكم العائم FLC. المحرك الذي تم اجراء الدراسة عليه محاكاته هو محرك ثلاثي الطور بالمواصفات التالية: 250W، 6/4poled. قمنا بمقارنة استجابة السرعة في المحرك بطريقة PI و FLC عند قيم مرجعية وقد وجدنا أن طريقة المنظم FLC أفضل من طريقة التحكم PI من ناحيتي سرعة الاستجابة والدقة في الموضع. وقد تم تنفيذ النظام بمساعدة متحكم صغري من نوع PIC بدقة تشفير 10bit وتم استحصال البيانات من خلال واجهة برنامج LabVIEW ومقارنتها مع نتائج المحاكاة عن طريق برامج Matlab، وأظهرت النتائج تطابقاً جيداً في حالة المنظم PI، أما مع طريقة

FLC فلم تحقق مخبرياً وإنما تم الاكتفاء بالمحاكاة عبر برنامج Matlab. أظهرت نتائج المحاكاة توفيقاً لطريقة المتحكم العائم FLC على طريقة المنظم التناسبي- التكاملية من حيث سرعة استجابة السرعة والدقة في الموضوع. من نتائج المحاكاة التي حصلنا عليها يمكننا القول أن المحرك يمكن أن يستخدم في الأماكن التي تحتاج إلى حركة خطية مثل المصاعد والتجهيزات الطبيعية التي تتطلب التحكم الدقيق بالموضع وفي الأماكن التي تحتاج إلى استجابة سريعة نظراً للتكلفة المنخفضة والفعالية العالية.

## References

- 1– Budig P.K.,(2000) **“The application of linear motors,”** Proceedings of the 3rd IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, Vol. 3, pp. 1336–1341.
- 2– Lim H.S., Krishnan R.,( 2007) **“Ropeless elevator with linear switched reluctance motor drive actuation systems”**, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, pp. 2209–221,.
- 3– Zhao S.W , Cheung N.C., Gan W., Yang J.M., Pan J.F.,( 2007) **“A self–tuning regulator for the high precision position control of a linear switched reluctance motor”**, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, pp. 2425–2434,
- 4– Miller T.J.E.,( 1993) **“Switched Reluctance Motors and Their Control”**, New York, Oxford University Press.
- 5– Dursun M., Ozbay H., Ko F., (2010) **“An elevator driver with linear motor”**, Elevator Symposium, Izmir, Turkey, pp.233–239, 2010 (in Turkish).
- 6– Dursun M., Koc F., Ozbay H., (2010.) **“Determination of geometric dimensions of a double sided linear switched reluctance motor”**, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 6, pp. 32–38.
- 7–Dursun M., KO F. (2010) **“Simulation of fuzzy logic position and speed control of double sided linear switched reluctance motor”**, International Conference on Modeling, Simulation and Control, pp. 517–521.
- 8– DARABI S., ARDEBILI M., (2011) –**“Optimization of Driving Force of Linear Switched Reluctance Motor,”** 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, IEEE.
- 9–Moustaf A. raport of Ph.D, 2014 , **Structure Development of a Linear Switched Reluctance Motor and Building an Optimal Drive System**, faculty of Electric & Electronic engineering , Aleppo university.