

## التحكم بالمصاعد الكهربائية العاملة بواسطة المحركات الخطية ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة

عمار حسين كنعان\*

(تاريخ الإيداع 18 / 1 / 2015. قُبل للنشر في 7 / 9 / 2015)

### □ ملخص □

تعتبر استراتيجية التحكم بمصاعد المحركات الخطية ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة من الأمور الهامة المؤثرة على أداء المصعد .  
تحتوي هذه الاستراتيجية على أربع حلقات تحكم هي : حلقة التحكم بالتيار و حلقة التحكم بالقوة و حلقة التحكم بالسرعة و حلقة التحكم بالموضع حيث تم اقتراح وظيفة لتوزيع القوة على طورين متجاورين للتحكم بالقوة و تم التحكم بكل من تسارع وتباطؤ ووقوف المصعد من خلال الاستفادة من أوضاع السرعة ذات الشكل شبه المنحرف و تعتمد حلقتي التحكم بالتيار والسرعة على المتحكم التكاملي التناسبي كما تم بالنهاية نمذجة كافة حلقات التحكم بواسطة برنامج الماتلاب .

**الكلمات المفتاحية :** المصاعد الكهربائية - المحركات الخطية ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة - مصاعد المحركات الخطية - نمذجة و محاكاة حلقات التحكم

\* ماجستير - كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية - جامعة دمشق - سورية .

## Controlling of Electrical Elevators which Use the Linear Switched Reluctance Motors

Ammar Hussin Kanaan\*

(Received 18 / 1 / 2015. Accepted 7 / 9 / 2015)

### □ ABSTRACT □

The Control strategy for linear switched reluctance motor elevator is an important issue, which effects on the performance of the elevator .

This strategy consists of four control loops , Current , Force , Velocity and position feedback control loops . For the force control loop , anew force distribution function ( FDF) is proposed . The trapezoidal velocity profile is introduced to control the vertical movement position smoothly during the elevator's accelerate, decelerate and halt operations.

Conventional proportional plus integral (pI) controller is used for the current and velocity control loops and their designs are described .

The proposed control strategy is dynamically simulated by Matlab .

**Keyword:** Electrical Elevator– Linear Switched Reluctance Motors– linear motor elevator– control loops simulation

---

\* Master- Faculty of Electrical Engineering – Damascus University- Syria

**مقدمة :**

بدأ العالم منذ القرن الثامن عشر باستخدام طرق حديثة في البناء لتشييد البنايات شاهقة الارتفاع و ناطحات السحاب التي تمتد لمئات الأقدام في الهواء .  
ولكن هذا التطور الكبير في العمران كان من الممكن أن يكون عديم القيمة لولا ظهور تكنولوجيا كهروميكانيكية جديدة وهي المصاعد .

وهذه التكنولوجيا جعلت أمر استخدام هذه البنايات الشاهقة عملاً غير شاق ، وبالتالي إن المصاعد الحديثة كانت المفتاح الحقيقي لنجاح هذا التطور الهائل في هندستي الإنشاء والعمارة الحديثتين .  
تعتمد هذه المصاعد على استخدام المحركات الدوارة ، و لكن يواجه استخدام المحركات الدوارة في الحركة الميكانيكية الخطية مجموعة من السلبيات، تتمثل في وجود علبة السرعة والعديد من المشاكل مثل التباطؤ، لذلك أزيلت المحركات الخطية الحاجة من تحويل الحركة الدورانية إلى خطية، و بالتالي تعتبر المحركات الخطية مكسب هام وكبير في تطبيقات أنظمة النقل ، وحركة الأشخاص والأبواب المتحركة وكذلك السيور المتحركة في العديد من الاستخدامات.

يتم استخدام المحركات الخطية في تقنيات النقل الخطي ، و منها في التطبيقات العمودية مثل المصاعد ، وذلك بسبب مشاكل المصاعد التقليدية عند استخدامها في الأبنية العالية التي يصل ارتفاعها إلى عدة مئات من الأمتار، ومن هذه المشاكل وجود حبال التعليق المعدنية التي تسبب مشاكل في أنظمة التحكم وذلك بسبب زيادة الكتلة و الاهتزاز العامودي لهذه الحبال عند الارتفاعات العالية.  
لذا سنقوم في بحثنا بدراسة نظم التحكم بالمصاعد الكهربائية العاملة بواسطة المحركات الخطية ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة و تحقيق هذا التحكم بواسطة برنامج الماتلاب لنموذج مصعد مخبري.

**1- مبدأ عمل المحركات الخطية ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة :**

يتشابه مبدأ عمل المحركات الخطية ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة مع المحركات الدوارة ذات الممانعة المتغيرة ، و لكن الفرق الوحيد بين التركيبين أن المحرك الدوار يعتمد على العزم الدوار أما المحرك الخطي فيعتمد على القوة الخطية .

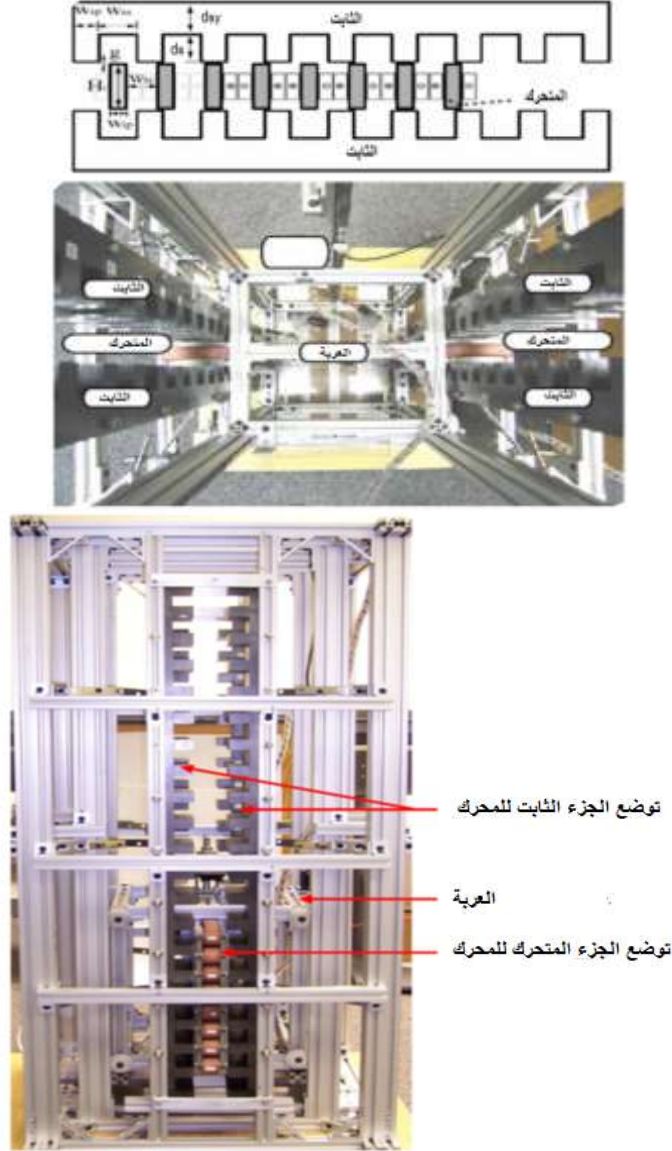
من أهم ما يميز هذا النوع من المحركات هو وجود الملفات في أحد الجزئين الثابت أو الدائر و الذي يسمى بدوره الجزء الفعال و بالتالي عند تغذية أحد ملفات الجزء الفعال تنشأ في الكتلة الحديدية الموجود عليها هذا الملف سيالة مغناطيسية ، تصبح بمنزلة قطب شمالي تخرج السيالة المغناطيسية منه، و تتجه نحو أقطاب الثابت ليصبح بمثابة قطب مغناطيسي جنوبي ، و يحصل تجاذب بين القطب الشمالي للجزء الفعال المغذى و القطب الجنوبي للجزء الأخرى عند القيام بتبديل ملفات التهيج لمختلف الأطوار تتحقق الحركة الدائمة مما يؤدي إلى دوران الجزء الدائر إذا كان المحرك ذو الممانعة المتغيرة دوار أو تحرك الجزء المتحرك إذا كان المحرك خطي كما في بحثنا ويجب الانتباه إلى أن المحركات الخطية لا تحوي أي مميزة خطية ، إنما تسمية خطية جاءت من المظهر حيث أن المتحرك والثابت ذو شكل مستقيم و يتوضعان بشكل متوازي .

وبالتالي فإن مبدأ عمل المحركات الخطية ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة يعتمد على أوضاع ملف الحثية ، و يتعلق بعدة عوامل تتمثل في أبعاد المحرك مثل أقطاب الثابت ، والمتحرك ، وعرض المجرى وكذلك تتعلق بتيار التهيج وموضع المتحرك .

## 2-الدراسة المرجعية :

## 1-2- بنية المحركات الخطية الخاصة بأنظمة النقل العامودية :

تم اجراء العديد من الأبحاث ضمن مجال بنية هذه المحركات [1] و [2] و [4] و [5] و التي تبين كيفية اختيار البنية الأفضل من هذه المحركات وفق عدة معايير من أهمها جعل وزن الجزء المتحرك أخف ما يمكن كونه سيثبت على عربة المصعد و في هذا البحث فإن دراستنا تتركز على محرك ذو 6/8 أقطاب له جزء ثابت مزدوج و جزء متحرك في الوسط ، يثبت الجزء الثابت على جدران البئر أما الجزء المتحرك يثبت على عربة المصعد .  
يبين الشكل (1) بنية المحرك المستخدم و طريقة تثبيته ضمن المصعد المخبري .



الشكل (1) بنية المحرك الخطي و طريقة تثبيته في المصعد ( مقطع أفقي و مقطع عامودي في البئر)

## 2-2- التحكم بالقوة :

يعد الهدف الأساسي من استخدام المحركات الخطية في أنظمة المصاعد هو التخلص من الاهتزازات العامودية لحبال التعليق الناتجة عن اضطرابات في عزم المحرك الدوار لذا يجب أن تكون القوة المولدة في المحركات الخطية

خالية من الاهتزازات و خاصة عند التبديل بين الأطوار ( أي عند الانتقال من الطورين المتجاورين الحاليين إلى الطورين المتجاورين التاليين ).

العديد من الأبحاث السابقة [1] و [3] و [6] و [7] عرضت الفكرة الأساسية لها هي توزيع القوة المولدة على طورين متجاورين بطريقة تقليدية و لكن تبين من خلال الدراسة و النمذجة على برنامج الماتلاب أن طريقة توزيع القوة التقليدية المتبعة في هذه الأبحاث تسبب اهتزازات تؤثر سلباً على عمل المصعد. لذا قمنا في هذا البحث باقتراح طريقة جديدة لتوزيع القوة على طورين متجاورين و سنثبت من خلال النمذجة ببرنامج الماتلاب و المقارنة مع الطريقة التقليدية نجاح الطريقة المقترحة في التخلص من الاضطرابات الغير مرغوب فيها بالقوة المولدة ( و هذا ما سنراه في فقرة التحكم بالقوة اللاحقة )

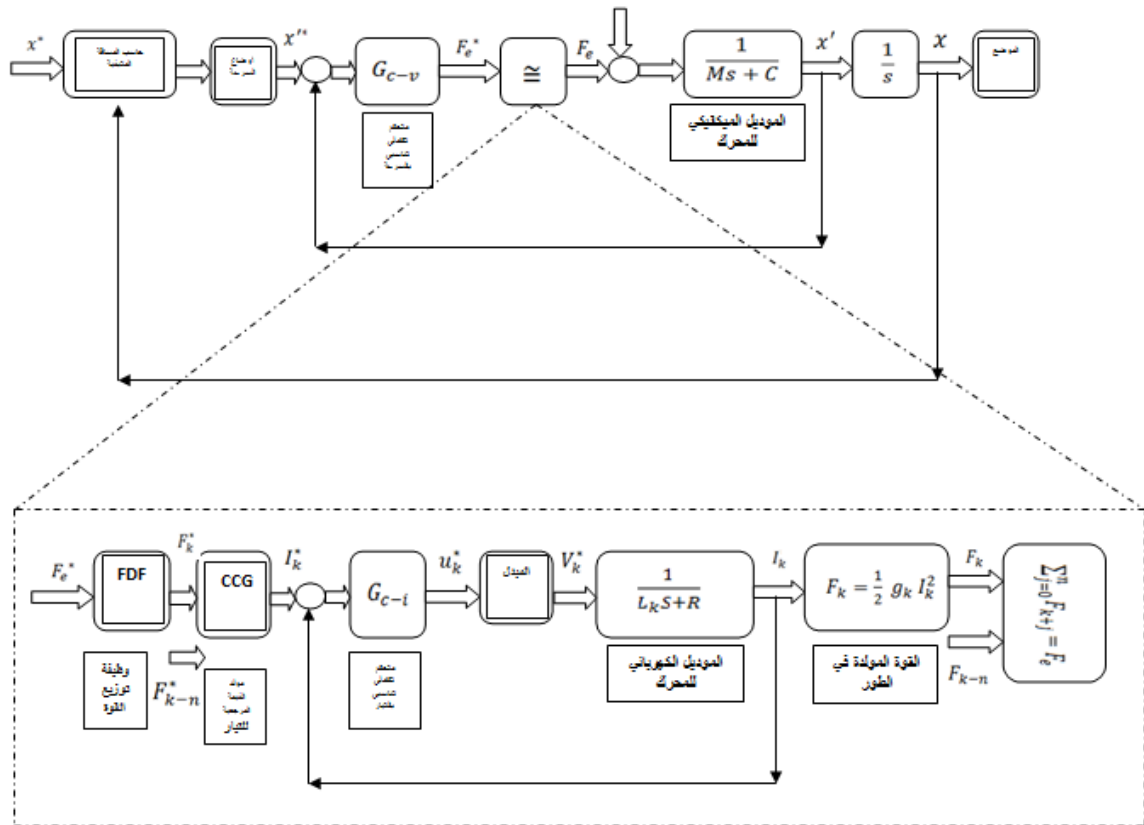
### 2-3- التحكم بالتيار :

تعتبر حلقة التحكم بالتيار من الحلقات الهامة جداً في التحكم بالمحركات الخطية ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة كون قوة الدفع تولد بشكل مباشر من التيار . قدمت العديد من الأبحاث [8] و [9] مجموعة من طرق التحكم بالتيار و لكن الجديد في بحثنا أننا سنقوم بتحليل و نمذجة حلقة التحكم بالتيار و حلقة التحكم بالسرعة من خلال استخدام متحكم تكاملي تناسبي و ذلك ضمن ما سنقوم به من نمذجة كافة نظام التحكم بواسطة برنامج الماتلاب و لنثبت القدرة على التحكم بالتيار ضمن طريقة توزيع القوة المقترحة في هذا البحث من خلال التطبيق على سرعات مختلفة و حمولات متنوعة للمصعد . و بالتالي تكمن أهمية البحث في الوصول إلى طرق جديدة للتحكم بالقوة و التيار و نمذجة كافة نظام التحكم لإثبات تفوق استخدام المحركات الخطية ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة في المصاعد ضمن الفترة القادمة بدلاً من المحركات الدوارة .

### 3- نظام التحكم بالمصعد :

يحتاج مصعد المحرك الخطي ذو الممانعة المغناطيسية المتغيرة إلى استراتيجية تحكم دقيقة بكل من القوة و التيار و السرعة و الموضع ، حيث يتم التحكم بالموضع من خلال منحنى السرعة ذو الشكل شبه المنحرف، لتعطي الاستجابة المطلوبة للموضع المطلوب ، كما نستخدم التغذية الخلفية لإعطاء معلومات عن الموضع إلى السرعة باستخدام مبدأ حساب المسافة المتبقية أما التحكم بالسرعة و التيار يتم عن طريق متحكم تكاملي تناسبي سيتم شرحه لاحقاً و الشكل ( 2 ) يوضح المخطط الصندوقي لاستراتيجية التحكم [1].

يبين هذا المخطط طريقة التحكم بالمصعد من لحظة وجود طلب جديد لعربة المصعد حتى الوصول للموضع المطلوب أي أنه عند طلب جديد فإن الموضع المطلوب الوصول إليه يعبر عنه بإشارة الدخل المرجعية  $x^*$  فيقوم حاسب المسافة المتبقية بحساب هذه المسافة بعد تلقيه إشارة تغذية خلفية من الموضع الحالي للمصعد  $x$  و بالتالي يعطي أمر لأوضاع السرعة من أجل اختيار السرعة المناسبة  $F_L$  لوصول للموضع المطلوب فتصدر من متحكم أوضاع السرعة ذات الشكل شبه المنحرف إشارة السرعة المرجعية لتدخل هذه الإشارة بعد أن يطرح منها سرعة المحرك الحالية إلى متحكم تكاملي تناسبي لتصدر منه إشارة قوة الدفع المرجعية اللازمة لإيصال المصعد للمكان المطلوب فنقوم بتوزيع هذه القوة على طورين متجاورين وفق وظيفة توزيع القوة المقترحة في هذا البحث (التي سيتم شرحها و اظهار الخلاف بينها و بين الطرق السابقة لاحقاً ) و من ثم يتم التبديل بين الأطوار لتأمين استمرارية الدفع حتى الوصول للموضع المطلوب .



الشكل (2) المخطط الصندوقي الكامل لاستراتيجية التحكم بالمصعد

### 3-1 التحكم بالقوة :

يشكل التحكم بالقوة حلقة مغلقة متتابعة مع التحكم بالتيار كما في الشكل (2) أي أن التحكم بالقوة يتضمن حلقة التحكم بالتيار حيث يقوم تابع توزيع القوة FDF بتوليد التيار المرجعي المطلوب و نستطيع باستخدام تابع توزيع القوة التخلص من تموجات (توافقيات) القوة الغير مرغوب فيها ، يتم قيادة تابع توزيع القوة FDF عن طريق المعادلات الديناميكية للمحرك الخطي ذو الممانعة المتغيرة . [1] لذا سنقوم بالبداية باستنتاج علاقة القوة المولدة لطور واحد وفق مايلي :

التوتر  $u_k$  المطبق على الطور يساوي إلى مجموع هبوط التوتر على المقاومة بالإضافة إلى مشتق الفيض بالنسبة للزمن أي:

$$u_k = R_s i_k + \frac{d\lambda_k}{dt}$$

حيث أن:

الفيض  $\lambda_k(x, i_k) = L_k(x, i_k) i_k$  ،  $L_k$  حثية الطور بالاعتماد على الموضع  $x$  تيار الطور  $i_k$  حيث أن  $k$  تشير إلى الأطوار  $a, b, c, d$  ،  $R_s$  هي ممانعة الطور .  
من المعادلة (1) و بضرها مع تيار الطور نحصل على استطاعة الدخل كمايلي :

$$P_{ik} = u_k i_k$$

الجزء الأخير من المعادلة (2) يعبر عن استطاعة الثغرة الهوائية للطور و تعطى كمايلي :

لكن استطاعة الثغرة الهوائية تنتج من القوة الكهرومغناطيسية للطور و سرعة المتحرك كمايلي:

و بالتالي فإن قوة الدفع لكل طور نحصل عليها من المعادلتين (3) و (4) كمايلي :

نلاحظ أن المعادلة السابقة تبين القوة المستنتجة لطور وحيد و بالتالي فإن التيار المرجعي اللازم يحسب من

العلاقة التالية :

حيث أن  $F_{ek}^*$  عبارة عن قوة الدفع المرجعية لكل طور

$g_k = dL_k(x, i_k)/dx$  هي نسبة التغير في حثية الطور لتحديد الموضع بدقة .

المعادلة (6) تسمى مولد التيار المرجعي ( CCG ) المبين بالشكل ( 2 ) بالإضافة إلى أن المعادلة الميكانيكية

ممثلة كمايلي:

حيث أن  $F_e$  : قوة الدفع المولدة [N] ،  $F_L$  : قوة الحمل [N] ، M : الكتلة [kg] ، C : معامل الاحتكاك

[N/ms]

حيث أن المعادلات ( 5 ) و ( 6 ) تبين أن قوة الدفع الضرورية بحاجة إلى التحكم بها بإعطاء قيم التيارات

المرجعية من خلال العمل الجيد لتابع توزيع القوة .

**3-1-1 تابع توزيع القوة (FDF):**

يتم العمل على توزيع القوة المولدة في الأطوار بحيث نحقق الشرط التالي :

مجموع توابع توزيع القوة FDFs لكافة الأطوار يساوي الواحد عند كل موضع من مواضع المصعد .

تعطى العلاقة بين القوة المرجعية وتابع توزيع القوة كمايلي :

حيث تعبر المعادلة ( 9 ) عن شرط توزيع القوة المذكور أعلاه رياضياً :

حيث أن  $F_e^*$  : القيمة المرجعية لقوة الدفع الضرورية

$f_k$  هي تابع توزيع القوة FDF للأطوار a,b,c,d ( حيث يتم التبديل بين كل طورين متجاورين مع الطورين

التاليين لنقوم بتوزيع القوة الناتجة عن كل الأطوار )

يعطى تابع توزيع القوة التقليدي بالعلاقة التالية:  $f_k = g_k(x)^2 / (g_k(x)^2 + g_{k+1}(x)^2)$  حيث  $g_k = dl_k(x, i_k) / dx$  (نسبة تغير الحثية بالنسبة للموضع) و يبين الجدول (1) قيم تابع توزيع القوة التقليدي خلال التبديل بين الأطوار في المواضع المختلفة للمصعد .

الجدول (1) تهييج ثنائي الطور لتابع توزيع القوة التقليدي

FDF	القيم	الموضع
$f_k$	$f_d = g_d(x)^2 / (g_d(x)^2 + g_a(x)^2)$ , $f_a = g_a(x)^2 / (g_d(x)^2 + g_a(x)^2)$	$0 \leq x \leq A$
		$A \leq x \leq B$
		$B \leq x \leq C$
		$C \leq x \leq D$

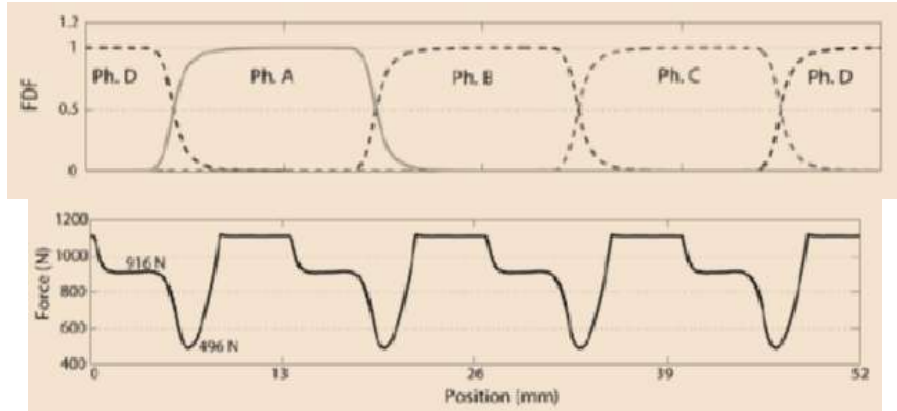
أما تابع توزيع القوة المقترح في هذا البحث يعطى بالعلاقة :  $f_k = |g_k(x)| / (|g_k(x)| + |g_{k+1}(x)|)$  حيث قمنا باستبدال التربيع من العلاقة التقليدية بالقيمة المطلقة بالعلاقة المقترحة و أصبح قيم تابع توزيع القوة المقترح خلال التبديل بين الأطوار في المواضع المختلفة للمصعد مبينة بالجدول (2) .

الجدول (2) تهييج ثنائي الطور لتابع توزيع القوة

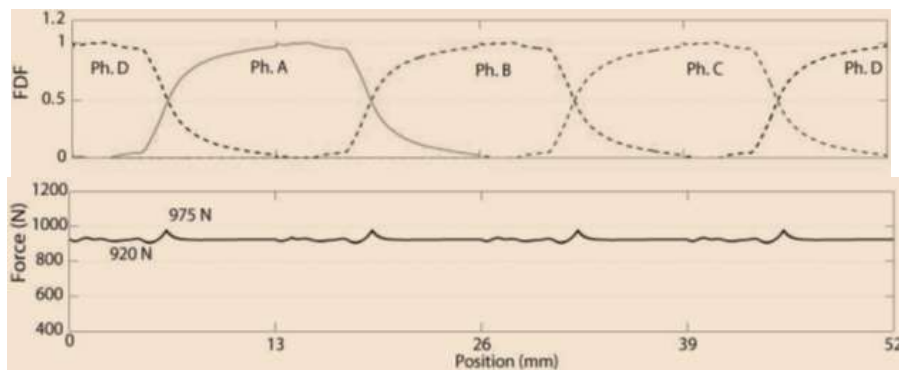
FDF	القيم	الموضع
$f_k$		$0 \leq x \leq A$
		$A \leq x \leq B$
		$B \leq x \leq C$
		$C \leq x \leq D$

لإثبات نجاح الطريقة المقترحة في بحثنا في توزيع القوة و تفوقها على الطريقة التقليدية فإننا سنقوم بنمذجة تابع توزيع القوة التقليدي و المقترح بواسطة برنامج الماتلاب فنحصل على النتائج التالية المبينة بالشكل رقم (3) لتابع توزيع القوة التقليدي و الشكل رقم (4) لتابع توزيع القوة المقترح :





الشكل (3) منحنى القوة الناتج باستخدام وظيفة توزيع القوة التقليدية

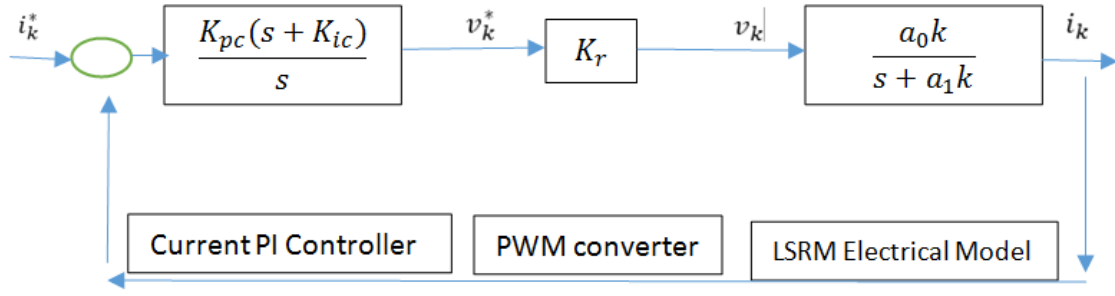


الشكل (4) منحنى القوة الناتج باستخدام وظيفة توزيع القوة المقترحة

و بالتالي نلاحظ أن قيمة الاضطراب الحاصل بالقوة المولدة باستخدام التابع التقليدي عند تبديل الطور يتراوح بين (496 N إلى 916 N) أما باستخدام التابع المقترح في بحثنا انخفض هذا الاضطراب إلى ( 920 N إلى 975N) بالمقارنة بين الشكلين 3 و 4 نجد أن تابع توزيع القوة المقترح بوجود مجموع القيم المطلقة لـ  $g_k$  تسبب زيادة سريعة بإعطاء التيارات المرجعية ، و جعل القوة المولدة ذات قيمة ثابتة تقريباً خلال عملية التبديل بين الأطوار الأربعة و هذا ما نحتاجه و نطمح إليه في المصعد الكهربائي المعتمد على المحركات الخطية ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة .

### 2-3 التحكم بالتيار :

يعتبر التحكم بالتيار من الأمور الهامة جداً" بسبب أن قوة الدفع تولد بشكل مباشر من تيارات الأطوار حيث تعطى معادلة تيار الطور بالشكل :



الشكل (5) المخطط الصندوقي للتحكم بالتيار

حيث أن :

$$a_{0k} = 1/L_k(x, i_k), a_{1k} = R_s/L_k(x, i_k), a_{2k} = g_k/L_k(x, i_k)$$

يتم التحكم بتيار الطور عن طريق تعديل توتر الدخل  $V_k$  ( و هو التوتر الناتج عن ( خرج ) مبدل القدرة أي دخل المحرك)

يتم التحكم بـ  $u_k$  ( توتر الدخل لمبدل القدرة و الناتج من المتحكم التكاملي التناسبي ) باستخدام متحكم تناسبي تكاملي :

حيث:

$K_{pc}$  : الكسب التناسبي للمتحكم PI ،  $K_{ic}$  : الكسب التكاملي للمتحكم PI

نلاحظ من الشكل (5) أن تابع النقل لحلقة التحكم بالتيار تستنتج كمايلي :

 $G_c(s)$  :

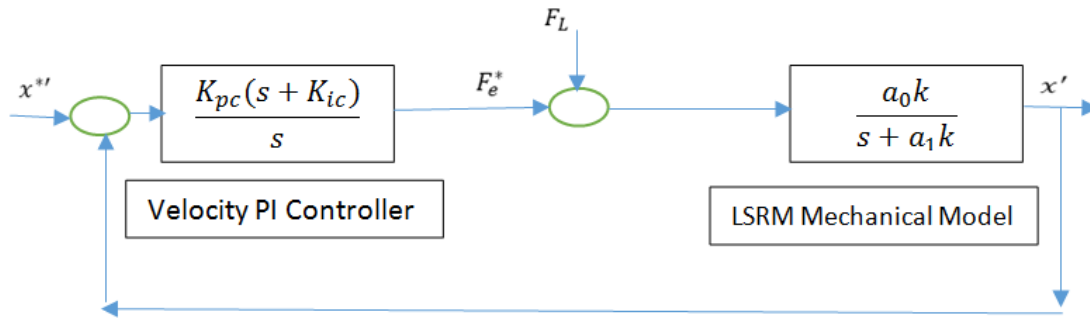
حيث :

 $K_r$  : كسب المبدلة

باستخدام عرض الموجة الترددي  $w_c$  ومعامل التخامد  $\beta$  لحلقة التحكم بالتيار يصبح الكسب بالشكل :

 $K_{pc}$ 

3-3 التحكم بالسرعة :



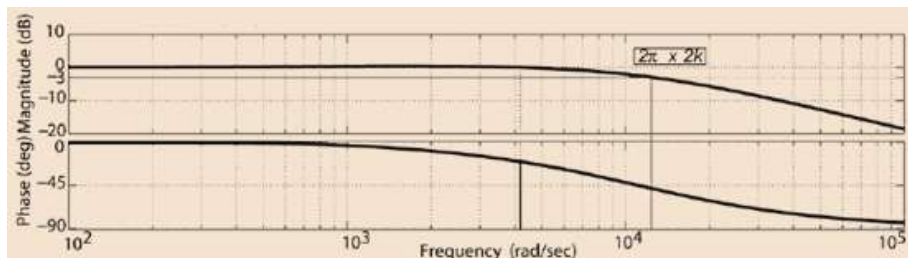
الشكل (6) المخطط الصندوقي للتحكم بالسرعة

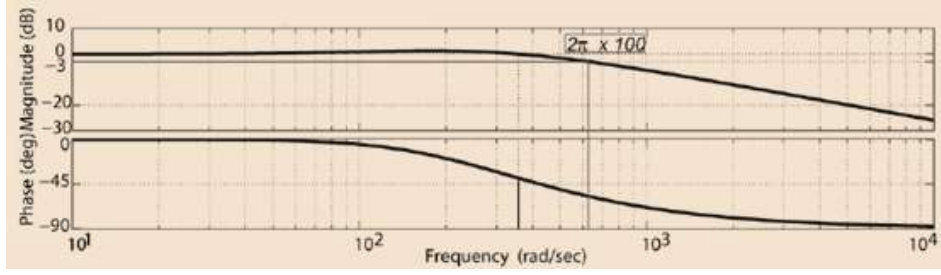
بما أن عرض المجال الترددي لحلقة التيار أكبر بكثير من عرض المجال الترددي لحلقة السرعة و على افتراض أن  $i_k^* \cong i_k$  أو  $F_x^* \cong F_x$  و عند تبسيط حلقة السرعة المبينة في الشكل (2) نصل إلى الشكل (6) و نصل إلى تابع النقل لمتحكم PI كمايلي :

حيث أن :

$K_{pv}$  الكسب التناسبي للتحكم PI بالسرعة ،  $K_{iv}$  : الكسب التكاملي للتحكم PI بالسرعة عند ضبط عرض المجال الترددي لحلقة السرعة  $\omega_v$  و معامل التخماد  $\beta$  يمكن الوصول إلى :

سنقوم في بحثنا بالمقارنة بين حلقة التحكم بالتيار و حلقة التحكم بالسرعة عن طريق رسم منحنيات الاستجابة الترددية لكل حلقة بواسطة برنامج الماتلاب عند القيم التالية :  $\omega_c = 2KHz$  و معامل التخماد  $\beta = 2$  لحلقة التحكم بالتيار و  $\omega_v = 100Hz$  و معامل التخماد  $\beta = 1$  لحلقة التحكم بالسرعة فنحصل على الشكل (7)



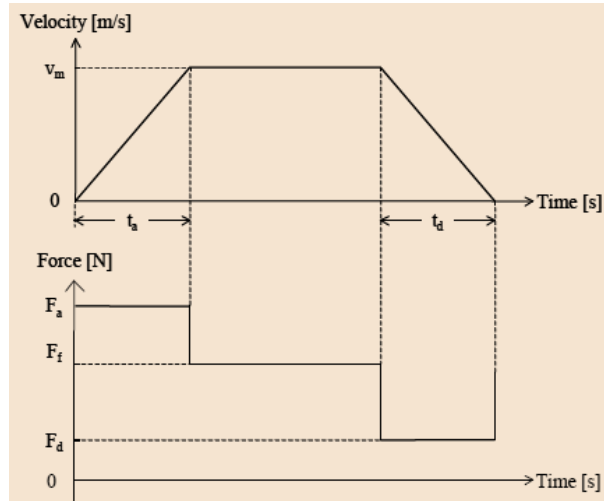


الشكل (7) منحنى الاستجابة الترددية لحلقة التحكم بالتيار في الأعلى و حلقة التحكم بالسرعة في الأسفل

بالمقارنة بين منحنىي الاستجابة الترددية الظاهرين في الشكل ( 7 ) نلاحظ أنه بالرغم من أن  $K_1$  متغير مرتبط بخصيية الطور  $L_k$  فإن أداء تابع التحكم بالتيار لا يعتمد على  $K_1$  لأن الجداء  $K_1 K_{pc}$  ثابت . كذلك يبدو أن المتحكم بالتيار المصمم مستقر بسبب الكسب العالي ، كما نلاحظ أن حلقة التحكم بالسرعة أبطأ بـ (5 إلى 10) مرات من حلقة التحكم بالتيار

### 3-4 التحكم بموضع المصعد :

يوظف نظام التحكم بالموضع لمصعد المحرك الخطي ذو الممانعة المتغيرة وضع السرعة ذات الشكل شبه المنحرف لتحقيق الركوب الناعم و الفعال لعربة المصعد بدون أي حركة اهتزازية . تحتوي السرعة ذات الشكل شبه المنحرف على أربع فترات و هي تسارع - سرعة ثابتة - تباطؤ - توقف . تصمم طريقة التحكم باستخدام أوضاع السرعة عن طريق حساب المسافة المتبقية كما في الشكل ( 2 ) . يبين الشكل ( 8 ) منحنى السرعة ذو الشكل شبه المنحرف والذي سستنتج منه العلاقات ( 18 ) و ( 19 ) للتحكم بالموضع سواء في حالات التسارع أو التباطؤ [1] حيث تعبر  $t_a$  عن زمن التسارع و  $F_a$  القوة خلال التسارع و  $t_d$  زمن التباطؤ و  $F_d$  القوة خلال التباطؤ .



الشكل (8) منحنى السرعة ذو الشكل شبه المنحرف و أوضاع القوة المقابلة

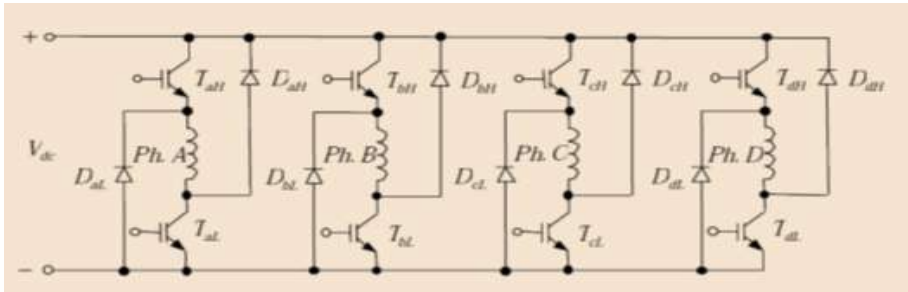
عند الصعود :

عند النزول :

حيث  $\alpha$  سرعة الرحلة .

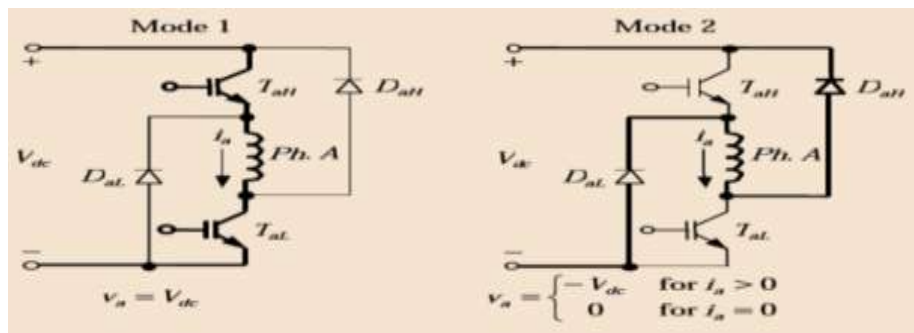
### 3-5-1 بنية مبدل القدرة :

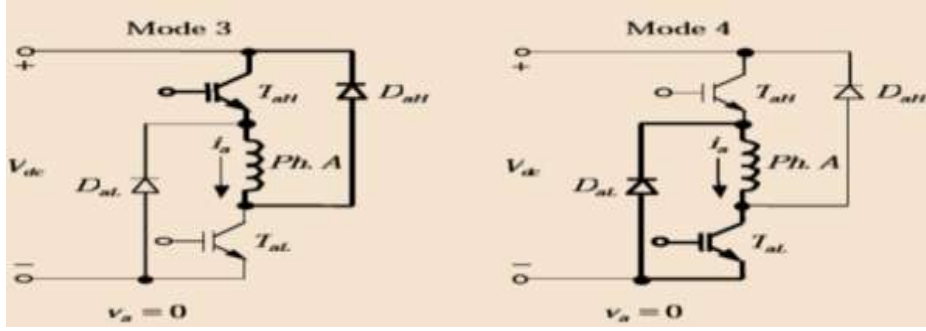
في هذا البحث سنختار مبدل قدرة مناسب للعمل في الربيعين و سنختار مبدل نصف جسري غير متناظر يمتلك القدرة على تقديم ثلاث حلقات للتوتر و هي حلقة التوتر الموجبة لتعمل على زيادة تيار الطور و حلقة التوتر السالبة التي تعمل على تخفيض تيار الطور و حلقة التوتر الصفرية للمحافظة على مستوى التيار المطلوب و يتميز بأنه ذو موثوقية عالية و خاصة في حالة العطل و مرونة كبيرة في التحكم والشكل (9) يبين نموذج المبدل [1].



الشكل (9) نموذج مبدل غير متناظر للتحكم بالمحرك الخطي ذو الممانعة المتغيرة

### 3-5-1 استراتيجيات التبديل :





الشكل ( 10 ) الحالات الأربعة لعمل المبدل للطور A

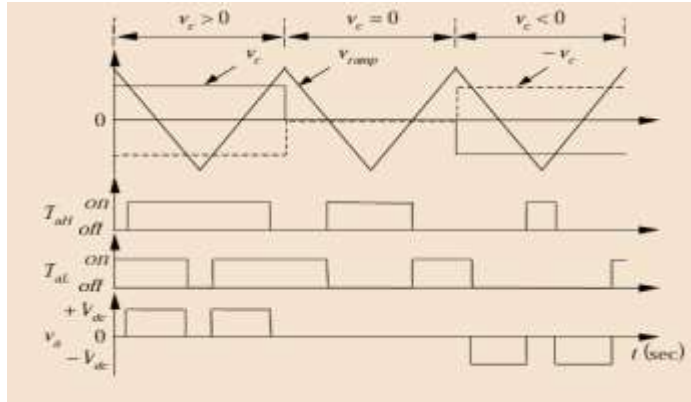
يوجد أربع حالات ممكنة لعمل الدارة في الشكل ( 9 ) لكل طور فالشكل ( 10 ) يبين هذه الحالات الأربعة للطور A

**في الحالة الأولى :** القواطع  $T_{al}, T_{ah}$  في حالة تشغيل والديودين  $D_{al}, D_{ah}$  في حال فصل وفي هذه المرحلة يكون  $V_{dc} = V_a$  ويزداد التيار في لفات الطور بسرعة لحقن الطاقة في لفات الطور .  
**في الحالة الثانية :** إذا كان  $I_a > 0$  يكون الديودات  $D_{al}, D_{ah}$  في حالة تشغيل أما القواطع  $T_{al}, T_{ah}$  في حالة فصل ويكون  $V_a = -V_{dc}$  يتدفق تيار الطور A من خلال كلا الديودين الحرين بقوة وهذا يؤدي إلى نقصانه بسرعة وتعود الطاقة من لفات الطور إلى التغذية .

إذا كان  $I_a = 0$  فإن الديودات  $D_{al}, D_{ah}$  والقواطع  $T_{al}, T_{ah}$  في حالة فصل وبالتالي يكون  $V_a = 0$   
**أما في الحالتين الأخيرتين** فإذا كان  $I_a > 0$  فإن القاطع والديود  $T_{al}, D_{al}$  في حالة تشغيل مع القاطع والديود  $T_{ah}, D_{ah}$  في حالة فصل أو القاطع والديود  $T_{ah}, D_{ah}$  في حال تشغيل مع القاطع والديود  $T_{al}, D_{al}$  في حالة فصل عندها يتناقص تيار الطور ببطء من خلال أحد القواطع مع أحد الديودات والطاقة لا تؤخذ ولا تعاد إلى التغذية المستمرة DC وإذا كان  $I_a = 0$  فإن الديودات  $D_{al}, D_{ah}$  والقواطع  $T_{al}, T_{ah}$  في حالة فصل يكون  $V_a = 0$  في كلا الحالتين .

يمكن للمبدل أن يعمل في كافة الحالات الأربعة السابقة أو في جزء منها وبالتالي فإن استغلال هذه الحالات الأربعة يتوقف على مواصفات التصميم . تسمى الحالتين الأخيرتين بحلقات التوتر الصفرية ذات الأهمية الكبيرة في تصغير توافقيات التيار غير المرغوبة عند أي عملية تبديل بالتردد وبالتالي نستطيع تخفيض الضياعات المغناطيسية للمحرك خلال أي فترة عند فصل و وصل قواطع المبدل لتخفيض التوتر المطبق على لفات الطور [1]العلاقة (20) خوارزمية التبديل حيث نعتمد مبدأ القيادة الشاقولية الخطية و يعطى توتر الخرج الوسطي  $v_a$  كما يلي :

$$v_a = \left\{ \right.$$

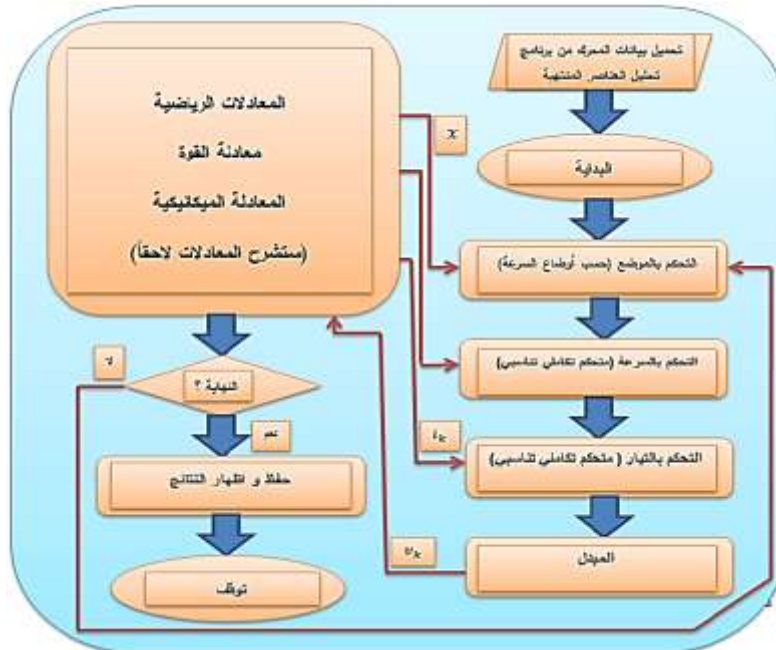


الشكل ( 11 ) خوارزمية التبديل بالاعتماد على مبدأ القيادة الشاقولية الخطية

#### 4- المحاكاة الديناميكية و تحقيق التحكم باستخدام الماتلاب:

سنقوم في هذا البحث بإجراء محاكاة ديناميكية باستخدام برنامج الماتلاب للتحقق من خوارزمية التحكم بالقوة باستخدام تابع توزيع القوة FDF المقترح بالإضافة إلى استراتيجيات التحكم بالتيار والسرعة والموضع و تمثيل بنية المبدل واستراتيجيات التبديل .

يبين الشكل (12) خوارزمية المحاكاة الديناميكية للمصعد حيث تعبر البداية في الخوارزمية عن طلب جديد للمصعد أما النهاية تعبر عن الوصول للطابق المطلوب مع ملاحظة ضرورة تحميل بيانات المحرك ( منحنيات الأداء ) الناتجة من برنامج تحليل العناصر المنتهية للمحرك الخطي المستخدم بدراستنا إلى برنامج الماتلاب قبل البداية بالخوارزمية ليتمكن نظام التحكم من معرفة تغيرات الفيض بالنسبة لكل من التيار و الموضع و هذا سنبينه لاحقاً .

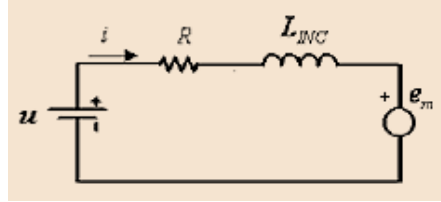


الشكل (12) خوارزمية المحاكاة الديناميكية للتحكم بالمصعد

#### 1-4 الموديل الرياضي غير الخطي و الدارة المكافئة للمحرك الخطي ذو الممانعة المغناطيسية المتغيرة :

تعطى معادلة التوتر لأحد أطوار المحرك الخطي ذو الممانعة المتغيرة مكون من m طور بالشكل التالي: [2]:

يبين الشكل (13) الدارة الكهربائية المكافئة لطور المحرك الخطي ذو الممانعة المغناطيسية المتغيرة حيث أن  $u$  هو التوتر المستمر المطبق  $i$  هو تيار الطور  $R$  هي مقاومة الطور  $L$  قيمة حثية الطور أما  $e_m$  هي القوة المحركة الكهربائية القادرة على تحريك الجزء المتحرك بالسرعة  $x'$



الشكل (13) الدارة المكافئة لطور المحرك

لذلك يمكن كتابة المعادلة (21) بالشكل التالي :

يتم حساب القوة الكهرومغناطيسية الفورية لأحد الأطوار من مجموع تغيرات القوة بالنسبة للموضع و ذلك عند تيار ثابت

تعطى القوة الكهرومغناطيسية الكلية بإهمال تأثير الحثيات المتبادلة بالعلاقة :

$$F_e = \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_0^1 \lambda(x, i) di \right) \right) \quad (23)$$

تعطى العلاقة التي تربط قوة المحرك بالحمل المطبق كمايلي :

حيث :

$m$ : الكتلة  $C$  : معامل الاحتكاك  $F_L$ : قوة الحمل المركب

بحل المعادلات (22) و (23) و (24) نحصل على المعادلتين (25) و (26). [2].

#### 2-4 نمذجة التحكم بمصعد مخبري ذو المحرك الخطي ذو الممانعة المغناطيسية المتغيرة باستخدام برنامج

الماتلاب :

سنقوم في هذا البحث بنمذجة مصعد مخبري ذو سرعة خطية عظمى مساوية إلى  $0.5$  [m/s] و زمن تسارع يقدر بـ  $0.25$  [s] و وزن العربة الكلي حوالي  $200$  [kg] باستطاعة محرك  $3$  [kw] و ارتفاع البناء المخبري  $2.4$  [m] حيث تم إيجاد كافة أبعاد المحرك الخطي ذو الممانعة المتغيرة اللازم لهذا المصعد و دراسة أداء هذا المحرك باستخدام برنامج تحليل العناصر المنتهية حتى حصلنا على منحنيات الأداء التي تشمل خصائص (فيض - تيار) من هذا البرنامج .

يحتوي نموذج المصعد ذو المحرك الخطي ذو الممانعة المغناطيسية المتغيرة على ثلاثة نماذج هي :

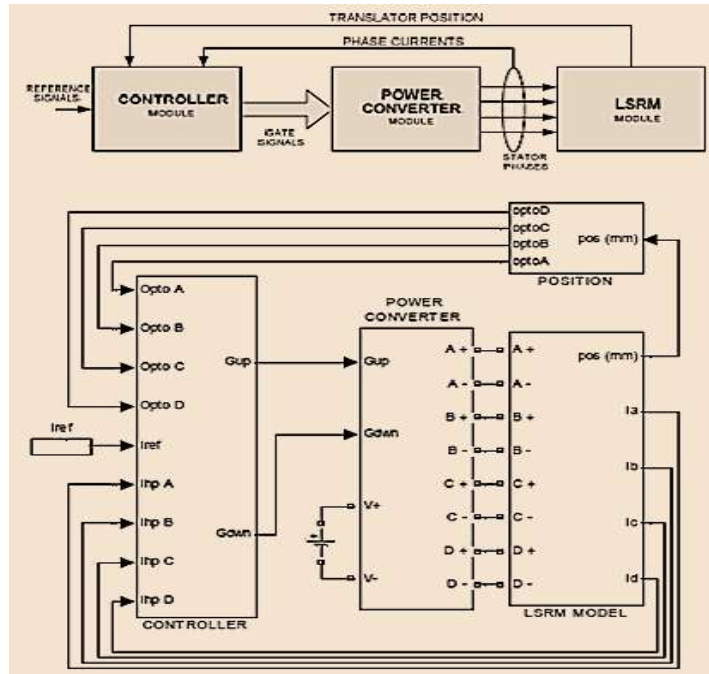


تمودج المحرك الخطي ذو الممانعة المتغيرة و يمثل كافة المعادلات الميكانيكية و الكهربائية للمحرك تمودج المبدل و يمثل عمل القواطع تمودج المتحكم و يمثل توليد إشارات تحكم ناتجة من الإشارات المرجعية المماثلة لها أما موضع المتحرك و تيارات الأطوار تعتمد على قوة الحمل المركب .

يبين الشكل ( 14 ) من الأعلى المخطط الصندوقي الكامل لعملية نمذجة نظام التحكم الذي يبين طريقة ترابط النماذج الثلاثة المذكورة أعلاه مع بعضها البعض للوصول إلى تمودج تحكم كامل بالمصعد .

يبين الشكل ( 14 ) من الأسفل تفصيل المخطط الصندوقي العلوي بكامل أجزائه و طريقة الترابط المفصلة لهذه الأجزاء حيث يتلقى المتحكم تغذية خلفية لكل من تيارات المحرك و تغذية خلفية أخرى عائدة من موضع المصعد من خلال حساسات مركبة ضمن بئر المصعد فيقوم المتحكم بإعطاء نبضات قرح مناسبة للمبدل الذي يقوم بعملية ابدال مبرمجة لأطوار المحرك حتى الوصول للموضع المطلوب .

و سنقوم الآن بنمذجة كل جزء من أجزاء المخطط الصندوقي لنظام التحكم بواسطة برنامج الماتلاب .



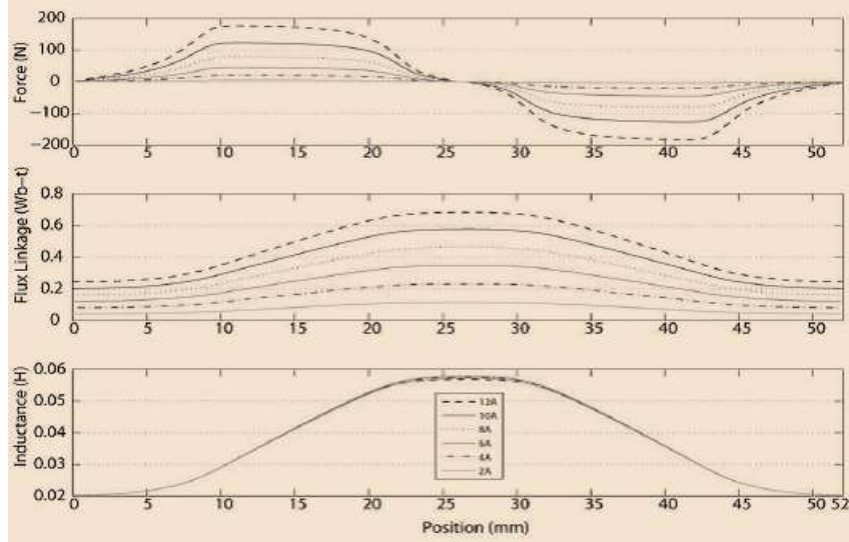
الشكل ( 14 ) المخطط الصندوقي للتحكم (في الأعلى) . موديل النمذجة الكامل للتحكم بالمصعد ( في الأسفل)

#### 4-2-1 نموذج المحرك الخطي ذو الممانعة المغناطيسية المتغيرة :

سنقوم في بحثنا ضمن هذه الفقرة بنمذجة المعادلتين النهائيةتين اللتين حصلنا عليهما من دراسة الدارة المكافئة للمحرك الخطي ذو الممانعة المغناطيسية المتغيرة و هما المعادلتين ( 25 ) و ( 26 ) التاليتين :

نلاحظ من هاتين المعادلتين أننا نحتاج في عملية النمذجة إلى تغيير الفيض (بدلالة الموضع و التيار) بالنسبة لتغيير التيار  $\frac{\partial \lambda(x,i)}{\partial i}$  أي تغيير ثلاثي الأبعاد ( فيض - تيار - موضع ) و نحتاج إلى تغيير الفيض ( بدلالة الموضع

و التيار) بالنسبة لتغير الموضع  $\frac{\partial \lambda(x,i)}{\partial x}$  كما نحتاج أيضاً إلى تغير السرعة بالنسبة للزمن وللحصول على هذه المتغيرات الثلاثة نقوم بتحميل بيانات المحرك من برنامج تحليل العناصر المنتهية و لكن سلبية برنامج تحليل العناصر المنتهية أنه يعطينا منحنيات ثنائية الأبعاد حيث يبين الشكل ( 15 ) هذه المنحنيات.



الشكل ( 15 ) المنحنيات الناتجة من برنامج تحليل العناصر المنتهية

نقوم بتحويل هذه المنحنيات من ثنائية البعد إلى ثلاثية البعد بواسطة العلاقات التالية :  
نقوم بإيجاد العامل  $K_{ee}$  الذي يعتمد على كثافة التيار و الموضع و يعطى بالعلاقة التالية :

حيث  $L_{end}$  هي حثية نهاية الملفات و التي تحسب من تحليل العناصر المنتهية أما  $K_f$  عبارة عن عامل

مساعد

و بالتالي نحصل على القيم ثلاثية الأبعاد من العلاقات التالية:

حيث أن  $\lambda_{2D}$  و  $L_{2D}$  عبارة عن الفيض و الحثية الناتجة من تحليل العناصر المنتهية ثنائية البعد بينما  $\lambda_{3D}$  و  $L_{3D}$  عبارة عن الفيض و الحثية في المستوي ثلاثي البعد .

نحصل على القوة ثلاثية الأبعاد  $W_{3D}$  بعد معرفة الفيض  $\lambda_{3D}$  حسب العلاقة التالية :

$$W_{3D}(x, i) = \int_0^I \lambda_{3D}(x, i) \cdot di \quad (30)$$

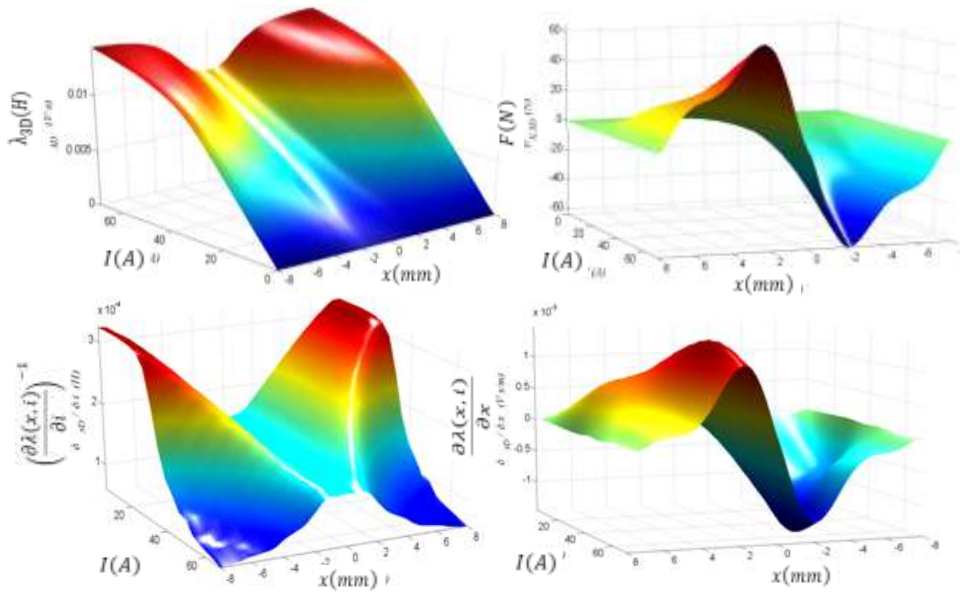
ثم يتم حساب قوة جر المحرك ثلاثية الأبعاد  $F_{x3D}$  من العلاقة :

$$F_{x3D}(x, i) = \frac{\partial W_{3D}(x, i)}{\partial x} \quad (31)$$

عند حدوث تغير صغير بقيمة الموضع بمقدار  $\Delta x$  و التيار  $\Delta I$  فإن العلاقة ( 31 ) تعطى بالشكل

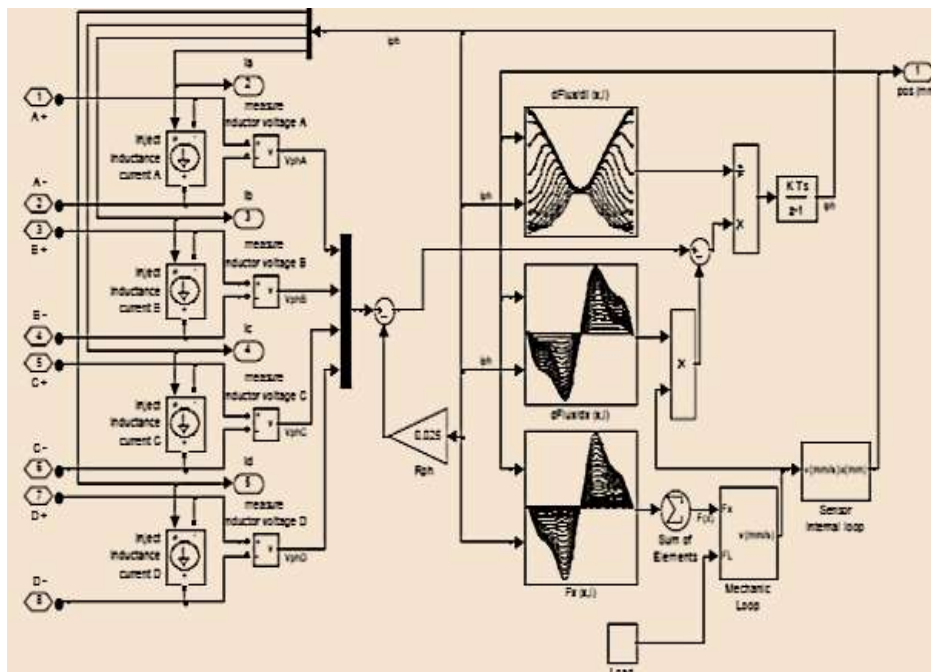
$$F_{x3D}(x, i) \approx \frac{\Delta W}{\Delta x} = \frac{\Delta I}{\Delta x} [\sum_0^I \lambda_{3D}(x + \Delta x, I) - \sum_0^I \lambda_{3D}(x, I)] \quad (32)$$

نقوم الآن باستخدام برنامج الماتلاب للحصول على شكل المنحنيات ثلاثية الأبعاد المطلوبة المبينة بالشكل (16) حيث المحور الأفقي الأول هو الموضع  $x$  و المحور الأفقي الثاني هو التيار  $i$ .



الشكل (16) المنحنيات ثلاثية البعد للخصائص المغناطيسية للمحرك

و الآن نقوم برسم نموذج المحرك بواسطة برنامج الماتلاب بالاستعانة ببعض أدوات البرنامج مع المنحنيات المبينة بالشكل (16) لنتمكن من برمجة المعادلتين (25) و (26) بشكل كامل لنصل للشكل (17)

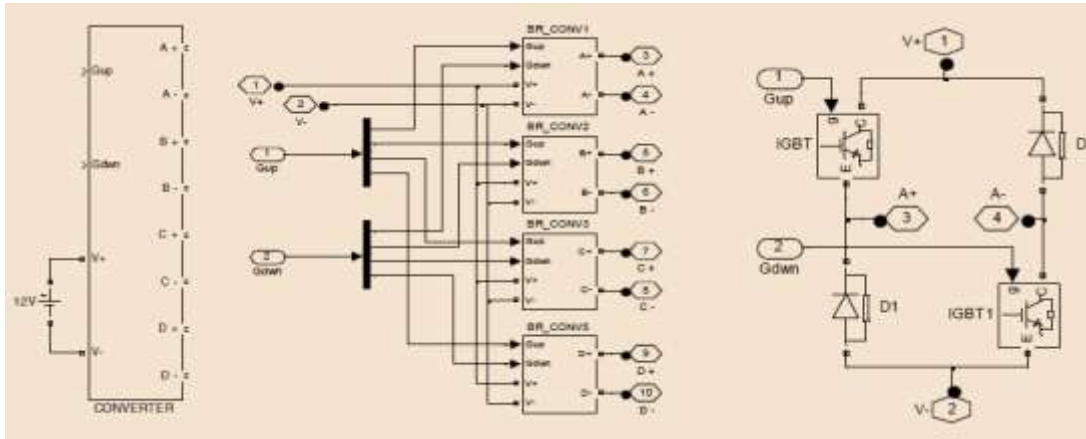


الشكل (17) موديل النمذجة الكامل للمحرك الخطي ذو الممانعة المغناطيسية المتغيرة

#### 4-2-2 نمذجة مبدل القدرة :

سنقوم بنمذجة بنية مبدل قدرة المبين في الشكل ( 9 ) و اللازم لتغذية المحرك باستخدام عناصر قدرة أنصاف نواقل من حقل Simpower system في برنامج الماتلاب و هي عبارة عن قواطع IGBT و ديودات بحيث نقوم بضبط محددات خاصة لقواطع IGBT مثل زمن الهبوط و زمن العمل بواسطة عداد و ذلك للحصول على أعلى قمة للتوتر و خاصة عند ترددات التبديل العالية .

يبين الشكل ( 18 ) من اليسار نموذج المبدل بالشكل النهائي و من الوسط التفاصيل الموجودة ضمن النموذج النهائي للأطوار الأربعة أما الجهة اليمينية فتبين تفاصيل و عناصر كل طور من الأطوار الأربعة حيث تم ترقيم مداخل و مخارج نموذج المبدل ليظهر لدينا بوضوح نقاط الربط مع الأرقام المتطابقة في بقية أجزاء نظام التحكم



الشكل (18). تفاصيل كل طور ( جهة اليمين ) تفاصيل نموذج المبدل (الوسط) . نموذج المبدل النهائي (جهة اليسار)

#### 4-2-3 نمذجة المتحكم :

يقوم المتحكم بجمع كافة إشارات التغذية الخلفية و التعرف على وضع المصعد الحالي ثم إعطاء نبضات القدر المناسبة للمبدل للوصول إلى الموضع المطلوب بناء على الطلبات الواردة للمصعد لذا فإن نمذجة المتحكم يشمل ثلاثة أجزاء :

الجزء الأول : هو عنصر مولد النبضات الذي يتلقى إشارات من موضع المصعد و يحولها إلى زوايا قدر مناسبة و سيتم شرح نمذجة هذا العنصر بالتفصيل في الفقرة القادمة .

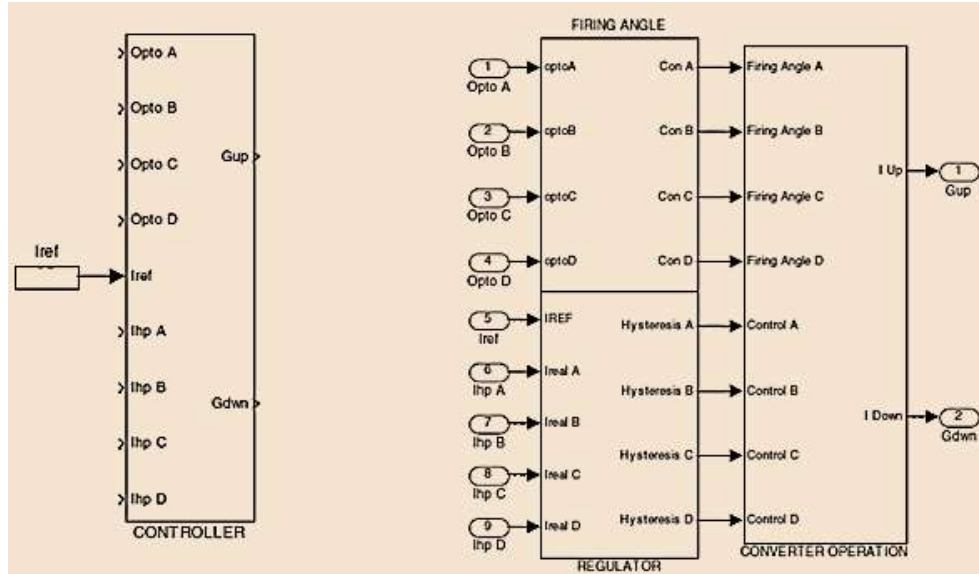
الجزء الثاني : هو المنظم الذي يتلقى تيارات الأطوار الفعلية و يقوم بمقارنتها مع التيارات المرجعية المطلوبة ليعطي إشارات التصحيح اللازمة التي تدخل إلى الجزء الثالث من المتحكم .

الجزء الثالث : هو المحول الذي يحول إشارات التصحيح مع زوايا القدر إلى نبضات القدر اللازمة للمبدل و بالتالي يكون نموذج المتحكم قد أدى وظيفتين أساسيتين هما :

الوظيفة الأولى : هي تنفيذ استراتيجية التحكم ضمن التحكم التسلسلي المتتابع لمختلف الأطوار بواسطة تابع توزيع القوة المقترح .

الوظيفة الثانية : هي توليد إشارات الأوامر ( نبضات القدر ) لتحديد التيار المطلوب توظيفه للعمل.

يبين الشكل ( 19 ) من اليسار نموذج المتحكم النهائي و من اليمين تفاصيل الأجزاء الثلاثة للمتحكم حيث تم ترقيم مداخل و مخارج هذا المتحكم ليظهر لدينا بوضوح نقاط الربط مع الأرقام المتطابقة في بقية أجزاء نظام التحكم .

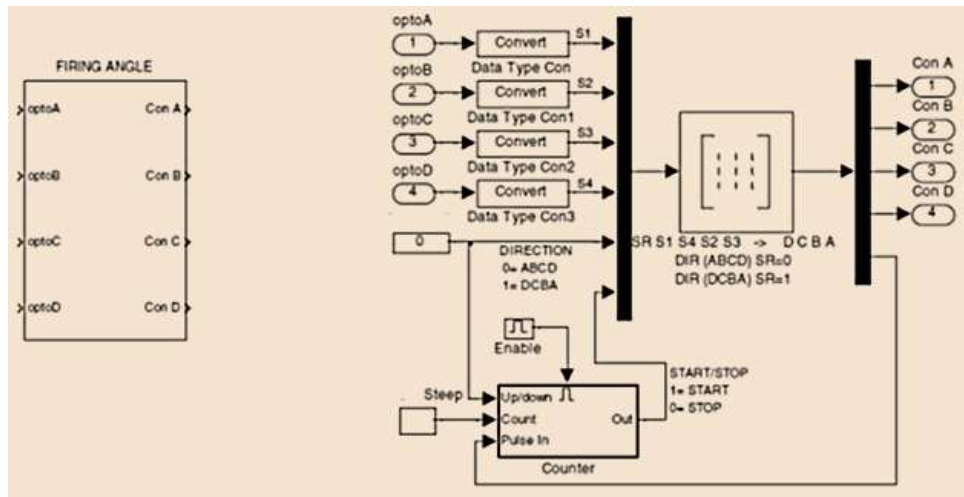


الشكل (19) تفاصيل النموذج (جهة اليمين) نموذج المتحكم (جهة اليسار) .

#### 4-2-4 نمذجة مولد النبضات :

يبين الشكل (20) نموذج مولد النبضات باستخدام مصفوفة الحقيقة مع عداد ففي المصفوفة يتم برمجة متواليات تبديل أطوار المحرك بواسطة عداد يبين عدد مواضع المتحرك و التي نستطيع الحصول عليها من الحسابات الخطية التي تبين موقع المصعد .

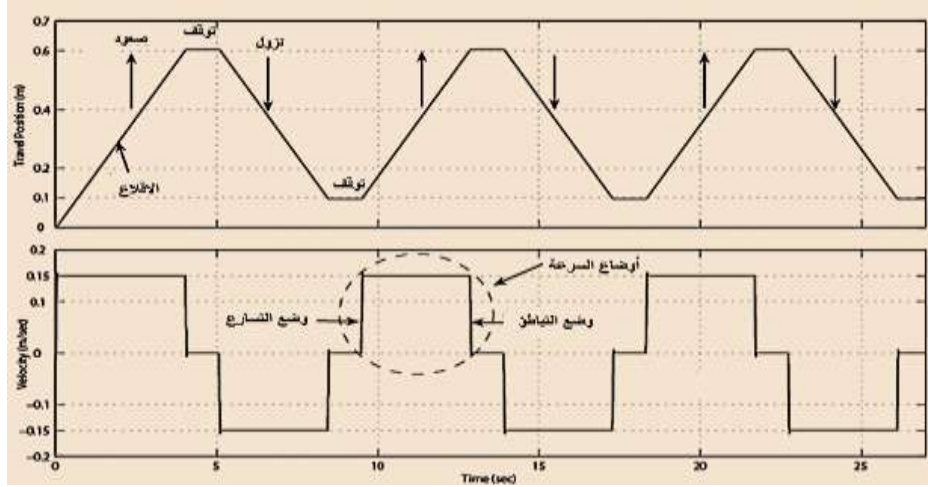
عند حدوث طلب جديد للمصعد فإن هذا الطلب يتضمن كل من رقم الطابق المطلوب الوصول إليه و اتجاه الحركة عندها مصفوفة الحقيقة تولد نبضات ناتجة من الجمع من إشارات الحسابات الخطية و عند ذلك يقوم العداد بعد هذه النبضات فإذا كانت " Enable " هي الفعالة عندئذ سيتولد على خرج العداد الرقم I الذي يعطي للمصفوفة أمر البدء و إعطاء أوامر العمل المناسبة و الرقم 0 عند انتهاء العمل و الوصول للطابق المطلوب .



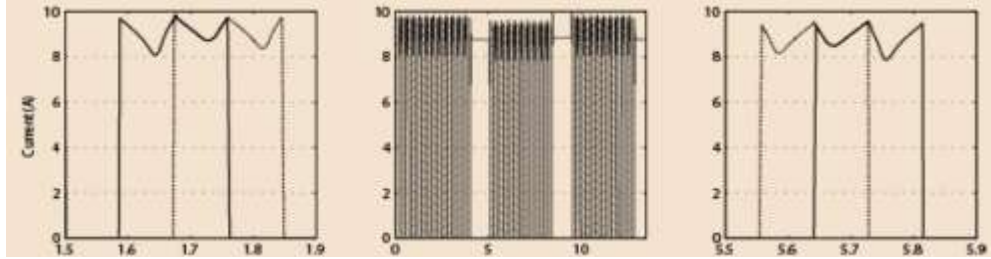
الشكل (20) تفاصيل النموذج (جهة اليمين) نموذج مولد النبضات (جهة اليسار)

## النتائج و المناقشة :

سنعرض فيمايلي نتائج النمذجة عند سرعات مختلفة و حمولات متغيرة مبينة عند كل شكل .

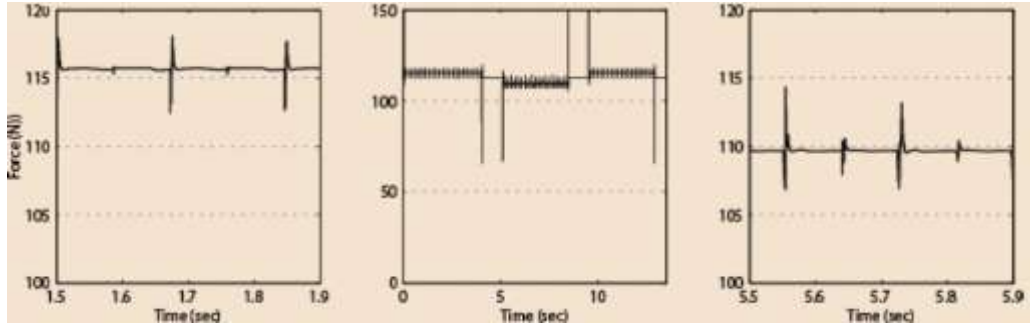


الشكل (a) نتائج النمذجة للتحكم بالسرعة و الموضع



تيار الطورين A,B أثناء التسارع      تيار الطورين A,B أثناء الانتقال      تيار الطورين A,B أثناء التباطؤ

الشكل ( b ) نتائج النمذجة للتحكم بالتيار



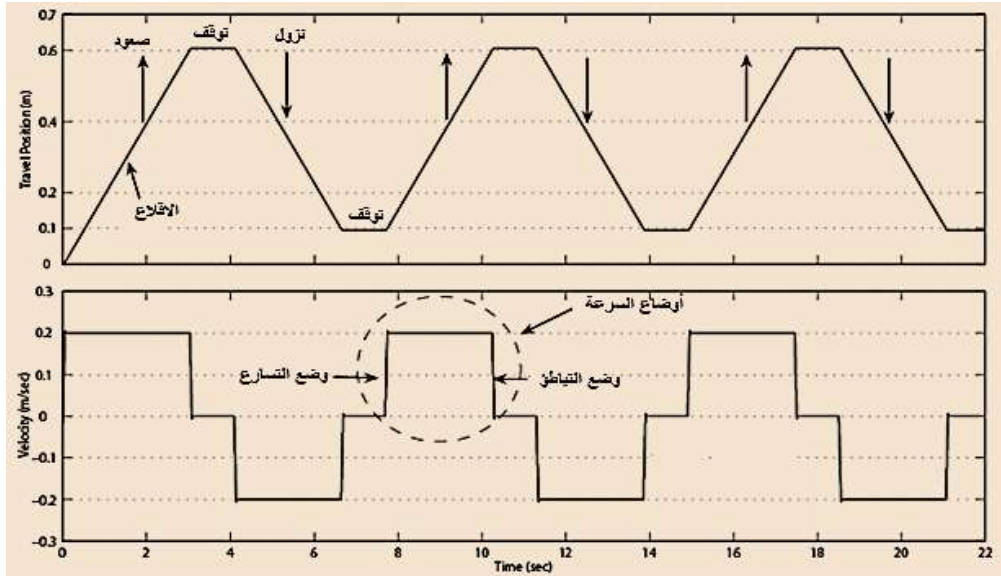
قوة الدفع أثناء التسارع

قوة الدفع أثناء الانتقال

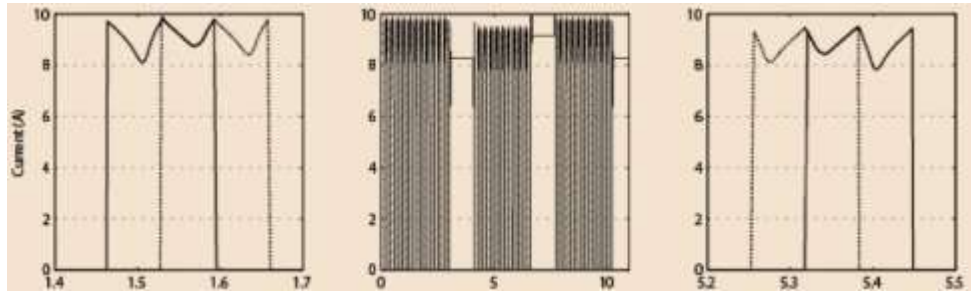
قوة الدفع أثناء التباطؤ

الشكل ( C ) نتائج النمذجة للتحكم بالقوة

الشكل (21) نتائج النمذجة باستخدام وظيفة توزيع القوة عند السرعة 0.15 m/s و الحمولة 23 كغ



الشكل (a) نتائج النمذجة للتحكم بالسرعة و الموضع

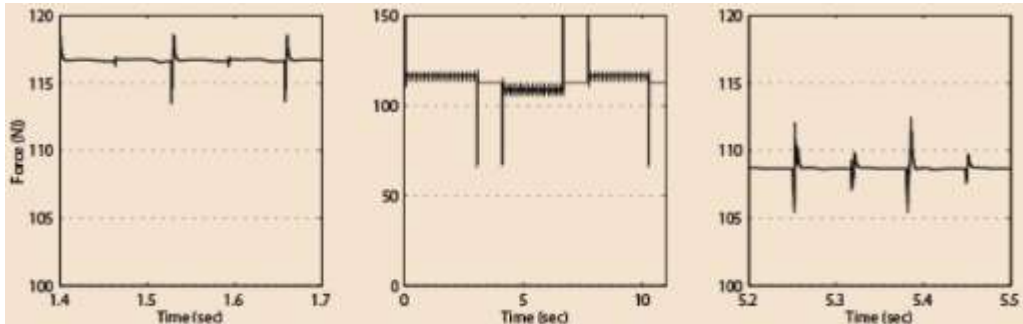


تيار الطورين A,B أثناء التسارع

تيار الطورين A,B أثناء الانتقال

تيار الطورين A,B أثناء التباطؤ

الشكل (b) نتائج النمذجة للتحكم بالتيار



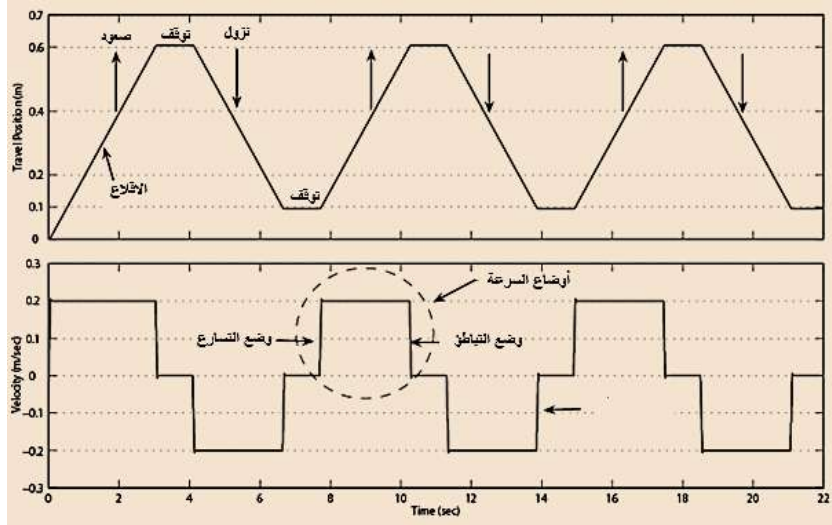
قوة الدفع أثناء التسارع

قوة الدفع أثناء الانتقال

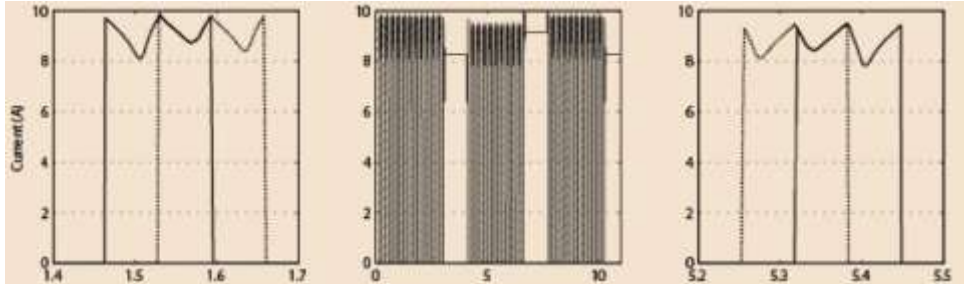
قوة الدفع أثناء التباطؤ

الشكل (c) نتائج النمذجة للتحكم بالقوة

الشكل (22) نتائج النمذجة باستخدام وظيفة توزيع القوة عند السرعة 0.2 m/s و الحمولة 23 كغ

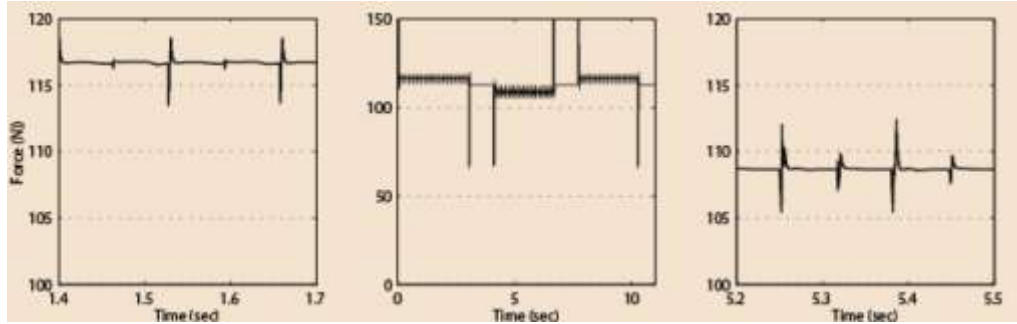


الشكل (a) نتائج النمذجة للتحكم بالسرعة و الموضع



تيار الطورين A,B أثناء التسارع      تيار الطورين A,B أثناء الانتقال      تيار الطورين A,B أثناء التباطؤ

الشكل (b) نتائج النمذجة للتحكم بالتيار



قوة الدفع أثناء التسارع

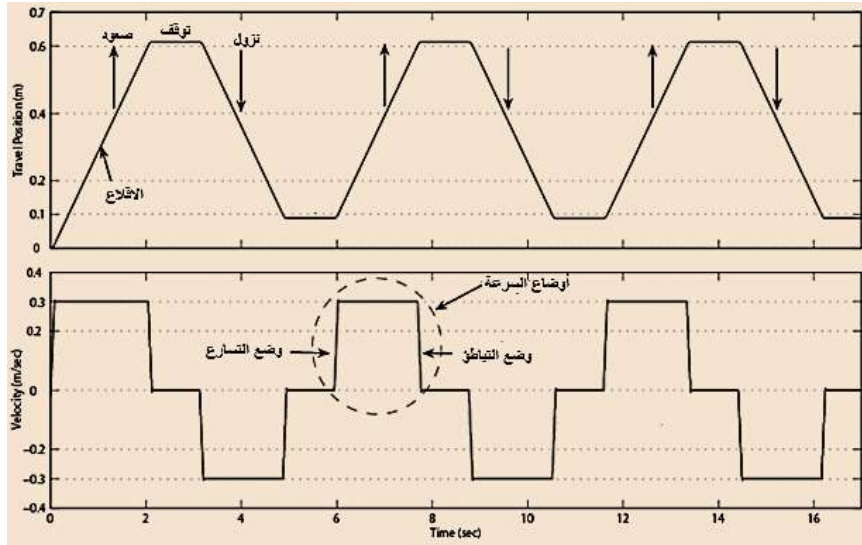
قوة الدفع أثناء الانتقال

قوة الدفع أثناء التباطؤ

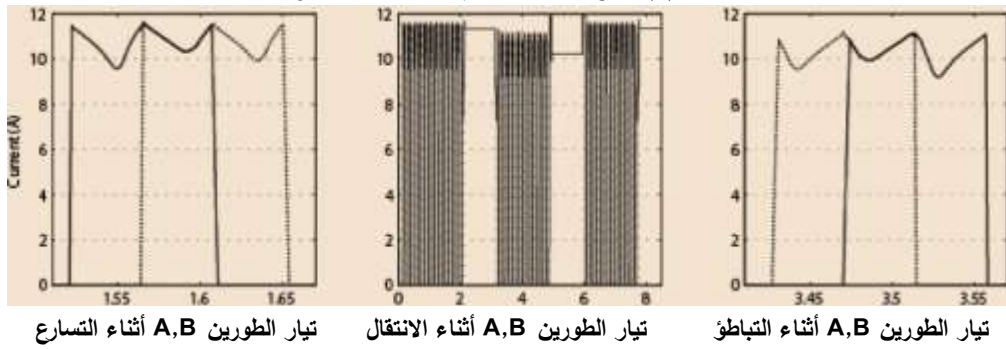
الشكل (c) نتائج النمذجة للتحكم بالقوة

الشكل (23) نتائج النمذجة باستخدام وظيفة توزيع القوة عند السرعة 0.2 m/s و الحمولة 32 كغ

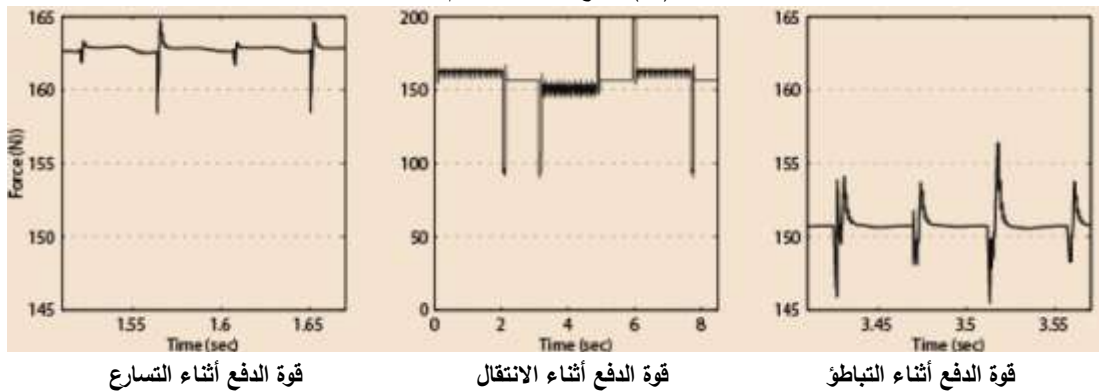




الشكل (a) نتائج النمذجة للتحكم بالسرعة و الموضع

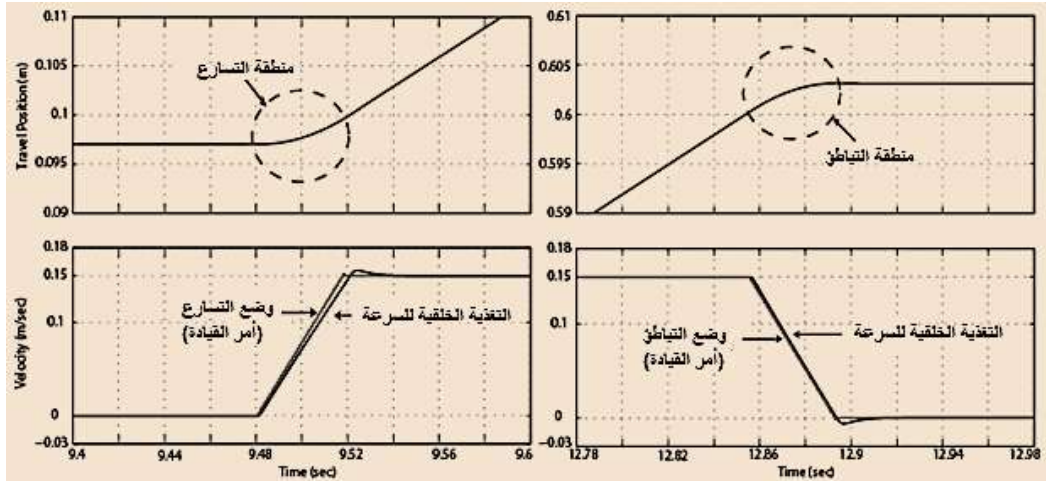


الشكل (b) نتائج النمذجة للتحكم بالتيار



الشكل (c) نتائج النمذجة للتحكم بالقوة

الشكل (24) نتائج النمذجة باستخدام وظيفة توزيع القوة عند السرعة 0.3 m/s و الحمولة 32 كغ



الشكل (25) أوضاع السرعة باستخدام وظيفة توزيع القوة عند السرعة  $0.15 \text{ m/s}$  و الحمولة  $23 \text{ كغ}$

نلاحظ من المقارنة بين الشكلين (3) و (4) نجاح وظيفة توزيع القوة المقترحة في هذا البحث في التخلص من الاضطرابات الناتجة أثناء توليد القوة و تفوقها على طرق التوزيع المتبعة في الأبحاث السابقة

يبين الشكل (21) نتائج النمذجة للتحكم بكل من الموضع و السرعة و التيار و القوة المولدة لنموذج المحرك الخطي ذو الممانعة المغناطيسية المتغيرة المصمم عند السرعة  $0.15 \text{ m/s}$  عند حمولة  $11.5 \text{ kg}$  لكل محرك مع العلم أن المصعد المخبري الموجود لدينا يحوي على محركين يركب كل محرك من جهة و بالتالي فإن الحمولة الكلية هي  $23 \text{ kg}$ .

نلاحظ من المنحنيات الناتجة في الشكل (21-a) أن المصعد قد تحرك ضمن كافة المواضع المطلوبة منه خلال مراحل الإقلاع و الصعود و التوقف و النزول و خلال مقارنتها مع المنحنيات الناتجة من التحكم بالسرعة نلاحظ أن العمل تم وفق منحنى السرعة ذو الشكل شبه المنحرف و هذا يدل على نجاح عمل نظام التحكم وفق المطلوب منه و يجب أن نلاحظ أن شبه المنحرف غير واضح في الشكل a كون مرحلة اقلاع المحرك ذات مدة قصيرة جداً لذا قمنا بتكبير هذه الفترة في الشكل (25) لإظهارها بشكل أوضح و تحديد منطقة التسارع و التباطؤ .

يبين الشكلين (21-b) و (21-c) تيارات الطورين a,b المتجاورين أثناء التسارع و الانتقال و التباطؤ و نلاحظ أن قوة الدفع أخذت قيم مختلفة عند كل حالة و نلاحظ بوضوح أيضاً نجاح طريقة توزيع القوة المقترحة في بحثنا للتخلص من الاضطرابات غير المرغوب فيها أثناء عمل المصعد .

الأشكال من (22) حتى (25) تبين نتائج النمذجة في الحالات التي تتغير فيها السرعة من  $0.2 \text{ m/s}$  الى  $0.3 \text{ m/s}$  و تغير الحمولة من  $23 \text{ kg}$  الى  $32 \text{ kg}$  حيث تظهر هذه النتائج مرونة و نجاح نظام التحكم في مختلف السرعات و الحمولات .

يبين الجدول رقم (3) ملخص نتائج النمذجة بشكل كامل .

الجدول (3) نتائج النمذجة عند تغير الحمولة و تغير السرعة

23 Kg						الحمولة [kg]
0.2 m/s			0.15 m/s			السرعة [m/s]
نزول	توقف	صعود	نزول	توقف	صعود	اتجاه الحركة
109	113	117	110	113	116	القوة [N]
8.8	0	9.2	8.9	0	9.1	التيار [A]
32 Kg						الحمولة [kg]
0.3 m/s			0.2 m/s			السرعة [m/s]
نزول	توقف	صعود	نزول	توقف	صعود	اتجاه الحركة
151	157	163	153	157	161	القوة [N]
10.4	0	10.8	10.5	0	10.7	التيار [A]

و بالتالي نكون قد قمنا بتصميم نظام تحكم متكامل للمصعد العامل بواسطة المحركات الخطية ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة و أثبتنا المرونة الكبيرة لهذا النظام بالعمل عند مختلف الحمولات و السرعات ليكون أحد الأسس المتبعة في تصميم هذا النوع من المصاعد مستقبلاً .

### المراجع :

- [1] H.K.Bae , B.S.Lee , P.Vijayrang havan , and R. Krishnan , (2000.oct ) " A Linear Switched Reluctance Motor : Converter and Control"; *IEEEtrans on Industry Application* . vol 36 , p.p 1351-1359.
- [2] B.S.Lee,H.K.Bae,P.Vijayran ghavan ,and R.Krishnan,(2000,Dec), "Design of a Linear Switched Reluctance Machine ". *IEEEtrans . on Industry Application*, Vol 36,p.p 1571-1580.
- [3] W.C.Gan; N.C.Cheung; L.Qiu ; (2004.Oct)" Position control of linear switched reluctance motor for high-precision applications";*IEEEtrans on Industry Application* . vol 39 , p.p 1350-1362.
- [4] B.S. Lee, (2002.Nov) "Linear Switched Reluctance Machine Drive with Electromagnetic Levitation and Guidance Systems"; Ph.D. Thesis in The Bradely Department of Electrical & Computer Engineering, Virginia Tech. Blacksburg, Virginia.
- [5] C.T. Liu and T.S. Chiang, (2006.July),"On the magnetic saturation analyses of micro linear switched-reluctance motor "*IEEEtrans . on Magnetics*, Vol 40,Issue 4, Part 2, p.p 2861-2867.

[6] D.S.Schramm,B.W. Williams , and T.C.Green, ( 2009.June)," Force ripple reduction of switched reluctance motors by phase current optimal profiling " *Proc . IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference* .p.p 857 - 863.

[7] Han-Kyung Bae , ( 2001.Aug) " Control of Switched Reluctance Motor Considering Mutual Inductance ". Ph . D. Thesis in The Bradley Department of Electrical & Computer Engineering , Virginia Polytechnic Institute &State University.

[8] H.K. Bae and R.Kishnan (2000.Oct) ," A study of current controllers and development of a novel current controller for high performance SRM drives,*Conf. Rec.of IEEE Industry Applications Conference* , Vol 1, p.p 68-77.

[9] Guo Wei ; Zhan Qianghua ; Ma Zhiyuan (2008.Aug) " A new current control mode for switched reluctance motor drive with DSP controller " ,*Proc.of IEEE Fifth International Conference on Electrical Machines and systems* Vol 2, p.p 1017-1025.