

## نمذجة تحليلية لمحرك ذي ممانعة مغناطيسية متغيرة SRM8/6

### والتحكم بالتيار باستخدام المنظمات البطانية

فاتح رشيد بسو

قسم هندسة القيادة الكهربائية، كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية، جامعة حلب

#### الملخص

تستخدم الآلة ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة Switched Reluctance Motor (SRM) في العديد من التطبيقات التي تتطلب وثوقية عالية ومجال واسع من تغير السرعة عند استطاعة ثابتة، وتكاليف تصنيع منخفضة واستجابة ديناميكية عالية.

تم من خلال هذا البحث إعطاء النموذج الرياضي التحليلي للمحرك ذي الممانعة المغناطيسية المتغيرة (SRM 8/6) باستخدام المحارضة الديناميكية، والذي يأخذ بالاعتبار تأثير الاثباع المغناطيسي على الفيض المتشابه.

كما تم في هذا البحث اقتراح نظام قيادة للمحرك (SRM 8/6) اعتماداً على المتحكم البطاني Hysteresis controller بهدف تنظيم التيار وتخفيض تموجات العزم والضحج المسموع. يتميز المتحكم البطاني بأنه يؤمن على خرج مباشر نبضات الوصل والفصل لقلبية الجهد ثلاثية الطور دون المرور بمرحلة وسيطة كمرحلة تعديل عرض النبضة (Pulse Width Modulation (PWM).

تم تمثيل النموذج الرياضي في بيئة Matlab/Simulink وبناء عليه تم استعراض أهم النتائج ومناقشتها.

الكلمات المفتاحية: محرك ذو ممانعة مغناطيسية متغيرة، المنظم البطاني، التحكم بالتيار.

ورد البحث للمجلة بتاريخ 2011/ /

قبل النشر بتاريخ 2011/ /

## 1- مقدمة

يتميز المحرك ذو الممانعة المغناطيسية المتغيرة SRM بمجموعة من المميزات الإيجابية مقارنة مع الأنظمة التقليدية للقيادة الكهربائية مما يجعله مناسباً لكثير من التطبيقات.

من أهم مميزات وخصائص محرك (SRM) [КОЛОМЕЙЦЕВ et (SRM) : БИБИКОВ,2008]

- بساطة ومثانة الدارة المغناطيسية للثابت والدوار، وشائع الملفات لا تملك تقاطعاً للأجزاء الجبهية للملفات، وثوقية عالية، عمر استثماري كبير، صيانة سهلة.
- تغير قليل للمردود في مجالات كبيرة لتغير الاستطاعة.
- الضياعات في حديد الدوار ليس كبيراً وهذا لا يتطلب وجود وسائل إضافية لطرح الحرارة.
- بنية بسيطة، مجال واسع لتغير السرعة، وعزم كبير.

إن البحث الحالي يصف نموذجاً رياضياً باستخدام الطريقة التحليلية لمحرك SRM 8/6، ولتخفيض تموجات العزم تم استخدام متحكم غير خطي بالتيار هو المتحكم البطاني Hysteresis controller والذي يتميز بالفعالية والسهولة عند التطبيق.

## 2- أهمية البحث:

تكمن أهمية هذا البحث في إيجاد النموذج الرياضي لمحرك ذي ممانعة مغناطيسية متغيرة SRM 8/6 باستخدام متحكم بالتيار اعتماداً على مبدأ Hysteresis controller مع الأخذ بالاعتبار تأثير الإشباع المغناطيسي على الفيض المتشابه لملفات الطور الواحد في المعادلات الرياضية التي تصف التبديل الكهروميكانيكي للطاقة. تم دراسة نبضات الوصل والفصل على المحرك ونظام القيادة وذلك للحصول على إشارة جيدة للعزم ذات مطال صغير لتأرجحات العزم.

## 3- طريقة البحث:

تعتمد طريقة البحث على إيجاد النموذج الرياضي التحليلي مع الأخذ

بالاعتبار تأثير الإشباع المغناطيسي على الفيض المتشابه للملفات باستخدام مستحکم البطائي للتحكم بالتيار، وتمثل هذا النموذج في بيئة Matlab/Simulink للحصول على معيزات المحرك.

#### 4- منهجية البحث:

المعادلات الرياضية التي تصف عملية التحويل الكهروميكانيكي للطاقة في

محرك SRM 8/6 لكل طور [KAMPER et RASMENI, 2007]:

$$U = Ri + \frac{d[L(\theta)i]}{dt} = Ri + L(\theta) \frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (1)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{em} - T_d \quad (2)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

حيث:  $U$  - جهد التغذية،  $R$  - المقاومة الكهربائية لملف الطور الواحد،  $i$  - تيار الطور الواحد،  $T_{em}$  - العزم الكهرومغناطيسي الذي يعطيه المحرك،  $T_d$  - العزم المقاوم،  $\omega$  - السرعة الزاوية للمحرك،  $J$  - عزم عطالة المحرك،  $t$  - الزمن،  $\theta$  - زاوية موضع الدوار.

بما أن الفيض المتشابه للملفات الطور الواحد في محرك SRM8/6 تابعة

لتيار الطور  $i$  وزاوية دوران الدوار  $\theta$  أي [KANERVA et ARKKIO, 2005]:

$\Psi = L(\theta, i)i$  فإن معادلة توازن الجهد (1) تكتب بالشكل التالي:

$$U = Ri + \left\{ L(\theta, i) + \frac{d[L(\theta, i)]}{di} i \right\} \frac{di}{dt} + \left\{ \frac{d[L(\theta, i)]}{d\theta} i + L(\theta, i) \frac{di}{d\theta} \right\} \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

وبالإصلاح نجد:

$$U = Ri + L_{dyn} \frac{di}{dt} + E [I, \theta, \omega, L(\theta, I)] \quad (5)$$

حيث أن  $L_{dyn}$  المحارضة الديناميكية للطور، يتم الحصول عليها من

النمذجة الرقمية لمحرك SRM باستخدام طريقة العناصر المنتهية FEM.

تُحسب الطاقة الكهربائية من العلاقة (4) بعد جداء الطرفين بالتيار فنجد:

$$Ui = Ri^2 + iL_{dyn} \frac{di}{dt} + L(\theta, i)i\omega \frac{d\theta}{dt} + \omega i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (6)$$

حيث :

$$W_{mech} = \omega i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta}$$

بالنسبة لزاوية دوران الدوار  $\theta$  أي الجزء من الطاقة الكهربائية المتحوّلة إلى طاقة ميكانيكية .

$$W_{mag} = iL_{dyn} \frac{di}{dt} + L(\theta, i)i\omega \frac{d\theta}{dt}$$

الطاقة المغناطيسية المخزنة في الملفات والناجمة عن تغير التيار

بالنسبة لزاوية دوران الدوار .

$$iL_{dyn} \frac{di}{dt}$$

للزمن  $t$  .

ويعطى الطاقة الكهربائية بشكلها التفاضلي بالعلاقة التالية :

$$dW_{el} = U i dt = Ri^2 dt + dW_{mag} + dW_{mech} \quad (7)$$

بجداء طرفي المعادلة (6) ب  $dt$  وبالإصلاح نجد :

$$U i dt = Ri^2 dt + iL_{dyn} di + L(\theta, i) i d\theta + i^2 dL(\theta, i) \quad (8)$$

في الحالة الخطية الشكل التفاضلي لعلاقة الطاقة المغناطيسية كنابع للتحريضية وللتيار تعطى بالعلاقة:

$$dW_{mag} = \frac{1}{2} i^2 L(\theta, i) + L(\theta, i) i di \quad (9)$$

بمقارنة (7)، (8)، (9) نجد :

$$dW_{mag} = [L_{dyn} + L(\theta, i)] i di + \frac{1}{2} i^2 dL(\theta, i) \quad (10)$$

$$dW_{mech} = \frac{1}{2} i^2 dL(\theta, i) \quad (11)$$

والعزم يساوي:

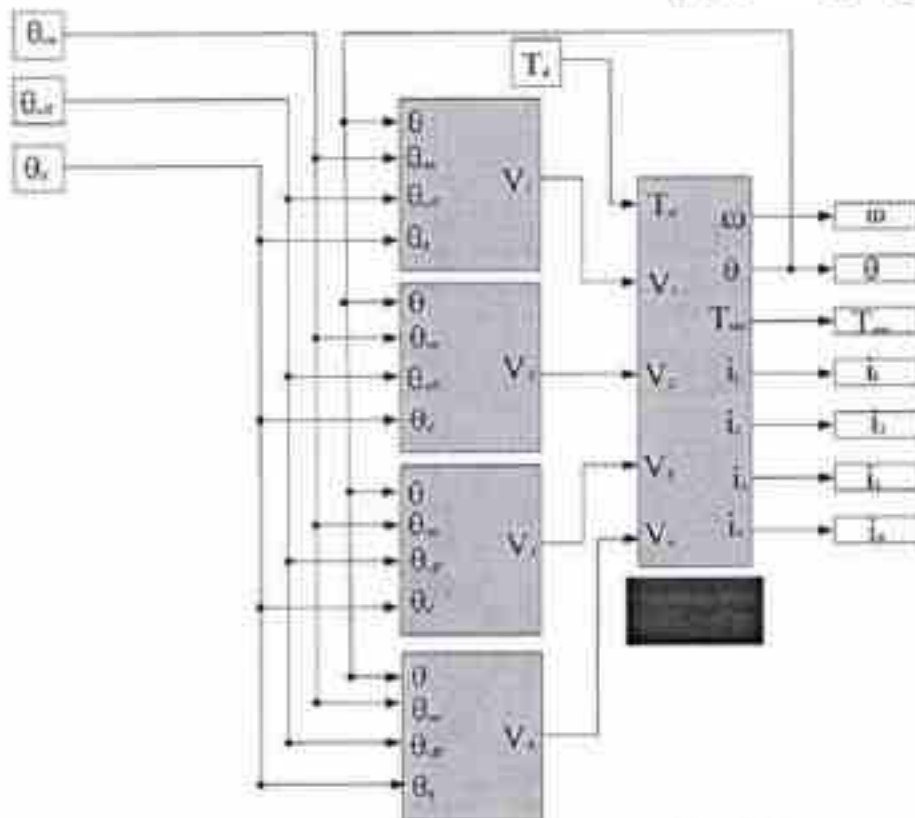
$$T(\theta, i) = \frac{dW_{mech}}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (12)$$

## 5- تمثيل النموذج الرياضي لمحرك SRM8/6 في بيئة Matlab/Simulink:

5-1- تمثيل النموذج الرياضي لمحرك SRM8/6 بدون استخدام متحكم التيار Hysteresis controller في بيئة Matlab/Simulink:

تمثل المعادلات (2)، (3)، (5) النموذج الرياضي لمحرك SRM8/6. للحصول على  $L_{\theta_{ij}}$  يتم نمذجة المحرك رقمياً باستخدام طريقة العناصر المنتهية FEM ثم نحسب الحقل المغناطيسي لمحرك SRM8/6 باستخدام برنامج FEMM4.2 عند زوايا دوران مختلفة وبناءً عليه يتم تحديد التغير في قيمة المحارضة نتيجة تغير قيمة التيار [ KYZHELOOB et MATBEEB, 2008 ]. النتائج موضحة في الجدول (1).

بالاعتماد على المعادلات السابقة نرسم نموذج المحرك في بيئة Matlab/Simulink وذلك بعد حساب زوايا الفتح وزوايا الإغلاق لكل طور كما هو موضح على الشكل (1).



الشكل (1) مخطط النموذج باستخدام ماتلاب بدون استخدام متحكم التيار

$\theta$ [deg.]	m.m.f.	L dyn=f(l)			
		bs=7mm	bs=7.4mm	bs=7.8mm	bs=8.2mm
30	200	67.6384	69.0336	75.4704	77.9544
	300	43.27136	52.4774	53.64576	55.07136
	400	21.9672	26.9288	26.136	25.9416
	500	14.14368	15.8976	15.8544	15.83928
	600	11.9384	13.7484	14.4221	13.36608
	750	8.9208	11.4696	12.69	11.8692
	1000	6.0048	5.8104	5.6808	7.9488
26	200	54.6632	58.6872	62.8344	65.6856
	300	53.00216	55.0994	58.36104	60.0912
	400	28.7928	34.8192	35.8776	34.668
	500	15.91704	19.77912	21.6604	20.82672
	600	12.40488	13.57344	14.27392	13.91904
	750	11.3802	12.4524	12.846	11.5344
	1000	10.8408	8.856	7.992	7.6248
19.5	200	39.8024	40.4352	43.7616	46.3928
	300	37.3724	39.76344	42.49368	45.75744
	400	29.5056	32.6376	32.9408	33.4368
	500	17.86336	23.04072	24.80312	22.07952
	600	14.45904	16.3296	16.10733	15.80904
	750	11.934	13.888	15.442	14.256
	1000	10.3248	9.4824	11.664	9.8928
13	200	20.444	20.8764	24.2568	26.0496
	300	20.1744	20.836	23.88312	25.53112
	400	18.1332	20.0124	21.24144	23.44896
	500	16.3944	17.3448	17.29944	17.23853
	600	15.31872	15.69888	16.30152	15.7276
	750	14.418	14.93856	15.0487	14.9904
	1000	13.36416	13.2948	14.1912	13.61016
6.5	200	11.82168	11.82816	12.78504	12.906
	300	11.82319	11.83032	12.78504	12.90816
	400	11.82384	11.83032	12.78504	12.90816
	500	11.82816	11.83248	12.78504	12.91032
	600	11.83162	11.83464	12.79152	12.91464
	750	11.83464	11.8368	12.79584	12.92752



12.9168	12.79584	11.8368	11.83896	1000
---------	----------	---------	----------	------

الجدول (1): تغير المحارضة الديناميكية مع تغير التيار من أجل زوايا دوران مختلفة

يتم اختيار قيمة زاوية الفتح  $\theta_m$  بحيث يمكننا من زيادة قيمة تيار الطور إلى القيمة المرغوبة وذلك عندما تكون المحارضة بقيمة أصغريه. إن مبدأ التحكم بالآلة SRM يعتمد على قيمة محارضة الطور للآلة SRM، فمن أجل العمل كمحرك يتم تهييج الطور في اللحظة التي تزداد فيها المحارضة. من أجل العمل كمولد يتم تهييج الطور في اللحظة التي يتم فيها تناقص المحارضة [ МАЛАФЕЕВ et ЗАХАРОВ, 2006 ] .

- نتائج النمذجة :

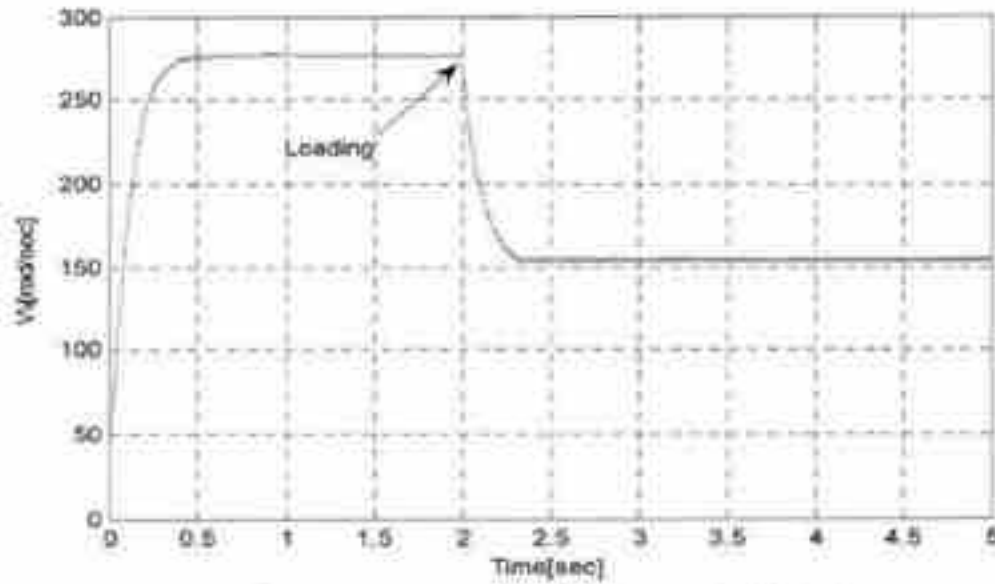
إن نتائج النمذجة هي لمحرك رباعي الطور SRM 8/6 والجدول (2) يوضح المعطيات الأساسية لهذا المحرك المصمم في جامعة خاركوف التقنية. إن الغاية من هذه النمذجة هو توضيح مدى استجابة هذا المحرك عند تغير زوايا الإغلاق.

معطيات ملفات الأقطار		معطيات الدوار		معطيات الثابت	
300 Tr.	عدد الأقطار لغات الطور الواحد	6	عدد الأقطاب	8	عدد الأقطاب (رباعي الطور)
9.7 mm	ارتفاع الملف $h_1$	21.2mm	نصف القطر الخارجي	43 mm	نصف القطر الخارجي
4.5mm	عرض الملف $b_1$	12mm	نصف القطر الداخلي	21.5mm	نصف القطر الداخلي
		22.853°	زاوية قطب الدوار	0.3 mm	طول الفرجة الهوائية 8
		287 rad/sec	سرعة دوران الدوار	20.902°	زاوية قطب الثابت $\beta_1$
		8.4mm	عرض القطب	15.5mm	ارتفاع قطب الثابت $h_2$
		9.2mm	ارتفاع القطب	7.8 mm	عرض قطب الثابت
		7mm	للقطر الخارجي	36 mm	طول المحرك

			لمحور الدوران	6 mm	ارتفاع قلب الثابت
--	--	--	---------------	------	-------------------

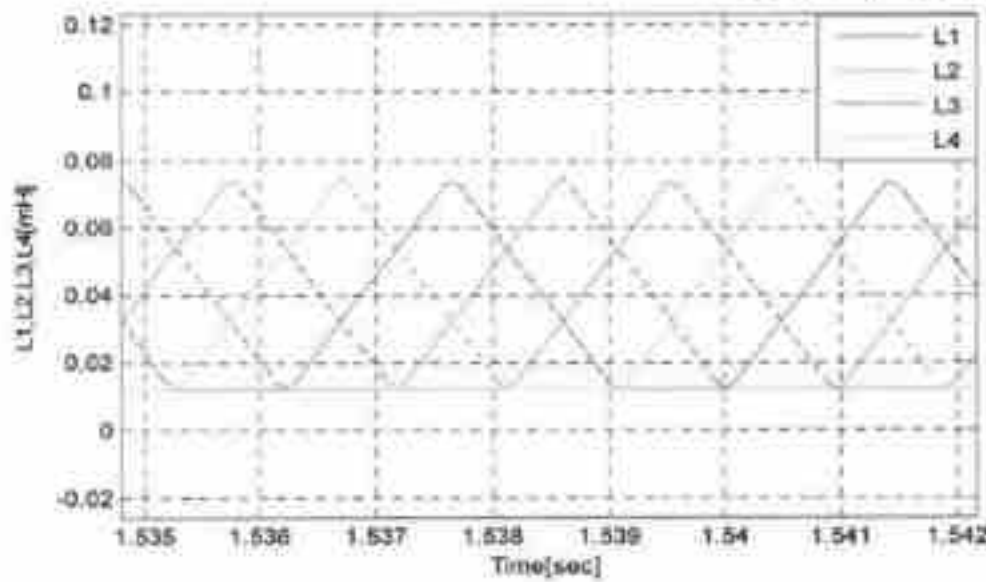
الجدول (2): معطيات المحرك المستخدم

يوضح الشكل (2) علاقة تغير السرعة مع الزمن وذلك بتغيير زاوية الإغلاق للحصول على أكبر سرعة ممكنة.



الشكل (2): إشارة السرعة بدلالة الزمن مع تغيير زاوية الإغلاق

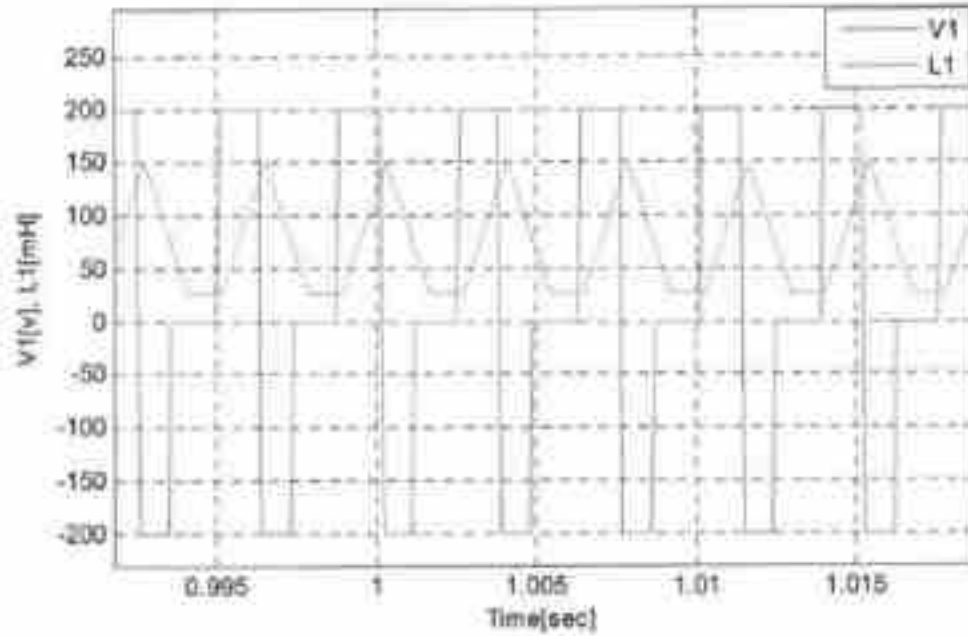
يوضح الشكل (3) منحنى تغير عامل التحريض الديناميكي للأطوار الأربعة وكل منحنى يكرر نفسه بدور مقداره (90) درجة وكل منحنى مزاح عن الآخر بزاوية (30) درجة.



الشكل (3): منحنى تغير عامل التحريض الديناميكي للأطوار الأربعة

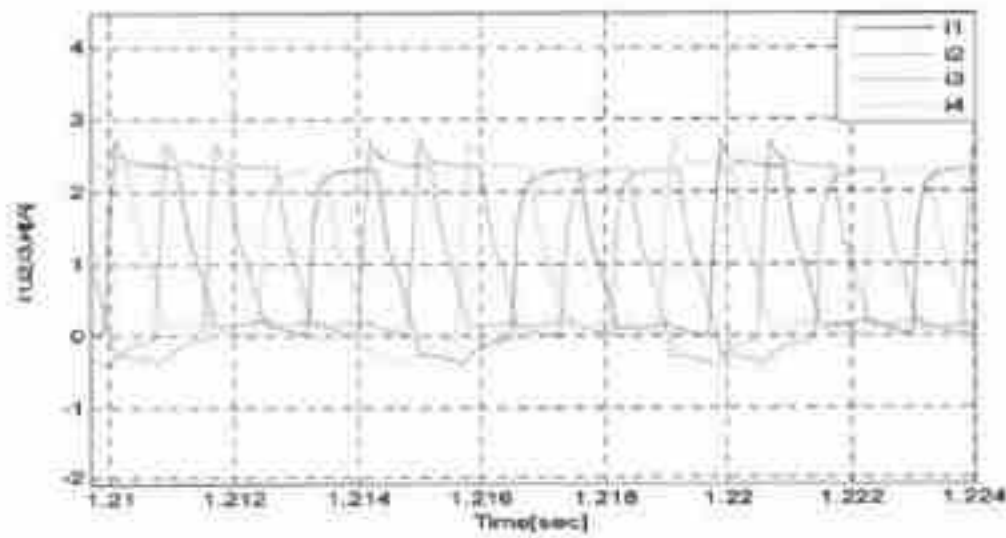


يوضح الشكل (4) تطبيق جهد قيمته 200V على كل طور عند ازدياد قيمة المحارضة الديناميكية أي عند العمل كمحرك، وتطبيق جهد قيمته -200V عند تناقص قيمة المحارضة الديناميكية. هذا الجهد ضروري تطبيقه لكي تتناقص قيمة التيار إلى الصفر وذلك عند إغلاق تغذية الطور.



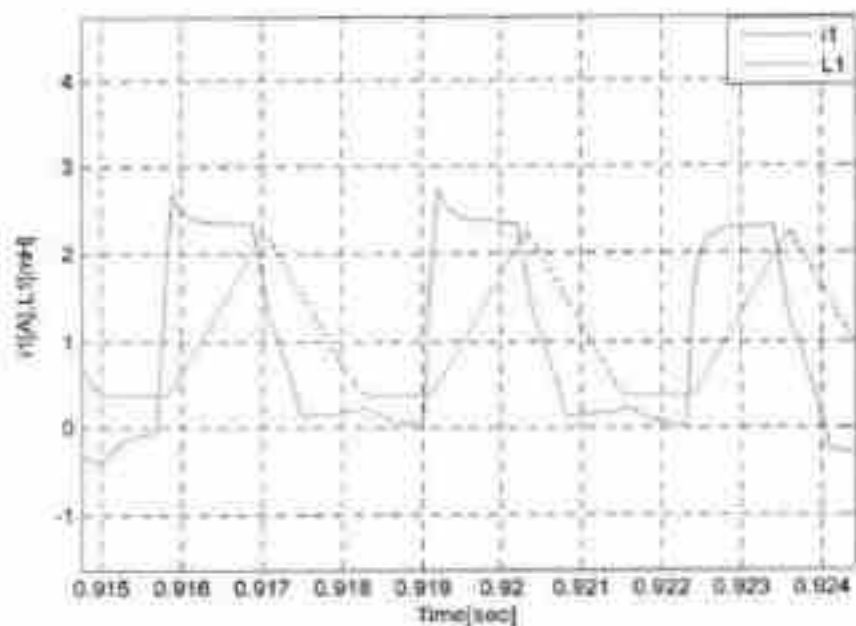
الشكل(4): جهد الطور الأول مع محارضة الطور الأول

يوضح الشكل (5) تغير تيارات الأطوار تحت الحموله، يتم تغذية الأطوار بالتيار بشكل متعاقب وهذه التيارات كما تم ذكره سابقاً غير متحكم بها.



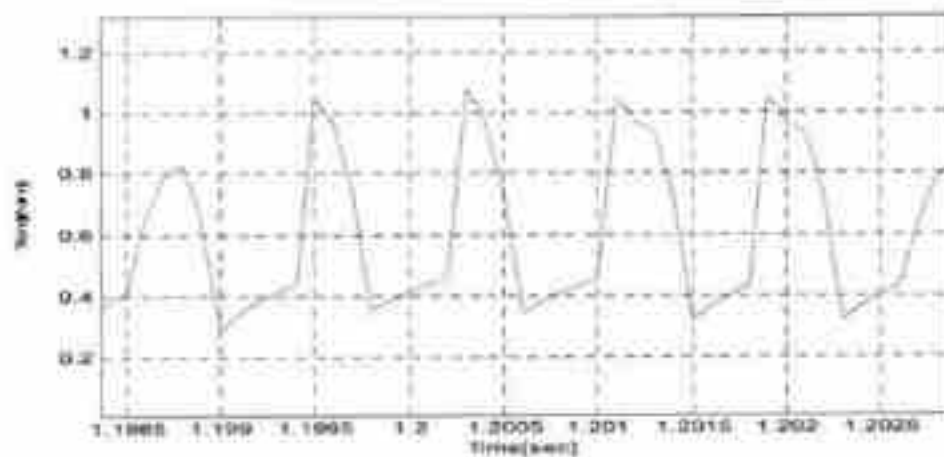
الشكل(5): تغير التيار للأطوار الأربعة

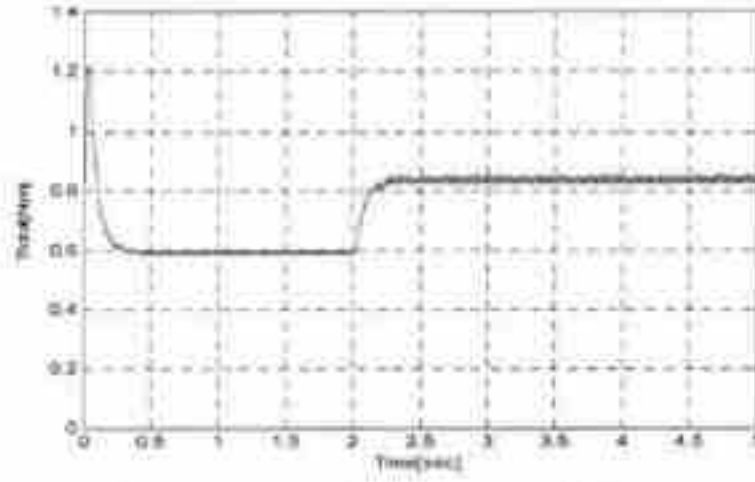
يوضح الشكل (6) إشارة تغير التيار بتغير المحارضة الديناميكية وتناقصه إلى الصفر بتطبيق جهد سالب.



الشكل(6): تغير تيار الطور مع محارضة الطور الأول

يوضح الشكل (7) عزم المحرك عند قيم لزوايا الفتح والإغلاق الموضحة سابقاً، حيث تتغير قيمة العزم حسب قيمة الزوايا المختارة.

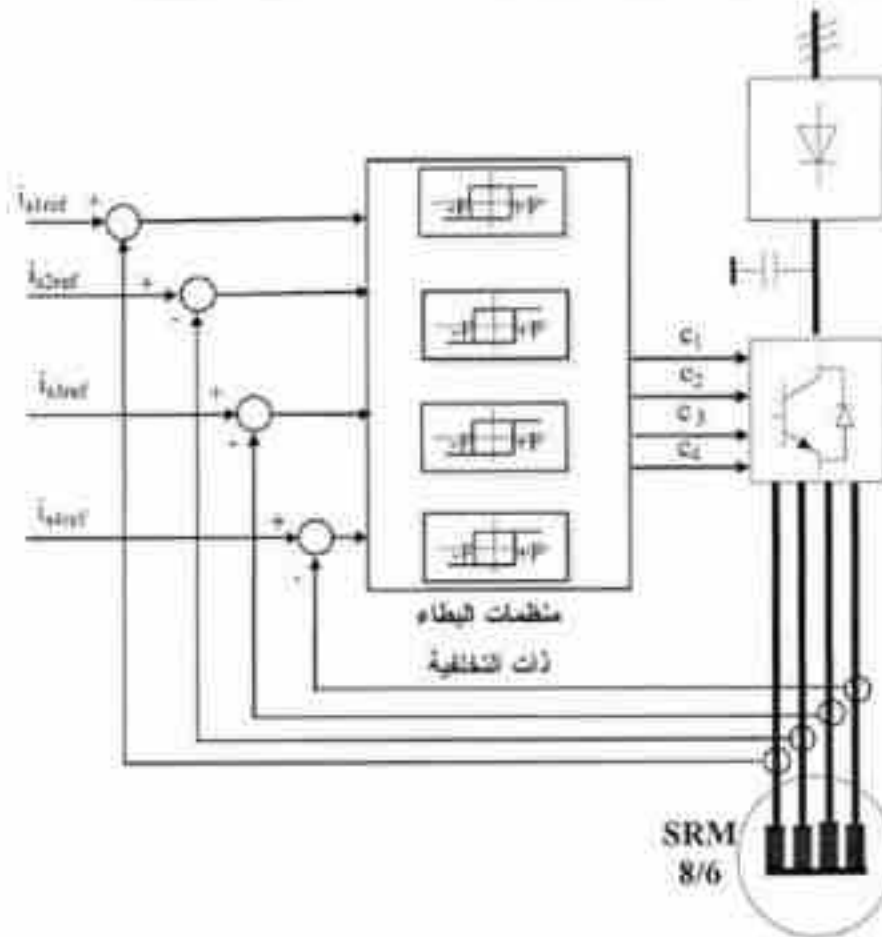




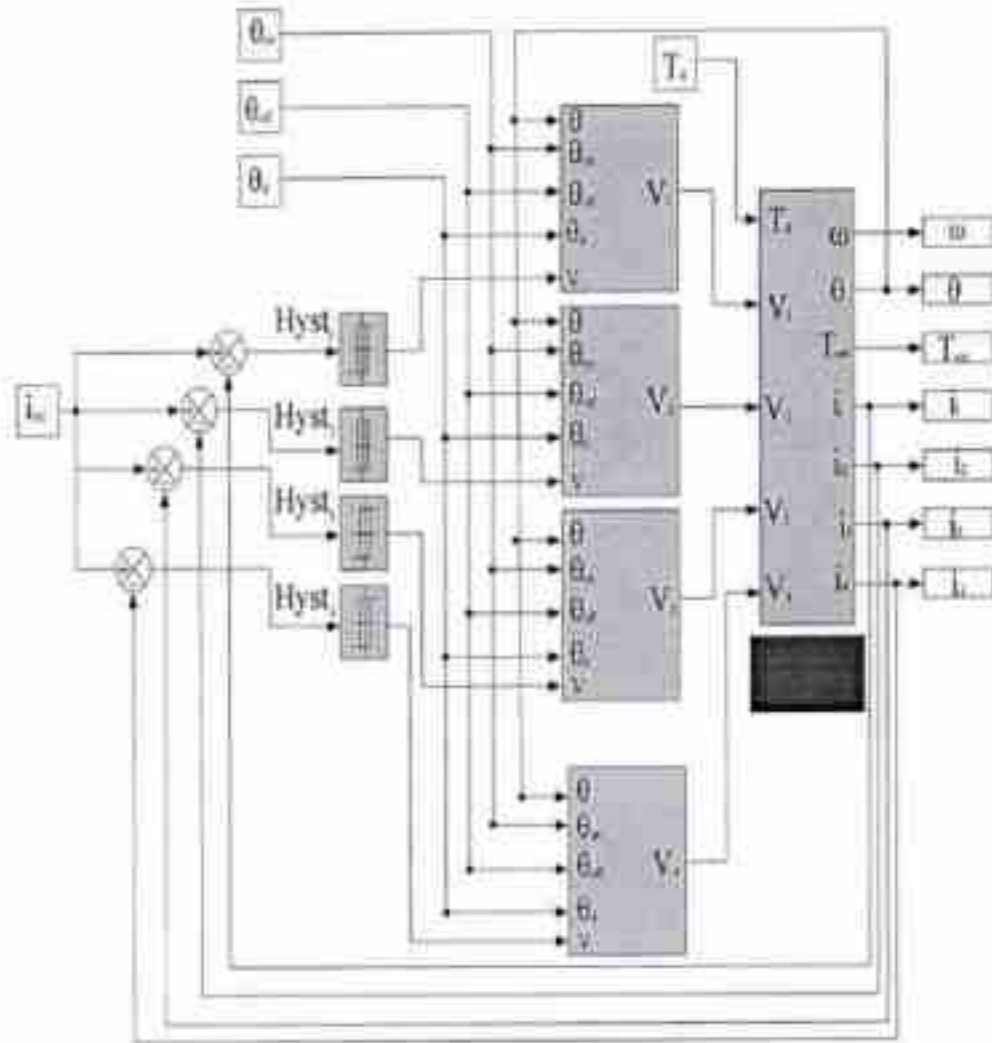
الشكل (7): (أ) العزم الكهرومغناطيسي، (ب) العزم الوسطي

5-2- تمثيل النموذج الرياضي لمحرك SRM 8/6 باستخدام متحكم التيار Hysteresis controller في بيئة Matlab/Simulink:  
في دارات القيادة ذات التحكم بالعزم تُعتبر طريقة التحكم بالتيار الأكثر استخداماً من بين تقنيات التحكم بالآلة (SRM) [SRHRODER et al., 2005].

إن تقنية التحكم بالتيار هنا عبارة عن منظم تيار من نوع (بطائي) Hysteresis. يتم في هذا النوع من منظمات التيار الفتح والإغلاق بحسب قيمة تيار الطور، إن منظم البطائي Hysteresis controller يقوم بتحديد قيمة تيار الطور ضمن حزمة السبطاء Hysteresis المحددة مسبقاً من قبل المصمم. يبين الشكل (8) المخطط الصندوقي للتحكم بتيارات الأطوار للمحرك باستخدام المنظمات البطائية (أربعة أطوار وبالتالي نحتاج إلى أربعة منظمات بطائية، على خرج هذه المنظمات نحصل على أربع إشارات لنبضات وصل وفصل ترانزستورات القالبية).



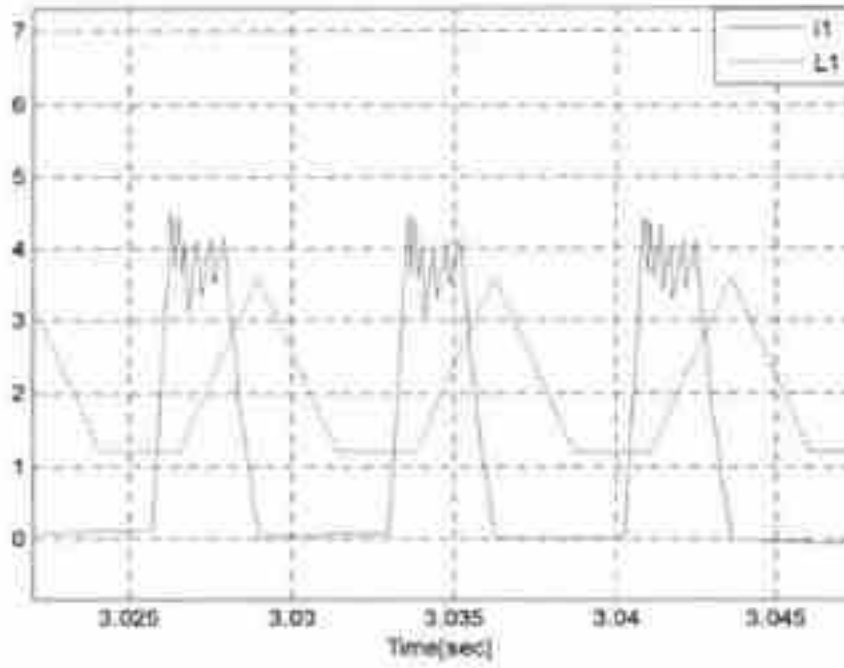
الشكل (8): المخطط الصندوقي للتحكم بتيارات الأطوار للمحرك باستخدام المنظمات البطائية تمت نمذجة محرك SRM 8/6 بإضافة متحكم تيار، كما هو موضح في الشكل (8)، إلى النموذج الرياضي في بيئة Matlab/Simulink، المخطط الصندوقي لقيادة المحرك باستخدام منظم التيار Hysteresis controller موضح في الشكل (9).



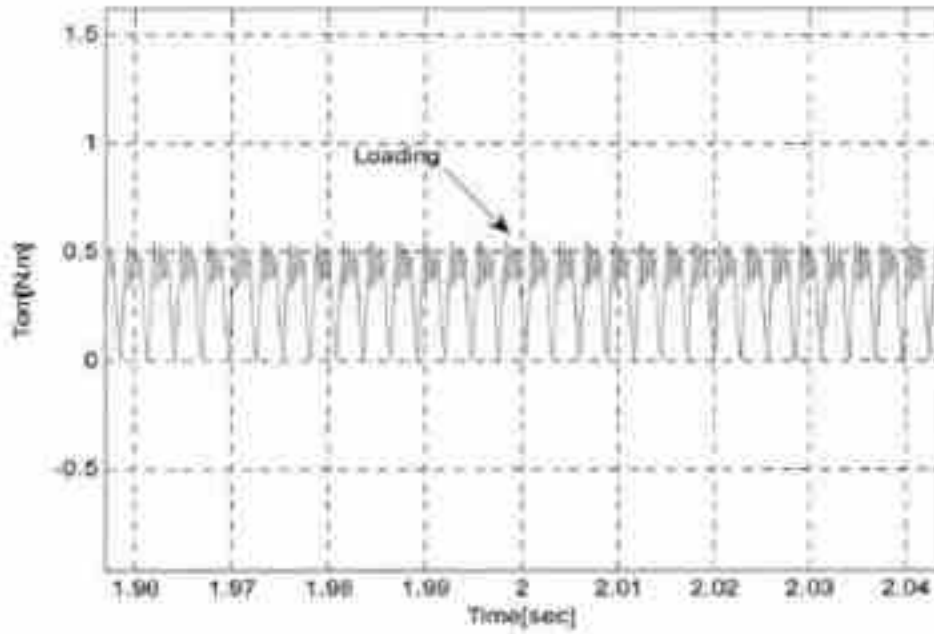
الشكل (9) المخطط الصندوقي لقيادة المحرك SRM8/6 باستخدام المنظومات البطانية

- نتائج النمذجة : يوضح الشكل (10) تغير تيار الطور الأول بتغيير المحارضة الديناميكية من أجل قيمة للتيار  $i_{ref} = 4A$ .

أما الشكل (11) فيوضح العزم الكهرومغناطيسي لمحرك SRM8/6 باستخدام متحكم التيار المقترح ويلاحظ أنه يأخذ شكل منحني التيار والذي يتعلق بزوايا الإغلاق والفتح.



الشكل(10): إشارة تيار الطور الأول مع المحارضة من أجل  $I_{ref}=4A$



الشكل(11): قيمة العزم بوجود المنظمات البطيئة

## 6- النتائج والمقترحات:

- استخدام النموذج الرياضي التحليلي لمحرك SRM8/6 والذي يأخذ بالاعتبار تأثير الإشباع المغناطيسي على المحارضة بإدخال  $L_{eff}$  وذلك باختيار قيم مختلفة للقوة المحركة المغناطيسية (m.m.f) ولعرض قطب الثابت (bs) ونمذجته في بيئة Matlab/Simulink للحصول على مميزات أكثر دقة، وبالتالي التخليص من



استخدام العوامل التقريبية التي تأخذ بالاعتبار تأثير الاشباع المغناطيسي ضمن شروط محددة .

- اقتراح نظام قيادة باستخدام متحكم بالتيار اعتماداً على Hysteresis controller والذي يتضمن تأثير زوايا الفتح والإغلاق.

- تخفيض تذبذب التيار والعزم.

- تطوير البحث للربط بين المحارضة الديناميكية المحسوبة في بيئة FEMM4.2 وحساب مميزات المحرك في بيئة Matlab/Simulink لمحرك SRM، ودراسة تأثير الاشباع المغناطيسي على منحنى العزم.

#### References

- КОЛОМЕЙЦЕВ Л.Ф.; БИБИКОВ В.И.; ПАХОМИН С.А.; КОЛОМЙЦЕВ Г.В. 2008- Применение Реактивных Индукторных Машин на Транспорте ,Известия Вузов, Электромеханика, **1**, 69-72.
- KAMPER M.J.; RASMENI S.W.; WANG R.J., 2007- Finite-Element Time-Step Simulation Reluctance Machine Drive under Single Pulse Mode Operation, *IEEE Transactions on Magnetics*, **43**(7), 3202-3208.
- KANERVA S.; SEMAN S.R.; ARKKIO A., 2005- Inductance Model for Coupling Element Analysis with Circuit Simulation, *IEEE Transactions On Magnetics*, **41**(5), 1620- 1623.
- КУЗНЕЦОВ В.А.; МАТВЕЕВ А.В., 2008- Дискретная Математическая Модель Вентильно-индукторной Двигателя , *Электричество*, **8**, 22-27.
- SRHRODER G.; BEKIESCH J., 2005- Current Control for the Switched Reluctance Motor with Enhanced Performance, EPE-Dresden, 1-8.
- МАЛАФЕЕВ С.И.; ЗАХАРОВ А.В., 2006- :Анализ Электромагнитного Момент Вентильно-индукторного Двигателя в Мехатронной Системе с Нелинейным Токовым Управлением, *Электротехника*, **3**, 37-42.

## **Modélisation Analytique d'un Moteur à Réductance Variable et le Contrôle du Courant par les Correcteurs à Hystérésis**

**F. Besso**

Dept. of Electrical Drives, Faculty of Electrical & Electronic Engineering  
University of Aleppo

### **Résumé**

Le moteur à réductance variable peut être utilisé dans de nombreuses applications industrielles dû, à sa simplicité de structure (seulement le stator présente des enroulements, alors que le rotor est fait en acier sans conducteurs ou aimants permanents), à sa fiabilité (puisque chaque phase est en grande partie indépendante physiquement, magnétiquement et électriquement des autres phases), à sa possibilité de tourner à très hautes vitesses (1000–50000 tr/min) en raison du manque de conducteurs ou d'aimants sur le rotor.

Ce travail présente le modèle mathématique et analytique du moteur à réductance variable (MRV8/6). Ce modèle prend en considération l'effet de saturation magnétique sur le flux mutuel tout en calculant numériquement l'inductance dynamique par l'environnement FEMM4.2.

Dans le but de minimiser les ondulations sur le couple et de réduire le bruit acoustique, le contrôle du courant par les contrôleurs à hystérésis a été proposé.

Le modèle mathématique du moteur a été implanté sur l'environnement MATLAB/SIMULINK, dans les deux cas; sans et avec le contrôle de courant. Les résultats de simulation montrent l'exactitude du modèle proposé ainsi que la possibilité d'utiliser les correcteurs à hystérésis pour le contrôle de courant.

**Mots clés:** Contrôleur à Hystérésis, Contrôle de Courant, Moteur à Reluctance Variable.

Received / /2011

Accepted / /2011