

## تصميم خوارزمية تحكم لقيادة محرك ذي ممانعة متغيرة باستخدام المتحكم البطائي

د. أحمد كردي

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

E-mail: akurdi86@hotmail.com , Mob:0955354507

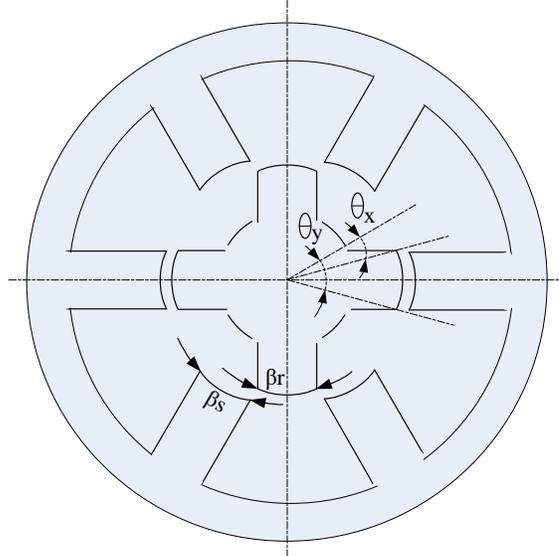
### المخلص

يعد المحرك ذي الممانعة المغناطيسية المتغيرة مناسب للعديد من تطبيقات الجر الكهربائي بسبب بساطة بنيته عديمة المسفرات وقلة كلفة تصنيعه مما يجعله حلاً اقتصادياً للعمل بسرعات العالية والمتغيرة. وقد زاد الاهتمام بهذا النوع من المحركات بعد بروز الدارات القابلة للبرمجة العاملة بالزمن الحقيقي ومنها شرائح FPGA. في هذا البحث نقدم خوارزمية لقيادة محرك ذي ممانعة مغناطيسية متغيرة متضمنة خوارزمية التبديل وعمل المبدلة الالكترونية. من أجل ذلك فقد تم بداية بناء نموذج رياضي تحليلي للمحرك يأخذ بالاعتبار السلوك المغناطيسي للمحرك وأن والمحاكاة المتبادلة بين الأطوار مهملة أما مقاومة ملف الثابت فقد تم أخذها بالاعتبار. إن قيادة هذا المحرك تتطلب معرفة دقيقة لموضع الدوار في كل لحظة، لهذا تم استخدام حساس موضع من أجل الحصول على زاوية الموضع بهدف الحصول على ثلاثة إشارات مرجعية. تُقارن هذه الإشارات مع الإشارات الفعلية الواردة من حساسات التيار، وبذلك يتم تشكيل نبضات القدر التي تُطبق على قواعد ترانزيستورات المبدلة. يُعتبر تنظيم التيار، وبالتالي العزم، الأساس في عملية التحكم في أنظمة القيادة لهذا النوع من المحركات وذلك بهدف الحصول على الاستجابة المطلوبة لكل من العزم والسرعة. من أجل ذلك فقد تم استخدام تقنية المتحكم البطائي في خوارزمية التحكم بالتيار للحصول على التيار المطلوب ضمن مجال محدد وبالتالي الحصول على العزم المطلوب. إن التمرجات المتأصلة في منحنى العزم لهذا المحرك يُعتبر مشكلة رئيسية، ولهذا تم في هذا البحث اقتراح طريقة التحكم البطائي Hysteresis control بهدف تنظيم التيار وعدم السماح له بالتغير ضمن مجال واسع، الأمر الذي يؤدي إلى موثوقية عالية في أنظمة القيادة الحديثة بسبب تخفيض تمرجات العزم والضجيج المسموع.

### 1- المقدمة:

بشكل عام، تتألف بنية الآلة ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة من ملفات كهربائية موجودة على الثابت في حين أن الدوار مكون من صفائح فولاذية بدون نواقل كهربائية أو مغناط دائمة [A]. بمقارنة المحركات ذات الممانعة المتغيرة مع محركات التيار المستمر ومحركات التيار المتناوب نجد أنها تمتاز ببنية بسيطة وقوية وموثوقية عالية بسبب أن كل طور مستقل يمكن أن يكون فيزيائياً وكهربائياً ومغناطيسياً عن بقية أطوار الآلة، وإمكانية الحصول على سرعات عالية ( 20,000 – 50,000 r.p.m) وذلك بسبب عدم وجود نواقل كهربائية أو مغناط في دوار الآلة. إلا أنه يوجد بعض المشاكل التي تعترض هذه الآلة ومنها عملية التبديل بين أطوار الآلة يجب أن تتم دائماً بشكل كهربائي، إضافة إلى ذلك العزم الذي ينتجه المحرك SRM ذو طبيعة نبضية يحوي اهتزازات غير مرغوب بها. والشكل الهندسي لأقطاب الدوار البارزة يسبب دخول الآلة في الحالة اللاخطية، الأمر الذي يعقد التحليل الرياضي للمحرك وعملية التحكم به [B].

يتم توليد الدوران في الآلة SR بسبب تغيير الممانعة المغناطيسية في الثغرة الهوائية الموجودة بين ثابت ودوار الآلة. وعند تغذية أحد ملفات الآلة ينشأ حقل مغناطيسي ويتولد عزم رد فعلي يجبر الدوار ليتحرك إلى الموضع الذي تكون فيه ممانعة مسار الفيض المغناطيسي صغرى بحيث يكون محور قطب الدوار متطابق مع محور قطب الثابت. وبالتالي تكون محارضة الطور عظمى. وبالتالي إذا تم تهيج مجموعات أقطاب الثابت لجذب أقطاب الدوار على التوالي فإنه يمكن الحصول على حركة مستمرة وعزم دائم.



الشكل (1) بنية المحرك SRM ذي النمط 6/4

## 2- الهدف من البحث:

في هذا البحث نقترح خوارزمية تحكم بمحرك ذي ممانعة متغيرة وفق تقنية المتحكم البطائي بالتيار hysteresis current control بغية ضبط تيارات الأطوار للمحرك والعزم الذي يولده المحرك ضمن مجال محدد خلال مجال واسع للسرعة، مما سيقفل من الضجيج الصادر عن المحرك بشكل كبير ويحسن أداء المحرك. في اطار هذه الدراسة يتم نمذجة المحرك ومحاكاته مع نظام القيادة في بيئة Matlab/Simulink.

## 3- النموذج الرياضي التحليلي للمحرك:

بداية نقوم بإيجاد علاقتي الجهد الكهربائي والعزم الكهرومغناطيسي، وسنفرض هنا أن المحارضة المتبادلة Mutual Inductance مهمة وذلك من أجل سهولة التحليل. تعطى علاقة الجهد المطبق على طور واحد كما يلي [C]:

$$U = Ri + \frac{d}{dt} \Phi(\theta) \quad (1)$$

حيث أن:

R : تمثل المقاومة الأومية لطور واحد من أطوار الثابت.

$\Phi$  : يمثل هو الفيض المتشابك، ويتعلق بزاوية الدوار.

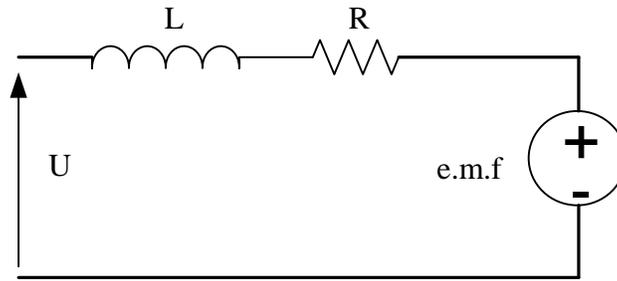
ولكن:

$$\Phi(\theta) = L(\theta)i \quad (2)$$

ومنه:

$$U = Ri + L(\theta) \frac{di}{dt} + i\omega \frac{dL}{d\theta} \quad (3)$$

الحدود الثلاثة في العلاقة الأخيرة تعبر عن هبوط الجهد الأومي وهبوط الجهد التحريضي والقوة المحركة الكهربائية العكسية ( Back-emf ) على الترتيب، وهذه الأخيرة مرتبطة بموضع الدوار وسرعة الدوران الميكانيكية وقيمة التيار، ولهذا يصعب حساب قيمتها إلى حد ما. يبين الشكل (2) الدارة المكافئة لطور واحد من الآلة SRM وذلك اعتماداً على المعادلة (3):



الشكل(2): الدارة المكافئة لطور واحد من الآلة SRM

إن اختيار زاوية قطب الثابت وزاوية قطب الدوار يعتبر أحد الخطوات الهامة في عملية تصميم الآلة SRM، فالتصميم الأمثل يتطلب عادة عدداً من الشروط النظامية التي يتوجب اتباعها أثناء عملية الاختيار. في التصميم الأمثل تكون زاوية قوس قطب الثابت  $\beta_s$  أصغر من زاوية قوس قطب الدوار  $\beta_r$ ، وهناك بعض الاعتبارات التي ترتبط بقيم هذه الزوايا نوردتها فيما يلي:

- 1- زاوية قوس قطب الثابت  $\beta_s$  أصغر من زاوية قوس قطب الدوار  $\beta_r$ ، أي  $\beta_s < \beta_r$ .
- 2- إن منطقة العزم الفعالة هي عادة أكبر من قيمة معينة  $\varepsilon$ ، من أجل الآلة SRM ذات النمط 6/4، فإن قيمة الزاوية  $\varepsilon$  هي:

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\frac{N_s}{2} \cdot N_r} = \frac{2\pi}{6 \cdot 4} = 0.523 \text{ rad} = 30^\circ \quad (4)$$

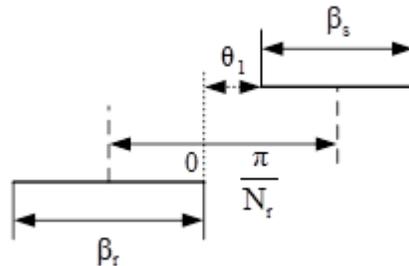
حيث أن:

$N_r$ ،  $N_s$  هي عدد أقطاب الثابت وعدد أقطاب الدوار بالترتيب.

- 3- إن الزاوية بين أقطاب الدوار المتجاورة يجب أن تكون أكبر من قوس قطب الثابت  $\beta_s$  وإلا فسوف يحدث تطابق بين أقطاب الثابت وأقطاب الدوار في موضع عدم التطابق، وبالتالي قد يكون هناك مواضع لاتقلع الآلة فيها، ويمكننا التعبير عن هذه الحالة بالعلاقة التالية:

$$\frac{2\pi}{N_r} - \beta_r > \beta_s \quad (5)$$

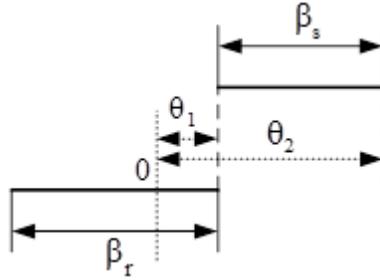
تتغير المحارضة مع زاوية الدوار، ولهذا يجب معرفة قيمة المحارضة في كل موضع أثناء دوران الجزء الدائر من الآلة [D]. تختلف قيمة المحارضة في هذه الآلة مع اختلاف موضع محاور أقطاب الدوار بالنسبة لمحاور أقطاب الثابت، ولذلك يجب تقسيم دورة العمل الميكانيكية إلى مجالات تتعلق بالزوايا التي ينتج عنها تغير قيمة المحارضة. تبقى قيمة المحارضة ثابتة ضمن المجال من الصفر وحتى  $\theta_1$  وذلك بسبب عدم تطابق محور قطب الثابت مع محور قطب الدوار كما هو مبين في الشكل (3):

الشكل (3): موضع الدوار في حالة عدم التطابق (مجال الزاوية 0 إلى  $\theta_1$ )

إن الدوار يجب أن يقطع مسافة تساوي  $\theta_1$  ابتداءً من موضع عدم التطابق والتي تعطى كما يلي:

$$\theta_1 = \frac{\pi}{N_r} - \frac{\beta_s}{2} - \frac{\beta_r}{2} \quad (6)$$

وذلك حتى يتم وصول حافة قطب الدوار إلى حافة قطب الثابت. من أجل المجال الممتد من الموضع  $\theta_1$  إلى  $\theta_2$ ، فإن محور قطب الدوار يبدأ بالتطابق مع محور قطب الثابت كما هو في الشكل (4):

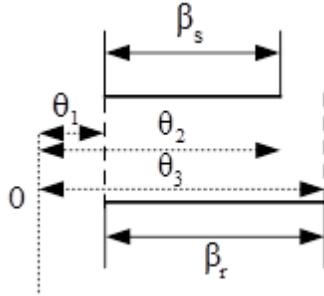


الشكل (4): موضع الدوار من  $\theta_1$  إلى  $\theta_2$

وبما أنه يزداد تطابق محور قطب الدوار مع محور قطب الثابت ضمن هذا المجال، فإن قيمة المحارضة تزداد حتى الوصول إلى القيمة الأعظمية، ويمكننا حساب قيمة الزاوية  $\theta_2$  من العلاقة التالية:

$$\theta_2 - \theta_1 = \beta_s \quad (7)$$

حالما يصل قطب الدوار إلى الموضع  $\theta_2$  فإن التطابق بين محور قطب الدوار و محور قطب الثابت يكون كاملاً، وبذلك تكون قيمة المحارضة عند هذا الموضع أعظمية وتساوي  $L_{max}$ . أما ضمن المجال الواقع بين  $\theta_2$  و  $\theta_3$  يحصل تطابق كامل بين محور قطب الثابت ومحور قطب الدوار كما هو مبين في الشكل (5):



الشكل (5): موضع الدوار من  $\theta_2$  إلى الموضع  $\theta_3$

وضمن هذا المجال (أي بين  $\theta_2$  و  $\theta_3$ )، تبقى المحارضة محافظة على قيمتها الأعظمية  $L_{max}$ ، أما قيمة الزاوية  $\theta_3$  فيمكن حسابها من العلاقة التالية:

$$\theta_3 - \theta_2 = \beta_r - \beta_s$$

حالما يصل قطب الدوار إلى الموضع  $\theta_4$ ، فإن الأقطاب تصبح في حالة عدم التطابق (Unaligen Position)، وبالتالي قيمة المحارضة عند ذلك تساوي إلى القيمة الدنيا  $L_{min}$ . وبالتالي يمكننا حساب قيمة المحارضة في كل لحظة خلال الدورة الميكانيكية الواحدة لعمل المحرك كما يلي:

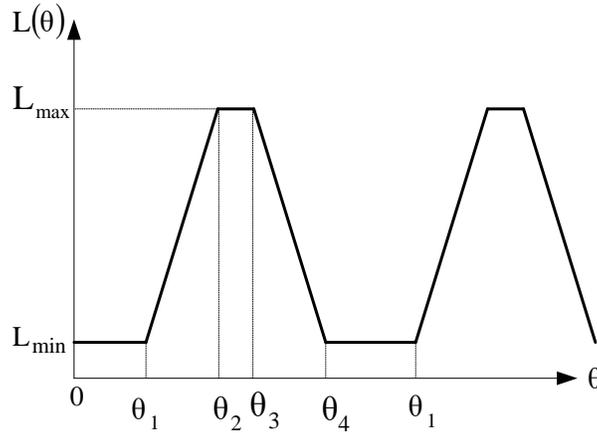
Angle Range	$\theta < \theta_1$	$\theta_1 \leq \theta < \theta_2$	$\theta = \theta_2$	$\theta_2 < \theta < \theta_3$
Inductance Equation	$L(\theta) = L_{min}$	$L(\theta) = L_{max} - K(\theta_2 - \theta)$	$L(\theta) = L_{max}$	$L(\theta) = L_{max} - K(\theta - \theta_3)$

الجدول (1): معادلات المحارضة حسب مجالات موضع قطب الدوار

حيث أن الثابت  $K$  في الجدول السابق يعبر عن ميل منحنى المحارضة، ويعطى بالعلاقة التالية:

$$K = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\theta_2 - \theta_1} \quad (8)$$

أما الدورة الميكانيكية الواحدة فهي  $90^\circ$ ، وهي تكافئ  $360^\circ$  كهربائية. بناء عليه يمكننا رسم منحنى المحارضة لطور واحد:

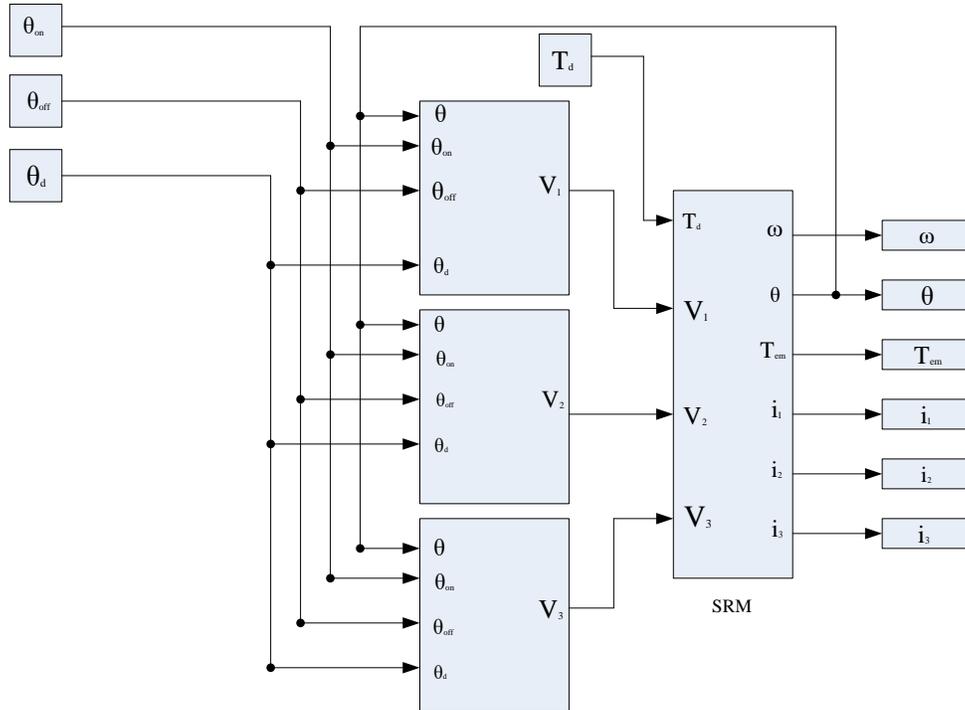


الشكل (6): منحنى المحارضة مع تغير موضع الدوار

إن هذا المنحنى يتكرر كل فترة  $\frac{2\pi}{N_r}$  راديان، كما أن منحنيات المحارضة للأطوار الثلاثة من الآلة SRM مزاحة عن بعضها

بزواية  $\theta_s$  تُحسب قيمتها من العلاقة التالية:  $\theta_s = 2\pi \left( \frac{1}{N_r} - \frac{1}{N_s} \right) = 2\pi \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{6} \right) = \frac{\pi}{6} = 30^\circ$

يمكننا الآن أن نقوم ببناء المخطط الصندوقي للمحرك SRM في الحلقة المفتوحة كما هو مبين في الشكل (7):

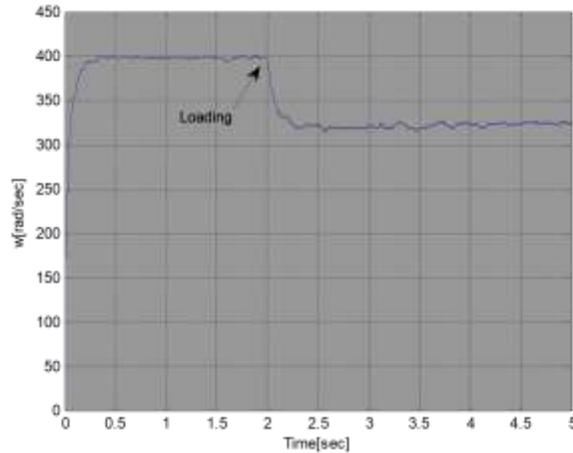


الشكل (7): المخطط الصندوقي للمحرك SRM عند تغذيته في الحلقة المفتوحة في برنامج Matlab/simulink

في الشكل (7) قمنا بتطبيق جهود الأطوار الثلاثة  $V_1, V_2, V_3$  للمحرك SRM انطلاقاً من معرفة موضع الدوار في كل لحظة من لحظات دورانه، وكذلك حساب زوايا الفتح والإغلاق لكل طور من الأطوار، وبالتالي التغذية المتتابعة بالجهد لأطوار المحرك SRM. يمكننا هذا المخطط من دراسة أداء المحرك SRM في الحلقة المفتوحة، أي أنه لا يوجد ضبط لبارامترات المحرك الكهربائية أو الميكانيكية، بسبب عدم وجود منظم في هذا المخطط. تم أخذ إشارة الموضع كتغذية عكسية من أجل توليد الجهد اللازم لفتح الأطوار في فترة تزايد المحارضة. في الحقيقة يتميز نظام الحلقة المفتوحة المصمم لدينا بإمكانية تغيير زوايا الفتح والإغلاق لكل طور من أطوار الآلة SRM، وبالتالي يمكننا اختيار الزوايا الأمثل في عملية فتح الأطوار وذلك تبعاً لقيمة الجهد والحمل المطبق على محور المحرك، ولهذا أمكننا أن نستخدم الزوايا  $\{\theta_{on}, \theta_{off}, \theta_d\}$  كإشارات دخل لنظام الحلقة المفتوحة. بهذا يمكننا دراسة أثر تغيير زوايا التبديل على القيم الكهرومغناطيسية للمحرك SRM بشكل دقيق [F].

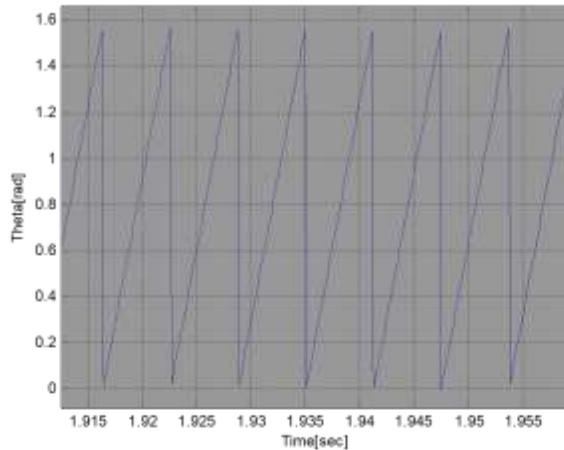
#### 4- نتائج المحاكاة للمحرك SRM ذي النمط 6/4 عند عمله في نظام الحلقة المفتوحة:

لقد تمت عملية تشغيل نظام الحلقة المفتوحة للمحرك SRM المبين في الشكل (7) في برنامج Matlab/simulink، وتم الحصول على مختلف الإشارات المطلوبة من المحرك من أجل قيم مختلفة لزوايا الفتح، وفيما يلي أهم النتائج التي تم الحصول عليها:



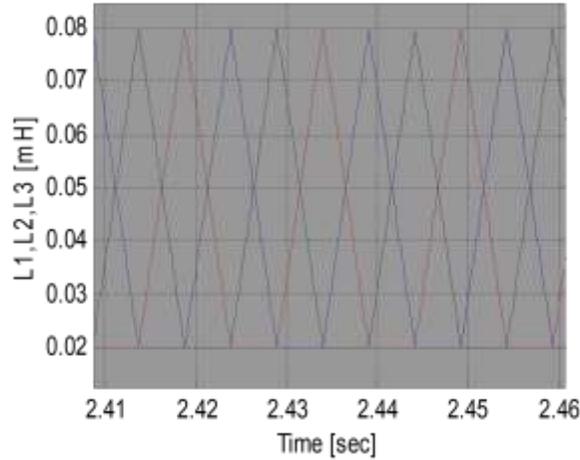
الشكل (8): إشارة سرعة المحرك SRM

يظهر الشكل (8) لنا بأن المحرك قد تسارع عند تغذيته بالجهد حتى وصلت سرعته إلى  $400[\text{rad/sec}]$  والتي تساوي تقريباً إلى  $3822[\text{rpm}]$  من أجل قيمة  $150[\text{v}]$  لجهد الطور، وعند اللحظة  $2[\text{sec}]$  تم تحميل المحرك بحمولة قدرها  $0.5 [\text{N.m}]$ ، أما قيم زوايا الفتح التي تم اختيارها عند تشغيل المحرك فهي:  $\theta_{on} = 75^\circ$ ،  $\theta_{off} = 14^\circ$ ،  $\theta_d = 40^\circ$ .



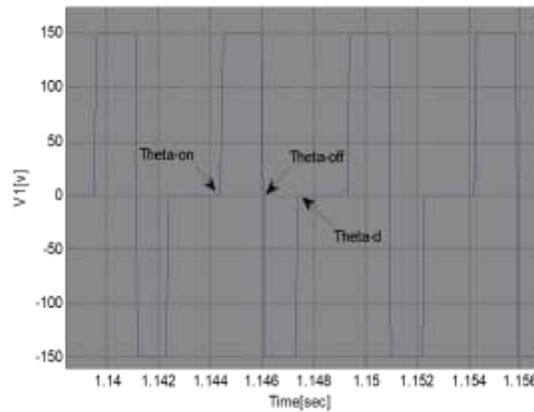
الشكل (9): إشارة تغير الموضع مع الزمن

يبين الشكل (9) لنا تغير الزاوية  $\theta$  مع الزمن، حيث نلاحظ أن الزاوية تتغير بشكل خطي مع الزمن وذلك من أجل فترة قرح كل طور والتي تمثل فترة  $30^\circ$ ، دور المنحني السابق هو في الحقيقة  $90^\circ$  والتي تمثل فترة قرح الأطوار الثلاثة من الآلة SRM.



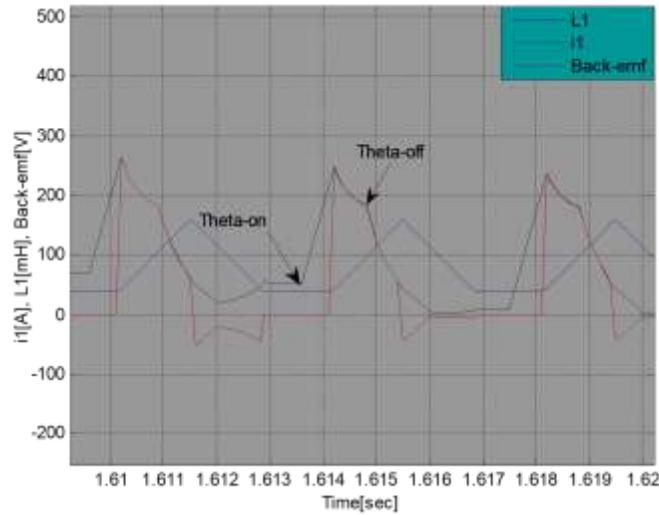
الشكل (10): إشارة المحارضة للأطوار الثلاثة من المحرك SRM

بما أن منحني تغير المحارضة يلعب دورا مهما في تحديد عمل المحرك فإننا قمنا بالحصول على منحنياتها ويمثل الشكل (10) إشارات المحارضة للأطوار الثلاثة من المحرك، على الترتيب، حيث أن المحارضة تتغير بين قيمتين حديتين هما  $L_{\max} = 0.08H$ ،  $L_{\min} = 0.02H$ ، علما أن منحنيات المحارضة للأطوار الثلاثة هي مزاحة عن بعضها بزاوية  $\theta_s$ .



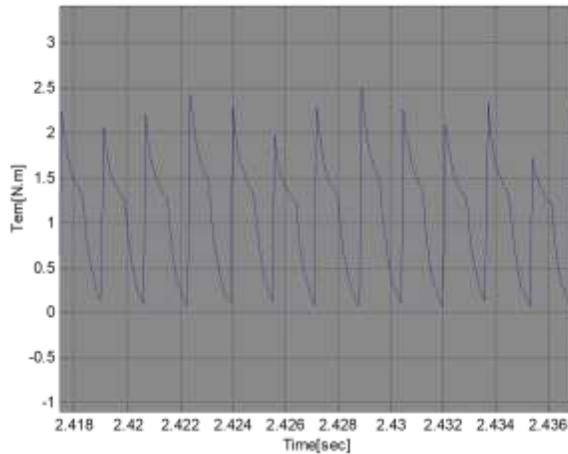
الشكل (11): إشارة الجهد المطبق على طور المحرك

يظهر الشكل (11) بأننا طبقنا الجهد الموجب على طور من المحرك SRM خلال منطقة تزايد المحارضة، حيث أن قيمة الجهد المطبق هي  $150[v]$ ، ثم نقوم بإغلاق الطور بتطبيق جهد عكسي من أجل إجبار التيار أن يهبط إلى الصفر والإسراع بإجراء عملية التبديل مع الأطوار الأخرى، كما يوضح لنا هذا الشكل مواقع الزوايا  $\theta_{on}$ ،  $\theta_{off}$ ،  $\theta_d$ .



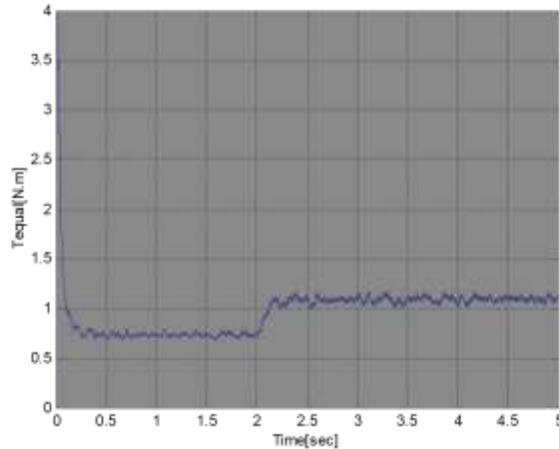
الشكل (12): القوة المحركة الكهربائية العكسية مع تيار و محارضة طور واحد من SRM

في الشكل (12) قمنا بإظهار تيار الطور مع القوة المحركة الكهربائية العكسية ومحارضة الطور وذلك بهدف إبراز أثر القوة المحركة الكهربائية العكسية Back-emf على التيار، حيث نلاحظ أنه قمنا بإمرار تيار الطور في اللحظة التي تكون فيها المحارضة والقوة المحركة بقيمة الدنيا، وهي توافق هنا  $\frac{dL}{d\theta} = 0$ ، وعند ازدياد المحارضة تظهر الـ Back-emf وتزداد حتى تتجاوز قيمتها قيمة الجهد المغذي للطور، عندها يتناقص التيار حتى زاوية الإغلاق  $\theta_{off}$ ، ثم تتناقص القوة المحركة الكهربائية وتعود للظهور من جديد نتيجة مرور الجهد من القيمة الموجبة إلى السالبة، ولهذا يزداد التيار من جديد.



الشكل (13): إشارة العزم اللحظي الكلي في المحرك SRM

يظهر لنا الشكل (13) منحنى العزم الكهرومغناطيسي اللحظي الذي يطره المحرك SRM من أجل نفس قيم زوايا القذح التي ذكرت أعلاه. نلاحظ أن هذا العزم يحتوي على نبضات شوكية حادة عائدة إلى طبيعة التسنن المضاعف للمحرك، إضافة إلى التغذية النبضية التي يمتاز بها هذا المحرك، وهذه النبضات الشوكية أو التموجات تؤدي إلى ضجيج مسموع في المحرك SRM.

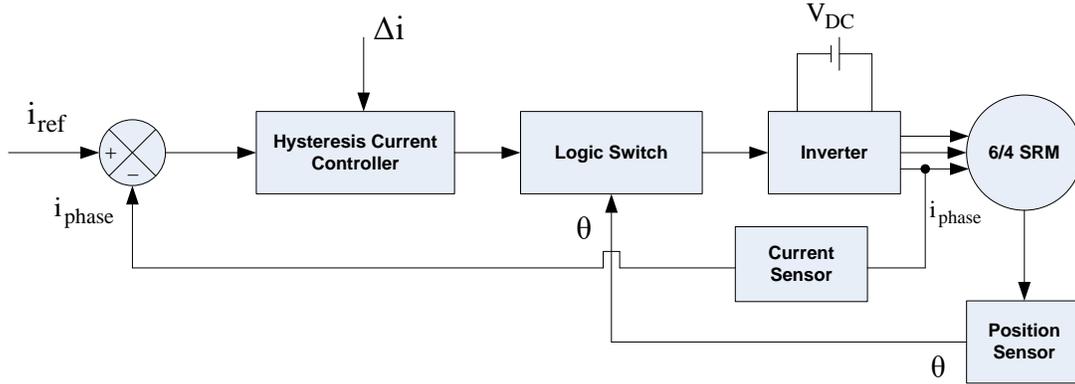


الشكل (14): إشارة العزم الوسطي في المحرك SRM

أما الشكل (14) فيبين لنا القيمة الوسطية للعزم الذي يطوره المحرك، حيث نلاحظ أن عزمه الوسطي على فراغ يساوي تقريباً  $0.75[\text{N.m}]$ ، وعند التحميل بكمولة قدرها  $0.5[\text{N.m}]$  فإن قيمة العزم الوسطي للمحرك تساوي تقريباً  $1.2[\text{N.m}]$ . يمكن الآن أن نختار قيم جديدة للزوايا بحيث تكون زاوية الفتح  $\theta_{on} = 80^\circ$  وزاوية الإغلاق  $\theta_{off} = 13^\circ$  وزاوية إزالة المغنطة  $\theta_d = 35^\circ$ ، ونقوم بتشغيل نظام الحلقة المفتوحة للمحرك SRM، فنحصل على قيم جديدة للسرعة والعزم.

5- المخطط الصندوقي للمحرك SRM ذي النمط 6/4 في برنامج Matlab/simulink في نظام الحلقة المغلقة بوجود منظم التيار Hysteresis controller:

بالاعتماد على المراجع العلمية تبين لنا ضرورة عمل نظام يعمل بالحلقة المغلقة لملاحقة تتابع تغذية الأطوار في المحرك للحصول على استجابة أفضل ما يمكن وخصوصاً أثناء تحميل المحرك [H]. على الشكل (15) المخطط الصندوقي للمحرك SRM مع نظام التحكم بالتيار Hysteresis controller:



الشكل (15): المخطط الصندوقي لقيادة المحرك SRM باستخدام نظرية التحكم بالتيار Hysteresis Controller

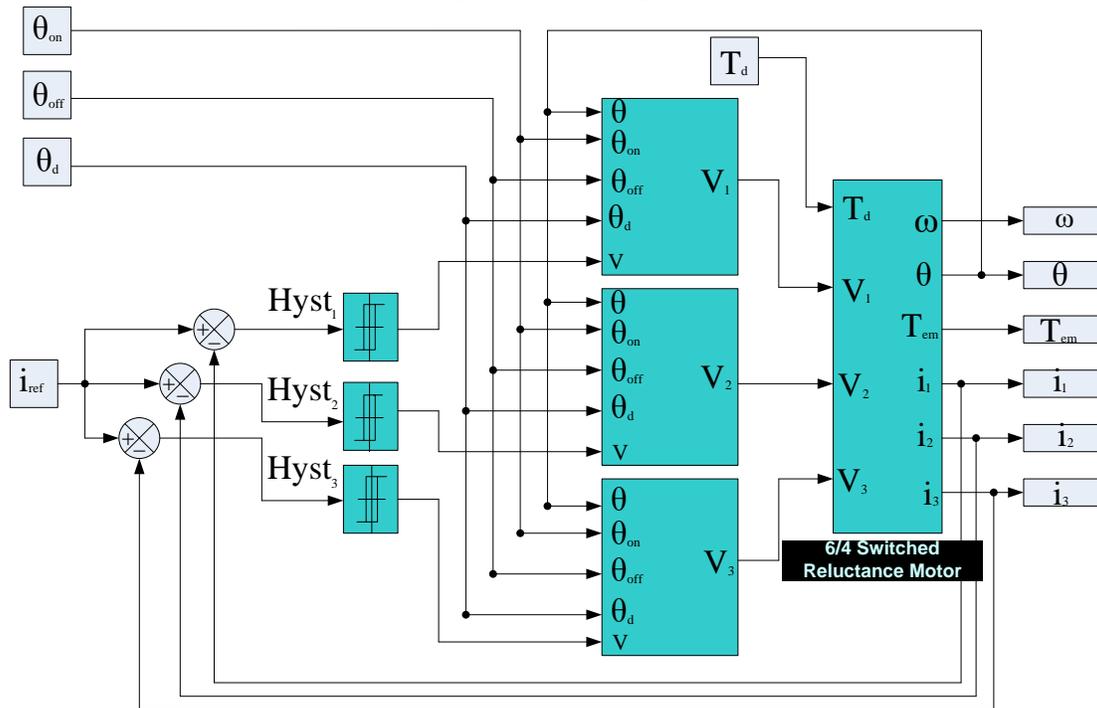
هذا المخطط يوضح لنا المبدأ العام لقيادة المحرك SRM باستخدام طريقة التحكم بالتيار اعتماداً على مبدأ Hysteresis controller، حيث تؤخذ إشارة تغذية لتيار الطور الفعلي  $i_{actual}$  عن طريق حساس تيار، ويُقارن مع إشارة التيار المرجعية  $i_{ref}$  بحيث يتم توليد إشارة الخطأ والتي يتم معالجتها في منظم Hysteresis controller، وبناء على ذلك يتم توليد نبضات القدرح التي تطبق على قواعد الترانزيستورات العائدة لطور معين حسب وضعية الدوار والذي يمكن تحديده وضعيته عن طريق إشارة حساس الموضع  $\theta$ ، وبناء عليه يتم قيادة المحرك عن طريق المبدلة الموصولة معه. بالنسبة للبلوك Logic Switch

فهو يأخذ بعين الاعتبار ضرورة مراعاة التتابع المنطقي في عملية قرح الأطوار، بمعنى آخر علينا معرفة الطور الواجب قرحه حتى يدور المحرك بالاتجاه المطلوب.

فيما يتعلق بزوايا القرح في نظام الحلقة المغلقة فإن زاوية الفتح  $\theta_{on}$  تختلف باختلاف كلاً من السرعة والقيمة المرجعية للتيار، وكذلك قيمة الجهد المغذي، أما زاوية الإغلاق  $\theta_{off}$  فهي تزيد عن زاوية الفتح بمقدار لا يتجاوز  $30^\circ$ ، ولهذا يمكن كتابة علاقة زاوية الفتح في حال وجود منظم تيار من خلال العلاقة التالية:

$$\theta_{on} = \theta_1 - \frac{L_{min} \omega i_{ref}}{V_{dc}} \quad (9)$$

بناء على هذا المخطط قمنا ببناء المخطط الصندوقي لقيادة المحرك SRM ذي التشكيل 6/4 في برنامج Matlab/simulink مستخدمين تقنية التحكم بالتيار Hysteresis controller كما هو مبين في الشكل (16):

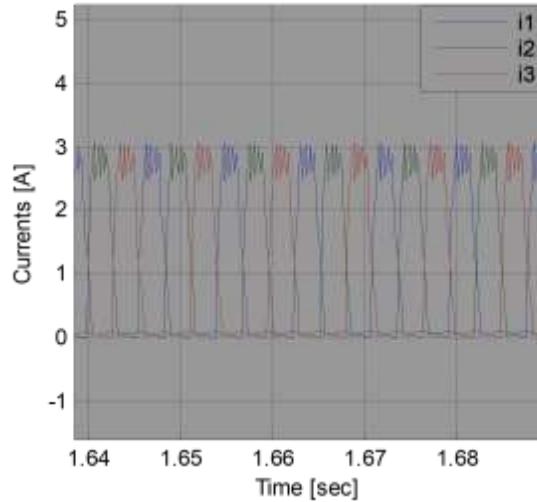


الشكل (16): المخطط الصندوقي لقيادة المحرك SRM ذي النمط 6/4 في نظام الحلقة المغلقة باستخدام Hysteresis Controller في برنامج Matlab/simulink

في هذا الشكل تم تطوير نظام الحلقة المفتوحة للمحرك SRM الذي وضعناه في الشكل (16) والذي تمت محاكاته، حيث تم الحصول على عدد من الإشارات التي تم مناقشتها وأثبتت صحة نظام الحلقة المفتوحة المصمم. في هذا النظام قمنا بإضافة حلقة تنظيم للتيار بهدف ضبط قيمة التيار حول قيم مرجعية معينة عن طريق مقارنة إشارات التغذية العكسية للتيار مع القيمة المرجعية بحيث يتم توليد إشارة خطأ يتم إدخالها إلى منظم Hysteresis controller، وبناء على عليه يتم قرح الأطوار بالإشارات المناسبة. لقد قمنا بمحاكاة هذا النظام في برنامج Matlab/simulink فحصلنا على مختلف الإشارات الكهروميكانيكية وذلك من أجل قيم مختلفة لقيمة التيار المرجعي  $i_{ref}$ .

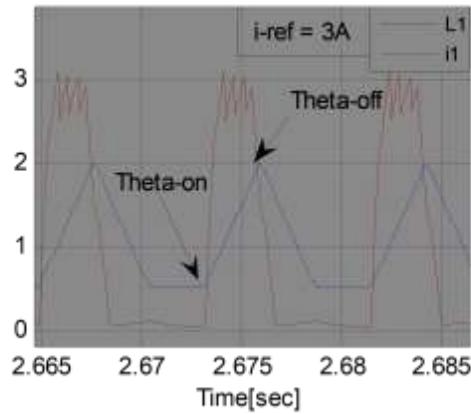
6- نتائج عملية التمثيل للمحرك SRM ذو النمط 6/4 في برنامج Matlab/simulink عند العمل في نظام الحلقة المغلقة ( بوجود منظم التيار Hysteresis Controller ):

لقد قمنا باختبار النظام المصمم لقيادة المحرك ذي الممانعة المغناطيسية المتغيرة في برنامج matlab/simulink وذلك من أجل قيم مختلفة للتيار، وذلك للتأكد من صحة التمثيل، وقد تم تشغيل المحرك من أجل قيم مختلفة للتيار المرجعي وبحمولات مختلفة:



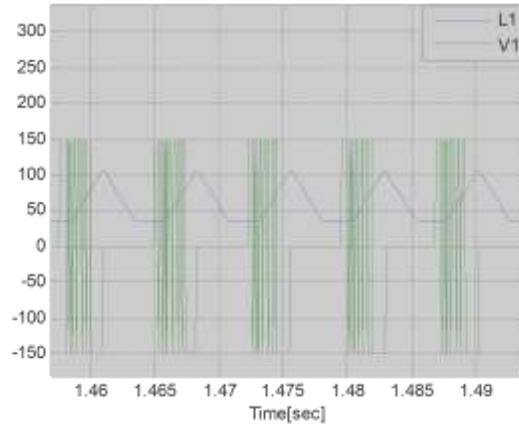
الشكل (17): تيارات الأطوار الثلاثة للمحرك من أجل  $i_{ref} = 3A$

يبين الشكل (17) تيارات الأطوار الثلاثة من المحرك SRM، حيث نلاحظ القدح المتتالي للأطوار الثلاثة مع تداخل بسيط بين التيارات وذلك لأن عملية قدح الطور التالي تبدأ قبل إغلاق الطور الحالي بفترة صغيرة جداً.



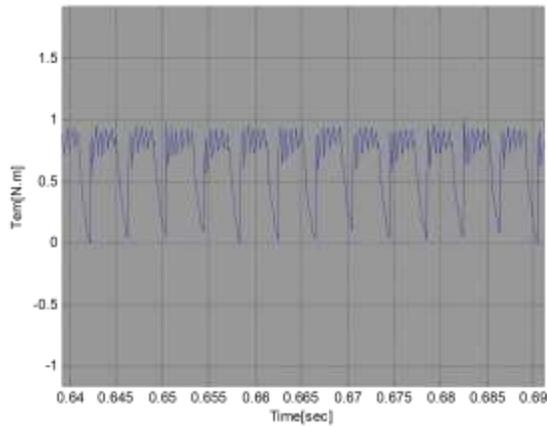
الشكل (18): تيار الطور الأول مع محارضة الطور ذاته من أجل  $i_{ref} = 3A$

يبين الشكل (18) تيار الطور الأول من المحرك SRM وذلك بوجود منظم التيار، مع محارضة هذا الطور، وذلك من أجل  $i_{ref} = 3A$ ، حيث يتضح لنا زوايا الفتح والإغلاق.

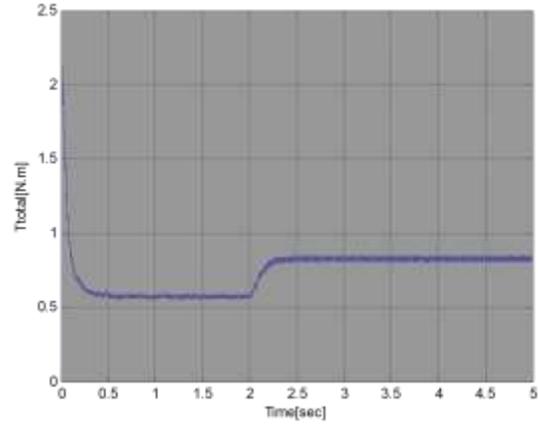


الشكل(19): الجهد المطبق على الطور الواحد من SRM والنتائج عن منظم Hysteresis controller

في الشكل (19) نبين إشارة الجهد المطبق على طور واحد من أطوار المحرك SRM، حيث أن منظم التيار Hysteresis controller يقوم بالتحكم بفتح وإغلاق الترانزيستورات وذلك من أجل تطبيق خوارزمية التحكم بالتيار بحيث يتغير حول القيمة المرجعية، ولهذا نجد أن المنظم يسمح بتطبيق جهد موجب قدره 150v وذلك خلال فترة تزايد المحارضة أو جهد سالب -150v خلال فترة تناقص المحارضة بهدف تحقيق هذه الغاية.



(a): إشارة العزم اللحظي للمحرك SRM

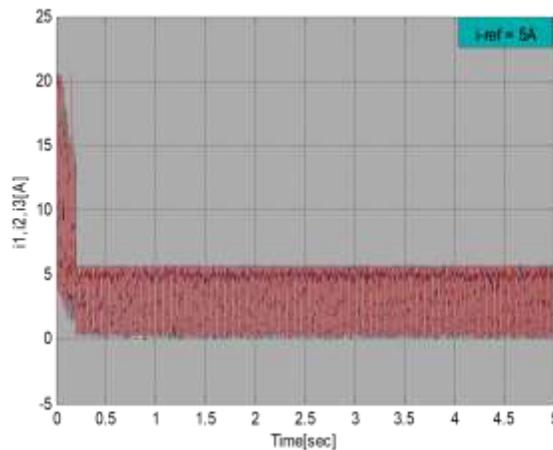


(b): إشارة العزم الوسطي للمحرك تم تحميله في اللحظة 2sec

الشكل (20): إشارة العزم للمحرك SRM بوجود Hysteresis controller من أجل  $i_{ref} = 4A$

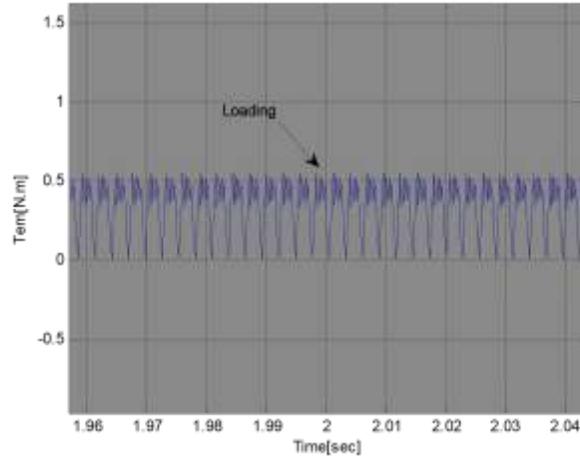
يبين لنا الشكل (20) العزم اللحظي الكلي الناتج عن أطوار المحرك SRM، حيث قمنا بتطبيق قيمة مرجعية للتيار تساوي  $i_{ref} = 4A$ ، فحصلنا على إشارة العزم السابقة والتي هي في الحقيقة مشابهة لإشارة التيار، وذلك لارتباط العزم مع التيار. نلاحظ أنه بتطبيق نظرية التحكم بالتيار استطعنا إجبار المحرك أن يعمل على عزم معين وذلك حسب القيمة المرجعية للتيار، كما استطعنا تحسين شكل العزم بحيث تم التخلص من النبضات الشوكية الموضحة في الشكل (13)، وهذا الأمر بالطبع يؤدي لتخفيض الضجيج المسموع في المحرك.

من أجل اختبار فعالية نظام القيادة بالتيار بوجود منظم Hysteresis controller قمنا باختبار أداء المحرك بوجود قيم مختلفة للحمل، حيث قمنا بتطبيق حمولات مختلفة على محور المحرك ومراقبة التيارات المستجرة من الأطوار ومدى انحراف قيمتها عن القيمة المرجعية المحددة على دخل النظام. في البداية قمنا بتطبيق قيمة مرجعية للتيار تساوي  $i_{ref} = 5A$  وبدون حمل فحصلنا على الشكل (21) والذي يمثل تيارات الأطوار الثلاثة للمحرك SRM:

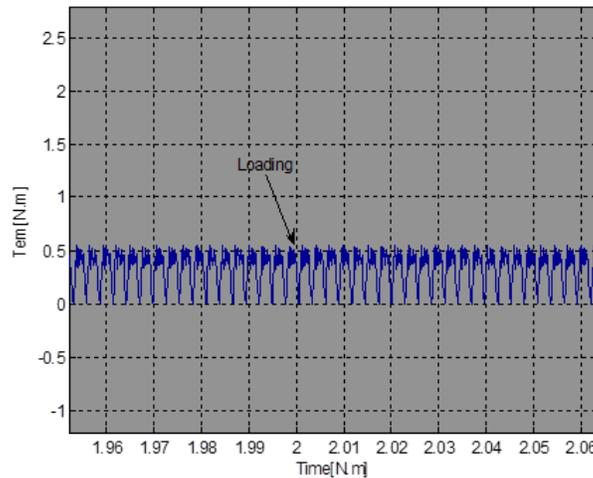


الشكل (21): تيارات الأطوار الثلاثة للمحرك من أجل  $i_{ref} = 5A$  بدون حمل

بهدف التأكد من ثبات قيمة العزم المقدم من قبل المحرك عند تغير الحمل، قمنا بتطبيق قيمة مرجعية للتيار تساوي  $i_{ref} = 3A$  ، وقمنا بتطبيق حمولات مختلفة على محور المحرك لاختبار أداء المحرك بوجود منظم التيار Hysteresis controller. يبين الشكل (22) إشارة العزم للمحرك SRM بوجود منظم التيار Hysteresis controller وذلك عند تطبيق حمل على محوره بقيمة  $T_d=0.1[N.m]$ :



الشكل (22): إشارة العزم اللحظي بوجود منظم التيار Hysteresis controller من أجل حمل قدره  $T_d=0.1[N.m]$  نلاحظ بأنه في اللحظة 2[sec] عند تطبيق الحمل على محور المحرك، ورغم ذلك بقي المحرك يقدم نفس قيمة العزم  $T_d=0.1[N.m]$ ، وذلك نتيجة ضبط قيمة التيار وعدم السماح له بالتغير، ولهذا نجد أن هذا المقدار من الحمل لم يؤدِّ إلى إحداث أي تغير يُذكر على قيمة عزم المحرك. أما على الشكل (23) فنظهر إشارة العزم للمحرك SRM بوجود منظم التيار Hysteresis controller وذلك عند تطبيق حمل على محوره بقيمة  $T_d=0.2[N.m]$ ، ورغم ذلك بقي المحرك يقدم نفس قيمة العزم، وذلك نتيجة ضبط قيمة التيار وعدم السماح له بالتغير، ولهذا نجد أن هذا المقدار من الحمل لم يؤدِّ إلى إحداث أي تغير يُذكر على قيمة عزم المحرك.



الشكل (23): إشارة العزم اللحظي للمحرك SRM بوجود منظم التيار Hysteresis controller من أجل حمل قدره  $T_d=0.2[N.m]$

لهذا يمكننا أن نقول وبشكل أثبتته نتيجة المحاكاة أن نظام القيادة بالتيار Hysteresis controller قد أبدى فعالية جيدة جداً في قيادة SRM بتيارات ثابتة من أجل حمولات مختلفة وبالتالي عزم ثابت من أجل قيم مختلفة للحمل.

**7- النتائج:**

في هذا المقال تم تصميم خوارزمية تحكم لقيادة لمحرك ذي ممانعة مغناطيسية متغيرة تعتمد تقنية المتحكم البطائي في ضبط التيار وبالتالي العزم المتولد عن المحرك ضمن مجال مرغوب به. من أجل تحقيق ذلك فقد تم إنجاز دراسة تحليلية ورياضية للمحرك SRM، حيث استُنتج النموذج الرياضي الخطي للمحرك، وأجريت عملية تمثيل ومحاكاة للنموذج المدروس في برنامج Matlab/Simulink. تم بشكل مفصل شرح كيفية تغذية هذه الآلة بالجهد وذلك باختيار اللحظات المناسبة للفتح والإغلاق.

في سياق هذا المقال تم دراسة أداء المحرك SRM في نظام الحلقة المفتوحة عند عملها كمحرك، حيث تم تحليل النتائج بالكامل من قيم ميكانيكية وكهربائية وأثر تغير زوايا الفتح والإغلاق على أداء الآلة وأهمية اختيار الزوايا الأمثلية بهدف تحقيق أعلى مروود ممكن للآلة مع ضجيج أقل للعزم، كما تم مناقشة أثر القوة المحركة الكهربائية العكسية على التيارات وضرورة القرح في اللحظة المناسبة لتقليل هذا الأثر قدر الإمكان.

تم تطوير نظام الحلقة المفتوحة للآلة SRM بإضافة حلقة مغلقة لتنظيم التيار باستخدام منظم التيار Hysteresis Contrller، على اعتبار أن نظام الحلقة المفتوحة لا يضمن العمل الأمثل للمحرك SRM، حيث تم اختبار فعالية نظام القيادة بالتيار المصمم لدينا وذلك بتطبيق قيم مرجعية مختلفة للتيارات على دخل النظام، حيث تبين بالدراسة والتحليل أن هذا النظام قادر على قيادة الآلة بشكل جيد من أجل تيارات مختلفة، وكذلك إمكانية ضبط قيم تيارات الأطوار عند قيمة ثابتة حول القيمة المرجعية وذلك من أجل قيم مختلفة للحمولات المطبقة على محور المحرك. كما تم دراسة إشارة العزم المطور من قبل المحرك وتبين لنا من خلال نتائج المحاكاة قدرة المحرك على العمل بعزم ثابت من أجل قيم مختلفة للحمولات المطبقة وذلك نتيجة ضبط قيم التيار، أضف إلى ذلك حذف النبضات الشوكية التي ظهرت في إشارة العزم عند العمل بنظام الحلقة المفتوحة، وبالتالي تخفيف الضجيج المسموع الموجود في هذه الآلة. بناء عليه، أظهرت النتائج فعالية خوارزمية التحكم بالتيار وفق تقنية المتحكم البطائي في ضبط تيارات وعزم المحرك مما يحقق استقراراً في عمل المحرك.

## References

- [A] Krishnan R, .(2001) – **Switched Reluctance Motor Drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications**, *p. cm. (Industrial electronics series.;* Tech Virginia).
- [B] Hafis Mohamad Bin Mohamad A., (2005) – **Modeling Linear 6/4 Switched Reluctance Motor Using Matlab Simulink**, *Fakulti Kejuruteraan Elektrik.*
- [C] Miller T.J.E.,( 1993) “**Switched Reluctance Motors and Their Control**”, New York, Oxford University Press.
- [E] Soares F., Costa Branco P.J., (2001)- **Simulation of a 6/4 Switched Reluctance Motor Based on Matlab/Simulink Environment**, *Laboratório de Mecatrónica, Instituto Superior Técnico.*
- [D] 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.
- [F] 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.
- [G] DARABI S., ARDEBILI M., (2011) -“**Optimization of Driving Force of Linear Switched Reluctance Motor**,”, 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, IEEE.
- [H ] YAICH M., GHARIANI M., (2018)- “**Control Strategy for Switched Reluctance Motor Based on Embedded System**”, J. Electrical Systems 14-1 (2018): 156-173.