

## تصميم نظام لقيادة محرك ذي مقاومة مغناطيسية متغيرة (6/8) SRM وتنفيذه باستخدام الحاسوب

د. عباس صندوق\*

### المُلخَص

عُرِضَتْ فِي هَذِهِ الْمَقَالَةِ طَرِيقَةُ لِقِيَادَةِ مَحْرَكِ ذِي مَقَاوِمَةٍ مَغْنَاطِيسِيَّةٍ مَتَغَيِّرَةٍ (SRM 6/8) بِأَرْبَعَةِ أَطْوَارٍ بِاسْتِخْدَامِ الْحَاسِبِ الشَّخْصِيِّ مِنْ خِلَالِ الْمَنْفَذِ التَّسْلِسِيِّ RS 232، وَدَارَةَ قِيَادَةٍ اسْتُخْدِمَ فِيهَا الْمَتَحَكَمُ الصَّغْرِيُّ Atmega 8535، وَخَوَازِمِيَّةُ التَّشْغِيلِ الَّتِي حُزِّنَتْ ضَمَّنَ الْمَتَحَكَمِ الصَّغْرِيِّ، يَتِمُّ الْإِشْرَافُ عَلَى عَمَلِ الْمَحْرَكِ مِنْ خِلَالِ نَافِذَةٍ صُمِّمَتْ لِمُرَاقَبَةِ وَتَغْيِيرِ مَحْدَدَاتِ الْمَحْرَكِ مِنْ سُرْعَةٍ وَتَوْتَرٍ وَتِيَارٍ، إِذْ يُمْكِنُ أَنْ تَسْتُخْدَمَ مِثْلَ هَذِهِ الطَّرَائِقِ لِقِيَادَةِ مَحْرَكٍ يَعْمَلُ فِي بِيئَةٍ يَصْعَبُ الدَّخُولُ إِلَيْهَا. عَلِمًا بِأَنَّ قِيَادَةَ هَذَا النُّوعِ مِنَ الْآلَاتِ الْخَاصَّةِ قَدْ تَطَوَّرَتْ تَطَوُّرًا كَبِيرًا فِي كِلْتَا الدَّارَتَيْنِ دَارَةَ الْقِيَادَةِ وَدَارَةَ الْإِسْطَاعَةِ. الْمَحْرَكُ ذُو الْمَقَاوِمَةِ الْمَغْنَاطِيسِيَّةِ الْمَتَغَيِّرَةِ (SRM 6/8) مَوْضُوعُ الْبَحْثِ صُمِّمَ مَخْبَرِيًّا بِدَوَارٍ مِنَ الْحَدِيدِ اخْتَبَرَ اخْتِبَارَ كُلِّ مِنَ الْمَحْرَكِ وَنَمُوذَجِ الْقِيَادَةِ الْمَنْفَذِ وَرُسِمَتْ مَنَحْنِيَّاتُ الْأَدَاءِ وَنُوقِشَتِ النَّتَائِجُ مِنْ حَيْثُ شَكْلُ مَنَحْنِيَّاتِ التِّيَارِ وَالتَّوْتَرِ فِي الْأَطْوَارِ وَالتِّيَارِ وَالتَّوْتَرِ الْكُلِّي الْمَسْتَجِرِ مِنَ الْمَنْبِعِ وَقِيَاسِ السَّرْعَةِ، وَالتَّحَكُّمِ بِهَذِهِ الْمَحْدَدَاتِ مِنْ خِلَالِ نَافِذَةِ الْبَرْنَامِجِ الْمَخْصُصَةِ لِذَلِكَ.

الكلمات المفتاحية: المتحكم المنطقي Atmega 8535، المحرك ذو المقاومة المغناطيسية المتغيرة، قيادة المحرك ذي المقاومة المغناطيسية المتغيرة.

\* قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

## 1- مقدمة

يمكن تصنيف المحركات الكهربائية في مجموعتين وذلك اعتماداً على أسلوب تشكل العزم في الآلات الكهربائية: الأولى: ويتشكل فيها العزم كهرومغناطيسياً بالآلات التحريضية- التزامنية - آلات التيار المستمر، وهذه الآلات تختلف أيضاً عن بعضها بعضاً من ناحية إنتاج حقل ملفات التحريض (مغانط كهرومغناطيسية أو مغانط دائمة).

الثانية: ويتشكل فيها العزم بسبب تغير المقاومة (Variable Reluctance).

تنتج السرعة في المجموعة الأولى من تفاعل حقلين مغناطيسيين، يتولد الأول من الجزء الثابت، والثاني من الجزء الدائر ونتيجة الترابط المتبادل بين هذين الحقلين (Mutually Coupled) ينتج العزم كهرومغناطيسي (Electromagnetic Torque)، ويشكل هذا النوع من المحركات حالياً الغالبية العظمى من المحركات المستخدمة في التطبيقات الصناعية.

في المجموعة الثانية تنتج الحركة كنتيجة لتغير المفاعلة في الثغرة الهوائية بين الثابت والدائر، فعند تغذية ملف التحريض في الثابت ينتج حقل وحيد وينتج العزم بسبب حركة الدائر بالاتجاه الذي تكون فيه المفاعلة بقيمة أصغر، وهذه الظاهرة مشابهة للقوة التي تجذب الحديد أو الفولاذ باتجاه المغانط الدائمة، في هذه الحالات تصل المفاعلة إلى أصغر قيمة لها عندما يصبح المعدن والمغناطيس في حالة تماس فيزيائي، حيث تقع المحركات ذات المقاومة المغناطيسية المتغيرة (SRM) ضمن هذه المجموعة من الآلات.

من حيث البنية تعدّ المحركات ذات المقاومة المغناطيسية المتغيرة هي الأبسط بين الآلات الكهربائية، والثابت هو الذي يحتوي على الملفات الكهربائية فقط، والجزء الدائر يخلو من أي ملفات أو مغانط دائمة إنما يشكل من اسطوانة من حديد مصمت تحتوي على محيطها أسناناً

لتشكيل الأقطاب، وتصنع بعض أنواع الدائر في هذا النوع من المحركات من رقائق فولاذية وبعدها الأقطاب المطلوب، وتجمع مع بعضها حول محور دوران المحرك، ويحظى حالياً هذا النوع من المحركات بعدد كبير من البحوث والدراسات.

لايغذى هذا النوع من المحركات مباشرة من المنبع المستمر أو المتناوب إنما يحتاج إلى مبدل إلكتروني، علماً بأن وجود الأقطاب البارزة في كل من الثابت والدائر الضرورية لإنتاج العزم تسبب عدم الخطية في خصائص هذا النوع من المحركات وتعقد عملية التحليل والتحكم به. تعدّ هذه الآلات ذات موثوقية عالية، فكل طور مستقل فيزيائياً ومغناطيسياً وكهربائياً عن الأطوار الأخرى في المحرك، فضلاً عن عدم احتواء الدوار على ملفات أو مغانط دائمة مقارنة بالمحركات الأخرى. من حيث مساوئ هذا النوع من المحركات فهي تنحصر بوجود صعوبة في التحكم، وحاجتها إلى حساس موضع الجزء الدائر، ظهور الضجيج في أثناء العمل، ويحتوي العزم على تعرجات كثيرة وذلك مقارنة بالمحركات الأخرى. إن التخلص من هذه المساوئ يحتاج إلى الفهم الجيد للتصميم الميكانيكي، وتطوير خوارزميات تشغيل هذا النوع من المحركات يمكن أن يحد من هذه المساوئ.

## 2- مبدأ عمل المحرك ذي المقاومة المغناطيسية المتغيرة

عند تغذية أحد أقطاب الجزء الثابت تنشأ فيه سيالة مغناطيسية ويصبح قطباً شمالياً تخرج السيالة المغناطيسية منه وتتجه نحو أسنان الجزء الدائر ليصبح قطباً مغناطيسياً جنوبياً، ويحدث التجاذب بين القطب الشمالي للثابت المغذي والقطب الجنوبي للدائر مما يؤدي إلى تحرك هذا السن ومن ثم إلى دوران الجزء الدائر. والشكل (1) يبيّن أشكال مختلفة للمحرك ذي المقاومة المغناطيسية المتغيرة، إذ نلاحظ في الشكل نموذجاً لمحرك

## آ - معادلة التوتير

$$u = i \cdot R + N \frac{df}{dt} = i \cdot R + \frac{d(N \cdot f)}{dt} = \quad (1)$$

$$= i \cdot R + \frac{dy}{dt}$$

$$u = i \cdot R + L_L \frac{di}{dt} + L_u \frac{di}{dt} + i \frac{dL_u}{dq} w \quad (2)$$

إذ:

$L_L$ : عامل التحريض المقابل للسيالة المتشردة وهو تقريباً ثابت من أجل تيار محدد.

$L_u$ : عامل التحريض المقابل للسيالة الرئيسية أو المفيدة.

## ب - معادلة التيار

- عندما يكون الدائر ثابتاً فإن قيمة التيار  $i$  تعطى بالعلاقة

الآتية:

$$i = \frac{u}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L} t}) \quad (3)$$

- عندما نعدُّ المقدار  $e_r = i \frac{dL_u}{dq} \cdot w$  (وهو يمثل القوة المحركة العكسية المتحرضة بسبب الدوران) ثابتاً أي أن مشتق عامل التحريض  $L_u$  بالنسبة إلى زاوية الدوران ثابت أي علاقة عامل التحريض بالزاوية تمثل بعلاقة خطية عندها يكون تغيّر التيار كما هو مبين بالعلاقة الآتية:

$$i = \frac{u - e_r}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L} t}) \quad (4)$$

## ج - معادلات الاستطاعة والعزم

$$T = \frac{1}{2} \cdot \frac{i^2 \cdot N^2}{R_{mg \min} \cdot q_{\max}}; P = w \cdot T$$

$$u \cdot i = R \cdot i^2 + i \frac{d\phi}{dt} \quad (5)$$

إذ:

$N$ : عدد اللفات.

$i$ : التيار الكهربائي (تيار الطور في المحرك).

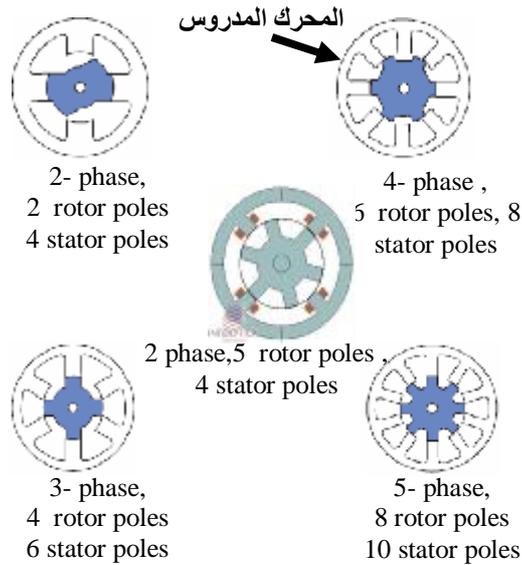
$R_{mg \min}$ : مقاومة الثغرة الهوائية الأصغرية (حالة

التطابق التام).

$\theta_{\max}$ : زاوية التطابق الأعظمية.

$\omega$ : السرعة الزاوية الميكانيكية.

يختلف عن النماذج المتعارف عليها، وهذا يدل على أن وجود العدد الأكبر للأقطاب ليس مرتبطاً دوماً في الجزء الثابت فيمكن أن يكون العدد الأكبر من الأقطاب في الجزء الدائر [4]، [5].



الشكل (1) يبين أشكالاً مختلفة للمحرك ذي المقاومة المغناطيسية المتغيرة (SRM)

## 3- النموذج الرياضي للمحرك ذي المقاومة

## المغناطيسية المتغيرة (SRM)

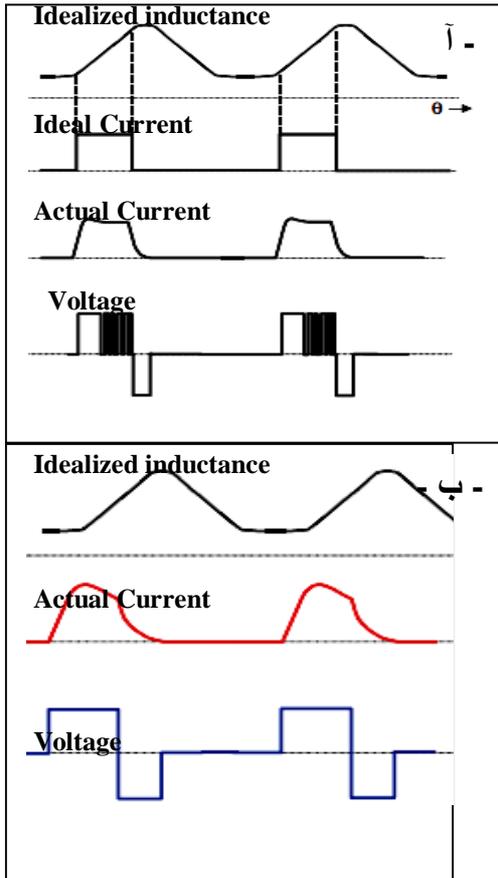
عند رسم مسارات السيالة الناتجة من أي قطب نجد أن هذه السيالة تخترق أكثر من ثغرة هوائية واحدة ومن ثمّ الدارة المغناطيسية للقطب ليست دارة بسيطة بل معقدة نسبياً. [3]، [4]، [5]

يتكون النموذج الرياضي لهذا النوع من المحركات من مجموعة من المعادلات كما هو معروف في أنواع الآلات الأخرى، وسوف نعرض النموذج لقطب واحد باعتبار أن الأقطاب متماثلة كلها:



الشكل (4): الشكل العام للمحرك المصمم ونظام التحكم

يبين الشكل (5) إشارات التيار - التوتر - تغير المحارضة النظرية والعملية تبعاً لزاوية الدائر ( $\theta$ ) في المحرك ذي المقاومة المغناطيسية المتغيرة (SRM) عند سرعتي دوران مختلفتين. [6],[7]



الشكل (5): منحنيات التيار - التوتر - تغير المحارضة

أ- عند سرعة منخفضة - ب- عند سرعة عالية

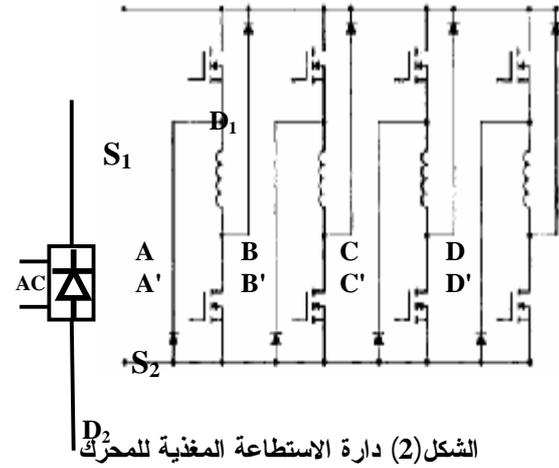
#### 4- طرائق قيادة المحرك ذي المقاومة المغناطيسية

##### SRM المتغيرة

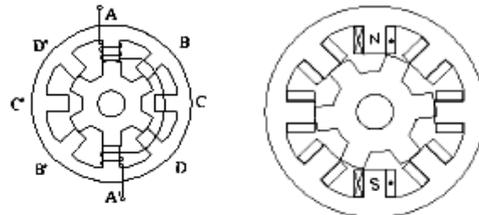
يصنف هذا النوع من المحركات ضمن مجموعة المحركات الخاصة، لذلك تتطلب قيادته استخدام طرائق قيادة مشابهة للطرائق المستخدمة في قيادة المحركات الكهربائية الخاصة مثل المحركات الخطوية (Step Motors)، ومن أجل الحصول على أداء أمثل للمحرك ولاسيما عند مرحلة الإقلاع لابد من الأخذ بالحسبان زاوية توضع الدائر. لذلك هناك حالتان من حالات التغذية الخلفية:

الأولى: دون حلقة تغذية خلفية (دون عنصر مراقبة لوضعية الدائر).

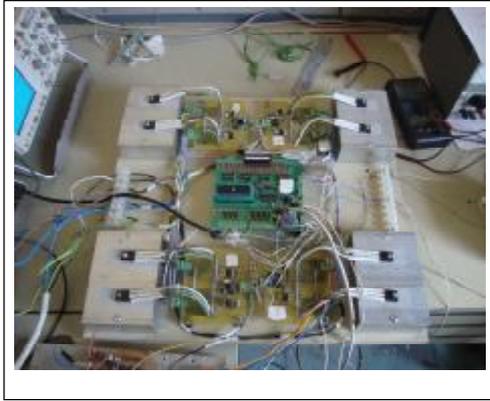
الثانية: مع وجود حلقة تغذية خلفية (مع وجود عنصر لمراقبة توضع الدائر (Sensor or Encoder). [1],[2], [5].  
أما أشكال دارة التغذية لمفاتيح المحرك ودائر توليد نبضات التحكم بفصل ووصل العناصر الترانزستورية فهي متعددة الأشكال وتتبع لأسلوب تغذية ملفات أقطاب المحرك ولطريقة وصل ملفات الأقطاب مع بعضها بعضاً من جهة، ومع منبع التغذية من جهة أخرى.



الشكل (2) دارة الاستطاعة المغذية للمحرك



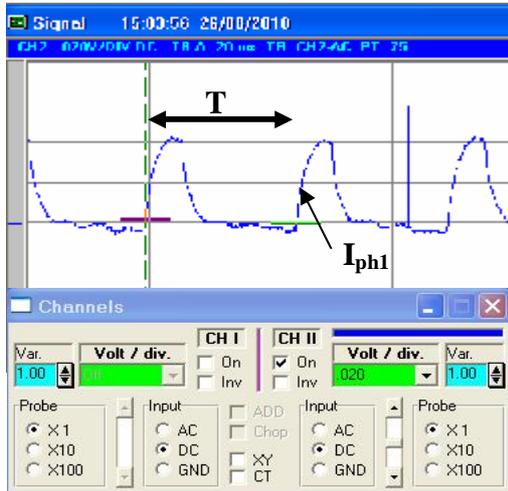
الشكل (3) طريقة واتجاه لف ملفات المحرك



الشكل (8) دائرة الاستطاعة المنفذة لتغذية المحرك

#### 6- نتائج الاختبارات العملية لنظام القيادة

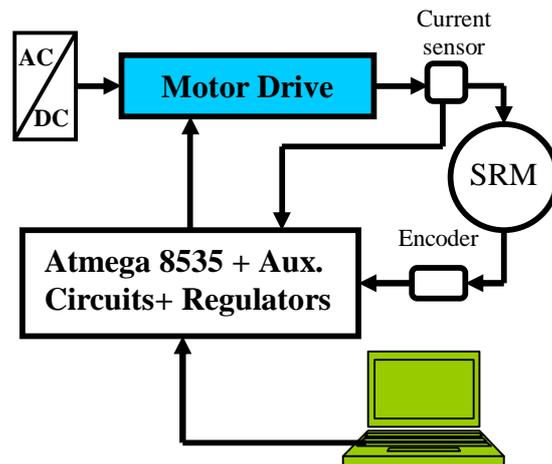
من أجل اختبار مدى كفاءة واستجابته نظام القيادة المنفذ أُجريت مجموعة من الاختبارات والقياسات ورُسِّمَت إشارات التيارات والتوترات لمنبع التغذية ولأطوار المحرك، والأشكال (9، 10، 11، 12، 13، 14) تبين الإشارات الحقيقية للتيارات والتوترات والقوة المحركة الكهربائية المتحرضة في أطوار المحرك لحظة فصل التغذية عنها.



الشكل (9): شكل تيار الطور A-A'

#### 5- نظام القيادة المنفذ

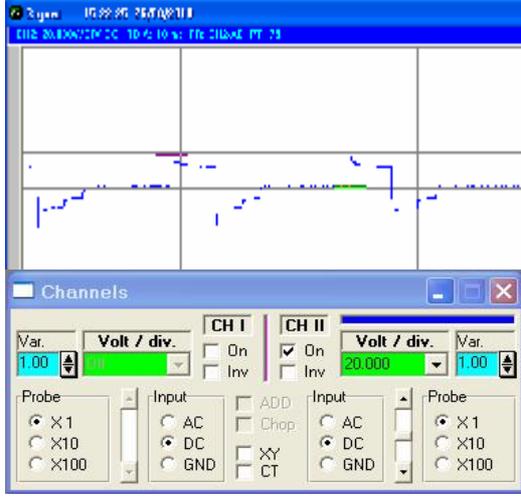
لقيادة المحرك نُفِّذَ نظام قيادة يرتبط مع الحاسب الشخصي PC من خلال المنفذ التسلسلي RS 232، حيث يتم الإشراف على عملية القيادة والتحكم بالمحرك من خلال واجهة نوافذ خاصة أعدت لهذه الغاية ويتكون هذا النظام من المتحكم الصغري Atmega 8535، خوارزمية التشغيل، التخاطب مع الحاسب من خلال المدخل التسلسلي RS 232، مجموعة الدارات المتممة كمنظم التيار، منظم التوتر [8] والشكل (5) يبين مخططاً صندوقياً عاماً يضم المحرك مع دائرة التحكم ودارات المراقبة اقترحت.



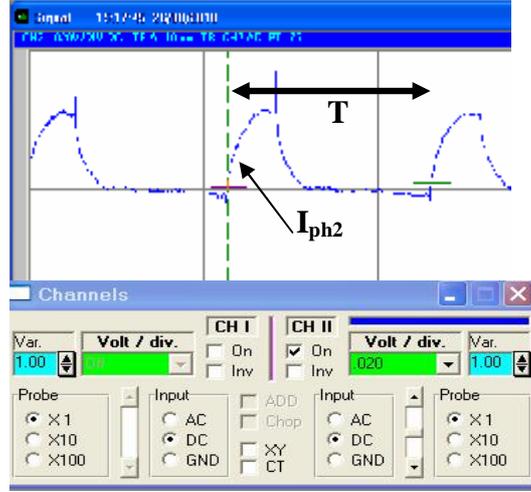
الشكل (6): مخطط صندوقي لنظام التحكم المنفذ



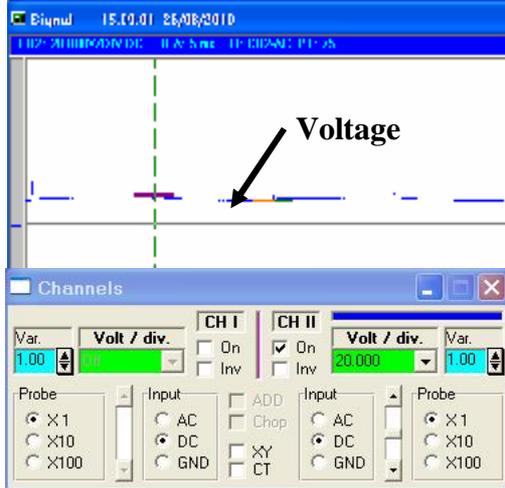
الشكل (7) دائرة القيادة مناسبة لقيادة حتى 16 ترانسستور



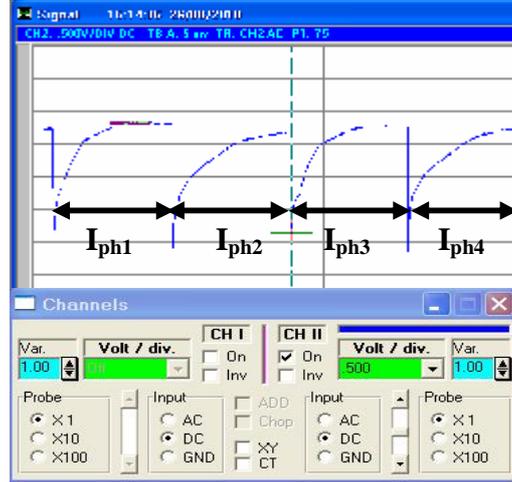
الشكل(13): شكل توتر الطور B-B'



الشكل(10): شكل تيار الطور B-B'



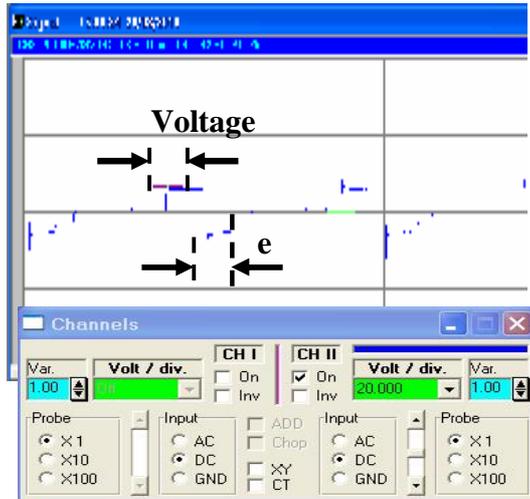
الشكل(14): شكل التوتر الكلي



الشكل(11): شكل تيار الكلي المستقر

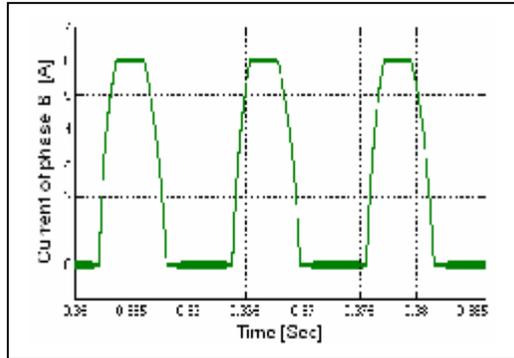
#### 7- النمذجة والمحاكاة للمحرك مع نظام القيادة

أصبحت النمذجة والمحاكاة لنظم القيادة والتحكم من الوسائل المهمة في تحري أداء النماذج الفيزيائية الحقيقية والتنبؤ بسلوك هذه النماذج من خلال النموذج الرياضي الذي يوضع لهذا النظام. قد نجد هناك فروقات في منحنيات الأداء الناتجة من كلا النموذجين، وهذه الفروقات تعتمد على دقة النموذج الرياضي وعلى الأخذ بالحسبان المحددات، وشروط التشغيل كلها. تمت المحاكاة عند القيم الاسمية للمحرك.

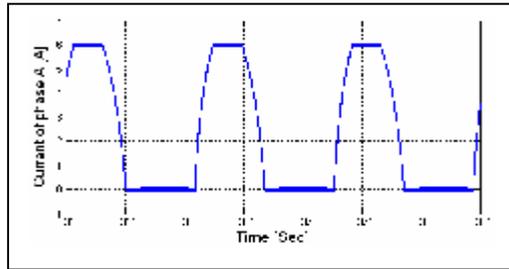


الشكل(12): شكل توتر الطور A-A'

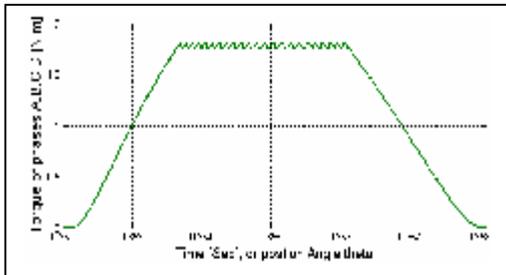
تغيير زاوية التداخل بين أقطاب الثابت والدائر أو زاوية التوضع position-angle، كما هو مبين في الشكل (5).



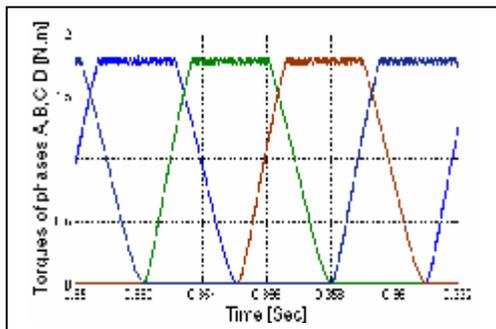
الشكل (17): تيار الطور A-A' (الطور الأول)



الشكل (18): تيار الطور B-B' (الطور الثاني)

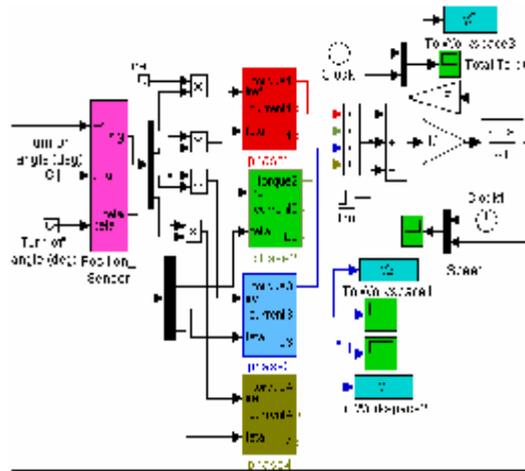


الشكل (19): العزم الناتج عن أحد الأطوار

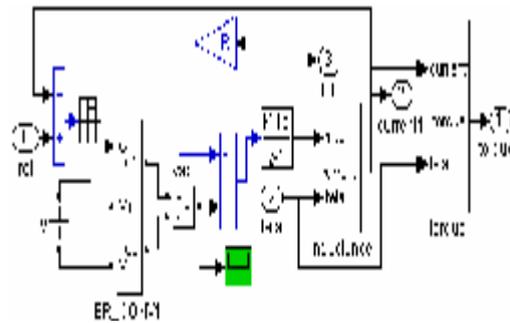


الشكل (20): العزم الناتج عن الأطوار

في بحثنا هذا أردنا إدخال عملية المحاكاة كوسيلة رديفة في اختبار أداء المحرك مع نظام القيادة حيث تم تمثيل أطوار المحرك بأربعة عناصر وعنصر لمحاكاة عنصر تحسس زاوية الدائر، ويبين الشكل (15) المخطط الصندوقي الكامل لعملية المحاكاة، في حين يبين الشكل (16) مخطط المحاكاة لأحد الأطوار على اعتبار أن الأطوار جميعها في المحرك متماثلة. [8]



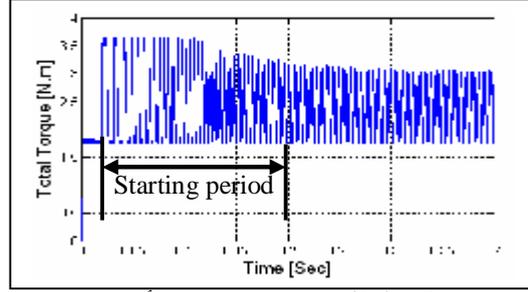
الشكل (15): المخطط الصندوقي الكامل للمحاكاة



الشكل (16): مخطط المحاكاة لأحد الأطوار

### 8- نتائج المحاكاة

اختبرت مجموعة من الإشارات التي نتجت من عملية المحاكاة للمحرك مع نظام القيادة، مع العلم أنه يمكن الحصول على نتائج أخرى مثل تغييرات المحارضة نتيجة



الشكل (21): العزم الناتج عن الأطوار

### 9- مناقشة النتائج

من خلال دراسة إشارات التوترات والتيارات التي تم الحصول عليها من الاختبارات العملية وعملية المحاكاة المبيّنة في الأشكال السابقة تم التوصل إلى النتائج الآتية:

1- إمكانية استخدام منابع التيار المستمر الناتجة عن دارات التقويم بدلاً من منابع التيار المستمر (المدخرات)، وذلك بعد إضافة مكثف على أطراف جسر التقويم ليقوم بعملية ترشيح للتوتر (تحسين شكل موجة التوتر).

2- نلاحظ أنه عند كل حالة فصل ووصل للقواطع (الترانزستورات) تظهر هناك حالة عابرة لكنها سريعة التخماد، ويمكن عدّها ضمن المجال المقبول ولا تؤثر في أداء المحرك (زمنها لا يتجاوز 0.01 من زمن النبضة المطبقة على الملف) الأشكال (12، 13، 14).

3- من الأشكال التي تم الحصول عليها نتيجة المحاكاة ومقارنتها بالنتائج العملية نلاحظ أن هناك بعض الفروقات بين الإشارات، وهي ناتجة من استخدام النموذج الرياضي.

### 10- محددات المحرك المدروس والمنفذ

عدد أقطاب الثابت (8)، عدد أقطاب الدوار (6)، عدد الأطوار (4) كل قطبين يوصلان على التسلسل ويمثلان طوراً، التوتر الاسمي (200 فولت)، التيار الاسمي (6 أمبير)، الاستطاعة الاسمية (1 حصان)، السرعة الاسمية (200د/د)، مقاومة الطور الواحد 3.52 أوم، طول الثغرة الهوائية 0.5مم، عدد لفات كل قطب 230 لفة.

**المراجع:**

1. N. H. Mvungi, " Sensorless Commutation Control of Switched Reluctance Motor, International Journal of Applied Science, Engineering and Technology Volume 4, No.1, 2007 ISSN 1307-4318
2. H. Klode, A. M. Omekanda and B. Lequesne, S. gopalakrishnan, GM Research Labs, A. Khalil, S. Underwood and I. Husain, the Univ. of Akron, " The Potential of Switched Reluctance Motor Technology for Electro-Mechanical Brake Applications" Copyright©2006,SAE International.
3. Application Note, NEC, "Switched Reluctance Motor Control with  $\mu$ PD78K0/KX2", Document No. U18498EE1V0 AN00, Date Published December 2006, © NEC Electronics 2006, Printed in Germany.
4. Abbas Sandouk, Dr. M.Aldosoky, Dr. Habil Gerhard Harold, "Desing and Execution Acontrolled Switch Reluctance Motor To be Used in Electric Cars", Doctorate Thesis, Damas Univ., 2005 .
5. Michael T. Drenzo, " Switched Reluctance Motor Control-Basic Operation and Example Using the TMS320F240", Application Report, SPRA420A-February, 2000, TEXAS INSTRUMENTS.
6. Michael T. DiRenzo, Digital Signal Processing Solutions, Switched Reluctance Motor Control – Basic Operation and Example Using the TMS320F240, Application ReportSPRA420A - February 2000, Texas Instruments.
7. NEC, Application Note Switch reluctance motor control with  $\mu$ PD78K0/KX2, Document No. U18498EE1V0AN00, Date published December 2006, © NEC Electronics 2006, Printed in Germany
8. Ali AL Jazi., Abbas Sandouk, " Design and Execution A Driving System for Switch Reluctance Motor SRM (3/4) Using PC ", Damascus Journal , 2010..