التحكم بالتيار باستخدام المتحكم التباطؤي للمحرك متغير الممانعة ذو الأقطاب (6/4)

د. بتول الساطي

ملخص

هدف هذا البحث لدراسة المحرك متغير الممانعة ذو الأقطاب (6/4) والتحكم به من خلال متحكم التيار التباطؤي. يوجد نمطين للتقطيع عند تطبيق طريقة التحكم بالتيار من خلال المتحكم التباطؤي وهما التقطيع الناعم والقاس، وتم تطبيق طريقة التقطيع الناعم في هذا البحث كونها الأكثر ملائمة لعمل الآلة بوضعية المحرك. تم تطبيق عدة قيم لتوتر المنبع المستمر للقالبة المسؤولة عن تغذية المحرك لمعرفة أداء المحرك وسلوكه كلما زادت قيمة التوتر والتي تعد من أهم البارامترات في عملية التبديل أثناء التحكم بالمحرك. تم تطبيق دارة التحكم بالمحرك باستخدام برنامج الماتلاب 2021a. تم استخلاص منحنيات السرعة والتيار والفيض وعزم المحرك الكهرومغناطيسي وعزم الحمولة. تبين من خلال النتائج أن التيار يزداد بزيادة التوتر المستمر وبالمقابل زيادة التوتر المستمر قد تؤثر على اللحظة التي يدخل فيها منحني سرعة دوار المحرك إلى الحالة المستقرة ولذا ينبغي انتقاء قيمة التوتر بشكل دقيق.

الكلمات المفتاحية: المحرك متغير الممانعة، التبديل، التحكم بالتيار.

Current Control Using Hysteresis Controller for Switched Reluctance Motor with Poles (4/6)

Abstract

The aim of this research is to study the switched reluctance motor with poles (4/6) and control it through the hysteresis controller. There are two switching patterns when applying the current control method through the hysteresis controller, which are soft and hard switching. The soft switching method is applied in this research as it is the most suitable for the machine to operate in the motor mode. Several values of the DC source voltage of the inverter responsible for feeding the motor are applied to know the motor performance and behavior as the voltage value increases, which is one of the most important parameters in the switching process during motor control. The motor control circuit is implemented using the MATLAB 2021a program. The speed, current, flux, electromagnetic motor torque and load torque curves were extracted. The results showed that the current increases with increasing DC voltage, and in contrast, increasing DC voltage may affect the moment at which the motor rotor speed curve enters the steady state, so the voltage value should be selected carefully.

Key words: switched reluctance motor, switching, current control.

1. مقدمة:

يعد محرك متغير الممانعة (SRM) مثاليًا لتطبيقات المركبات الكهربائية (EV) نظرًا لبنيته القوية وعزم دورانه العالي، ونطاق السرعة الواسع والأداء الجيد أثناء الحمل الزائد، وبوجود الأعطال. حيث تعتبر المحركات القابلة للتحكم والقيادة (كالمحركات متغيرة الممانعة)، أساساً لأنواع مختلفة من المركبات التي تعمل بالطاقة المتجددة، وذلك انطلاقاً من السعي للحصول على مزايا انبعاثات الكربون الأقل وكفاءة الوقود العالية وانخفاض الضوضاء، حيث أصبحت المركبات الكهربائية تحظى بشعبية متزايدة في قطاع النقل[1]. يعتمد المحرك متغير الممانعة على عزم الممانعة للدوران بدلاً من العزم الكهرومغناطيسي. يأتي مصطلح (التبديل) من أنّ المحرك يعتمد بشكل كبير على الترانزستورات من أجل التشغيل[2].

يتمتع المحرك متغير الممانعة بمجموعة من الميزات، كالسعر المنخفض والبنية الثابتة والبسيطة، وتنظيم السرعة الجيد، وأداء جيد أثناء الإقلاع، بالإضافة إلى الكفاءة التشغيلية العالية [3]. إنّ خصائص المحرك SRM كالفيض المتشابك والعزم، بالإضافة إلى تغير الممانعة المغناطيسية وآثار الإشباع كلها عبارة عن توابع لاخطية لموضع الدوار وتيار الطّور، مما يجعل تمثيل المحرّك رياضياً عمليّة معقّدة [4]. ظهر المحرك متغير الممانعة واستخدم بشكل فعلي في العام 1970 نتيجة توافر الأجهزة الالكترونية في ذلك الوقت. حالياً جذب هذا المحرك الانتباه بشكل لافت نظراً لمزاياه بالمقارنة مع المحركات التقليدية [5].

2. مشكلة البحث:

زاد مؤخراً الاهتمام بشكل بالغ في التطبيقات المتعلقة بالمركبات الكهربائية، ويجري العمل على تطويرها وتطوير المعدات الخاصة بها ومنها المحركات متغيرة الممانعة. يعتبر المحرك متغير الممانعة من الآلات الخاصة التي تتميز بعدم وجود ملفات أو مغانط على الجزء

الدوار بخلاف الآلات التحريضية وذات المغانط الدائمة. انطلاقاً مما سبق، ناقشت هذه الدراسة فعالية التحكم بالمحرك متغير الممانعة باستخدام طريقة التحكم بالتيار عن طريق المتحكم التباطؤي. يعتبر توتر المنبع المستمر الخاص بالقالبة من أهم البارامترات التي تؤثر على عملية التبديل وبالتالي من الضروري انتقاء القيمة المناسبة التي تحقق أداء المحرك بشكل فعال.

3. أهمية البحث

تتجلى أهمية البحث في تنفيذ ومناقشة فعالية طريقة التحكم بالتيار للمحرك متغير الممانعة (6/4)، وتأتي أهمية دراسة هذا النوع من المحركات وأهمية التحكم به من استخدامه في المركبات الكهربائية، والطائرات وغيرها من التطبيقات.

4. أهداف البحث

1-دراسة المحرك متغير الممانعة ذو الأقطاب (6/4)، مع حمولة متغيرة، وتغير بالسرعة والتوتر المستمر.

2-تصميم دارة التحكم بالتيار باستخدام المتحكم التباطؤي باستخدام الماتلاب واستخراج منحنيات السرعة والعزم الكهرومغناطيسي وعزم الحمولة وملاحظة تغير هذه المنحنيات بتغير الحمولة وتوتر القالبة المستمر.

5. أدوات البحث:

تم تطبيق البحث من خلال تمثيل المحرك متغير الممانعة (6/4) ودارة التحكم بالتيار الخاصة به باستخدام برنامج Matlab 2021a.

6. الدراسات السابقة:

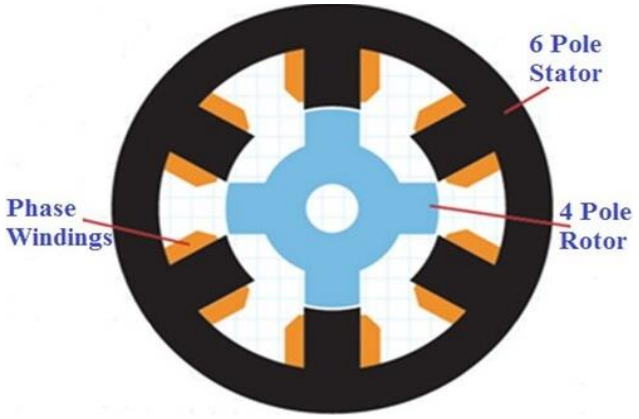
دراسة [6] قدمت مراجعة حول الآلات الكهربائية التي تتضمن العديد من بنى الآلات متغيرة الممانعة بالإضافة إلى الآلات التقليدية كالآلات المتزامنة ذات المغانط الدائمة، رصدت الدراسة أداء هذه الآلات من خلال قياس كالمردود، وتعرجات العزم، الاهتزاز والضجيج، وحالات العطل، وأثبتت الدراسة من خلال نتائجها أن البنى المغناطيسية الحديثة كالمحرك متغير الممانعة يمكن أن يكون بديلاً عن الآلات ذات المغانط الدائمة في تطبيقات الجر الكهربائي. دراسة [7] درست الموديل الرياضي للمحرك متغير الممانعة غير الخطي بالاعتماد على تحريضية طور ملف الثابت. عندما يكون للمحرك خصائص لاخطية فإنه يلزم بالإضافة إلى الموديل الرياضي أن يتم فهم عمل المحرك وتصميمه والتحكم به. من خلال المعادلات والتمثيل الرياضي للمحرك قام الباحث بنمذجة المحرك متبدل الممانعة 8/6. ودراسة [8] ناقشت التطورات والعقبات التي تواجه المحركات متغيرة الممانعة والرؤية المستقبلية للتطبيقات، وتصف الصعوبات الأساسية في دارات التحكم في المحرك متغير الممانعة والتي ينبغي أن تؤخذ في الاعتبار عند قيادة المحرك، اقترحت الدراسة خريطة أعمال مستقبلية لتحقيق استراتيجية تحكم موثوقة تعزز عمل المحرك في التطبيقات المستقبلية. في حين أن الدراسة [9] قدمت مراجعة مفصلة عن المحركات متغيرة الممانعة وأنظمة قيادتها في السيارات الكهربائية، وبينت أن هذا النوع من المحركات استخدم بشكل شائع في تطبيقات المركبات الكهربائية نتيجة بنيتها الموثوقة، والتصميم الخالي من المغانط، وناقشت الدراسة أهم طرق قيادة هذا النوع من المحركات. أما الدراسة [10] فقد بينت أهم مزايا المحركات متغيرة الممانعة ومساوئها، وذكرت أن زيادة عدد الأقطاب في هذه المحركات يقلل من تعرجات العزم فيها. وبيّن أن البنية الهندسية للدوار تؤثر بشكل أساسي على قدرة المحرك على الإقلاع من أي موضع للدوار، وبينت أن بيانات الموضع للتحكم بالمحرك والحصول على أفضل أداء يعد من أهم التحديات في عمل المحرك. كما أن البنية البارزة المضاعفة تسبب ضجيج وتعرجات بالعزم. الدراسة [11] طبقت تشغيل المحرك باستخدام

المتحكم التباطؤي بالاعتماد على الحلقة المغلقة، وبيّن أن متحكم التيار يستخدم لتتبع تيار الدوار ومقارنته مع قيم التيار المرجعي، وقدّمت الدراسة مخطط للتحكم بالمحرك (6/4) بناء على مفهوم الحلقة المغلقة، واعتماداً على المبدلة غير المتناظرة والمتحكم التباطؤي. وذكر الباحث أن تشغيل الأطوار المختلفة في المبدلة يعتمد على موضع الدوار والذي يستخرج بناء على السرعة والزاوية θ على مخرج المحرك. دراسة [12] بينت أن المحرك متغير الممانعة يعمل بشكل أساسي في منطقة التشبع لأن عامل الاستطاعة أقل في المنطقة الخطية مما يجعل عملية نمذجة المحرك صعبة، واقترح الباحث إنشاء نماذج وبنى محددة للمحركات تأخذ بعين الاعتبار حالة اللاخطية، وذكر أن غياب المغانط في بنية المحرك يجعل تكاليف إنتاجه وإعادة تدويره أقل مقارنة مع الآلات ذات المغانط. كما أن كل طور مستقل كهربائياً ومغناطيسياً من بقية الأطوار مما يزيد من موثوقية عمله في حالات العطل، ويجعل من عمليات الصيانة أسهل. دراسة [13] حللت أداء المحرك ثلاثي الطور 6/4 من حيث إشارات التيار والتدفق وعزم الدوران والسرعة. وبيّن أنه عندما تكون سرعة المحرك منخفضة يرتفع التيار بسرعة، في حين أنه إذا كانت السرعة كبيرة تكون الزيادة في التيار منخفضة، وأنه في منطقة السرعة المنخفضة يمكن التحكم بالتيار باستخدام التحكم بالمتحكمات التباطؤية. يتم تطبيق جهد $\pm V_{dc}$ بطريقة يتحد التيار وفق نطاق حزمة، بحيث تكون قيم الحزمة العلوية والسفلية حول القيمة المرجعية للتيار، وبعد السرعة الأساسية ينبغي الحفاظ على التيار، ولا يمكن أن يزداد التيار بسرعة لأن السرعة تصبح كبيرة، وبدلاً من الحفاظ على ثبات التيار في هذه المنطقة يجب اعتبار الاستطاعة. في حين عندما تكون السرعة كبيرة ينبغي أن يتراكم التيار من خلال التبديل وتسمى الزاوية التي يتم التبديل من خلالها زاوية التقدم التي يتقدم فيها تطبيق الجهد.

7. الإطار المفاهيمي للبحث

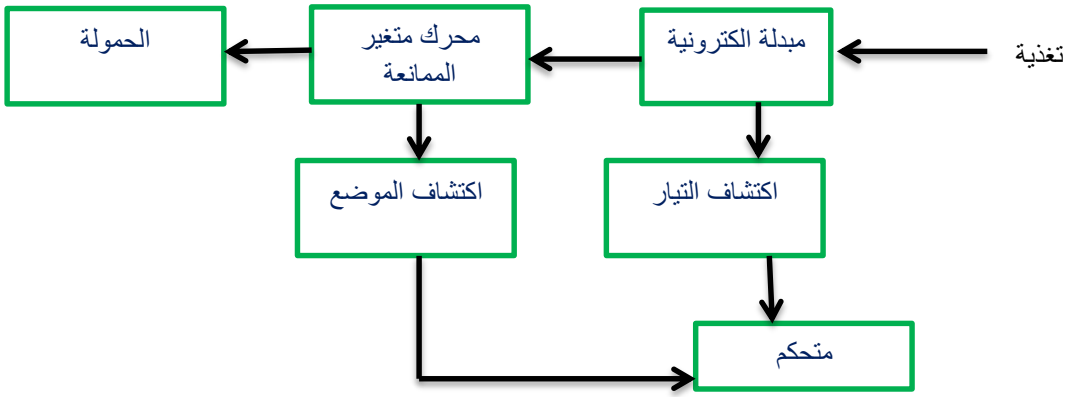
1.7 تركيب المحرك متغير الممانعة:

إن المحرّك متغير الممانعة ذو ست أقطاب للثابت وأربع أقطاب للدوار موضح بالشكل (1)، وقد يكون عدد الأقطاب زوجياً أو فردياً، يتم تصنيع غالبية المحركات بـ(ست أو ثماني) أقطاب للثابت. هذه الأقطاب تحمل وشائع الحقل. تتصل وشائع الحقل للأقطاب المعاكسة على التسلسل بحيث تكون القوى المحرّكة الكهربائية تراكميّة، وتسمّى ملفّات الطّور. الوشيعة المفردة أو مجموعة الوشائع تكوّن ملفّات الطور، كل من هذه الملفات يتصل إلى طرف المحرّك. هذه الأطراف تتصل مع أطراف الخرج لدارة التبديل الالكترونية التي يكون دخلها مستمر dc [14]. إن المحرك متغير الممانعة له أقطاب بارزة على الثابت والدوار، بدون أية وشائع أو مغانط دائمة على الدوار ويشار إليه بالآلة مضاعفة الأقطاب البارزة. تكون أقطاب الثابت أكبر من أقطاب الدوار[15]. ينتج العزم في هذه الآلة نتيجة لتغير الممانعة في الثغرة الهوائية بين الثابت والدوار، وتنتج حركة المحرك من خلال ميل الدوار إلى الحركة إلى الموقع حيث تكون ممانعة الملف المتهيج أقل ما يمكن [16].



الشكل 1مقطع عرضي في المحرك متغير الممانعة (6/4)

عدد أقطاب الدوار في هذا المحرك تختلف عن عدد أقطاب الدائر (4 أو 6). يحمل محور الدوّار حساس الموضع. الإيقاف والتشغيل لمختلف العناصر في دارة المبدلة تتأثّر بشكل أساسي بالإشارات التي يتم الحصول عليها من حساس موضع الدوار[2]. تستخدم وحدة الكشف عن الموضع من أجل الكشف عن إشارة موضع دوار المحرك ووحدة اكتشاف التيار يستخدم بشكل أساسي لجمع تيار طور ملف الثابت. تتحكم آلية التبديل الخاصة بدارة المبدل بإشارة الدخل[17].



الشكل 2 مخطط تنظيم السرعة للمحرك متغير الممانعة

إن الجزء الأساسي في دارة عمل المحرك متغير الممانعة هو التحكم بالسرعة، تعمل تقنية التحكم على نقل الاختلاف بين السرعة المرجعية والسرعة المقاسة إلى وحدة التحكم بالسرعة ، وبالتالي يتم توليد إشارات التيار المرجعية عبر تيار مرجعي وفقاً لموضع الدوار. إن التيار الناتج عن التباين بين التيار المقاس والمرجعي يُقدَّم إلى متحكم تيار تباطؤي (هايسترس) كدخل. يقوم هذا المتحكم بإرسال إشارات التحكم للقالبة التي تغذي المحرك [18].

2.7 مميزات المحرك SRM:

للمحركات متغيرة الممانعة الكثير من المميزات نذكر منها[6]:

- تركيب بسيط وتكلفة منخفضة نتيجة غياب ملفات الدوار والمغانط الدائمة.
- لا تحصل صدمات أثناء الأعطال بين باسبارات DC في المبدلة وذلك لأن كل ملف دوار يتصل على التسلسل مع المبدلة.
- غالبية الضياعات تتركز في الثابت مما يجعل عملية التبريد أسهل.
- مميزات العزم –السرعة للمحرك يمكن تعديلها حسب متطلبات التطبيق بسهولة.
- عطالة الدوار أقل ونسبة العزم إلى العطالة عالية.

وبالرغم من المميزات التي يحظى بها المحرك إلا أنه يعاني من تعرجات العزم والضجيج، كما أن العزم ذو التعرجات العالية يسبب تعرجات في التيار في وحدة التغذية DC مما يستوجب مكثف ذو سعة كبيرة للترشيح [19].

3.7 التمثيل الرياضي للمحرك متغير الممانعة:

ليكن الفيض التشابكي للوشيعة λ يتناسب طرداً مع تيار الطور (i) الذي يمر عبر الوشيعة وتحريضية الطور (L) فإنّ:

$$V = iR_s + \frac{d\lambda}{dt}(\theta, i) \quad (1)$$

$$\lambda = L(\theta, i)i \quad (2)$$

حيث (R_s) مقاومة الطور، θ موضع الدوار.

ومن ثم نقوم باشتقاق المعادلة (1) حيث نفترض أن التيار متغير، والمفاعلة (L) ثابتة. وتكتب معادلة التوتر لطور واحد وفق الآتي[20]:

$$V = iR_s + \frac{L(\theta,i)}{dt}di + i\frac{dL}{dt}(\theta,i) \quad 3$$

$$V = iR_s + \frac{L(\theta,i)}{dt}di + i\frac{d\theta}{dt}\frac{dL}{d\theta}(\theta,i) \quad 4$$

إنّ مشتق الموضع الزاوي للدوار (θ) بالنسبة للزمن يمثّل السرعة الزاوية للمحرك (ω_m) وبالتالي:

$$V = iR_s + \frac{L(\theta,i)}{dt}di + i\omega_m\frac{dL}{d\theta}(\theta,i) \quad 5$$

المعادلات السابقة تصف المحرك متغير الممانعة كهربائيا [20].

القوة المحركة الكهربائية المتحرضة في المحرك تعطي بالعلاقة [21]:

$$e = i\omega_m\frac{dL}{d\theta}(\theta,i) = i\omega_m K_b \quad 6$$

العزم المتولد في كل طور يعطى بالمعادلة:

$$T_e(\theta,i) = \sum_{phase}\frac{1}{2}i^2\frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \quad 7$$

المعادلة الميكانيكية للمحرك تعطى بالمعادلة:

$$T_e - T_L = J_m\frac{d\omega_m}{dt} + B_m\omega_m \quad 8$$

حيث أن B_m يمثل معامل الاحتكاك، J_m تشير إلى كمية العطالة، T_L: عزم الحمولة [21].

4.7 تمثيل المحرك متغير الممانعة في برنامج الماتلاب:

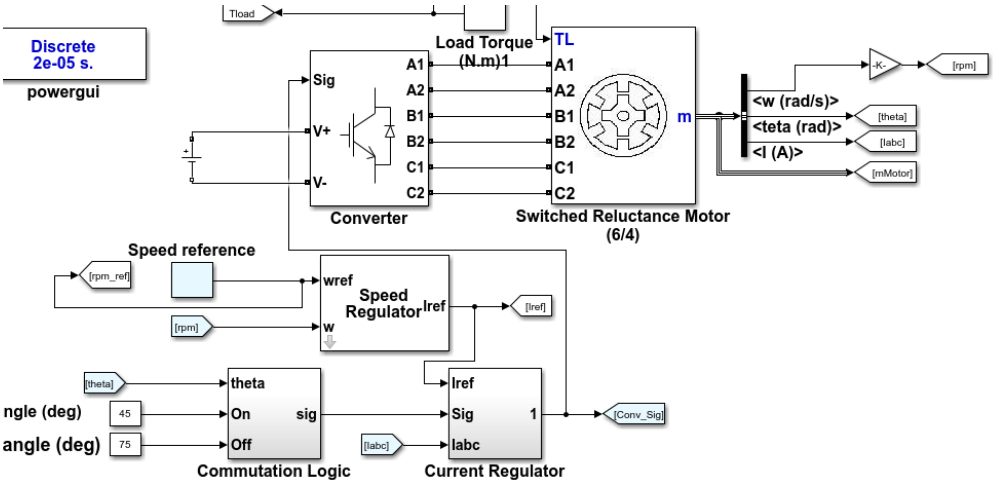
مبدأ متحكم التيار التباطؤي: يستخدم متحكم التيار التباطؤي مع المحرك متغير الممانعة للتحكم بتيارات الأطوار لتكون ضمن حزمة حول القيمة المرجعية. تستخدم هذه الاستراتيجية بشكل واسع في تشغيل المحركات متغيرة الممانعة بسبب إمكانية الوصول للتيار المباشر بسهولة، استراتيجية التحكم بالاعتماد على تشغيل مفاتيح المبدلة عندما يكون تيار الطور الحد الأدنى من الحزمة، وتطفئ عندما يتجاوز التيار حد الأعلى للحزمة. يمكن الحصول على الحد الأنى والأعلى وفقاً لمتطلبات التحكم وتردد التبديل للمبدلة الخاصة بالمحرك متغير الممانعة إن متحكمات التباطؤ تنقسم إلى نوعين (تقطيع ناعم، وتقيع قاس)، هذين النوعين يستخدمان في المبدلة الجسرية غير المتناظرة. يتم التحكم بتيار من خلال مستويين (الحد العلوي، والحد الأدنى) المساوي لـ $i_{refj} \mp \frac{\Delta i}{2}$ حيث i_{refj} يمثل التيار المرجعي لكل طور و$\frac{\Delta i}{2}$ حزمة التباطؤ والتي تكون قيمها مقبولة حول القيمة المرجعية للتيار. يتحقق التحكم بالتيار من خلال التحكم بالحلقة المغلقة ويوجد نمطين للتقطيع ناعم وقاس حيث:

-الناعم: يكون توتر الطور متراوح بين الصفر و $+U$.

-القاسي: توتر الطور يكون بين قيمتين $-U, +U$

في هذه الدراسة تم تطبيق النمط الناعم لمعرفة أداء المحرك متغير الممانعة ذو الأقطاب (4/6) في حالة الحمل، والذي يعتبر أفضل بالنسبة لحالة عمل الآلة كمحرك. تعتبر قيمة حزمة التباطؤ من أهم البارامترات في عملية التحكم والتي ينبغي أن تكون أصغر ما يمكن لتقليل تعرجات التيار. كما أن اختيار قيمة المنبع وزوايا التبديل تعتبر أساسية للحصول على استراتيجية التبديل المناسبة. الفكرة الأساسية للتحكم بالتيار هي الحصول على عزم مستقر قدر الإمكان في حالة التشغيل اللاخطي وإذا دار المحرك في الحالة الخطية. تعتمد خطية العزم على زوايا التبديل لجعل تيار الأطوار في حالة تراكم وإنتاج تيار كلي قريب من تيار dc من أجل تعظيم قيمة العزم الكلي للمحرك. وبالتالي نستخدم زوايا التبديل

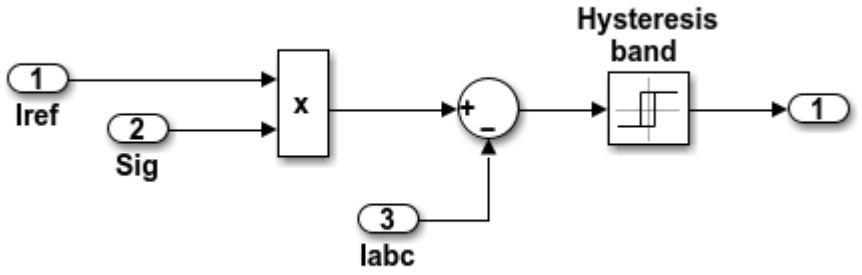
للتشغيل بين $\theta_{on} = 45°, \theta_{off} = 75°$. يبين الشكل ()، تمثيل دارة التحكم بالمحرك متغير الممانعة (6/4) ثلاثي الطور في برنامج الماتلاب بوجود أحمال.



الشكل 3 تمثيل دارة التحكم بالمحرك متغير الممانعة (6/4) في برنامج الماتلاب

دارة منظم التيار:

ونجد أن الحلقة التحكمية مكونة من التيار مرجعي، والقطاع الناتج من حساس موضع الدوار حيث تتم مقارنة الناتج مع إشارة التيار المقاسة من خرج المحرك، لنحصل على الإشارة التي تمثل دخل متحكم التباطؤ ذو الحزمة.



الشكل 4 المتحكم التباطؤي للتيار

حالات العمل المدروسة بوجود الحمل:

تم إجراء محاكاة للمحرك متغير الممانعة ذو الأقطاب (6/4) والبرامترات المستخدمة في دارة المحرك موضحة بالجدول (1)، للتحقق من أداء المحرك باستخدام التحكم التباطؤي بالتيار، وتم استخلاص منحنيات السرعة والتيار والعزم الكهرومغناطيسي وعزم الحمولة للمحرك بوجود حمولة متغيرة وتم تمثيل هذا التغير وفق الآتي:

من 0–0.15 sec (15 N.m)

من 0.15–0.5 sec (75 N.m)

الأجزاء الأساسية لدارة التحكم بالمحرك:

–منظم السرعة: يقارن سرعة المحرك المقاسة مع السرعة المرجعية. إذا كان المحرك بحاجة لأن يتسارع فإن المنظم يزيد التيار المرجعي لإنشاء العزم. إذا كانت سرعة المحرك أكبر من المرجعية فإن المنظم يقلل من التيار المرجعي.

–حساس موضع الدوار: بالاعتماد على موضع الدوار (الممثل بإشارة theta من المحرك متغير الممانعة) وزوايا الإطفاء والتشغيل. يساعد هذا الجزء من دارة التحكم في تكوين إشارات التحكم للحصول على تتابع مناسب لإنتاج العزم.

–منظم التيار: بالاعتماد على التيار المرجعي، وإشارات التبديل يتم إنشاء التيار المرجعي لكل من الأطوار الثلاثة، كل تيار مرجعي يقارن مع القيمة المقاسة لتيار الثابت. وإشارة الخطأ الناتجة تدخل نطاق حزمة التباطؤ الموجبة. يتم إرسال أمر التوصيل إلى القالبة الجسرية المناسبة. عندئذ تطبق المبدلة توتر موجب على ملفات الثابت بحيث يمر تيار موجب في الملف، في الفترة التي لا تتواجد فيها نبضات على القالبة، يتم تطبيق توتر سالب على الملف، ويتم إرجاع الطاقة المختزنة إلى المنبع المستمر عبر الديودات. وتتم الآلية وفق التالي:

في موضع الدوار (1) يطبق توتر موجب على الملفات A1 A2، والفيض المغناطيسي الناتج يؤدي إلى إنشاء عزم ممانعة يجبر قطب الدوار ليتحاذى مع قطب الثابت المغذى في هذه المرحلة. عندما يصل المحرك إلى الموضع (2) تفصل التغذية عن الملفات A1 A2، وتتغذي الملفات B1 B2 للحفاظ على تشغيل الدوار مع عقارب الساعة، وذلك كون الدوار يسعى ليتحاذى مع هذه الملفات. وأخيراً الموضع 3، حيث تفصل B1 B2، ويتم تغذية C1 C2. يتكرر هذا التتابع كل °90 كون الدوار لديه أربع أقطاب، وذلك لأن دوار المحرك ذو أربع أقطاب. في هذه الدراسة يتم الحفاظ على زوايا التشغيل والإطفاء ثابتة على°75و°45 .

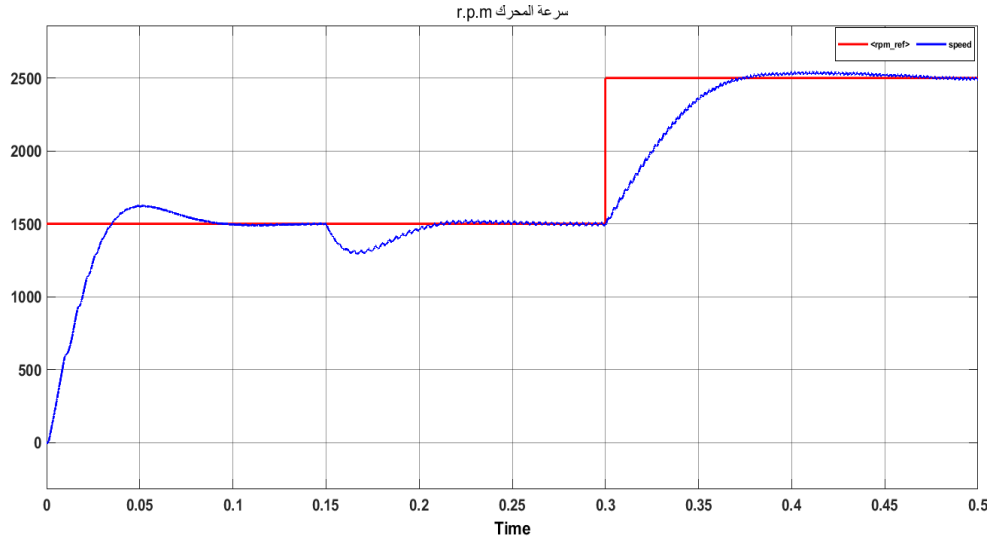
الجدول 1 بارامترات المحرك متغير الممانعة (6/4)

البارامتر	القيمة	الواحدة
مقاومة الثابت R_s	0.0061	Ω

الاحتكاك F	0.22	N.m.s
تحريضية الإشباع L_{sa}	1.500e−04	H
عدد أطوار المحرك	3	–
عدد أقطاب الثابت	6	–
عدد أقطاب الدوار	4	–
حزمة التباطؤ	± 20	–
الثابت التناسبي لمتحكم السرعة	0.34	–
الثابت التكاملي لمتحكم السرعة	18.01	–

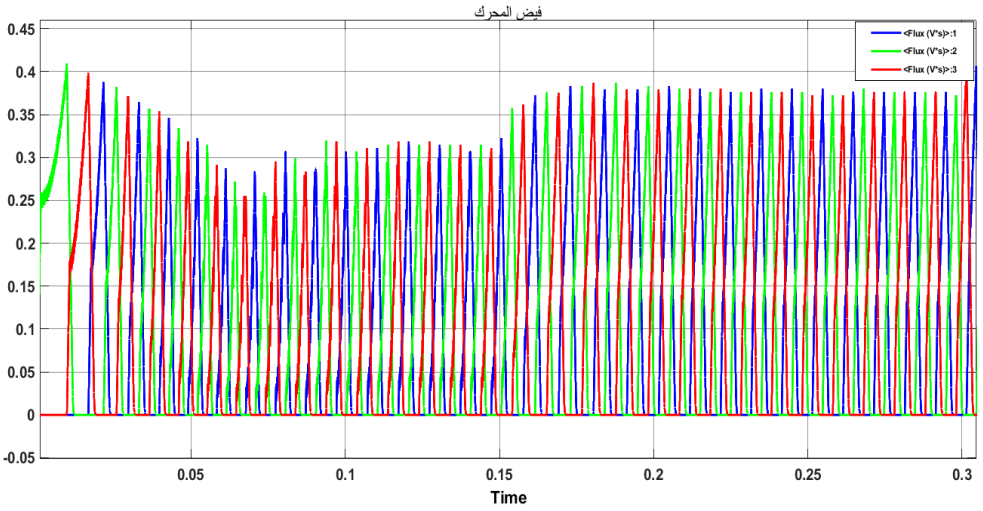
- التوتر المستمر 220 V على دخل المبدلة:

يبين الشكل (5) أن المحرك يتحرك بسرعة من 0 إلى 1500 r.p.m مع عزم حمولة 15 N.m. عند 0.15 sec، يزداد عزم الحمولة إلى 75 N.m. يزيد نظام التحكم التيار المرجعي للحفاظ على سرعة 1500 r.p.m. عند الزمن 0.3 sec تنتقل السرعة المرجعية إلى 2500 r.p.m. للوصول إلى السرعة المناسبة، يقوم نظام التحكم بإنتاج عزم أكبر بشكل لحظي لزيادة تيارات المحرك.



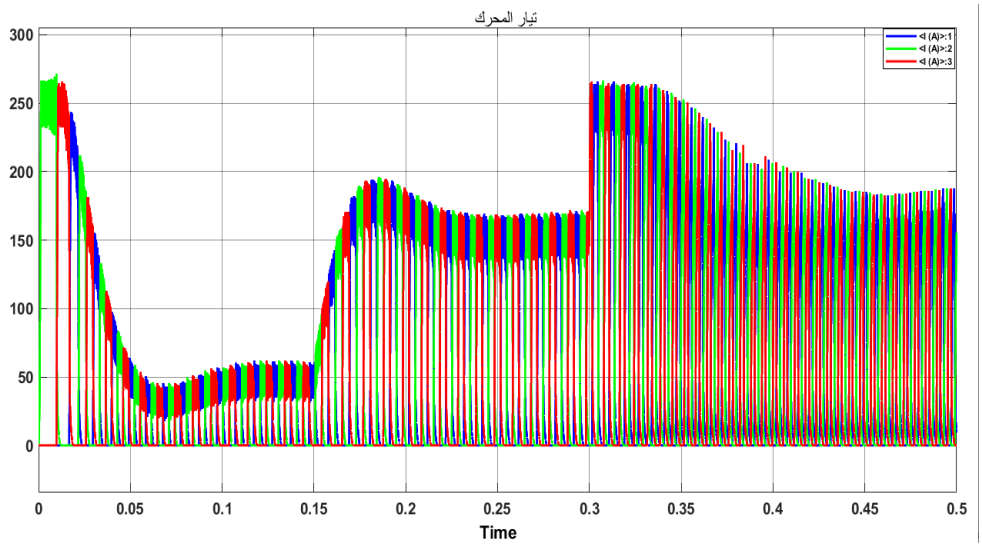
الشكل 5 سرعة المحرك باستخدام التقطيع الناعم عند توتر 220V مستمر

يبين الشكل (6) فيض المحرك متغير الممانعة (6/4) للأطوار الثلاثة، نلاحظ تغير الفيض عند اللحظة t=0.15 sec والتي توافق تغير حمولة المحرك.



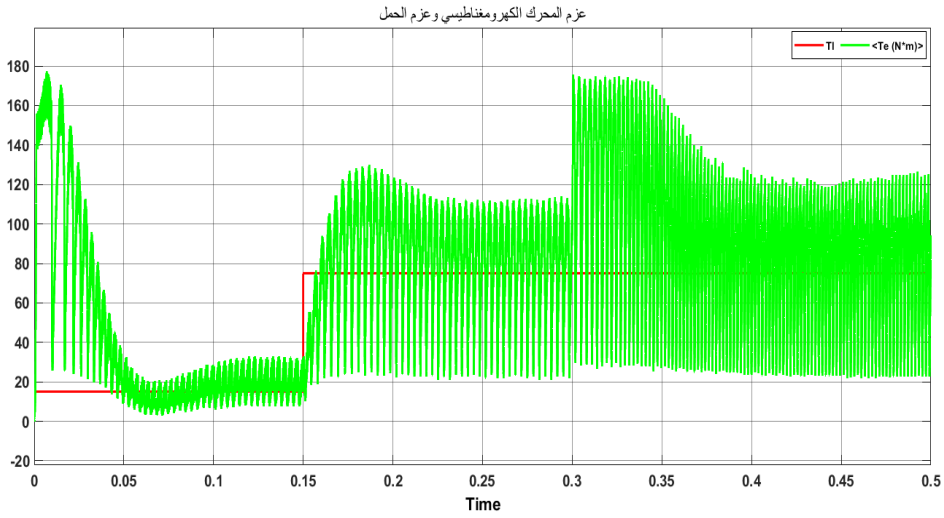
الشكل 6 فيض المحرك باستخدام التقطيع الناعم عند توتر 220V مستمر

يبين الشكل (7) تيار المحرك متغير الممانعة عند U= 220 V.



الشكل 7 تيار المحرك باستخدام التقطيع الناعم عند توتر 220V مستمر

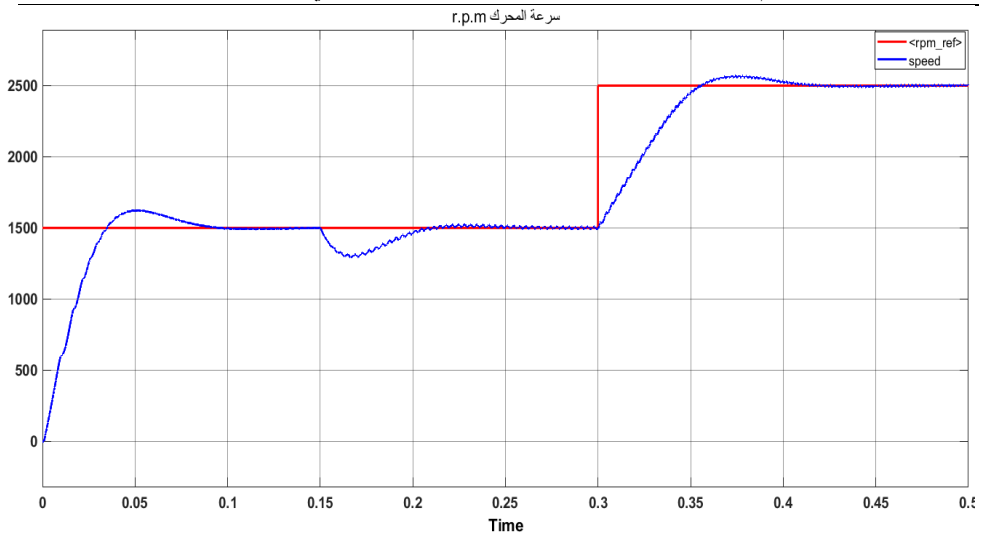
يبين الشكل (8) عزم المحرك الكهرومغناطيسي للمحرك متغير الممانعة (6/4)، عند تطبيق توتر مستمر 220 V.



الشكل 8 عزم المحرك الكهرومغناطيسي وعزم الحمولة للمحرك باستخدام التقطيع الناعم عند توتر 220V مستمر

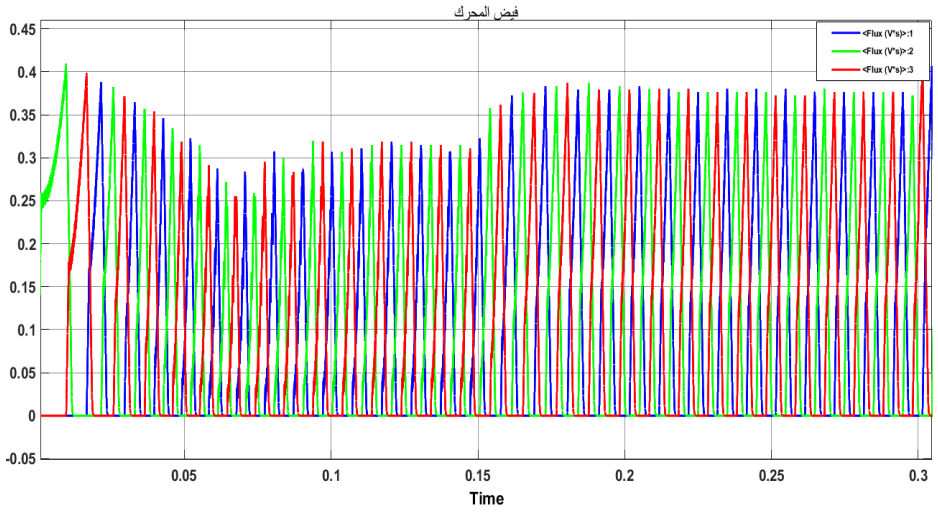
- التوتر المستمر 240 : في هذه المرحلة تم زيادة قيمة التوتر المستمر المطبق على القالبة للتعرف على أثر زيادة التوتر المستمر على أداء المحرك.

يبين الشكل (9) أن منظم السرعة يعمل بكفاءة أكبر عند زيادة التوتر إلى 240 V حيث عند تغير السرعة من 1500 r.p.m إلى 2500 r.p.m نجد أن سرعة المحرك تلاحق الإشارة المرجعية وتصل إلى 0.4 sec، وهي أفضل بالمقارنة مع الحالة السابقة عندما كان التوتر 220 V حيث تحقق استقرار السرعة على القيمة المرجعية عند زمن 0.415 sec.



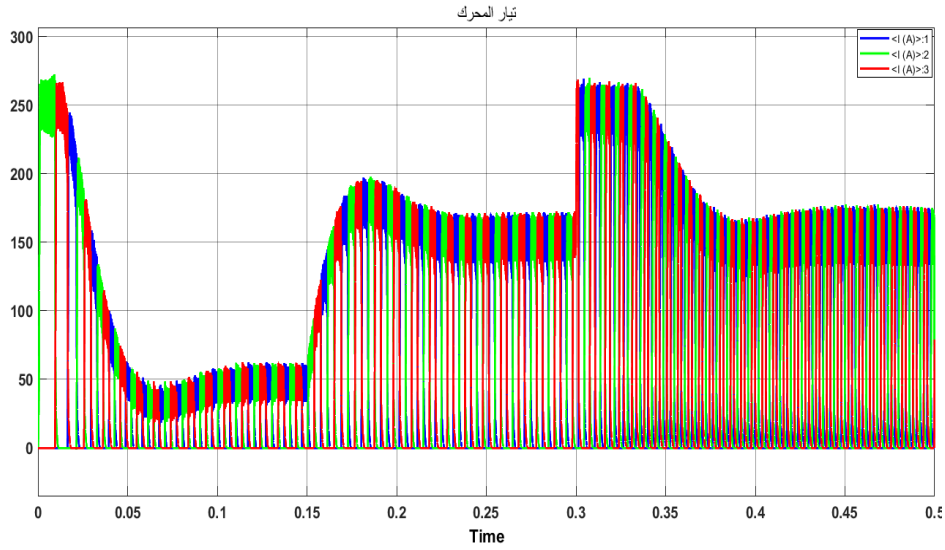
الشكل 9 سرعة المحرك باستخدام التقطيع الناعم عند توتر 240V مستمر

يبين الشكل (10) فيض المحرك متغير الممانعة ذو الأقطاب (6/4) عند تطبيق توتر مستمر 240 V ويتبين أن الفيض لا يتأثر بتغير التوتر.



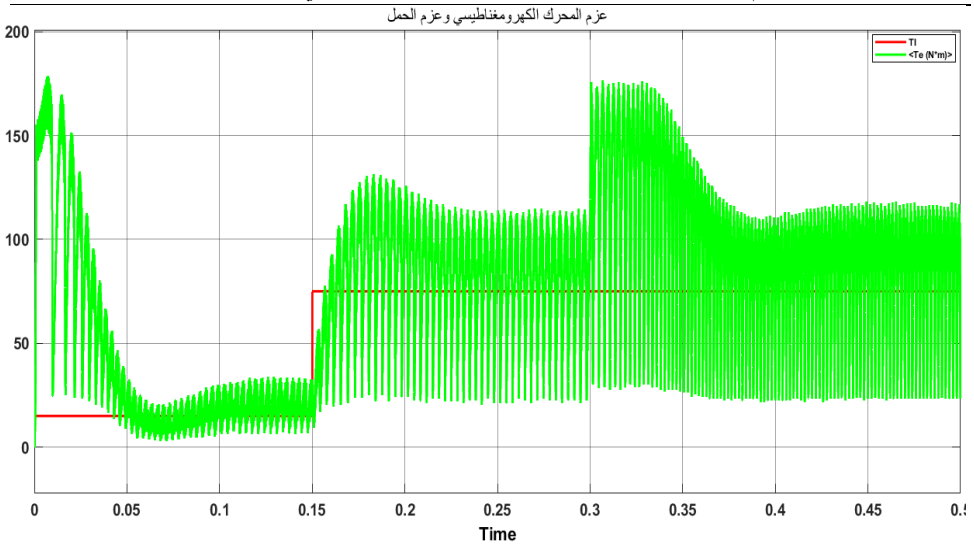
الشكل 10فيض المحرك باستخدام التقطيع الناعم عند توتر 240V مستمر

نجد من الشكل (11)، أن منظم التيار يقوم بزيادة التيار ليتوافق مع زيادة الحمولة عند الزمن 0.15 sec، كما يزداد عندما تتغير السرعة من 1500 r.p.m إلى 2500 r.p.m. وبالمقارنة مع الحالة السابقة التي كانت فيها قيمة التوتر 220 V نجد أن التيار يزداد عند زيادة التوتر المستمر.



الشكل 11 تيار المحرك باستخدام التقطيع الناعم عند توتر 240V مستمر

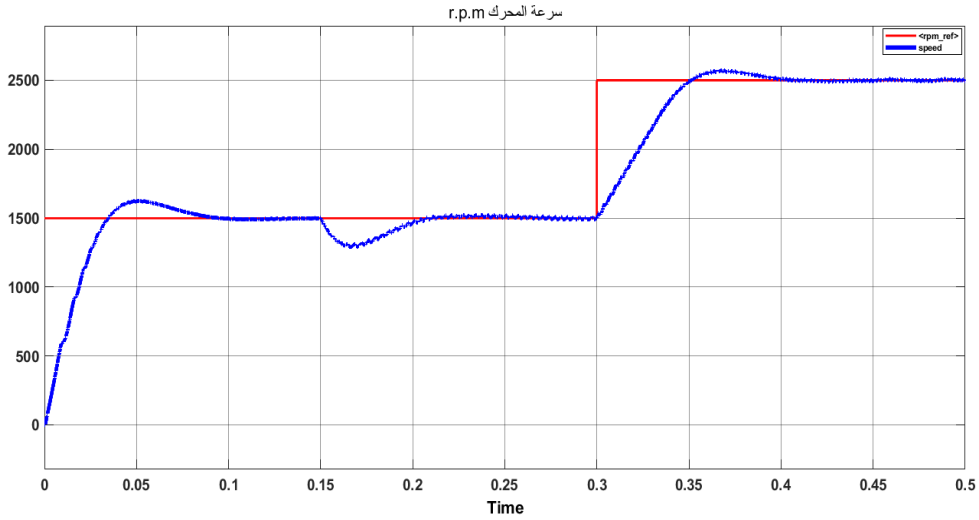
نلاحظ من الشكل التالي (12) تغير عزم المحرك عند اللحظة 0.15 sec، مع تغير الحمولة. بالإضافة إلى تغير عزم الحمولة عند تغيير السرعة المرجعية في اللحظة 0.3 sec. وعلى الرغم من أن زيادة التوتر تؤدي لزيادة التيار وبالتالي العزم إلا أن الزيادة التي حصلت في قيمة العزم تعتبر طفيفة وغير ملحوظة.



الشكل 12 عزم المحرك الكهرومغناطيسي وعزم الحمولة للمحرك باستخدام التقطيع الناعم عند توتر 240 V مستمر

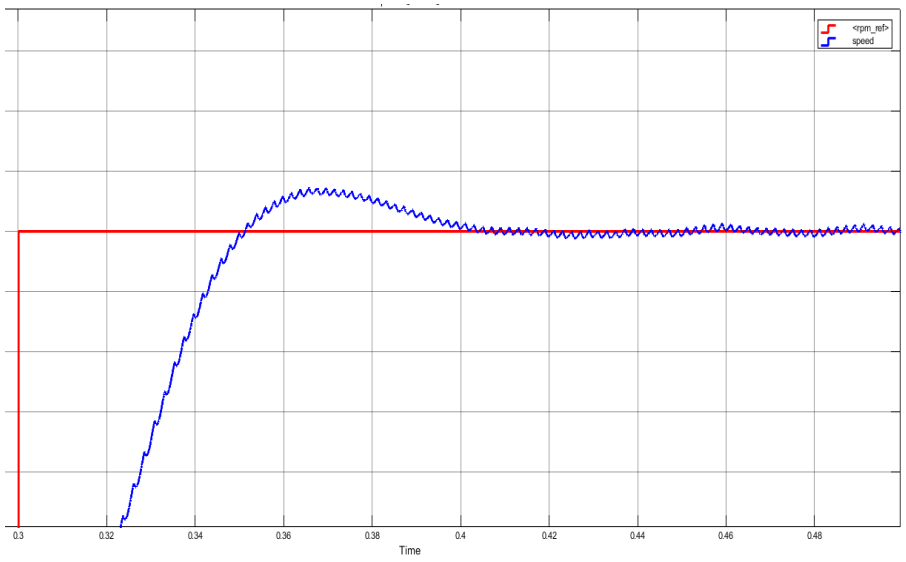
- التوتر المستمر 550

في هذه المرحلة تم تغيير قيمة التوتر المستمر إلى 550 V لتغذية القالبة. وفي هذه الحالة نجد من منحني السرعة، عند تغير الحمولة في اللحظة 0.3 sec نجد أن منظم السرعة يؤدي لملاحقة سرعة المحرك لتتوافق مع السرعة المرجعية، إلا أن الإشارة تكون غير مستقرة تماماً كلما زدنا التوتر بالمقارنة مع الحالات السابقة، حيث تزداد التعرجات في الإشارة، الشكل (13).



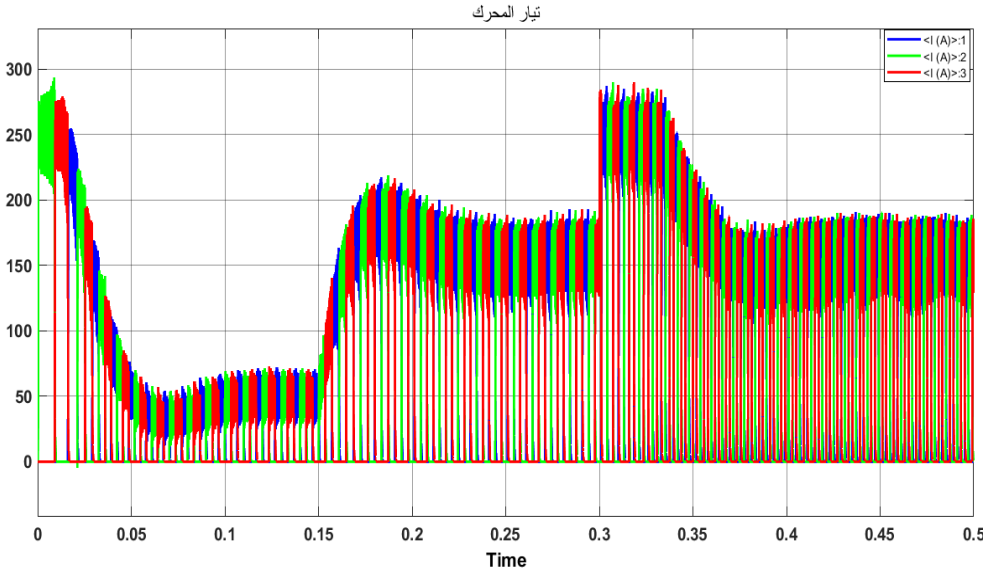
الشكل 13 سرعة المحرك باستخدام التقطيع الناعم عند توتر 550 V مستمر

يبين الشكل (14) أن موجة السرعة في المجال من 0.4 sec إلى 0.5 sec تزداد التعرجات في موجة السرعة مما يجعلها تنحرف بشكل بسيط عن القيمة المرجعية.



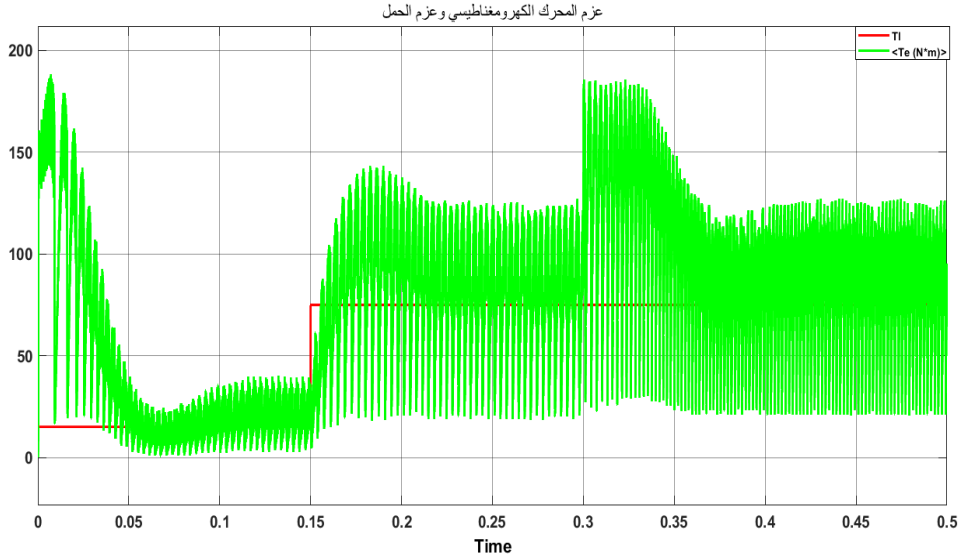
الشكل 14 التعرجات في موجة السرعة عند زيادة التوتر إلى 550 V

يبين الشكل (15) أن قيمة التيار تزداد بزيادة التوتر إلى 550 V.



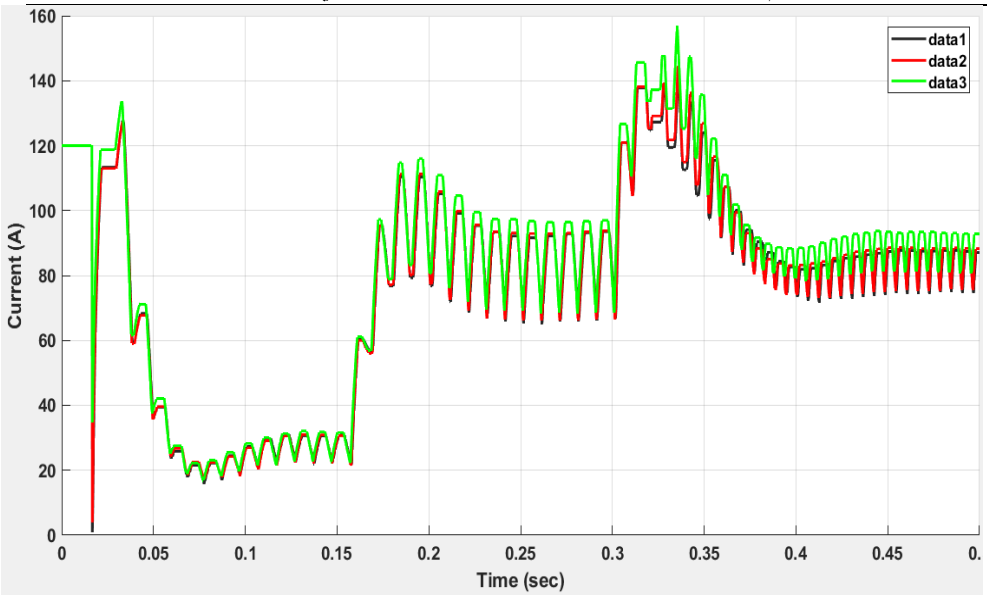
الشكل 15 تيار المحرك باستخدام التقطيع الناعم عند توتر 550 V مستمر

أدت زيادة التوتر المستمر (550 V) إلى زيادة عزم المحرك بالمقارنة مع قيم العزم الكهرومغناطيسي في الحالات السابقة، الشكل (16)



الشكل 16 عزم المحرك الكهرومغناطيسي وعزم الحمولة باستخدام التقطيع الناعم عند توتر 550V مستمر

يبين الشكل (17) مقارنة بين موجات تيار المحرك الناتجة عن الحالات السابقة حيث نلاحظ أنه كلما زادت قيمة التوتر المستمر فإن تيار المحرك يزداد بالمقابل.



الشكل 17 مقارنة قيم التيارات عند قيم التوتر المختلفة

نستنتج مما سبق أن التيار يزداد بزيادة توتر المنبع المستمر، وكذلك العزم الكهرومغناطيسي يزداد بزيادة التوتر المستمر على دخل القالبة التي تغذي المحرك متغير الممانعة

8. التوصيات والمقترحات:

يوصي البحث بضرورة دراسة أداء المحرك باستخدام طرق تحكم أخرى، ومقارنة النتائج مع نتائج التحكم بالتيار. كما يوصي البحث بضرورة إجراء دراسة متممة تتناول أثر قيمة حزمة المتحكم التباطؤي وانتقاء القيمة الأمثل التي تحقق أفضل أداء للمحرك.

المراجع

[1] Vuddanti S., Karknalli V., and Salkuti S. R., 2021. **Design and comparative analysis of three phase , four phase and six phase switched reluctance motor topologies for electrical vehicle propulsion**, vol. 10, no. 3, doi: 10.11591/eei.v10i3.3054.

[2] Ahn J.-W. and Lukman G. F., 2018. **Switched reluctance motor: Research trends and overview**, *CES Trans. Electr. Mach. Syst.*, vol. 2, no. 4, pp. 339–347.

[3] Bian H., Chen H., and Wang R., 2020. **Modeling and simulation of three-phase 6 / 4 switched reluctance motor speed control system Modeling and simulation of three-phase 6 / 4 switched reluctance motor speed control system**, doi: 10.1088/1742-6596/1684/1/012139.

[4] Ilhem D., Walid H., and Djamel R., 2019. **Sizing and Control of a Typical 6 / 4 Switching Reluctance Motor**, vol. 21, no. 1, pp. 19–25.

[5] Djamel and Terzic A. E., M. V., Bilgin H. Li, B., 2018. **Comparison of Experimental Methods for**

Electromagnetic Characterization of Switched Reluctance Motors, *2018 XIII Int. Conf. Electr. Mach. (ICEM), Alexandroupoli*, pp. 1881–1888.

[6] Bostanci E., Moallem M., Parsapour A., and B. Fahimi, 2017. **Opportunities and challenges of switched reluctance motor drives for electric propulsion: A comparative study**, *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, vol. 3, no. 1, pp. 58–75.

[7] Chaple M. and Bodkhe S. B., 2017. **The simulation and mathematical modeling of switched reluctance motor based on phase winding inductance," in *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)***, IEEE, pp. 3048–3052.

[8] Valencia D. F., Tarvirdilu R. -Asl, C. Garcia, J. Rodriguez, and A. Emadi, 2021. **Vision, challenges, and future trends of model predictive control in switched reluctance motor drives**, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 69926–69937.

[9] Lan Y. *et al.*, 2021. **Switched reluctance motors and drive systems for electric vehicle powertrains: State of the art analysis and future trends,** *Energies*, vol. 14, no. 8, p.

2079.

[10] Ibrahim M. A. and Alsammak A. N. B., 2023. **Switched Reluctance Motor Drive Challenges – A review,** vol. 2, no. 4, pp. 9–23.

[11] Kurian S. and Nisha G. K., 2015. **Closed loop operation of switched reluctance motor with hysteresis controller,** *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 10, no. 17, pp. 37645–37650,.

[12] Brouri A., Kadi L., Tounzi A., Ouannou A., and Bouchnaif J., 2021. **Modelling and identification of switched reluctance machine inductance**, *Aust. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 18, no. 1, pp. 8–20, doi: 10.1080/1448837X.2020.1866269.

[13] Lokeshwar C., Kumar P. S., Rao J. V., and Sharanya M., 2023. **Performance Analysis of Switched Reluctance Motor by Using Closed Loop Current Control Technique,** vol. 35, no. 6, pp. 1393–1401.

[14] Online, 2024. **Rohini college of engineering & technology**.

[15] Al-Amyal F. and Számel L., 2022. **Research on novel hybrid torque sharing function for switched reluctance**

motors, *IEEE Access*, vol. 10, pp. 91306–91315,.

[16] Bilgin and A. E., B., Jiang J. W., 2019. **Switched Reluctance Motor Drives: Fundamentals to Applications**.

[17] Fabianski B. and Zawirski K., 2016. **Simplified model of Switched Reluctance Motor for real-time calculations**, *Przegląd Elektrotechniczny*, pp. 19–23,.

[18] Kolluru A. K. and Kumar M. K., 2021. **Artificial neural network vector controlled common high-side switch asymmetric converter fed switched reluctance motor drive**, *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 24, no. 2, pp. 697–703,.

[19] Krishnan R., 2017. **Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications**. CRC press.

[20] Hameed H. S., Al Azze Q., and Hasan M. S., 2023. **Speed control of switched reluctance motors based on fuzzy logic controller and MATLAB / Simulink**, vol. 31, no. 2, pp. 647–657, doi: 10.11591/ijeecs.v31.i2.pp647-657.

[21] Ibrahim M. A. and Alsammak A. N. B., 2023. **Dynamic Modelling and Current Control for Switched Reluctance**

Motor Drives in Electric Vehicles, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, p. 12006.