المجلة الدولية للهندسة وتقنية المعلومات
journal homepage:www.ijeit.misuratau.edu.ly

التحكم في سرعة المحرك الحثي ثلاثي الطور باستخدام طريقتي المجال الموجّه والعزم المباشر

م. التهامي رمضان الكرّامي
كلية التقنية الصناعية ، الدراسات العليا
مصراتة ، ليبيا
elkerramituhami10@gmail.com

د. أكرم محمد الرجوبي
كلية الهندسة ، قسم الهندسة الكهربائية
مصراتة ، ليبيا
akrmrojobi@eng.misuratau.edu.ly

د. ستار جابر العيساوي
كلية التقنية الصناعية ، قسم الهندسة الكهروميكانيكية
مصراتة ، ليبيا
sattarjaber@cit.edu.ly

الملخص— يقدم البحث دراسة ومحاكاة للتحكم الحديث بالمحرك الحثي (التحكم بالمجال الموجّه، والتحكم المباشر بالعزم)، ويركز على استخدام عاكس جهد المصدر (VSI) ذو التضمين العرضي للنبضة PWM وتقنياته، وكذلك استخدام المتحكمات (متحكمات التناسبية التكاملية PI ومتحكمات المنطق الضبابي FL). أوضحت نتائج المحاكاة التي تم تدوينها ومقارنتها أن طرق التحكم المباشر بالعزم يكون لها أسرع استجابة في العزم والسرعة، بالإضافة إلى أن تيار البدء العالي ينخفض بشكل أسرع لطريقة التحكم المباشر بالعزم مع إضافة متحكم المنطق الضبابي. أما في حالة الاستقرار فإن أفضل سرعة تكون عند استخدام التحكم بالمجال الموجّه مع المتحكم التناسبي التكاملي، وعند التحكم المباشر بالعزم بطريقة متجهات الفضاء كانت نسبة التحكم في السرعة تتراوح بين 97% إلى 98.5%. أما في حالة العزم فإن طرق التحكم المباشر بالعزم أظهرت نتائج أفضل و أكثر استقرارا من باقي الطرق لخلوها من التذبذبات (تشوه الإشارة) عند تغير الحمل، أما بالنسبة للوصول لأقصى عزم فإن التحكم المباشر بالعزم يحتاج لفترة زمنية أكبر، وتم الحصول على أقصى عزم بسرعة أكبر عند محاكاة طرق التحكم بالمجال الموجّه. وعند إضافة متحكم FL إلى طريقة التحكم المباشر بالعزم تحسنت استجابة السرعة عند الكبح، وطرق المجال الموجّه كانت أفضل مقارنة بطرق التحكم المباشر بالعزم عند لحظة التوقف. وكان منحنى الجهد المستمر في فترة البداية (0 - 0.25 Sec) لطرق التحكم بالمجال الموجّه أكثر تذبذب من طرق التحكم المباشر بالعزم، أما في طرق التحكم المباشر بالعزم يكون التذبذب في البداية فقط.

الكلمات المفتاحية: **المحركات الحثية، التحكم التقليدي، التحكم الحديث، مبدلات القدرة، المتحكمات، النمذجة والمحاكاة.**

1. المقدمة

زاد الاهتمام بالمحركات الحثية بشكل كبير خلال السنوات الماضية بسبب مزاياها، مثل المتانة الميكانيكية والبناء البسيط وقلة الصيانة، ومع ذلك فإنها تعاني من محدودية التغير في السرعة عند تغير الحمل، ويمكن حل هذه المشكلة باستخدام محركات سرعة قابلة للتعديل، وهناك العديد من الطرق المختلفة للتحكم في المحرك الحثي مثل التحكم القياسي (التقليدية) والتحكم الموجّه (الطرق الحديثة)، وبعد تطور طرق التحكم في المحرك الحثي تم استخدامه بشكل أكبر في التطبيقات الصناعية التي تتطلب التحكم في سرعته [1]. تتطلب نظرية التحكم الحديثة لنظام التحكم الكهربائي وجود نموذج رياضي دقيق ومستقر في الوقت الفعلي لكل مكون من مكونات النظام، حيث أنه يعتمد تحليل وتصميم القيم العددية لمثل هذه الأنظمة على نماذج الأجهزة والبرامج، خاصة وأن الاستجابة في الوقت الفعلي لأنظمة التحكم ضرورية في العمليات الصناعية.

تحتوي نظم التحكم في المحركات الحثية على أنظمة متطورة من مبدلات القدرة كالمقومات المحكومة والعواكس وتعمل بالمعالجات الدقيقة والحساسات الكهربائية وخوارزميات التحكم في السرعة، وتستخدم متحكمات الجهد المتغير للتحكم في التردد والتيار والجهد لتلبية متطلبات وحدة التحريك الكهربائي [2، 3].

استلمت الورقة بالكامل في 26 يوليو 2022 وروجعت في 14 اغسطس 2022
وقبلت للنشر في 30 سبتمبر 2022

ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 1 ديسمبر 2022.

هناك العديد من الدراسات والبحوث التي أجريت لمحاكاة الطرق الاتجاهية الحديثة المستخدمة للتحكم في المحرك الحثي، ومعظم هذه الدراسات كانت على هيئة مقارنة بين طرق التحكم الاتجاهي. والمراجع المستخدمة تشير الى أهم الدراسات المتعلقة بتحليل أداء ومحاكاة والتحكم في سرعة المحرك الحثي: بالتحكم المباشر في الفيض والعزم للمحرك الحثي ثلاثي الطور باستخدام متحكم PI ومتحكم FL، منها على سبيل المثال دراسة تقنيات التحكم في سرعة المحرك الحثي باستخدام طريقة التحكم المباشر بالعزم، والتي تشرح وتحاكي التقنيات المختلفة للتحكم المباشر بالعزم. وأظهرت وحدة التحكم التكيفية المشتركة والتي تستخدم متحكم Fuzzy _ PI أسرع استجابة وأفضل أداء مقارنة بطرق التحكم الحديثة الأخرى مثل (CDTC, SVM_DTC_PI, SVM_DTC_FUZZY) بالإضافة إلى أن حلقة تنظيم السرعة تمنع اضطراب الحمل المسلط بسرعة، ولكن الوصول إلى السرعة القصوى يكون بشكل متدرج.

إن عملية التحكم في المحركات الحثية وخاصة نوع الدوار الملفوف تعاني من مشكلة اعتماد الفيض المغناطيسي والعزم على بعضهما بشكل كبير، لذلك فان التحكم الاتجاهي يعمل على فصل الفيض والعزم عن بعضهما مما يساعد في عملية التحكم في المحرك الحثي ثلاثي الطور. كذلك تحتاج العديد من الطرق الحديثة للتحسين والتطوير للحصول على نتائج تحكم أفضل في المحرك. كما أن هناك بعض الطرق الحديثة منها (المنطق الضبابي) لا تستخدم النماذج الرياضية في التحكم، بالإضافة إلى التغير المفاجئ في الحمل قد ينتج عنه تذبذب في سرعة المحرك الحثي [4، 5].

لذا تهدف هذه الورقة إلى تحليل ومحاكاة ودراسة خصائص منظومة التحكم في المحرك الحثي للطريقتين (التحكم بالمجال الموجّه والتحكم المباشر بالعزم) مع متحكم المنطق الضبابي (FL) والمتحكم التناسبي التكاملي (PI)، وكذلك تحديد سرعة الاستجابة للعزم لكل طريقة ومدى استقرارية المحرك. حيث تساهم هذه الدراسة في تحليل وفهم موضوع يخص قطاع كبير ومهم من المصانع التي يوجد بها محركات حثية بتوضيح أهمية التحكم في سرعة المحرك الحثي، والتطور الحاصل في طرق التحكم الحديثة التي تساهم في تحسين استقرارية المحرك الحثي ثلاثي الطور مما يساعد على استخدام طرق التحكم الاتجاهي. كذلك تساهم هذه الدراسة والمراجعة المكثفة للعديد من البحوث العلمية المتعلقة بالموضوع في تسهيل وتبسيط دراسة طرق التحكم باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، وتوضيح طرق التحكم في المحرك الحثي باستخدام المنطق الضبابي والمتحكم التناسبي التكاملي ومعرفة مدى كفاءة أدائها.

2. طرق التحكم في سرعة المحرك الحثي

تعتمد السرعة في المحركات الكهربائية بصورة عامة على تردد المصدر لذلك، تم تطوير العديد من الطرق من خلال استخدام المعدات والأجهزة الإلكترونية الحديثة للتحكم في سرعة المحرك الحثي بشكل أفضل، وتقسم طرق التحكم في سرعة المحركات الحثية بشكل عام إلى

قسمين هما طرق التحكم التقليدية (القياسية)، وطرق التحكم الحديثة (الاتجاهية).

1.2 طرق التحكم التقليدية

يقتصر نطاق التشغيل العادي للمحرك الحثي النموذجي على انزلاق أقل من 5%، ويتناسب تغير السرعة عبر هذا النطاق بشكل مباشر إلى حد ما مع الحمل على عمود المحرك. وإذا كان الانزلاق أكبر، فإن كفاءة المحرك ستصبح ضعيفة للغاية؛ لأن المفاقيد النحاسية في الجزء الدوار تتناسب طرديًا مع الانزلاق على المحرك [2]. تم استخدام العديد من الطرق للتحكم في سرعة المحرك الحثي ولكن بعضها تستخدم مع المحرك الحثي ذو القفص السنجابي ولا تستخدم مع المحرك الحثي ذو الدوار الملفوف؛ وبعض الطرق الأخرى تستخدم مع المحرك ذو الدوار الملفوف ويصعب استخدامها للتحكم في سرعة المحرك الحثي ذو القفص السنجابي، كذلك تستخدم بعض الطرق التقليدية مع المحركات الصغيرة، وبعضها تستخدم للحصول على تحكم محدود في السرعة. تنقسم طرق التحكم القياسية إلى عدة أنواع منها: تغيير مقاومة الدوار - تغيير عدد الأقطاب - تغيير تردد المصدر - تغيير جهد المصدر.

2.2 طرق التحكم الحديثة:

تعتمد طرق التحكم الحديثة بشكل أساسي على التطور الحاصل في المعدات والأجهزة الإلكترونية لأن من خلالها يتم التحكم في جهد وتيار الدخل والخرج ومن خلال هذه الأجهزة يمكن تغيير الدخل من متردد إلى مستمر، والعكس. كذلك يمكنها تغيير الخرج بنفس نوع الدخل ولكن بمستوى مغاير لمستوي تيار أو جهد الدخل. وتقسم الطرق الحديثة للتحكم في سرعة المحرك الحثي إلى قسمين رئيسيين هما طريقة الجهد والتردد وطريقة التحكم الاتجاهي والتي تشمل طريقتي التحكم بالمجال الموجّه، وطريقة التحكم بالعزم المباشر.

أ. طريقة الجهد والتردد Voltage/Hertz Method: يتم المحافظة على قيمة العزم من خلال تغيير جهد المصدر بنفس النسبة التي يتم فيها تغيير التردد للحفاظ على نسبة التردد إلى الجهد ثابتة، وبالتالي ثبات الفيض المغناطيسي، ولكن يعيب هذه الطريقة أنها غير مجدية في حال العمل عند ترددات منخفضة مع وجود عزم حمولة كبير، والسبب يعود إلى هبوط الجهد الناتج عن مرور التيار في ممانعة ملفات الجزء الثابت الذي يصبح كبير. تتكون هذه الطريقة من نظامين (نظام الحلقة المفتوحة والحلقة المغلقة).

ب. طريقة التحكم الاتجاهي Vector Control Method: تعد التشغيل الديناميكي لنظام محرك آلة الحث له دور مهم على الأداء العام للنظام الذي هو جزء منه، ويجب أن تتمتع المحركات الكهربائية للتحكم في الحركة باستجابة سريعة لعزم الدوران، وإمكانية تشغيل رباعي، وإمكانية التحكم في عزم الدوران والسرعة على نطاق واسع من ظروف التشغيل [6، 7، 8]. ويعتبر التحكم الاتجاهي تحكم معقد وذلك نتيجة لفصل الفيض عن العزم حيث تنشأ تيارات في الجزء الثابت للمحرك، ولا يوجد اتصال مباشر بين هذه التيارات وفيض الدوار؛ وللتغلب على هذه الصعوبات والتعقيدات في التحكم الاتجاهي تم تطوير خوارزميات عالية الأداء [4]. يستخدم التحكم الاتجاهي في الحالات العابرة أيضا على عكس التحكم التقليدي الذي يستخدم في الحالات المستقرة.

3. نمذجة المحرك الحثي

تبدأ عملية النمذجة من دراسة المقادير الكهربائية لكل من الجزء الدوار والثابت للمحرك، أي دراسة الجهد والتيار والفيض للحصول على معادلات تصف خصائص وسلوك المحرك. ولتصميم المتحكم بطريقة سهلة نحتاج للتغيير من ثلاثة أطوار إلى محورين؛ يتم ذلك من خلال نمذجة المحرك الحثي. فيتم التغيير من المحاور الثلاثية إلى المحاور الثنائية بسبب صعوبة كتابة معادلات تمثل المحرك بشكل صحيح، لأن ملفات الجزء الساكن تكون مزاحة في الفراغ 120°، وكذلك فان المحاور الثلاثية نحصل منها على ثوابت تحوي حدود مثلثية متغيرة مع الزمن مثل الحدود المثلثية الموجودة في مصفوفة المحاثات المتبادلة بين الجزء الساكن والدوار، أما في المحاور الثنائية فتلغى هذه الحدود المثلثية [9، 10، 11]. يمكّن النموذج الرياضي من معرفة المعادلات التي تصف عمل المحرك الحثي في الحالة المستقرة والحالة العابرة، وكذلك يعمل على تحويل الأطوار الثلاثة للمحرك إلى محاور ثنائية دوارة الذي يتم بعدة طرق منها [4].

- طريقة مباشرة من ثلاثة أطوار إلى محاور ثنائية دوارة.

- طريقة التحويل من كلارك (Clarke's) إلى بارك (Park's).

ينتج عزم الدوران من خلال تفاعل التيار وتشابك الفيض المغناطيسي، ويوجد نوعين من التيارات (تيار الجزء الثابت وتيار الجزء الدوار) وثلاثة أنواع من تشابك الفيض (تشابك الفيض للجزء الثابت وتشابك الفيض للجزء الدوار وتشابك الفيض التبادلي) [12، 13].

ويمكن الحصول على العزم من خلال المعادلات التالية:

$$T_e = K\Psi_s \times I_s = \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)\left(\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}\right) \quad (1)$$

$$T_e - T_L = \frac{J}{p}.\frac{dw}{dt} \quad (2)$$

4. العاكس (مبدل من DC إلى AC)

يقوم العاكس بتغير من مصدر جهد أو تيار مستمر إلى جهد أو تيار متردد. أي بعكس ما يفعله "المقوّم" الذي يغير من التيار المتردد إلى التيار المستمر. وقد يكون المصدر الأساسي للدخل مصدر تيار متردد الذي يتم تحويله إلى تيار مستمر بواسطة "مقوم" ثم يتغير مرة أخرى إلى تيار متردد باستخدام عاكس، ولكن خرج التيار المتردد النهائي قد يكون بتردد وحجم مختلفين عن التيار المتردد الداخل. هذا وتعتبر العواكس دوائر إستاتيكية حيث لا تحتوي دوائرها على أي أجزاء متحركة [14]. وللتحكم في سرعة المحركات الحثية ثلاثية الطور يتم استخدام العواكس للتحكم في الجهد المسلط على الجزء الثابت أو التحكم في التردد أو التحكم في الجهد والتردد معا.

1.4 عاكس جهد المصدر (Voltage Source Inverter (VSI:

عاكس جهد المصدر يكون لمصدر جهد مستمر بأطراف الدخل مع مقاومة صغيرة، لذا يعتبر جهد أحادي الاتجاه، وتيار ثنائي الاتجاه أي يمكن إعادة التيار من المحرك إلى مصدر الجهد المستمر. حيث يستخدم العاكس مصدر جهد ثابت يتم توفيره بواسطة مقوم مصدر جهد ومكثف DC link، لتوليد موجة جهد متناوب بمركبة جهد أساسي وتردد قابل للتغيير؛ وطور وسعة الخرج تطابق الجهد المرجعي المطلوب. ويتم تحديد تيار خرج العاكس باستخدام المرشحات عند تغذية الحمل، والذي يكون عادةً جيبيًا للمحركات الحثية [13]. ويعتبر عاكس جهد المصدر (VSI) من أكثر أنظمة تبديل القدرة شيوعًا للتغيير من جهد مستمر إلى متردد، لا سيما لتطبيقات القدرة المنخفضة والمتوسطة لكلا الأنظمة الأحادية وثلاثية الطور. ولا يمكن تشغيل مفاتيح (ترانزستورات) أي ساق من العاكس في وقت واحد لأن هذا يؤدي إلى قصر الدائرة [11]. ويستخدم هذا النوع من العواكس مع المحركات المنخفضة والمتوسطة القدرة، كما يستخدم في أغلب التطبيقات لكفاءته، وسرعة استجابته الديناميكية. ولا يستخدم في التطبيقات التي تتطلب مسافة طويلة بين العاكس والمحرك لأنها قد تؤدي إلى جهد عالي على المحرك وتسبب في اعطابه. حيث يستخدم عاكس جهد المصدر أحادي الطور للتطبيقات صغيرة القدرة، بينما يتم استخدام عاكس جهد ثلاثي الطور لتطبيقات القدرة المتوسطة والكبيرة. ويتكون العاكس ثلاثي الطور من ستة مفاتيح، وله ثماني حالات تشغيل [13، 14].

2.4 تقنيات تضمين عرض النبضة (PWM):

يتم تطبيق جهد تيار مستمر ثابت على العاكس ويتم الحصول على جهد خرج متردد مع تردد متحكم به عن طريق ضبط تشغيل مفاتيح (ترانزستورات) العاكس. يوجد العديد من أنواع تقنية تضمين عرض النبضة المتاحة لتحسين كفاءة العاكس والتنفيذ البسيط في التطبيقات العملية. يعد تضمين عرض النبض (PWM) هو النهج القياسي لتشغيل مفاتيح العاكس من أجل توليد الجهود المطلوبة عالية الجودة، وهناك مجموعة

كبيرة ومتنوعة من تقنيات تضمين عرض النبضة PWM التي تظهر خصائص أداء مختلفة [14].

5. اختبار المتحكمات CONTROLLERS

يتم استخدام عدة أنواع من متحكمات السرعة لتحسين عملية التحكم في سرعة المحركات الحثية باستخدام طرق التحكم الاتجاهي منها:

أ- متحكم PI: تتمثل فائدة وحدة تحكم PI في أنه يمكن تعديلها تجريبياً عن طريق ضبط واحدة أو أكثر من قيم الكسب ومراقبة التغيير في استجابة النظام، كذلك سهولة التركيب نسبيا، وعلاقة معلمات PI مع خصائص استجابة النظام حيث يمكن فهمها وتنفيذها في الممارسة العملية المتقدمة. ويعيب وحدة التحكم هذه حساسيتها لتغير معلمات النظام، وكذلك غير قادرة على التعامل مع اضطرابات الحمل الخارجية، وتغير ظروف النظام أثناء التشغيل. وتعد المحركات الحثية غير خطية بينما وحدة التحكم PI تعتبر وحدة تحكم خطية قادرة على العمل ضمن نطاق معين [15، 16].

ب- متحكم المنطق الضبابي (FLC) Fuzzy Logic Controller:
يحتوي الهيكل العام لوحدة التحكم المنطقية الضبابية على مدخلين، وهما الخطأ الناتج عن العملية التي يجب التحكم فيها وتغير هذا الخطأ، ويساعد أحيانا مشتق الخطأ في عمليات عابرة أكثر استقرارًا للمعالجة، يجب قياس الخطأ ومشتقاته بالعاملين Ke وΔKe ويتم استخدام هذين العاملين لتحديد مدخلات وحدة التحكم المنطقية الضبابية إلى قيمتين محددتين. والخطوة التالية هي اختيار وتحديد المنطق الضبابي المناسب واختيار جميع قواعد التحكم وإنشاء القواعد اللغوية. وبعد الانتهاء من جميع الخطوات الأخيرة يتم اختيار قيمة أو شكل للتحكم في الإخراج، ويجب بعد ذلك رفع مستوى إخراج وحدة التحكم الضبابية لملاءمة العملية التي يتم التحكم فيها [17].

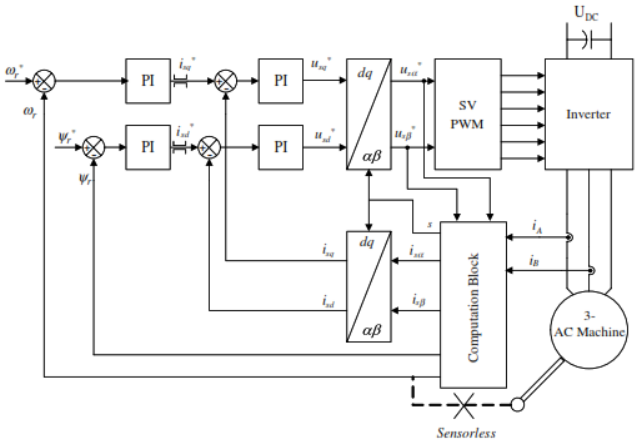
6. التحكم بالمحرك عن طريق المجال الموجّه (FOC)

تقدم طريقة التحكم بالمجال الموجّه حلاً في الحالات التي يوجد بها معادلات ذات الترتيب العالي بعدد كبير من المتغيرات والمعادلات غير الخطية وتحقيق تحكم فعال بديناميكية عالية [5]. طريقة التحكم بالمجال الموجّه تعتمد بشكل رئيسي على الفصل بين العزم والفيض المغناطيسي ويتم التعامل مع المحاور (d, q) في هذه الطريقة ويمكن تسميتها بالتحكم في الفيض الموجّه أو (التحكم الغير مباشر في العزم). باستخدام تحويلي (كلارك، وبارك) يتم تغيير التعامل مع الأطوار الثلاثة لمتجه التيار إلى المحاور الثنائية الدوارة (d, q) حيث يمثل d مكون إنتاج الفيض لتيار الجزء الثابت، ويمثل q مكون إنتاج العزم من خلال تيار الجزء الثابت.

يوجد نوعان من تقنيات التحكم بالمجال الموجّه: التقنيات المباشرة وغير المباشرة، ويعتمد التنفيذ المباشر على القياس المباشر أو تقدير الفيض في الجزء الثابت أو الدوار أو مغنطة نطاق متجه الفيض وموقعه. أما الطريقة غير المباشرة تستخدم نموذج الآلة، الشكل (1) يوضح عملية التحكم بالمجال الموجّه للمحرك الحثي ثلاثي الطور مع تحويلي كلارك، وبارك.

1.6 التحكم المباشر بالمجال الموجّه

يتم عن طريق قياس التدفق في فجوة الهواء أو تقديره، وتحسب زاوية فيض الجزء الدوار بمعرفة موضع الفيض، ويمكن حساب تيارات الطور المطلوبة التي تعطي قيمة الفيض وعزم الدوران المطلوبين للجزء الثابت للمحرك [8].



شكل (1) التحكم بالمجال الموجّه للمحرك الحثي ثلاثي الطور [9].

طريقة التحكم المباشرة بطبيعتها أكثر أنظمة التحكم المرغوبة، إلا أنها تعاني من التكلفة العالية وعدم موثوقية قياس الفيض مما يقلل في توسع استخدامها [18]. والعزم الكهرومغناطيسي يمكن الحصول عليه من المعادلة رقم (3).

$$T_e = \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)\frac{L_m}{L_r}\left(\Psi_{dr} i_{qs} - \Psi_{qr} i_{ds}\right) \qquad (3)$$

2.6 التحكم غير المباشر بالمجال الموجّه

يعتبر التحكم غير المباشر بالمجال الموجّه مشابه للتحكم المباشر بالمجال الموجّه، باستثناء أنه يتم توليد إشارات متجه الوحدة ($cos\theta_e$ و $sin\theta_e$) بطريقة عشوائية، ويتم الحصول على مخطط التحكم غير المباشر بناءً على تصنيفات زاوية المجال. على وجه الخصوص، يتم التعرف على مخطط التحكم المباشر الموجّه نحو المجال عندما يتم استخدام زاوية المجال المكتسبة بواسطة أجهزة استشعار التدفق أو التيارات والجهد الطرفي، بينما يتم التعرف على مخطط التحكم غير المباشر الموجّه نحو المجال عندما لا يتم استخدام زاوية المجال المحسوبة الجهد أو التيار كمتغيرات من موضع الدوار [19]. التحكم الغير مباشر بالمجال الموجّه شائع جدا في التطبيقات الصناعية [11]. يطلق عليه أيضا اسم التغذية الأمامية.

يمكن تنفيذ التحكم غير المباشر بالمجال الموجّه لتيارات الجزء الدوار باستخدام التيارات اللحظية للجزء الثابت والموضع الميكانيكي للجزء الدوار، حيث لا تحتوي على مشاكل بطء في السرعة ويفضل استخدامها في معظم التطبيقات، كما أنه يتم التحكم في الفيض من خلال تيار المغنطة عن طريق مطابقة الفيض مع المحور d ومطابقة مكون إنتاج عزم الدوران للتيار مع المحور q، ويمكن التحكم في عزم الدوران على الفور عن طريق التحكم في التيار i_{qs} بعد فصل فيض الجزء الدوار وعزم الدوران لإنتاج مكون من مكونات التيار. ويجب أن يكون الفيض على طول المحور q صفرا، وتقاس معلومات موضع الدوران من تردد الانزلاق. والعزم الكهرومغناطيسي نتحصل عليه من خلال المعادلة رقم(4).

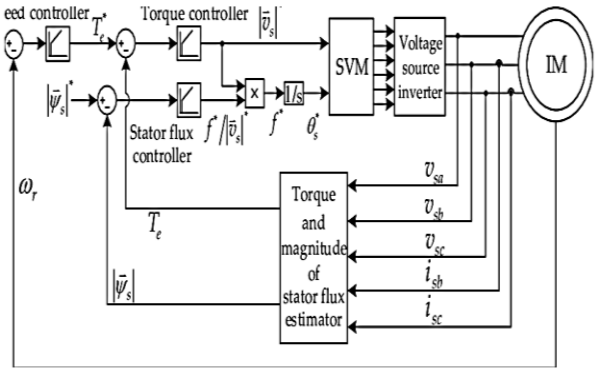
$$T_e = \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)\frac{L_m^2}{L_r}\left(i_{ds} i_{qs}\right) \qquad (4)$$

7. التحكم بالمحرك عن طريق التحكم المباشر بالعزم

التحكم المباشر في عزم الدوران وفيض الجزء الثابت للمحرك بواسطة عاكس الجهد لمتجه فضاء يتم اختياره من خلال جدول البحث [11]. في وحدة التحكم في عزم الدوران المباشر التي طورتها شركة ABB، يتم تحديد أسلوب تبديل العاكس الأمثل في كل فترة أخذ عينات (25 ملي ثانية). ويستخدم مخطط DTC طرقًا بسيطة لمعالجة الإشارات ويعتمد كليًا على الطبيعة غير المثالية لمصدر القدرة الذي يستخدم لتزويد آلة الحث داخل نظام التحكم المتغير السرعة ، ويتم استخدام التحكم في التشغيل والإيقاف في مفاتيح المبدل لفصل التركيب غير الخطي لآلة الحث. جوهر

هذه التقنية هو تكيفها ويعتمد نموذج المحرك على التعبيرات الرياضية لنظرية المحرك الأساسية، ويتطلب هذا النموذج معلومات حول معاملات المحرك المختلفة. تلتقط الخوارزمية كل هذه التفاصيل في البداية من المحرك دون تدوير المحرك، لكن تدوير المحرك لبضع ثوان يساعد في ضبط النموذج، وقياس السرعة الفعلية غير مطلوب. حيث يتم استخدام نموذج الآلة في الإطار المرجعي الثابت لتطوير نظرية DTC [20].

يستخدم العديد من المصممين طريقة تضمين متجه الفضاء (SVM) في التحكم في عاكس الجهد لتحسين التحكم بطريقة العزم المباشر، والفرق الرئيسي بين هذه الطريقة والتحكم التقليدي بالعزم المباشر هو أن التحكم المباشر بالعزم التقليدي (الكلاسيكي) له نمط تبديل محدد باستخدام جدول تحويل قياسي، وهذا يعني أن التغييرات في متجه فيض الجزء الثابت وعزم الدوران ستكون قياسية تماما بسبب الحالات المنفصلة للعاكس، ويحدث ذلك لأن العاكس ينتج متجهات قياسية للجهد. يوضح الشكل (2) تركيب طريقة التحكم المباشر بالعزم مع تقنية متجهات الفضاء، والهدف منه هو تقدير متجه الجهد المرجعي للجزء الساكن $(\boldsymbol{V_s^*})$ وتضمينه بتقنية متجهات الفضاء (SVM) وذلك للتحكم في بوابات القدرة للدخل بتردد تبديل ثابت، وهذا يمكنه أخذ العينات في أي زمن. حيث يمكن للعاكس أن ينتج متجها للجهد بأي اتجاه وحجم، وبذلك ستكون التغييرات في العزم أكثر سلاسة [21].



شكل (2) المخطط الصندوقي للتحكم المباشر بالعزم باستخدام تضمين متجه الفضاء [18].

1.7 *التحكم المباشر بالعزم باستخدام تقنية نموذج التوقع*

تستخدم الحلقة الداخلية للتحكم المباشر بالعزم باستخدام تقنية نموذج التوقع وحدة تحكم توقعيه نموذجية بدلا من فيض الجزء الثابت ومقارنات تخلفيه العزم المستخدمة في التحكم المباشر بالعزم التقليدي. وتتكون وحدة تحكم نموذج التوقع من نماذج توقع عزم الدوران وفيض الجزء الثابت ودالة التكلفة، بينما يتم الحصول على القيم التي تم توقعها للفيض وعزم الدوران باستخدام نماذج التوقع ثم يتم تحديد متجه الجهد الذي يقلل من دالة التكلفة وتطبيقه على العاكس [19] .

2.7 *التحكم المباشر بالعزم بناء على التحكم بطريقة الانزلاق:*

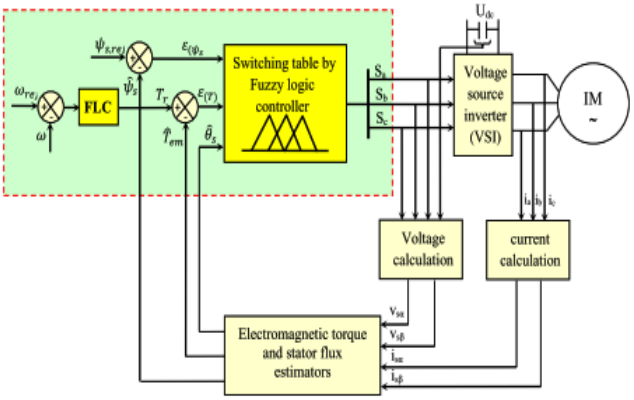
التحكم بطريقة الانزلاق (SMC) هي نوع من تقنيات التحكم في التركيب (البنية) المتغير (VSC) التي قدمتها Utkin، تعد هذه التقنية تقنية تحكم غير خطية وتكيفية وتوفر أداء تحكم فعال وقوي في حالة اضطراب الحمل، واستجابة النظام غير حساسة لمعاملات المحرك الغير مؤكدة، حيث أن IMD هو نظام متعدد المتغيرات وغير خطي ويواجه الكثير من الاضطرابات أثناء التنفيذ التجريبي يتم تنفيذ مخطط SMSC ليحل محل PISC، ويحدد مبدأ قانون التحكم في التبديل عالي السرعة لدفع مسار الحالة غير الخطية إلى سطح التبديل والحفاظ على مسار الحالة على سطح منزلق لجميع الفترات الزمنية اللاحقة، حيث تجبر استجابة النظام في مستوى الطور على اتباع سطح منزلق.

3.7 *التحكم المباشر بالعزم بناء على المنطق الضبابي*

المنطق الضبابي أو بشكل عام معالجة حالات عدم اليقين، هو أحد فئات الذكاء الاصطناعي يتم تقديمه لتحسين أداء استراتيجيات التحكم الكلاسيكية المختلفة المطبقة على محركات السرعة المتغيرة، ويستخدم لتحسين الأداء الديناميكي للتحكم التقليدي في DTC وتطوير جدول اختيار جديد يعتمد على وحدة تحكم منطقية ضبابية (FLC) واستبداله بجدول التبديل ومقارنات التخلف، من أجل توليد جهد المتجه الذي يدفع الفيض وعزم الدوران إلى مراجعهم بالطريقة المثلى [20] .

في التحكم بالعزم المباشر التقليدي CDTC تكون نتائج التموجات ثابتة أثناء التبديل من حالة إلى أخرى بسبب اتساع نطاق تخلفيه العزم والفيض، ولكن التغيير غير المتوقع في ظروف الحمل قد ينتج عنه تجاوز وتذبذب في سرعة IMD، ووقت استقرار طويل، ولكن يتم العمل على تقليل تموجات الفيض والعزم باستخدام وحدة تحكم التبديل المنطقي الضبابي (FLSC) القائمة على DTC (FDTC)، كذلك يتم استخدام المنطق الضبابي للتحكم في حدود نطاق تخلفيه عزم الدوران الكهرومغناطيسي [21].

يظهر المخطط الصندوقي للتحكم المباشر بالعزم المبني على المنطق الضبابي في الشكل (3) حيث يحتوي على ثلاثة مداخل وهي: خطأ فيض الجزء الثابت $(\boldsymbol{\varphi_s^* - \varphi_s})$، وخطأ عزم الدوران $(\boldsymbol{T_s^* - T_s})$، وموضع متجه الفيض $\boldsymbol{\theta_s}$، وخرج واحد وهو حالة تبديل أذرع العاكس $(\boldsymbol{S_a, S_b, S_c})$. يتم تقسيم كل مدخلات ومخرجات إلى عدد محدد من المجموعات الضبابية وذلك للحصول على تحكم أفضل باستخدام الحد الأدنى من القواعد.



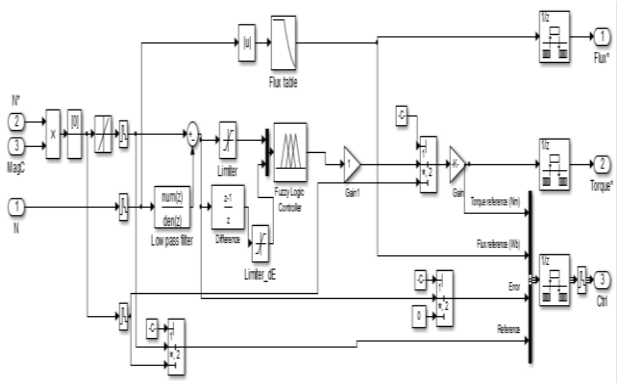
شكل (3) مخطط التحكم المباشر بالعزم باستخدام المنطق الضبابي [3].

8. محاكاة التحكم الاتجاهي للمحرك الحثي ثلاثي الطور

يمثل برنامج ماتلاب (MATLAB) حقيبة هندسية رياضية وأحد الوسائل المهمة لتطور التعليم والتصميم والتحليل الهندسي بسرعة فائقة. حيث تطورت استخداماته لدراسات الهندسة الكهربائية وهندسة التحكم والنظم من خلال الإمكانيات المتوفرة في أدوات المحاكاة (Simulink) وما تتضمنه من امكانيات عديدة وفعالة لتبسيط الجوانب الهندسية الحقيقية المعقدة، وجعل تنفيذها بالغ الأهمية لتحليل النتائج والحصول على التحكم المرغوب عمليا للمحركات الحثية.

1.8 محاكاة التحكم بالمجال الموجّه باستخدام متحكم المنطق الضبابي

تم استخدام دالة المنطق الضبابي لكلا الطريقتين في المحاكاة بالماتلاب. والشكل (4) يبين نظام متحكم المنطق الضبابي.

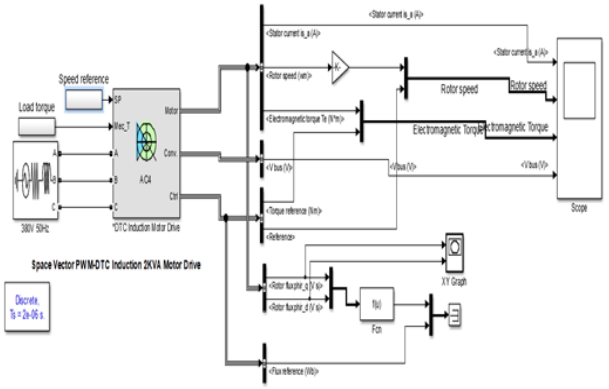


شكل (4) نموذج ماتلاب لمتحكم المنطق الضبابي.

2.8 محاكاة طريقة التحكم بالعزم المباشر ذو تقنية متجه الفضاء

تمت محاكاة منظومة التحكم في المحرك الحثي ثلاثي الطور باستخدام طريقة التحكم المباشر بالعزم مع متحكم PI، ولم تذكر في هذه الورقة

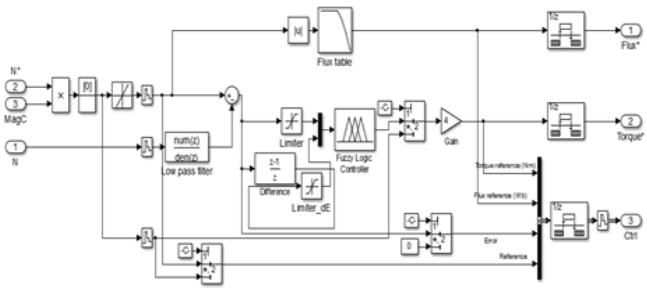
للاختصار. تختلف هذه الطريقة عن طريقة التحكم المباشر بالعزم باستخدام تقنية تضمين عرض النبضة، والشكل (5) يبين منظومة التحكم بالمجال الموجّه مع متحكم PI.



شكل (5) منظومة التحكم بالمجال الموجّه مع متحكم PI.

3.8 محاكاة طريقة التحكم بالعزم المباشر ذو تقنية متجه الفضاء مع متحكم المنطق الضبابي

يستخدم في هذه الطريقة متحكم المنطق الضبابي بدلا من متحكم PI. والشكل (6) يبين محاكاة متحكم المنطق الضبابي لطريقة التحكم المباشر بالعزم مع متجهات الفضاء.



شكل (6) متحكم المنطق الضبابي لطريقة التحكم المباشر بالعزم مع متجهات الفضاء.

9. النتائج والمناقشة

عند تنفيذ المحاكاة يمكن ملاحظة إشارة خرج كل من تيار الجزء الساكن والعزم وجهد التيار المستمر (DC bus voltage) وسرعة الجزء الدوار من خلال الأشكال المتحصل عليها من الخرج. فمن خلال نتائج المحاكاة لكل طريقة يمكن معرفة سرعة الاستجابة للعزم وأفضل استجابة للسرعة.

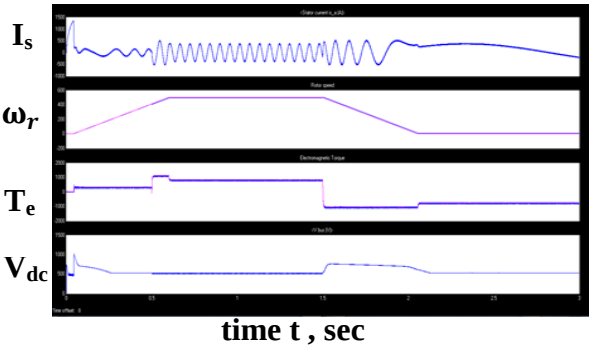
1.9 . نتائج طريقة التحكم بالمجال الموجّه مع متحكم المنطق الضبابي

استخدم في هذه الحالة متحكم المنطق الضبابي، حيث كانت موجة التيار والجهد مشابهة لطريقة FOC، أما في حالة العزم فإن طريقة التحكم بالمجال الموجّه بمتحكم FL حسنت التذبذب الناشئ من تغير الحمل عند زمن t=0.075 sec.

عند الزمن t=0.5 sec يصل المحرك لأقصى سرعة وهي 500 rpm ولكن تكون السرعة الفعلية للمحرك في هذه الحالة أقل من السرعة المرجعية، حيث كانت السرعة 494 rpm أي أن السرعة في حالة الاستقرار تكون مشوهة مقارنة بحالة التحكم بطريقة FOC، أما تيار الساكن والعزم والجهد فتكون الإشارة مشابهة للطريقة السابقة.

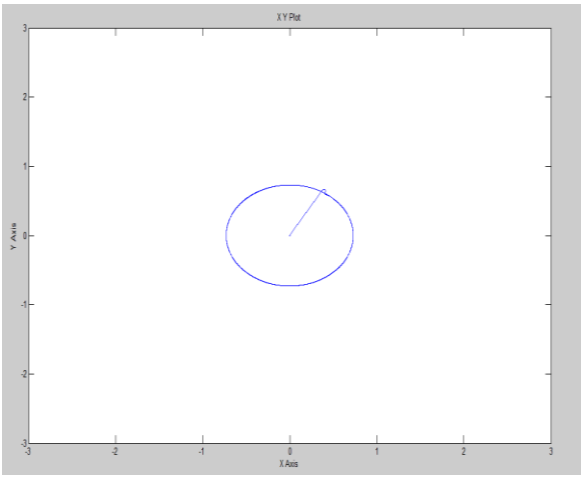
وعند زمن t=1.5 sec تبدأ عملية التوقف (التباطؤ) وتكون إشارة خرج التيار الساكن وسرعة الدوار في هذه الحالة محسنة مقارنة بطريقة التحكم السابقة حيث أنه عند البدء في الكبح كانت الزيادة اللحظية في هذه الطريقة ووصلت سرعة الدوار إلى 502 rpm.

وعند الزمن t=2 sec تصل السرعة إلى الصفر ويتوقف المحرك وتكون الإشارة مشابهة لطريقة FOC، وتظهر نتائج المحاكاة لطريقة المجال الموجّه في الشكل (7) وهي تيار الجزء الساكن، وسرعة الجزء الدوار، والعزم الكهرومغناطيسي، والجهد المستمر، أما الشكل (8) يظهر الفيض على المحاور (d _q).



شكل (7) خرج محاكاة طريقة التحكم بالمجال الموجّه مع متحكم المنطق الضبابي.

بالنسبة لحلقة الفيض يتجاوز نطاق الحلقة في التحكم بالمجال الموجّه في الطريقتين حيث يظهر من المحاكاة خروج قيمة الفيض من نطاق الحلقة، وخلال فترة البدء يأخذ الفيض مسار مباشر للوصول إلى المحيط بسبب تغير النطاق.



شكل (8) يظهر الفيض على المحاور (d _q) تحكم المنطق الضبابي.

2.9 نتائج طريقة التحكم المباشر بالعزم DTC

عند تنفيذ المحاكاة يمكن ملاحظة إشارة خرج كل من تيار الجزء الساكن والعزم وجهد التيار المستمر (DC bus voltage) وسرعة الجزء الدوار من خلال الأشكال المتحصل عليها من الخرج.

عند الزمن t=0 sec نقطة ضبط السرعة 500 rpm لاحظ أن التيار يكون عالي في البداية ويكون شكل الموجة غير مستقر، وتكون موجة الجهد غير مستقرة في البداية ولكن تشوه إشارة الجهد يأخذ فترة زمنية أقل من التحكم بالمجال الموجّه بحيث لا يتجاوز 770 v. استجابة العزم في هذه الطريقة أسرع في حدود t=0.01 sec - t=0.02 sec.

يسلط أو يطبق عزم الحمل الكامل على العمود الدوار للمحرك عند الزمن t=0.5 sec بينما سرعة المحرك لا تزال تزداد إلى قيمتها النهائية والتي تحتاج في هذه الطريقة زمن أكبر لتطابق إشارة السرعة المرجعية عند زمن t=1 sec، ويصل العزم الكهرومغناطيسي إلى القيمة العظمى (1200 N.m)، وتستقر إشارة العزم في هذه الطريقة بسرعة أكبر (تستغرق فترة زمنية أقل في فترة العزم الأقصى) عند وصولها قيمة (800 N.m)، وكذلك موجة تيار الساكن تستقر عند استقرار العزم

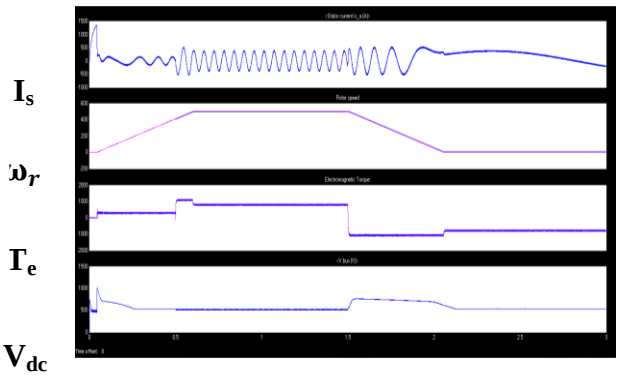
وتصل سرعة المحرك إلى 499 rpm ولكن بعد زمن t=1 sec، بعد ذلك تستقر السرعة أيضا.

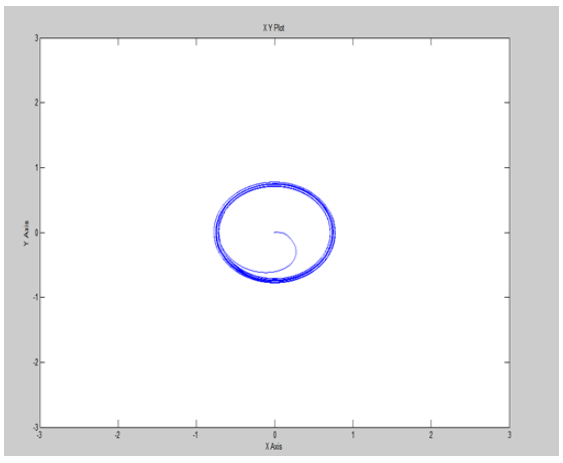
عند الزمن t=1.5 sec نقطة ضبط السرعة تتغير إلى الصفر، وتنخفض السرعة إلى الصفر بمتابعة دقيقة للتباطؤ في السرعة على الرغم من أن الحمل الميكانيكي ينعكس فجأة، وتغير العزم من 800 N.m إلى -1250 N.m. إشارة الجهد عند الزمن t=1.5 sec تزداد لفترة صغيرة وتصل لجهد 770 v. ويكون التشوه في شكل موجة تيار الساكن عند بدأ عملية التوقف أكبر من التحكم بطريقة المجال الموجّه وتقنياتها بالإضافة إلى تشوه إشارة السرعة في هذه الحالة يكون أكبر، حيث أنه عند لحظة الكبح يزداد التيار وتصل السرعة إلى 536 rpm.

عند الزمن t=2sec بعد فترة قصيرة سرعة المحرك تستقر عند الصفر، والعزم يستقر عند 800N.m ، وكذلك تستقر إشارة الجهد.

3.9 نتائج طريقة التحكم المباشر بالعزم ذو تقنية متجه الفضاء

عند تنفيذ المحاكاة في هذه الطريقة كانت مشابهة لطريقة التحكم المباشر بالعزم DTC مع تحسن إشارة تيار الساكن في البداية، وتحسن إشارة الجهد المستمر في البداية، حيث قللت هذه الطريقة من التشوه الحاصل لإشارة الجهد المستمر، وتظهر نتائج المحاكاة لطريقة المجال الموجّه في الشكل (9) وهي تيار الجزء الساكن، وسرعة الجزء الدوار، والعزم الكهرومغناطيسي، والجهد المستمر، أما الشكل (10) يظهر الفيض على المحاور (d _ q).



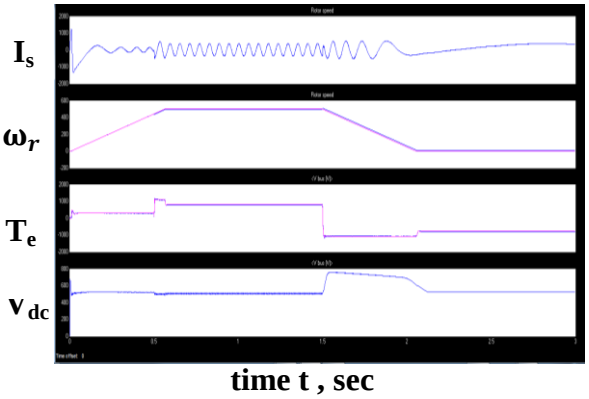


شكل (10). الفيض على المحاور (d _ q) التحكم بالعزم المباشر ذو تقنية متجه الفضاء.

4.9 نتائج طريقة التحكم بالعزم المباشر ذو تقنية متجه الفضاء مع متحكم المنطق الضبابي FSV_DTC

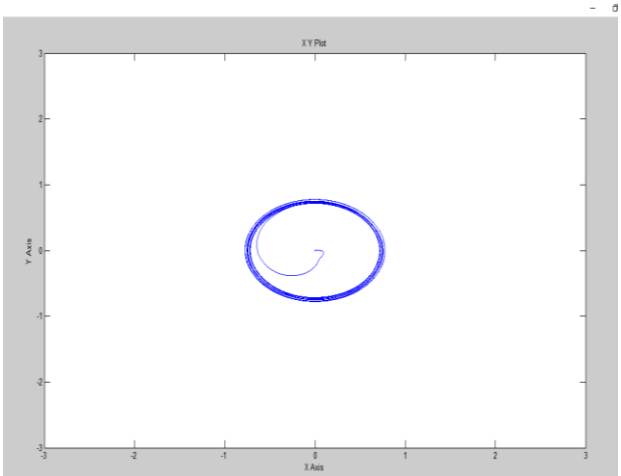
استخدم في هذه الحالة متحكم المنطق الضبابي، وعند تنفيذ المحاكاة تمت ملاحظة أن الأشكال في البداية بين زمن t=0 sec - t=0.5 sec إشارة تيار الساكن مثل الطرق السابقة يكون فيها تيار البدء عالي ويكون التيار غير مستقر، ولكن التيار ينخفض بسرعة أكبر من باقي الطرق والتي ينخفض فيها التيار بشكل تدريجي (التيار ينخفض مباشرة)، واستجابة العزم تكون سريعة مثل باقي تقنيات التحكم المباشر بالعزم ولكن تكون إشارة العزم في هذه الحالة مشوهة وإشارة الجهد المستمر تكون مشابهة لطريقة التحكم SV_DTC.

فعند الزمن t=0.5 sec يصل المحرك لأقصى سرعة ولكن أقل من السرعة القصوى وهي 500 rpm، ولكن تكون السرعة الفعلية للمحرك 492 rpm أقل من السرعة المرجعية، أي أن السرعة في حالة الاستقرار تكون مشوهة مقارنة بحالة التحكم بطريقة DTC. أما تيار الساكن والجهد فتكون الإشارة مشابهة للطريقة السابقة، وعندما يصل العزم لأقصى قيمة في هذه الفترة تكون الإشارة مشوهة مع ذلك تكون الفترة الزمنية للعزم الأقصى في هذه الطريقة أكبر من طرق التحكم المباشر السابقة وتكون في حدود t=0 sec - t=0.5 sec. وعند زمن t=1.5 sec تبدأ عملية التوقف (التباطؤ) وتكون إشارة خرج التيار الساكن وسرعة الدوار في هذه الحالة محسنة مقارنة بطرق التحكم DTC، SV_DTC وتصل سرعة الدوار اللحظية عند بدء التوقف 510 rpm، ولكن يزداد تشوه الإشارة بالنسبة للعزم وذلك عندما يكون العزم سالباً. ثم عند الزمن t=2sec تصل السرعة إلى الصفر ويتوقف المحرك وتكون إشارة العزم والتيار مشوهة أكثر من الطرق السابقة، والشكل (11) يوضح نتائج هذه الطريقة.



شكل (11) خرج محاكاة طريقة التحكم بالعزم المباشر مع متحكم المنطق الضبابي.

حلقة الفيض في تقنيات التحكم المباشر بالعزم لا تخرج قيمة الفيض خارج نطاق الحلقة على عكس طريقة التحكم بالمجال الموجّه، ولكن بلاحظ أن نطاق الحلقة في تقنيات التحكم المباشر بالعزم يكون أكبر من نطاق الحلقة في تقنيات التحكم بالمجال الموجّه، والشكل (12) يوضح ذلك.



شكل (12) الفيض على المحاور (d _ q) التحكم بالعزم المباشر مع متحكم المنطق الضبابي.

10. الخلاصة

استخدام برنامج MATLAB بإمكانياته الهائلة مفيد ومناسب لمحاكاة ودراسة نظم التحكم بسرعة المحرك الحثي. لوحظ أثناء المحاكاة أن

سلوكيات بدء المحرك الحثي مهمة جدا للنظام بأكمله، بسبب الحاجة إلى عزم دوران كبير لتسريع المحرك في البداية؛ لذا يجب دراسة كيفية تقليل أو حماية المعدات من خطر هذا التيار العالي، وذلك لتحسين موثوقية النظام والأداء الديناميكي. كما ينبغي الاهتمام بدراسة نظم التحكم الصناعية الحديثة كالمتحكم الدقيق، مع إجراء تجارب معملية بعد المحاكاة على طرق التحكم في سرعة المحرك الحثي. وبناء على هذه الدراسة والمراجعة لعدة بحوث متقدمة للموضوع تم تلخيص النقاط التالية:

1. التحكم بالمجال الموجّه يعطي استجابة أفضل (أكثر دقة) للسرعة من التحكم المباشر بالعزم، حيث أن السرعة عند التحكم بالمجال الموجّه لا تتأثر بشكل كبير بالتغير المفاجئ للحمل. بينما التحكم المباشر بالعزم لديه استجابة عزم أسرع وأقل تذبذبات من التحكم بالمجال الموجّه.
2. التحكم المباشر بالعزم لديه أسرع حالة وأكثر استقرار للفيض ويرجع ذلك إلى نطاق التخلفية التي تحافظ على الفيض ضمن النطاق المطلوب.
3. القيمة الفعالة (rms) لتيارات الجزء الساكن عند التحكم المباشر بالعزم أعلى وأكثر تشوه منه في التحكم بالمجال الموجّه، ولكن عند استخدام متحكم FL مع التحكم المباشر بالعزم أعطى أسرع انخفاض لتيار البدء.
4. التحكم المباشر بالعزم أقل تعقيد وتنفيذ للمحاكاة بسبب غياب متجهات التحويل والتي تستخدم في التحكم بالمجال الموجّه.
5. كلا من التحكم المباشر بالعزم والتحكم بالمجال الموجّه يتأثر بتغير مقاومة الجزء الثابت؛ لأنهما يعتمدان على فيض الجزء الثابت. ويمكن للطريقتين العمل في مناطق التشغيل الأربعة.
6. أعطى متحكم المنطق الضبابي (FL) نتائج أفضل في إشارة السرعة والتيار عند البدء في عملية الكبح (التوقف).
7. التحكم في العزم والفيض في حالة التحكم بالمجال الموجّه يكون غير مباشر من خلال تيارات الجزء الساكن، أما في حالة التحكم المباشر بالعزم فيكون تحكم مباشر. كذلك عند فصل طرق المجال الموجّه يتطلب توجيه على عكس التحكم المباشر بالعزم.
8. أظهرت طرق التحكم الاتجاهي للتحكم في سرعة المحرك الحثي تحسناً كبيراً وواضحاً في كفاءة واستقرار تشغيل المحرك.
9. استخدام طرق التحكم المباشر بالعزم يعطي إشارة جهد مستمر أسرع وأقل تذبذب خاصة عند الاقلاع من التحكم بالمجال الموجّه.

المراجع

[1] J. R. Domínguez, I. Dueñas and S. Ortega-Cisneros, "*Discrete-Time Modeling and Control Based on Field Orientation for Induction Motors*," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 8, pp. 8779-8793, Aug. 2020.

[2] Y. Xu, C. Morito and R. D. Lorenz, "Extending High-Speed Operating Range of Induction Machine Drives Using Deadbeat-Direct Torque and Flux Control With Precise Flux Weakening," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 4, pp. 3770-3780, July-Aug. 2019.

[3] El Ouanjli, N., Derouich, A., El Ghzizal, A. et al. "Modern improvement techniques of direct torque control for induction motor drives - a review". Prot Control Mod Power Syst 4, 11 (2019).

[4] Emad Karrar " Field Oriented Control of Induction Motor". ttps://www.semanticscholar.org/paper/Field-Oriented-Control-of-Induction-Motor-Karrar-Ajang/e01a0eb2678a3bdc9c4a8fe5cb28015f66c8e4bf (2010).

[5] Hamid Khan, "Field Oriented Control", Application Note, Renesas 2008.

[6] B. Thool, K. C. Wakhare. "Induction Motor Control By Vector Control Method", International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES).

[7] P. Nimisha D.,J. S. Tadel,A. T. Patel, "Vector Control Technique of Induction Motor", International Journal of Advance Engineering and Research Development, Volume 1,Issue 12, December -2014.

[8] Raul I. G. Recalde, "Induction Motors: Applications, Control and Fault Diagnostics", Published by AvE4EvA, Copyright © 2015.

[9] Haitham Abu-Rub, Atif Iqbal and Jaroslaw Guzinski, "High Performance Control of AC Drives with MATLAB/Simulink Models", 2012 Wiley & Sons.

[10] Bimal K. Bose, "Modern Power Electronic and AC Drives", 2002 Prentice Hall PTR.

[11] Zhi Shang, "Simulation and Experiment for Induction Motor Control Strategies". Electronic Theses and Dissertations. University of Windsor 2011.

[12] Bogdan M. Wilamowski, J. david Irwin, "Power Electronics and Motor Drives", The Industrial Electronics Handbook Second Edition, 2011 CRC Press.

[13] Muhammad H. Rashid, "Power Electronics Handbook", 2001 by Academic Press.

[14] Milan Singh Tekam, Dr. A. K. Sharma, *"Comparative Study of Field Oriented Control and Direct Torque Control of Induction Motor*" © July 2018 IJSDR/ Volume 3, Issue 7.

[15] Sobha C. Barik, "Sliding Mode Vector Control of Three Phase Induction Motor", Master Thesis at National Institute of Technology Rourkela Orissa May 2007.

[16] Henrik Mosskull, *"Robust Control of an Induction Motor Drive*", PhD Dissertation in Automatic Control School of Electrical Engineering, Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, Sweden, 2006.

[17] Anmol Aggarwal, J. N. Rai, Maulik Kandpal, "*Comparative Study of Speed Control of Induction Motor Using PI and Fuzzy Logic Controller*", IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), Mar – Apr. 2015.

[18] Nirupama Patra, "*Study of Induction Motor Drive with Direct Torque Control scheme and Indirect field oriented control scheme using Space Vector Modulation*" Master Thesis at National Institute of Technology Rourkela Orissa, June 2013.

[19] Wenxiang Song, Shengkang Le, Xiaoxin Wu, and Yi Ruan, "*An Improved Model Predictive Direct Torque Control for Induction Machine Drives*", Journal of Power Electronics, Vol. 17, No. 3, pp. 674-685, May 2017.

[20] H. Sudheer, SF Kodad, B Sarvesh. "*Improved Fuzzy Logic based DTC of Induction machine for wide range of speed control using AI based controllers*" J. Electrical Systems 12-2 (2016): 301-314.

[21] Y. Zhang, J. Zhu, Z. Zhao, W. Xu and D. G. Dorrell, "*An Improved Direct Torque Control for Three-Level Inverter-Fed Induction Motor Sensorless Drive*," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 3, pp. 1502-1513, March 2012.