

تطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم باستخدام المنطق العائم لقيادة محرك تحريضي في عربة كهربائية

م.أحمد حمود العريفي⁽¹⁾

د.م. رائد الشرع⁽²⁾ و د.م. سلام محمود⁽³⁾

المخلص

تعتبر منهجية التحكم المباشر بالعزم الأكثر استخداماً في تصميم نظم القيادة الكهربائية في عملية التحكم بالمحركات الكهربائية لتأمين حركة المركبات الكهربائية، إلا أنها تعاني من بعض السلبيات عند سير العربة في شروط خاصة، لذا تم تطويرها بطرق مختلفة وفقاً لمتطلبات عملية قيادة المركبات للمساهمة في تطوير نظم قيادتها. يقدم هذا البحث آلية لتطوير تقنية التحكم المباشر بالعزم باستخدام مخمن عائم، بحيث يمكن لهذه المنهجية تقدير وحساب أدق للفيضان من تقنية التحكم المباشر بالعزم التقليدية. وذلك من خلال تعديل التغيرات والاضطرابات التي تطرأ على قيمة مقاومة الثابت للمحرك التحريضي نتيجة تأرجح الحمولة وفقاً لمسار المركبة وانتقالها من مستوي إلى آخر صاعد ثم نازل بواسطة تقدير القيمة الصحيحة اعتماداً على قيم تيارات المحرك. يقود ذلك إلى الحصول على عزم كهرومغناطيسي بأقل خطأ ديناميكي وستاتيكي، مقارنة مع الطريقة التقليدية. تم دراسة منهجية التحكم المباشر بالعزم وتطويرها باستخدام المنطق العائم، من خلال نمذجة ومحاكاة المحرك التحريضي في بيئة MatLab وقيادته بكلتا الطريقتين التقليدية والمطورة بالمنطق العائم، وإيجاد الاستجابة للسرعة والعزم وإشارات الخطأ لكل الطريقتين، ومقارنة النتائج بالاعتماد على معيار متوسط مربع الخطأ. اثبتت النتائج أفضلية تقنية التحكم المباشر بالعزم المطورة باستخدام المخمن العائم على التقليدية.

الكلمات المفتاحية: عربة كهربائية، محرك تحريضي، منهجية التحكم المباشر بالعزم، المنطق العائم.

⁽¹⁾ طالب دكتوراه في قسم هندسة القيادة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

⁽²⁾ عضو هيئة تدريسية في قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق

⁽³⁾ عضو هيئة تدريسية في قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق

Development Direct Torque Control Using Artificial Neural Network to Drive Induction Motor in Electrical Vehicle

Eng. A. H. Alaraifi
Dr. R. Alcharea Dr. S. Mahmoud

Abstract

Direct Torque Control (DTC) is the most used in design electrical drive system to control induction motor that is used to provide electrical vehicle by motion. DTC is suffered many negatives characteristics when electrical vehicle run in special conditions so it is developed according to required need in develop drive system. This paper introduces develop of DTC using Fuzzy Logic Estimator (FLE) so DTC – FLE can estimate flux more precise than classical DTC. Tolerances of stator resistance for induction motor that appear from change of load according to track of vehicle and transit from direct to up and down way, is filtered by DTC – FLE that estimates correct value for stator resistance from currents taken for motor. This process as conclusion gives electromagnetic torque with least dynamic and static error than classical DTC. DTC and method DTC – FLE are explained purely. Model of induction motor using matlab, drive using DTC and drive using DTC – FLE are achieved. Response of speed and torque and errors signals for DTC and DTC – FLE are found out. A comparative is achieve depends on Mean Square Error (MSE). Results improve that DTC – FLE is much better than classical DTC.

Key words: Electrical Vehicle, induction motor, DTC, fuzzy logic

1. مقدمة:

شهدت السنوات الأخيرة تطوراً هائلاً وملحوظاً في صناعة المركبات الكهربائية لما لها من أثر إيجابي على البيئة، ولأنها الحل البديل والأنسب لسيارات الديزل. إن التقدم الكبير في صناعة المركبات الكهربائية جاء نتيجة تطور دارات وأنظمة القيادة الكهربائية للمحركات الكهربائية ثلاثية الطور المستخدمة فيها، وذلك لأنها تمتاز باستطاعتها العالية وقدرتها على العمل لساعات طويلة دون ضجيج. تعتبر طريقة التحكم المباشر بالعزم من أكثر طرق التحكم شيوعاً في أنظمة القيادة الكهربائية، لأنها اثبتت فعالية عالية في قيادة المحرك الكهربائي ثلاثي الطور، إلا أنها تعاني من بعض السلبيات عند وجود شروط خاصة لقيادة العربة وبالأخص عند تغير الحمولة أو مسار العربة.

2. أهمية البحث وهدفه:

تبرز أهمية البحث في مجال صناعة المركبات الكهربائية، التي تتطلب وجود نظم قيادة كهربائية دقيقة ذات استجابة سريعة، وخالية من الانتقالات الحادة بين مستويات العزوم المختلفة، وتؤمن انتقال ناعم وسلس من مستوى عزم لآخر مناسب للمركبة الكهربائية رغم اختلاف ظروف الحركة ومسار المركبة الكهربائية واختلاف حمولتها التي تتغير وفقاً لعدد الأشخاص والأمتعة التي تحملها مع الحفاظ على مستوى السرعة المطلوبة، دون حدوث انخفاض كبير فيها رغم تغير الحمولة والمسار، لذلك يهدف البحث إلى تطوير أنظمة القيادة الخاصة بالمركبة الكهربائية، من خلال تطوير طريقة التحكم المباشر بالعزم باستخدام مخمن عائم، لإجراء عملية التخمين فيها التي تعتبر جزءاً أساسياً من طريقة التحكم المباشر بالعزم التقليدية. يؤدي التخمين الدقيق إلى تحسين طريقة التحكم المباشر، والحصول على أداء أفضل

واستجابة أنعم بأقل تأرجحات للعزم، فينعكس إيجاباً على أداء المركبة الكهربائية، ولا سيما عند الأحمال الكبيرة نسبياً والتي تتطلب تيارات كبيرة؛ لها أثر حراري يؤدي إلى تغير في قيم محددات المحرك، الذي بدوره يسبب تأرجحاً في العزم عند القيادة بواسطة منهجية DTC.

3. خطوات البحث:

تم انجاز هذا البحث وفق الخطوات التالية:

- 1- إجراء دراسة مرجعية لأبرز طرق تطوير طريقة التحكم المباشر بالعزم
- 2- نمذجة المحرك الكهربائي ثلاثي الطور وفق المحاور الثنائية q-d
- 3- دراسة قيادة المحرك الكهربائي بواسطة طريقة التحكم المباشر للعزم التقليدية.
- 4- تطوير طريقة التحكم المباشر بالعزم باستخدام مخمن عائم لإجراء التخمين وتطبيق طريقة التحكم المباشر بالعزم المطورة بالمخمن العائم DTC-FLE لقيادة المحرك الكهربائي.
- 5- تحصيل نتائج قيادة المحرك الكهربائي ثلاثي الطور المستخدم لتحريك عربة على مسار مكون من ثلاث مراحل؛ مستوية ثم صاعدة ثم نزول، وذلك باستخدام طريقة التحكم المباشر بالعزم التقليدية والمطورة بالاعتماد على المخمن العائم DTC-FLE
- 6- إجراء مقارنة لأداء المحرك الكهربائي وفق نظامي القيادة؛ طريقة التحكم المباشر التقليدية، والمطورة باستخدام المخمن العائم أو الغامض؛ لمعرفة مدى مقدار التحسين وتحصيل النتائج النهائية ومناقشتها.

4. الدراسة المرجعية:

تناولت العديد من الدراسات المرجعية تطوير منهجية DTC بدمجها مع تقنيات تحكم حديثة لتصميم نظم قيادة أكثر فعالية، حيث تم تطويرها بدمجها مع تقنية التعديل

خلال محاكاة بواسطة برنامج MatLab لتحصيل النتائج[6].

وقد اكتفى آخرون باستخدام المتحكم العائم لتنظيم السرعة في منهجية DTC باستخدامه كمنظم ومتحكم في حلقة تنظيم السرعة مستخدمين (7) مجموعات انتماء لمتحولي دخل المتحكم الغامض وهما: الخطأ في السرعة وتغير خطأ السرعة، واعتمدوا على (49) قاعدة غموض لإجراء فك التغميض وأجريت محاكاة بواسطة MatLab واعطت النتائج فعالية عالية في إنقاص معدل التآرجح في العزم[7]. تم تطوير DTC باستخدام المنطق العائم انطلاقاً من المشكلة الرئيسية الموجودة فيها وهي معدل التآرجح العالي في العزم مستخدمين المتحكم الغامض في حلقة التحكم بالعزم بدلاً من حلقة التحكم بالسرعة يتكون المتحكم العائم من متحولي دخل هما: الخطأ وتغير الخطأ في العزم وكل متحول يحتوي على (7) مجموعات انتماء ويحتوي المتحكم العائم على (49) قاعدة عائمة وتمت المحاكاة بواسطة بيئة MatLab بغية إيجاد النتائج[8].

قد قام باحثان هنديان بتدعيم DTC بمتحكم صناعي عصبوني عائم (Neuro-fuzzy) لإجراء عملية التحكم بالعزم[9]. كما قام مجموعة باحثين بتطوير DTC بإدخال المتحكم العائم كمتحكم للسرعة بالاعتماد على خطأ وتغير خطأ السرعة وتعديل عرض النبضة بالفراغ الشعاعي كمتحكم للعزم بهدف تقليل التآرجح للعزم الناتج على محور المحرك التحريضي، نتيجة إجراء عملية القيادة وفق المنهجية المقترحة تم مقارنة الطريقة المدعمة مع الطريقة التقليدية لتوضيح مدى أهمية الطريقة المطورة من خلال حساب معدل التآرجح بعد إجراء عملية المحاكاة في بيئة Matlab [10].

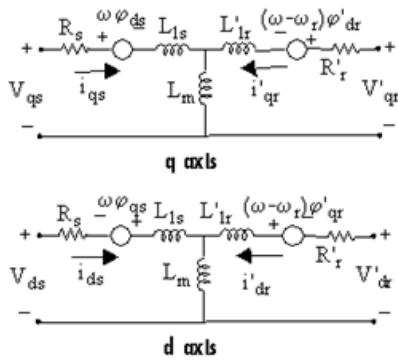
واستخدم المتحكم العائم لكل من حلقة التحكم بالعزم والسرعة بالاعتماد على الخطأ وتغير الخطأ يتكون المتحكم

الفراغي الشعاعي بغية التغلب على تغيرات العزم الناتجة عن شروط المسار المتغيرة من صعود وهبوط وتحصيل النتائج بالاعتماد على برنامج MatLab [1]. إلا أن الباحثين لم يتطرقوا إلى موضوع تغير محددات المحرك نتيجة العزم الكبيرة واكتفوا بأخذ محددات ثابتة عند استطاعة منخفضة.

وقد طورت منهجية DTC بإدخال متحكم عائم يقوم بتقدير نسبة دورة التبديل بغية إنقاص التآرجحات في إشارة العزم من خلال تخمين نسبة دورة التبديل بالاعتماد على الخطأ في العزم والفيوض، ويتكون المتحكم العائم المستخدم في هذه الدراسة من ثلاث مجموعات انتماء لكل من متحولات الدخل والخرج ومن (12) قاعدة فك تغميض [2]، استخدم آخرون المنطق العائم أو الغامض لتطوير منهجية DTC، لإجراء عملية التبديل بالاعتماد عليه؛ يحتوي على ثلاث مجموعات انتماء لثلاث متحولات دخل ومتحول خرج وعلى (24) قاعدة فك تغميض يقوم المتحكم الغامض أو العائم بتقدير قيمة التبديل بالاعتماد على خطأ الفيض وخطأ العزم وزاوية الفيض[3].

اقترح آخرون استخدام متحكم عائم للتحكم بالعزم من خلال تقدير خطأ العزم بدقة بالاعتماد على خطأ العزم وتغير خطأ العزم واعتمد (7) مجموعات انتماء لكل متحول دخل وخرج و(56) قاعدة غموض [4]. وقد ركز باحثون على عملية معايرة المتحكم التناسبي التكاملية (PID) مستخدم في منهجية DTC بواسطة المنطق العائم وخوارزمية أسراب الطيور بهدف الحصول على أقل تعرج وتآرجح في العزم [5]. وقد استبدل جدول التبديل في منهجية التحكم المباشر بالعزم بمتحكم عائم يقوم بعملية التبديل بواسطة متحولي دخل هما الفيض وخطأ العزم بستة مجموعات انتماء؛ بهدف تقليل التآرجح في العزم وتمت مقارنته مع منهجية DTC التقليدية، واثبت تفوقه عليها من

$$\begin{aligned}
 V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{\partial \phi_{qs}}{\partial t} + \omega \phi_{ds} \\
 V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{\partial \phi_{ds}}{\partial t} - \omega \phi_{qs} \\
 V'_{qr} &= R'_r i'_{qr} + \frac{\partial \phi'_{dr}}{\partial t} + (\omega - \omega_r) \phi'_{dr} \\
 V'_{dr} &= R'_r i'_{dr} + \frac{\partial \phi'_{dr}}{\partial t} + (\omega - \omega_r) \phi'_{qr} \\
 Te &= 1.5p(\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \\
 \phi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \\
 \phi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i'_{qr} \\
 \phi'_{qr} &= L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \\
 \phi'_{dr} &= L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \\
 L_s &= L_{ls} + L_m \\
 L'_r &= L'_{lr} + L_m
 \end{aligned} \tag{1}$$



الشكل (1) الدارات المكافئة لمحرك كهربائي ثلاثي الطور في الإحداثيات الثنائية q,d

أما الجزء الميكانيكي للمحرك فتعطى معادلاته بالشكل

التالي:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial \omega_m}{\partial t} &= \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_m - T_m) \\
 \frac{\partial \theta_m}{\partial t} &= \omega_m
 \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

حيث يبين الجدول (1) دلالة كل رمز في مجموعتي

المعادلات (1) و(2) كالتالي:

من (7) مجموعات انتماء و(49) قاعدة غموض بهدف تقليل التأرجحات في العزم ووجدت النتائج بالاعتماد على محاكاة في بيئة Matlab [11]. نفس آلية التطوير السابقة تم اقتباسها من أجل تطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم بواسطة تغيير قانون التحكم بالمنطق العائم بهدف تقليل التأرجحات في العزم وقد أجريت محاكاة في بيئة Matlab أيضاً [12].

ركزت الدراسات المرجعية السابقة على تطوير منهجية التحكم المباشر بمنحى محدد باستخدام المنطق العائم، بهدف الحصول على قيادة ناعمة وسلسة بتقليل تأرجحات العزم والسرعة الناتجان عن عملية القيادة وفق شروط وظروف حركة متغيرة.

5. نمذجة المحرك الكهربائي ثلاثي الطور

إن عملية إجراء التطبيق المباشر لمنهجيات التحكم على المحرك تتطلب الكثير من الوقت والجهد، بالإضافة إلى التكلفة العالية، والتي قد تؤدي في بعض الأحيان إلى احتراق المحرك أو نظام التحكم والقيادة أو كلاهما، الأمر الذي يدفع غالب الباحثين إن لم نقل جميعهم إلى اعتماد النمذجة والمحاكاة لإجراء مثل هذه الأبحاث والدراسات لتجنب التكاليف العالية أو التعرض لخطورة ما قد تحدث أثناء التجريب.

إن المحرك الكهربائي نظام كهروميكانيكي يتكون من جزئين:

الجزء الكهربائي والجزء الميكانيكي

يبين الشكل (1) الدارات المكافئة للجزء الكهربائي لمحرك ثلاثي الطور في فراغ الإحداثيات الثنائية، ومنه تعطى معادلات الجزء الكهربائي للمحرك بمجموعة المعادلات التالية [13,14]:

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2\cos\theta & \cos\theta + \sqrt{3}\sin\theta \\ 2\sin\theta & \sin\theta - \sqrt{3}\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{abs} \\ V_{bcs} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V'_{qr} \\ V'_{dr} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2\cos\beta & \cos\beta + \sqrt{3}\sin\beta \\ 2\sin\beta & \sin\beta - \sqrt{3}\cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{abr} \\ V'_{bcr} \end{bmatrix} \quad (3)$$

وتعطى تحويلات بارك العكسية للتيارات وفق
المعادلات الآتية [13,15,16]:

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos\theta}{2} & \frac{\sin\theta}{2} \\ -\frac{\cos\theta + \sqrt{3}\sin\theta}{2} & -\frac{\sqrt{3}\cos\theta - \sin\theta}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i'_{ar} \\ i'_{br} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos\beta}{2} & \frac{\sin\beta}{2} \\ -\frac{\cos\beta + \sqrt{3}\sin\beta}{2} & -\frac{\sqrt{3}\cos\beta - \sin\beta}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix}$$

$$i_{cs} = -i_{as} - i_{bs}$$

$$i'_{cr} = -i'_{ar} - i'_{br}$$

في تحويل بارك يكون الإطار المرجعي هو الدوار
Rotor (Park transformation) وتكون الزوايا
 $\theta = \theta_r, \beta = 0$

تتم عملية نمذجة المحرك الكهربائي ثلاثي الطور
باستخدام مجموعة المعادلات (1) و (2) و (3) و (4)، وذلك
لتمثيل الجزئين الكهربائي والميكانيكي للمحرك وإجراء
التحويلات من نظام محاور ثلاثية الطور abc إلى نظام
الإحداثيات الثنائية q-d وبالعكس، حيث يكون دخل
النموذج ككل جهود التغذية ($V_{abs}, V_{bcs}, V'_{abr}, V'_{bcr}$)
وعزم الحموله (العزم الميكانيكي لمحور المحرك) T_m
وخرج النموذج ككل السرعة والعزم اللذان يعطيهما المحرك.

6. طريقة التحكم المباشر بالعزم التقليدية:

تعتمد منهجية التحكم المباشر بالعزم على إيجاد قيم الجهود
أو التوترات V_{abs} و V_{bcs} والتيارات i_{as} و i_{bs} عن طريق
حساسات التوترات والتيارات التي تتركب على ثابت المحرك كما
يبين المخطط الصندوقي في الشكل (2)، تستخدم تحويلات
بارك بعد ذلك لحساب قيم التوترات V_{qs} و V_{ds} والتيارات
 i_{qs} و i_{ds} وفقاً لمجموعتي المعادلات (3) و (4)، بعد ذلك
ننتقل لمرحلتين تخمين الفيض وتخمين العزم [17].

الجدول (1) دلالات رموز محرك كهربائي ثلاثي الطور

الرمز	الدلالة
R_s, L_{ls}	المقاومة والمحاكاة التسريعية للثابت
L_s	المحاكاة الكلية للثابت
V_{ds}, i_{ds}	توتر وتيار الثابت وفق المحور d
ω_m	السرعة الزاوية لمحرك كهربائي ثلاثي الطور
ω_r	السرعة الزاوية الكهربائية تساوي $\omega_r = p\omega_m$
P	عدد أزواج الأقطاب
T_m	العزم الميكانيكي لمحرك كهربائي ثلاثي الطور
H	معامل العطالة للحمولة وممانعة المسار
R'_r, L'_{lr}	مقاومة والمحاكاة التسريعية للدوار
V'_{dr}, i'_{dr}	توتر وتيار الدوار وفق المحور d
L_m	المحاكاة المغناطيسية
V_{qs}, i_{qs}	توتر وتيار الثابت وفق المحور q
ϕ_{qs}, ϕ_{ds}	فيض الثابت وفق المحور d و q
θ_m	زاوية موضع المحرك الكهربائي ثلاثي الطور
θ_r	زاوية الموضع الكهربائية للدوار تساوي $\theta_r = p\theta_m$
ω	السرعة الزاوية للإطار المرجعي
T_e	العزم الكهرومغناطيسي
F	معامل الاحتكاك
V'_{qr}, i'_{qr}	توتر وتيار الدوار وفق المحور q
ϕ'_{qr}, ϕ'_{dr}	فيض الدوار وفق المحور d و q
L'_r	المحاكاة الكلية للدوار

تتم عملية الانتقال من الإحداثيات الثلاثية abc إلى
الإحداثيات الثنائية qd أو العكس باستخدام تحويل بارك،
تعطى تحويلات بارك للجهود وفق المعادلات
التالية [14,15]:

حيث:

e_d و e_q القوة المحركة الكهربائية على المحور d و q على الترتيب.

تم الاعتماد على تخمين الفيض والعزم لحساب قيمة الخطأ في كل من العزم والفيض dT و $d\varphi$ على الترتيب، ذلك من خلال المقارنة مع العزم المرجعي المرغوب T_e^* وقيمة فيض الثابت المرجعي المرغوب $|\varphi_s^*|$ وإجراء عملية ابطاء من الدرجة الثانية hysteresis وفق المعادلتين التاليتين [14,17]:

$$dT = \begin{cases} -1; T_e^* - \hat{T}_s < 0 \\ 0; T_e^* - \hat{T}_s = 0 \\ +1; T_e^* - \hat{T}_s > 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$d\varphi = \begin{cases} 1; |\varphi_s^*| - |\varphi_s| > 0 \\ 0; |\varphi_s^*| - |\varphi_s| \leq 0 \end{cases}$$

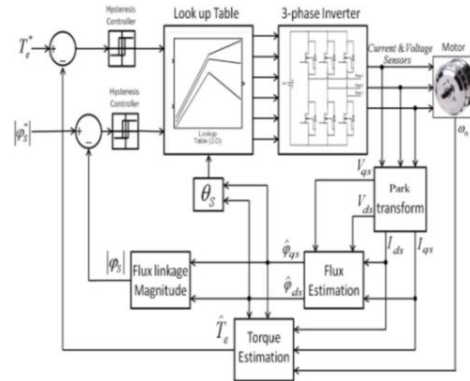
يبين الشكل (3) جميع حالات شعاع الفيض وفقاً لفتح واغلاق مفاتيح المبدل، حيث تمثل الحالة (000) والحالة (111) توقف للمحرك، ولم تؤخذ بالحسبان في مخطط توضع شعاع الفيض، يقسم مستوي توضع شعاع الفيض إلى ستة قطاعات من (1) إلى (6) تحقق عملية زيادة أو إنقاص العزم أو الفيض وفقاً للجدول التالي [15,17]:

الجدول (2) جدول زيادة وإنقاص العزم والفيض بناء على

موضع القطاع

شعاع الجهد	ازدياد	تناقص
تدفق ثابت	V_k, V_{k+1}, V_{k-1}	$V_{k+3}, V_{k+2}, V_{k-2}$
العزم	V_{k+1}, V_{k+2}	V_{k-2}, V_{k-1}

وهكذا تجري عملية التحكم المباشر بالعزم من خلال تحديد مقدار الزيادة أو النقصان في عزم المحرك للوصول إلى العزم المرجعي المرغوب بناءً على الجدول (3) المقترح من قبل الباحث (Takahashi look-up table)، تحدد القطاعات (من S_1 حتى S_6) عن طريق زاوية الثابت θ_s ثم



الشكل (2) المخطط الصندوقي لمنهجية DTC التقليدية

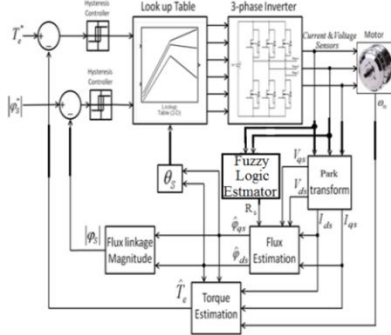
للتحكم بمحرك كهربائي ثلاثي الطور

تعتمد مرحلة تخمين مركبات الفيض $\hat{\varphi}_{ds}$ و $\hat{\varphi}_{qs}$ على مركبات التيارات والتوترات الناتجة من تحويل بارك على نظام المحاور $d-q$ ، يمكن بناءً على ذلك حساب فيض الثابت $|\varphi_s|$ وزاويته θ_s وفق الآتي [17,18]:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\varphi}_{ds} &= \int (V_{ds} - R_s i_{ds}) \\ \hat{\varphi}_{qs} &= \int (V_{qs} - R_s i_{qs}) \\ |\varphi_s| &= \sqrt{\hat{\varphi}_{ds}^2 + \hat{\varphi}_{qs}^2} \\ \theta_s &= \tan^{-1} \left(\frac{\hat{\varphi}_{ds}}{\hat{\varphi}_{qs}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

وتعتمد مرحلة تخمين قيمة العزم \hat{T}_e على التيارات والتوترات الناتجة من تحويل بارك بالإضافة للسرعة المقاسة وفق مجموعة المعادلات التالية:

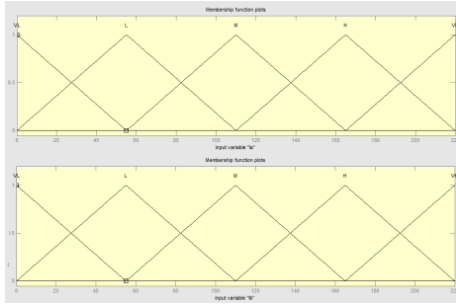
$$\begin{aligned} \hat{\varphi}_{qr} &= \hat{\varphi}_{qs} - L_s i_{qs} \\ \hat{\varphi}_{dr} &= \hat{\varphi}_{ds} - L_s i_{ds} \\ e_q &= \frac{d\hat{\varphi}_{qr}}{dt} \\ e_d &= \frac{d\hat{\varphi}_{dr}}{dt} \\ \hat{T}_e &= \frac{3}{2} \frac{p}{2} \left[\frac{e_q}{\omega} i_{qs} + \frac{e_d}{\omega} i_{ds} \right] \end{aligned} \quad (6)$$



الشكل (4) المخطط الصندوقي لمنهجية التحكم

المباشر بالعزم المطورة بالمخمن العائم DTC-FLE

يبين الشكل (5) و (6) آلية إجراء التعويم fuzzification وتوزع مجموعات انتماء دخل وخرج المخمن العائم على الترتيب، حيث الدخل هو تيار المحرك المسحوب على الطور a والطور b ويتوزع التيار على المجال $[0, 220]A$ والخرج هو مقاومة الثابت وتوزع على المجال $[11.88, 17.82]\Omega$ ويرمز VL لمجموعة الانتماء منخفض جداً very Low والرمز L لمجموعة الانتماء منخفض Low والرمز M لمجموعة الانتماء متوسط median والرمز H لمجموعة الانتماء مرتفع High والرمز VH لمجموعة الانتماء مرتفع جداً very High، حيث يتوزع الدخل على خمس مجموعات $\{VL, L, M, H, VH\}$ والخرج على ثلاث مجموعات $\{L, M, H\}$.

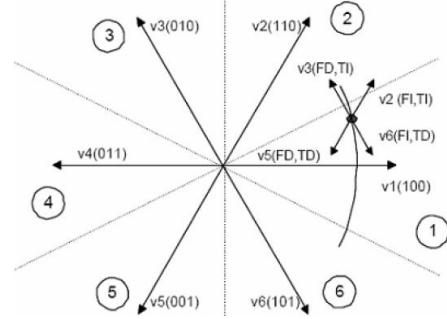


الشكل (5) توزع مجموعات انتماء دخل المخمن

العائم المستخدم لتطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم

DTC-FLE

بواسطة dT و $d\phi$ الناتجة عن مجموعة المعادلات (7) والتي تصف آلية التبديل للحصول على العزم المطلوب.



الشكل (3) توضع شعاع فيض الثابت

وفقاً لجميع حالات تبديل مفاتيح المبدل

switching inverter حيث

FD: flux decrease. FI: flux increase.

TI: torque increase. TD: torque decrease.

الجدول (3) جدول تبديل خوارزمية DTC التقليدية

$d\phi$	dT	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6
1	1	v2	v3	v4	v5	v6	v1
	0	v0	v7	v0	v7	v0	v7
	-1	v6	v1	v2	v3	v4	v5
0	1	v3	v4	v5	v6	v1	v2
	0	v0	v7	v0	v7	v0	v7
	-1	v5	v6	v1	v2	v3	v4

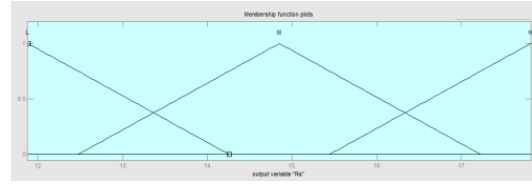
7. تطوير طريقة التحكم المباشر

بالعزم وفق المنطق العائم:

بعد تغيير قيمة مقاومة الثابت R_s نتيجة الأثر الحراري للتيارات عند الأحمال العالية نسبياً من أبرز مساوئ طريقة التحكم المباشر بالعزم التقليدية. تعود عدم دقة تخمين الفيض إلى مشاركة مقاومة الثابت في معادلات التخمين المعادلات (5). يعتمد تطوير طريقة DTC على إدخال المنطق العائم لحساب قيمة مقاومة الثابت من تيارات دخل المحرك عند الأحمال المتغيرة كما هو مبين بالشكل (4)، تمثل قيمتا التيار دخلاً للمخمن العائم ويمثل خرجه قيمة مقاومة الثابت R_s .

الجدول (5) قيم محددات ومواصفات المحرك المدروس

المحدد	القيمة
الاستطاعة الأسمية	150Kw
التوتر الاسمي	380v
التردد	50Hz
عدد أزواج الأقطاب	2
مقاومة الثابت	14.85mΩ
محاوضة الثابت	0.3027mH
مقاومة الدوار	9.295mΩ
محاوضة الدوار	0.3027mH
عزم العطالة	3.1Kg.m2
معامل الاحتكاك	0.08N.m.s



الشكل (6)

توزع مجموعات انتماء الخرج المخمن العائم المستخدم لتطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم DTC-FLE

يبين الجدول (4) قواعد محرك العوم لإجراء فك التعويم defuzzification، حيث يحتوي على (25) قاعدة ويشير تقاطع انتماء الدخل إلى انتماء الخرج ليشكل بمجمله قاعدة الغموض كما هو مبين بالمثال التالي:

$$\text{if } (I_a \in VL) \text{ and } (I_b \in L) \text{ then } (R_s \in L)$$

الجدول (4) جدول قواعد محرك العوم

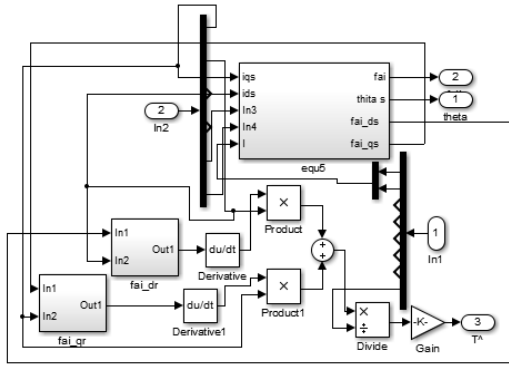
$I_b \backslash I_a$	VL	L	M	H	VH
VL	L	L	M	M	M
L	L	L	M	M	M
M	M	M	M	M	M
H	M	M	M	H	H
VH	M	M	M	H	H

8. النتائج والمناقشة:

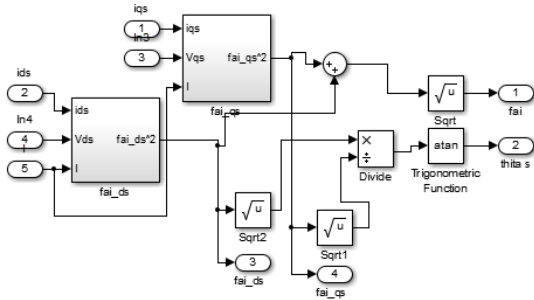
نفذت محاكاة المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار كما هو مبين بالشكل (7) الجزء motor بناءً على مجموعات المعادلات من (1) حتى (4) في البيئة البرمجية MatLab، وفق محددات المحرك المعطاة بالجدول الآتي:

وأجريت محاكاة لحركة المركبة الكهربائية على مسار بثلاث أجزاء؛ جزء مستوي مع حمولة 100N.m، وجزء صاعد بعزم قدره 150N.m (مرة ونصف من العزم السابق بسبب عملية الصعود)، وجزء نازل بعزم 50N.m أي نصف العزم اللازم للجزء الأول، وبسرعة ثابتة قدرها 90rpm كما هو مبين بالشكل (7). أجريت عملية نمذجة منهجية التحكم المباشر بالعزم DTC من خلال برمجة مجموعة المعادلات من (5) إلى (7) بالإضافة إلى قيم جدول الاختيار وفق الخطوات المبينة في الفقرة (6) لتوليد نبضات قرح المبدل inverter لإجراء عملية التحكم بمحرك المركبة الكهربائية ثلاثي الطور وبإدخال السرعة والعزم المرجعيين المطلوبين لحركة العربة بغية معرفة مدى فعالية طريقة DTC لقيادة العربة الكهربائية وفق هذا المسار مع الأخذ بعين الاعتبار وجود تذبذبات في قيمة مقاومة الثابت بسبب تغير الحمولة وتتراوح قيمة هذه التغيرات ضمن $\pm 20\%$ لكل من مقاومتي الثابت والدوار.

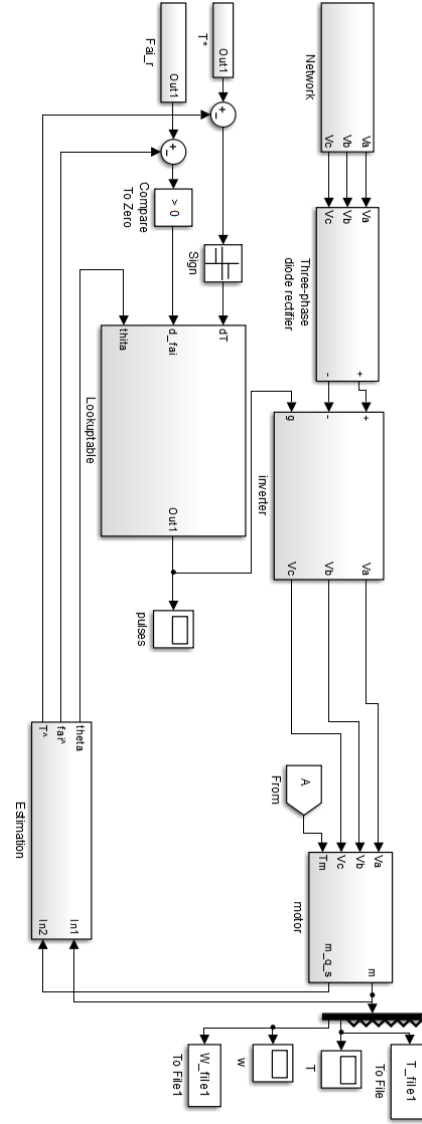
منهجية DTC-FLE فقد تضمنت وجود اختلاف في النظام الجزئي Estimation الموضح بالشكل (8)، في النظام الفرعي منه equ5 الموضح بالشكل (9)، في كلا النظامين الفرعيين fai_ds و fai_qs. يبين الشكل (10) كيفية تطبيق المخمن العائم FLE في النظام الفرعي fai_qs بالاعتماد على صندوق محاكاة متحكم المنطق الغامض Fuzzy Logic Controller الموضح بالشكل (10).



الشكل (8) نموذج المحاكاة الخاص بجزء التخمين Estimation من منهجية التحكم المباشر بالعزم المطورة بالمخمن العائم DTC-FLE

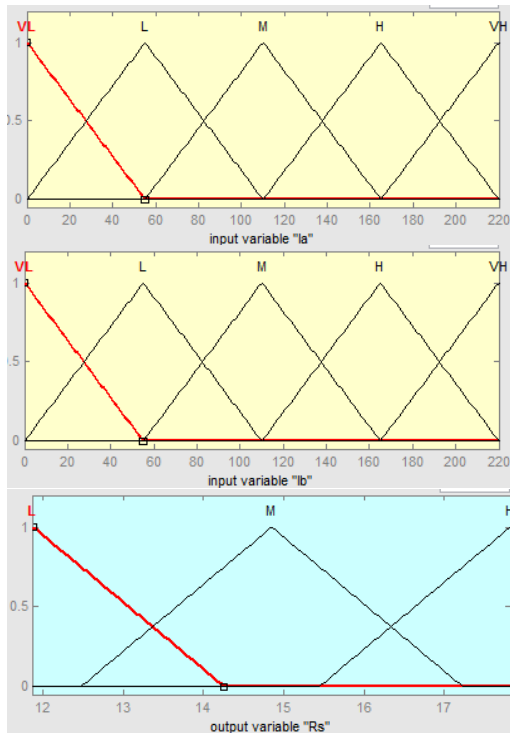


الشكل (9) نموذج المحاكاة الخاص بمجموعة المعادلات رقم 5 (equ5) من جزء التخمين Estimation من منهجية التحكم المباشر بالعزم المطورة بالمخمن العائم DTC-FLE



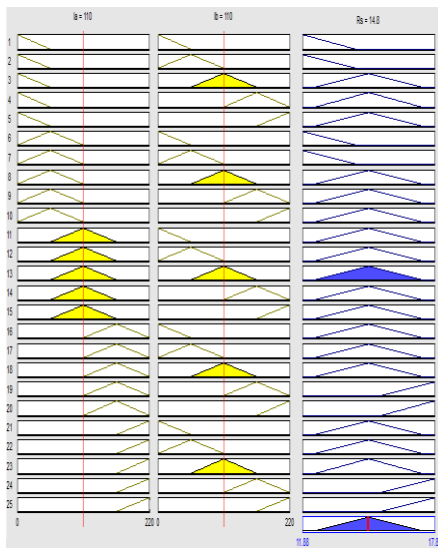
الشكل (7) نموذج محاكاة منهجية التحكم المباشر بالعزم المطورة بالمخمن العائم DTC-FLE

يبين الشكل (7) المخطط الرئيسي لمحاكاة منهجيتي DTC و DTC-FLE، حيث بُني مخطط المحاكاة على شكل أنظمة محاكاة فرعية، كل نظام فرعي يمثل مجموعة المعادلات الخاصة بجزء محدد؛ حيث نمذجة المحرك الممثلة بمجموعة المعادلات (1) مثلت بالنظام الفرعي motor ومنهجية DTC من مجموعة المعادلات (1) إلى (7)، وذلك عند محاكاة منهجية DTC، أما عند محاكاة



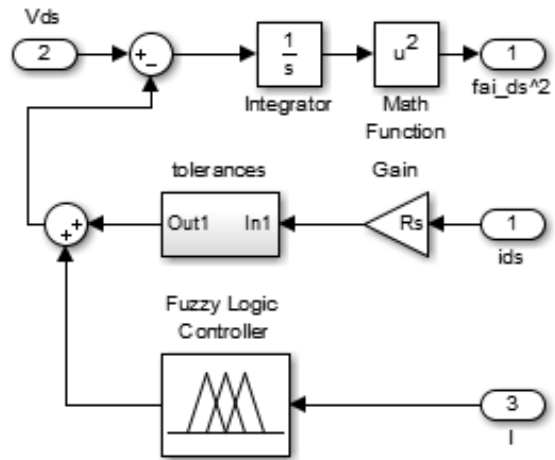
الشكل (12) توزع مجموعات انتماء متحولات دخل وخرج

المخمن العائم المستخدم في DTC-FLE



الشكل (13) توزع قواعد العوم وفق متحولات دخل وخرج

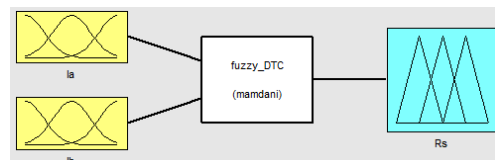
المخمن العائم المستخدم في DTC-FLE



الشكل (10) نموذج المحاكاة (fai_ds) الخاص بتخمين

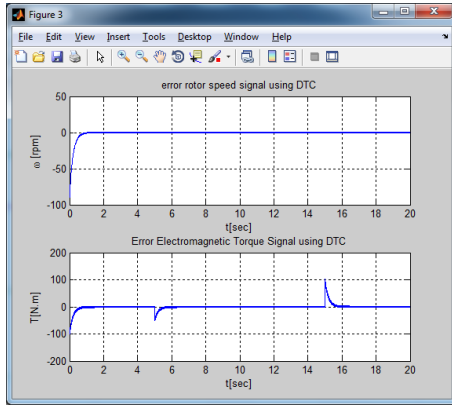
الفيض $\hat{\varphi}_{ds}$ بواسطة المخمن العائم

تم بناء المخمن العائم باستخدام أدوات برنامج ماتلاب لتصميم الأنظمة العائمة، حيث صمم المخمن العائم كما هو مبين بالشكل (11) بمتحولي دخل وهما التيارين I_a و I_b الخاصين بالطور الأول والثاني المستجران من قبل المحرك وخرجه هو مقاومة الثابت، حيث توزعت قيم مجموعات الدخل للمتحولين I_a و I_b ضمن المجال تغير التيار $[0,220]A$ أما توزع قيم مجموعة الخرج فهو ضمن التغيرات المجالية الأصغرية والأعظمية لمقاومة الثابت وهو $[11.88,17.82]\Omega$ وتم استخدام التوابع المثلثية لتمثيل مجموعات الانتماء كما هو مبين بالشكل (12)، أما قواعد العوم فهي (25) قاعدة عائمة مبين بالشكل (13) وتوزعها وفقاً لمتحولي دخل المتحكم العائم مع خرجه.



الشكل (11) المخمن العائم المستخدم في DTC-FLE

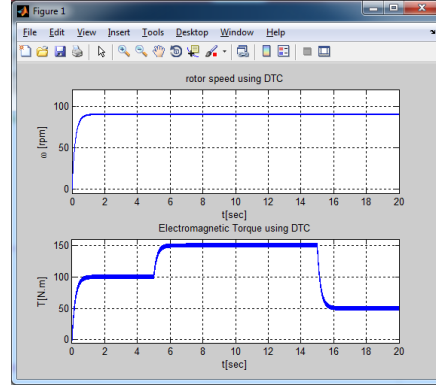
FLE، مما يتسبب في زيادة الخطأ الستاتيكي لعملية قيادة المحرك، وهذه التغيرات هي أكبر في العزم وأكثر وضوحاً، ويعود سبب ذلك إلى أن تأثير تغير قيمة مقاومة الثابت كبير في عملية تخمين العزم كما هو واضح في مجموعتي المعادلات (5) و(6)، حيث إن قيمة مقاومة الثابت بتخمين الفيض الذي بدوره يدخل بتخمين العزم الكهرومغناطيسي. وهكذا عند تغير الحمل نتيجة وجود مسار متغير، يتم استجرار تيارات كبيرة نسبياً، والتي لها أثر حراري يؤدي لوجود تغيرات في مقاومة ثابت المحرك، وعدم ثبات قيمتها ينتج عنه وجود تغيرات في قيمة الفيض المخمن ويظهر تأثيرها على شكل اضطرابات وتذبذبات في العزم المخمن. يسبب ذلك زيادة في الخطأ الستاتيكي لعملية قيادة المحرك، وعلى الخطأ الديناميكي أيضاً، كما أن الخطأ بين خرج النموذج والإشارات المرجعية تؤكد ذلك كما مبين في الشكل (16). تتوافق الاضطرابات مع إشارة العزم أثناء الإقلاع والانتقالات بين مستويات العزم اللازمة لتحريك المركبة وفق المسار المحدد صعوداً وهبوطاً مسببة تأرجح واضح في العزم.



الشكل (16) إشارات الخطأ للسرعة والعزم الناتجة عن منهجية DTC للمسار: استواء - صعود - هبوط.

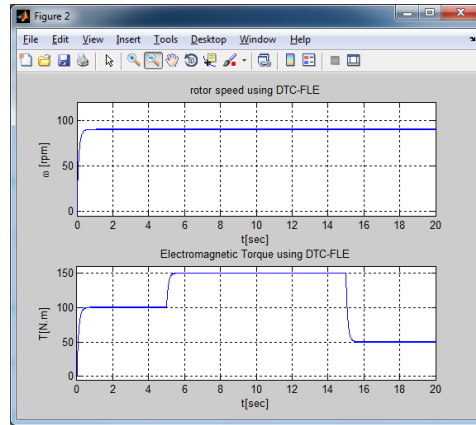
عند قيادة المحرك وفق طريقة DTC-FLE فيقوم المخمن العائم بتقدير قيمة مقاومة الثابت أقرب ما يمكن إلى القيمة الحقيقية وفقاً لتغيرات تيارات الحمل. يتم تطوير

تم تحصيل نتائج المحاكاة بإيجاد العزم والسرعة وفقاً لمنهجية التحكم DTC، كما هو مبين بالشكل (14).



الشكل (14) السرعة والعزم الناتجين عن منهجية DTC.

وأجريت نفس عملية المحاكاة لنفس المسار لطريقة التحكم المباشر بالعزم المطورة بالمخمن العائم DTC-FLE الموضحة في الفقرة (7). يبين الشكل (15) نتيجة السرعة والعزم لتطبيق هذه الطريقة على المسار المحدد (استواء صعود هبوط).



الشكل (15) السرعة والعزم الناتجين عن منهجية DTC-FLE.

يلاحظ وجود تغيرات وتذبذبات كبيرة في السرعة والعزم عند القيادة وفق منهجية DTC مقارنة مع طريقة DTC-

N : عدد العينات الكلي.

يتضح من النتائج تفوق طريقة DTC-FLE على DTC للحصول على قيم متوسط مربع خطأ أدنى، ويعني ذلك وجود خطأ ديناميكي وستاتيكي أدنى أيضاً، وإنخفاض التآرجح في العزم، والذي يؤدي إلى قيادة المركبة الكهربائية بسلاسة ومرونة.

الجدول (6) قيم MSE كل من السرعة والعزم لكل من

طريقتي التحكم DTC و DTC-FLE

المنهجية	السرعة	العزم
DTC	8.0106e+02	4.5803e+03
DTC-FLE	6.6486e+02	7.4201e+01

كما تمت مقارنة نتائج هذا البحث مع بحث سابق كما هو مبين بالجدول (7) وأثبتت الطريقة المتبعة تفوقها على منهجية التحكم المباشر بالعزم المطورة باستخدام الشبكات العصبونية.

الجدول (7) قيم MSE كل من السرعة والعزم لكل من

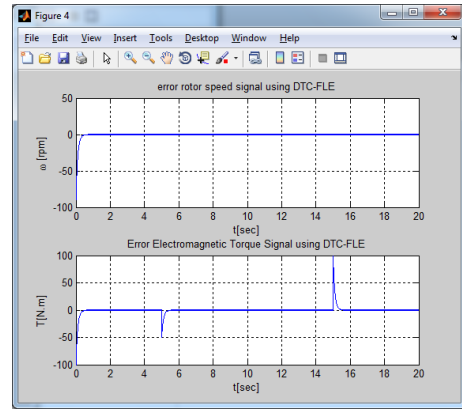
طريقتي التحكم DTC-ANN و DTC-FLE

المنهجية	السرعة	العزم
DTC-ANN[19]	7.9486e+03	2.3901e+03
DTC-FLE	6.6486e+02	7.4201e+01

9. التوصيات الأفاق المستقبلية:

اثبت المنطق العائم فعاليتيه في تقدير وتخمين قيمة مقاومة الثابت وحقق تطويراً ملحوظاً في منهجية التحكم المباشر بالعزم، كما أنه تفوق على الشبكات العصبونية الصناعية في نفس المهمة، لذلك يوصى باعتماده بسبب قدرته على تقليل تموجات العزم للحد الأدنى من نظيراتها في منهجيتي DTC التقليدية والمطورة باستخدام الشبكات العصبونية DTC-ANN، كما يمكن استخدام المتحكم العائم لتخمين السرعة والعزم كما بينته المراجع، مع مراعاة البنية

تقدير العزم من خلال تقنية المنطق العائم وتقدير الفيض يعمل مخمن المنطق العائم للفيض على ترشيح التغيرات التي تطرأ على مقاومة الثابت من خلال تخمين القيمة الصحيحة وتقديرها عن طريق قياس تيارات الثابت، وهكذا يمكن تحسين قيمة العزم المطبق على العربة وتقليل الخطأ السناتيكي والديناميكي في العزم المخمن مع الحفاظ على سرعة العربة كما هو مبين في الشكل (17) والذي يوضح إشارتي الخطأ لكل من العزم والسرعة عند القيادة وفق منهجية DTC-FLE.



الشكل (17) الخطأ للسرعة والعزم الناتجة عن منهجية

DTC-FLE للمسار: استواء - صعود - هبوط.

تم حساب قيمة متوسط مربع الخطأ Mean Square Error (MSE) لكل من اشارتي الخطأ للسرعة والعزم في حالتي التحكم DTC و DTC-FLE والمبينة في الجدول (6) وفق العلاقة التالية:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (T - T_r)^2}{N} \quad (8)$$

حيث: MSE : متوسط مربع الخطأ

T : العزم الناتج من تطبيق إحدى المنهجيتين.

T_r : العزم المرجعي (المرغوب).

التصميمية لمجال استخدام المنطق الغامض، حيث تختلف طريقة تصميمه وفقاً للهدف والمهمة الموكلة له، ويمكن اجراء تصاميم أخرى لتقدير أو التحكم بالسرعة أو العزم أو تخمين أحد البارامترات لكن وفق المحددات التصميمية للمسألة المدروسة وطريقة التطوير المراد تحقيقها.

10. الخاتمة:

تم في هذا البحث تطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم لجعلها قادرة على تخمين العزم مع وجود تغيرات في قيمة مقاومة الثابت، من خلال تدعيمها بمخمن عائم، يقوم بتقدير قيمة هذه المقاومة بالاعتماد على التيارات المسحوبة للمحرك، مما يساهم في تخمين قيمة الفيض وتحسين عملية التخمين؛ التي بدورها تنعكس إيجاباً على عملية التحكم المباشر بالعزم من خلال تحسين العزم الكهرومغناطيسي، وتقليل الخطأ الستاتيكي والديناميكي لعزم المحرك وانقاص التآرجح فيه، مما يؤمن قيادة أكثر نعومة وسلاسة للمحرك الكهربائي ثلاثي الطور المستخدم لتحريك المركبة الكهربائية وفق مسار متغير يتكون من ثلاث أجزاء مختلفة: استواء - صعود - هبوط.

المراجع References

- [1] Yavuz User, Nilay Tabanlı, Development of Induction Motor Torque Control Algorithm for Electric Vehicles on Inclined Roads, International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN), 2017
- [2] G. Venkata RamaKrishna, TORQUE RIPPLE REDUCTION IN DIRECT TORQUE CONTROLLED INDUCTION MOTOR DRIVE BY USING FUZZY CONTROLLER, Department of Electrical Engineering National Institute of Technology, 2007, 3, 236-242
- [3] Sudheer H, Kodad SF, Sarvesh B, Improved Sensorless Direct Torque Control of Induction Motor Using Fuzzy Logic and Neural Network Based Duty Ratio Controller, IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI) Vol. 6, No. 2, June 2017, pp. 79-90
- [4] Mohanapriya, P. and Umadevi, K, DIRECT TORQUE CONTROL OF THREE PHASE INDUCTION MOTOR USING NEURAL NETWORK-FUZZY LOGIC TECHNIQUES, International Journal of Development Research Vol. 08, Issue, 01, pp.18233 18239, January, 2018
- [5] Ghoulemallah Boukhalfa, Sebti Belkacem, Abdesselem Chikhi, Said Benagoune, Direct torque control of dual star induction motor using a fuzzy-PSO hybrid approach, Computing and Informatics, (2018).
- [6] Najib El Ouanjli, Saad Motahhir, Aziz Derouich, Abdelaziz El Ghzizal, Ali Chebabhi, Mohammed Taoussi, Improved DTC strategy of doubly fed induction motor using fuzzy logic controller, Energy Reports 5 (2019) 271-279
- [7] Danduprolu Kiran Kumar, Gaddam Tulasi Ram Das, Adaptive Fuzzy Controller Based Self Regulated Reference Stator Flux Estimator of Direct Torque Control for Three Level Inverter Fed IPMSM, International Journal of Intelligent Engineering and Systems, Vol.13, No.2, 2020
- [8] Ecole Nationale Polytechnique d'Oran Maurice Audin, Oran, ALGERIA, FIVE-LEVEL DTC CONTROL OF INDUCTION

- [19] A. H. Alaraifi, S.Mahmoud, R. Alcharea," Development Direct Torque Control Using Artificial Neural Network to Drive Induction Motor in Electrical Vehicle", Damascus University Journal, Vol 5303, pages 127,2021.

Received	2021/4/13	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2021/5/24	قبول البحث للنشر

- MACHINE DRIVE USING FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR LOW TORQUE RIPPLE, A CTA TECHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering Tome XII [2019] | Fascicule 2 [April – June]
- [9] Mohanapriya, P. and Umadevi, K., DIRECT TORQUE CONTROL OF THREE PHASE INDUCTION MOTOR USING NEURAL NETWORK-FUZZY LOGIC TECHNIQUES, International Journal of Development Research Vol. 08, Issue, 01, pp.18233-18239, January, 2018
- [10] Jeyashanthi J, SANTHI M, Performance of Direct Torque Controlled Induction Motor Drive by Fuzzy Logic Controller, JOURNAL OF CONTROL ENGINEERING AND APPLIED INFORMATICS,2020
- [11] Hellali Lallouani, Belhamdi Saad and Benyettou Letfi, DTC-SVM based on Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller of Double Stator Induction Machine fed by Six-Phase Inverter, IJ. Image, Graphics and Signal Processing, 2019, 7, 48-57
- [12] Abdelkarim Ammar, Performance improvement of direct torque control for induction motor drive via fuzzy logic-feedback linearization: Simulation and experimental assessment, COMPEL International Journal of Computations and Mathematics in Electrical 38(2): 672-692 · April 2019
- [13] Krause, P.C., O. Wasynczuk, and S.D. Sudhoff, Analysis of Electric Machinery, IEEE Press, 2002.
- [14] Farhan A. Salem, MODELING AND CONTROL SOLUTIONS FOR ELECTRIC VEHICLES, European Scientific Journal May 2013 edition vol.9, No.15 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431
- [15] Schaltz, Erik, Electrical Vehicle Design and Modeling, Aalborg University Denmark, 2011
- [16] MUHAMMAD H. RASHID, POWER ELECTRONICS HANDBOOK, University of West Florida, 2016
- [17] G. Venkata RamaKrishna, TORQUE RIPPLE REDUCTION IN DIRECT TORQUE CONTROLLED INDUCTION MOTOR DRIVE BY USING FUZZY CONTROLLER, National Institute of Technology Rourkela, 2007
- [18] A. Tashakori, M. Ektesabi, Direct Torque Controlled Drive Train for Electric Vehicle, Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol II WCE 2012, July 4 - 6, 2012, London, U.K.