



الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة الطاقة الكهربائية

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الصناعي لقيادة المحركات التحريضية

(تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

رسالة مقدمة لنيل درجة الدكتوراه في هندسة الطاقة الكهربائية

إعداد

أحمد يحيى الحمود العريفي

المشرف المشارك

المشرف

الأستاذ المساعد الدكتور المهندس

الأستاذ المساعد الدكتورة المهندسة

رائد الشرع

سلام محمود

2023-2022

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي



إلى من شرفني بحمل أسمه والذي رحمة الله عليه
من بذل الغالي والنفيس في سبيل وصولي لدرجة علمية عالية
ورحل قبل أن يرى ثمرة غرسه....

إلى نور عيني وضوء دربي ومهجة حياتي
أمي ثم أمي ثم أمي.....من كانت دعواتها وكلماتها رفيق الألق والتفوق..

إلى السند والعضد والساعد إخوتي وأخواتي

إلى زوجتي الغالية... فرحتي وعمري وحياتي وأعظم إنجازاتي رفيقة الكفاح والظروف الصعبة التي لم
تبخل بوقت أو جهد لمساعدتي....

إلى زينة حياتي وبهجتها، إلى الابتسامات التي تغدق عليّ الأمل، أولادي الأحباء: حسن، و تقى.

أساتذتي الأكارم والسادة المشرفين الدكتوراة سلام محمود والدكتور رائد الشرع والذين تعجز
الكلمات عن وصفهم وأعضاء الهيئة التدريسية الذين لم يخلوا يوماً في إعطائي معلومة أو أي فكرة
قيمة.

إليكم جميعاً أهدي ثمرة جهدي.....

الباحث

أحمد الحمود العريفي

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

فهرس المحتويات

18	 الفصل الأول
18	 الإطار العام للبحث
18	 1-1 المقدمة Introduction
20	 2-1 مشكلة البحث:
21	 3-1 هدف البحث وأهميته Objectives
22	 4-1 نطاق البحث: The Scope
23	 5-1 منهجية البحث Methodology
25	 6-1 الدراسة المرجعية Background Review
25	 1-6-1 تطوير تقنية التحكم المباشر بالعزم؛ باستخدام الشبكات العصبونية:
26	 2-6-1 تطوير تقنية التحكم المباشر بالعزم؛ باستخدام المنطق العائم:
27	 3-6-1 تطوير تقنية التحكم المباشر بالعزم، باستخدام طرائق ذكاء أخرى:
28	 4-6-1 استخدام تقنية التحكم المباشر بالعزم مع أنواع محركات أخرى:
29	 5-6-1 تطوير تقنية الكبح بإعادة التوليد، باستخدام طرائق ذكاء مختلفة:
31	 7-1 الخاتمة
33	 الفصل الثاني
33	 المحركات الكهربائية المستخدمة في المركبات الكهربائية، ونظم قيادتها
33	 1-2 مقدمة

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

- 2-2 محركات الجرّ في المركبات الكهربائية. 34
- 1-2-2 محرك التيار المستمر: DC motor 35
- 2-2-2 محرك التيار المستمر عديم المسفّرات: brushless DC motor [50] 35
- 3-2-2 المحرك المتزامن ذو المغناطيس الدائم: 37
-(PMSM) permanent magnet synchronous motor 37
- 4-2-2 المحرك التحريضي ثلاثي الطور: Three Phase AC Induction Motor 37
- 5-2-2 المحرك ذو الممانعة المتغيرة (SRM) Switched reluctance motor 40
- 3-2 نمذجة المحرك الكهربائي التحريضي ثلاثي الأطوار. 41
- 4-2 نظم قيادة المحركات الكهربائية التحريضية. 45
- 1-4-2 التحكّم بنسبة الجهد إلى التردد ثابتة: 45
- 2-4-2 نظم التحكم بإلغاء الاضطراب الفعال [71,70]: 47
- 3-4-2 التحكم الحقلي الموجه: 49
- 4-4-2 التحكم المباشر بالعزم: 51
- 5-2 نظم الدفع في المركبات الكهربائية: 54
- 1-5-2 نظم الدفع الرئيسة في المركبات الكهربائية: 55
- 2-5-2 نظم الدفع داخل العجلة: 56
- 6-2 أهمية المحرك في نظم الدفع للمركبات الكهربائية 64
- 7-2 الخاتمة: 65

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

66	الفصل الثالث.....
66	استخدام الشبكات العصبونية لتطوير تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC والكبح بإعادة التوليد.....
66	1-3 مقدمة.....
66	2-3 مدخل إلى تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC.....
68	3-3 أهمية تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC في الصناعة.....
70	4-3 مبدأ تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC.....
71	5-3 مرحلة التقدير في تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC.....
73	6-3 تغيير Rs في تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC.....
74	7-3 بناء مقدر عصبوني في تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC.....
83	8-3 مبدأ الكبح بإعادة التوليد.....
85	9-3 المتحكم التناسبي التكاملي التقليدي.....
86	10-3 بناء متحكم عصبوني.....
88	11-3- الخاتمة.....
89	الفصل الرابع.....
89	استخدام المنطق العائم لتطوير تقنية DTC.....
89	1-4 مقدمة.....
90	2-4 مفهوم المنطق العائم:.....
93	3-4 مبدأ المنطق العائم.....

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

4-4	توابع الانتماء، ومجموعاته.....	95
4-5	محرك وقواعد المنطق العائم.....	100
4-6	بناء المقدر العائم.....	101
4-7	الخاتمة.....	103
	الفصل الخامس.....	104
	التطبيق العملي.....	104
	التحكم بسرعة المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار؛ بتقنية التحكم المباشر بالعزم المطورة؛ استناداً للذكاء الصناعي، باستخدام المنصة المخبرية RT-LAB	104
5-1	النمذجة والمحاكاة للمحرك التحريضي ثلاثي الأطوار؛ وقيادته بالتحكم المباشر بالعزم DTC التقليدية والمطورة؛ بالذكاء الصناعي، في بيئة الماتلاب؛ إجراء مقارنة بين طرائق التحكم قبل التطوير وبعده، وحساب مقدار التحسن بالأداء.....	104
5-2	تطوير نظام الكبح بإعادة التوليد للمركبة الكهربائية؛ باستخدام الشبكات العصبونية الصناعية من أجل تقليل التيار الكهربائي المستهلك في أثناء قيادة المركبة الكهربائية، وإعادة شحن مدخزة السيارة، والحفاظ على نسبة شحن عالية نسبياً.....	122
5-3	تطبيق منظومة القيادة المصممة والمكونة من المحرك المقاد، باستخدام نظرية التحكم المباشر بالعزم المطورة، وإجراء التجارب والاختبارات على النموذج، وتحصيل النتائج؛ باستخدام منصة RT-LAB، ومقارنتها بنتائج النمذجة والمحاكاة.....	126
5-3-1	تطبيق طريقة DTC التقليدية في بيئة RT-LAB	129
5-3-2	تطبيق طريقة DTC-ANN في بيئة RT-LAB	130

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

132	3-3-5 تطبيق طريقة DTC-FUZZY في بيئة RT-LAB
133	4-3-5 المقارنة بين نتائج النمذجة للطرائق الثلاثة للتحكم المباشر بالعزم (التقليدية-الذكاء الصناعي) الناتجة، باستخدام منصة RTLAB
134	5-3-5 قيادة الحمل الفيزيائي (المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار)؛ باستخدام طريقة التحكم المباشر بالعزم التقليدية DTC والمطبقة؛ من خلال المنصة المخبرية المنفذة وعند دوران المحرك بسرعة [rpm] 750.134
136	6-3-5 قيادة الحمل الفيزيائي (المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار)؛ باستخدام طريقة التحكم المباشر بالعزم المطورة DTC-ANN، والمطبقة من خلال المنصة المخبرية المنفذة وعند دوران المحرك بسرعة [rpm] 300.....
138	7-3-5 قيادة الحمل الفيزيائي (المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار)؛ باستخدام طريقة التحكم المباشر بالعزم المطورة DTC-FLC؛ والمطبقة من خلال المنصة المخبرية المنفذة، وعند دوران المحرك بسرعة [rpm] 600.....
140	4-5 الخاتمة.....
141	النتائج و التوصيات
144	المراجع.....

قائمة الجداول

- الجدول (2-1) مقارنة بين أنواع المحركات الكهربائية المستخدمة بالمركبات الكهربائية [58-63]: 41
- الجدول (2-2) دلائل رموز المحرك التحريضي 43
- الجدول (2-3) جدول زيادة العزم وإنقاظه بناء على موضع شعاع الفيض المغناطيسي للثابت 53
- الجدول (2-4) جدول التبديل في DTC التقليدية: 54
- الجدول (2-5) جدول مقارنة بين نظم الدفع المختلفة [76-84]: 64
- الجدول (3-1): توابع التفعيل المستخدمة في العصبونات الاصطناعية: 76
- الجدول (4-1) جدول قواعد محرك العوم..... 103
- الجدول (5-1) محددات المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار، ومواصفاته..... 105
- الجدول (5-2) قيم MSE كل من السرعة والعزم لكل من طريقتي التحكم DTC وDTC-ANN... 114
- الجدول (5-3) قيم MSE كل من السرعة والعزم لكل من طريقتي التحكم DTC وDTC-FLE:..... 120
- الجدول (5-4) قيم MSE كل من السرعة والعزم لكل من طريقتي التحكم DTC-ANN وDTC : 121
- FLE..... 121
- الجدول (5-5) مقارنة SOC لمذخرة المركبة الكهربائية في حالتي الكبح بإعادة التوليد باستخدام المتحكم PI والمتحكم ANN:..... 123
- الجدول (5-6) مقارنة خطأ السرعة والعزم لطرائق التحكم، وذلك من خلال محاكاتها بالزمن الحقيقي: ... 134
- الجدول (5-7) مقارنة خطأ السرعة والعزم لطرائق التحكم وذلك من خلال التطبيق العملي:..... 139

قائمة الأشكال

- الشكل (1-1) المخطط الصندوقي لتوضيح مبدأ عمل منهجية التحكم المباشر بالعزم [6] . 19.....
- الشكل (2-1) محرك التيار المستمر، وأبرز مكوناته..... 35
- الشكل (2-2) محرك تيار مستمر عديم المسفرتات ذو الدوار الداخلي..... 36
- الشكل (2-3) محرك تيار مستمر عديم المسفرتات ذو الدوار الخارجي والعجلة الكهربائية..... 36
- الشكل (2-4) المحرك المتزامن ذو المغناطيس الدائم ومكوناته..... 37
- الشكل (2-5) المحرك التحريضي بنوعيه..... 38
- الشكل (2-6) المحرك ذو الممانعة المتغيرة [58] 40
- الشكل (2-7) الدارات المكافئة لمحرك تحريضي ثلاثي الطور في الإحداثيات المتعامدة q,d..... 42
- الشكل (2-8) المخطط العملي والتنفيذي لمنهجية التحكم بإلغاء الاضطراب ADRC بوساطة وحدة تحكم مركزية عبر بطاقة هدف Target..... 49
- الشكل (2-9) المخطط الصندوقي لمنهجية التحكم الحقلي الموجه..... 50
- الشكل (2-10) المخطط الصندوقي لتقنية DTC التقليدية للتحكم بسرعة المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار وعزمه..... 52
- الشكل (2-11) توضع شعاع تدفق الثابت؛ وفق جميع حالات مفاتيح المعرج switching inverter 54
- الشكل (2-12) أنواع نظم الدفع في المركبات الكهربائية من ناحية مصدر الدفع..... 55
- الشكل (2-13) شكل نظام الدفع بمحرك رئيس ذي نظام دفع ثنائي..... 56
- الشكل (2-14) نظام الدفع بمحرك رئيس ذي نظام دفع رباعي..... 56

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

- الشكل (2- 15) نظام الدفع الكلي (AWD)..... 62
- الشكل (3- 1) مخطط مبدأ خوارزمية التحكم المباشر بالعزم..... 71
- الشكل (3- 2) خوارزمية التحكم المباشر بالعزم المستخدمة في شركة ABB..... 72
- الشكل (3- 3) بنية العصبون الصناعي..... 74
- الشكل (3- 4) نموذج العصبون الصناعي..... 77
- الشكل (3- 5) بنية شبكة عصبونية صناعية..... 79
- الشكل (3- 6) المخطط الصندوقي لتقنية التحكم المباشر بالعزم المطورة بالشبكة العصبونية DTC-ANN..... 81
- الشكل (3- 7) بنية متحكم الشبكة العصبونية الصناعية المستخدمة؛ لتطوير تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC-ANN..... 82
- الشكل (3- 8) منحنى الخاصية الميكانيكية للمحرك التحريضي ثلاثي الأطوار..... 84
- الشكل (3- 9) مبدأ الكبح بإعادة التوليد في السيارات الكهربائية..... 84
- الشكل (3- 10) دائرة الكبح بإعادة التوليد في المركبات الكهربائية..... 85
- الشكل (3- 11) نموذج متحكم تناسبي تكاملي..... 86
- الشكل (3- 12) نظام الكبح المقترح بإعادة التوليد بوجود متحكم عصبوني..... 88
- الشكل (4- 1) المخطط الصندوقي لمنهجية التحكم المباشر بالعزم المطورة بالمخمن العائم DTC-FLE... 92
- الشكل (4- 2) المخطط الصندوقي لنظام المنطق العائم..... 94
- الشكل (4- 3) مثال عن توابع الانتماء في نظام المنطق العائم..... 96
- الشكل (4- 4) أشكال أشهر توابع الانتماء في المنطق العائم..... 99

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

الشكل (4- 5) توزع مجموعات انتماء دخل المخمن العائم المستخدم لتطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم

102 DTC-FLE

الشكل (4- 6) توزع مجموعات انتماء خرج المخمن العائم المستخدم لتطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم

102 DTC-FLE

الشكل (5- 1) مخطط محاكاة المحرك ونظام قيادته ب DTC 106

الشكل (5- 2) مخطط المحاكاة لجزء التخمين Estimating Part 107

الشكل (5- 3) مخطط المحاكاة للنظام الفرعي equ5 107

الشكل (5- 4) مخطط المحاكاة للنظام الفرعي fai-qs 108

الشكل (5- 5) مخطط محاكاة بنية الشبكة العصبونية المستخدمة 108

الشكل (5- 6) السرعة والعزم الكهرومغناطيسي المرجعيان المطلوبان لمسار المركبة: استواء - صعود - هبوط.

110

الشكل (5- 7) منحني تدريب الشبكة العصبونية المستخدمة للتقنية المطورة DTC-ANN 110

الشكل (5- 8) منحني الملاءمة للشبكة العصبونية المستخدمة للتقنية المطورة DTC-ANN 111

الشكل (5- 9) السرعة والعزم الناتجة عن تطبيق تقنية التحكم المباشر بالعزم التقليدية 112

الشكل (5- 10) السرعة والعزم الناتجة عن تطبيق تقنية التحكم المباشر بالعزم المطورة باستخدام الشبكات

العصبونية 112

الشكل (5- 11) قيمة خطأ السرعة الناتجة عن تطبيق DTC و DTC-ANN 113

الشكل (5- 12) قيمة خطأ العزم الناتجة عن تطبيق DTC و DTC-ANN 113

الشكل (5- 13) المخطط الصندوقي لمنهجية التحكم المباشر بالعزم المطورة بالمخمن العائم DTC-FLE 114

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

- الشكل (5- 14) توزع مجموعات انتماء دخل المخمن العائم المستخدمة لتطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم
DTC-FLE 115
- الشكل (5- 15) توزع مجموعات انتماء خرج المخمن العائم المستخدمة؛ لتطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم
DTC-FLE 115
- الشكل (5- 16) المخمن العائم المستخدم في DTC-FLE 116
- الشكل (5- 17) توزع قواعد العوم، وفق متحولات دخل المخمن العائم وخرجه المستخدم في DTC-FLE 117
- الشكل (5- 18) السرعة والعزم الناتجان عن منهجية DTC 117
- الشكل (5- 19) السرعة والعزم الناتجان عن منهجية DTC-FLE 118
- الشكل (5- 20) إشارات الخطأ للسرعة والعزم الناتجة عن منهجية DTC للمسار: استواء - صعود - هبوط.
..... 119
- الشكل (5- 21) إشارات الخطأ للسرعة والعزم الناتجة عن منهجية DTC-FLE للمسار: استواء - صعود - هبوط.
..... 119
- الشكل (5- 22) نموذج محاكاة أداء مركبة كهربائية تستخدم محرك دفع ثلاثي الطور؛ مع وجود كبح بإعادة التوليد.
..... 122
- الشكل (5- 23) منحنيات السرعة والعزم الناتجة عن قيادة المركبة الكهربائية، بوجود الكبح بإعادة التوليد. 124
- الشكل (5- 24) منحنيات التيار والجهد لمُدخِرة المركبة الكهربائية؛ بوجود نظام الكبح بإعادة التوليد مع وجود APS. في حالتين: باستخدام متحكم PI؛ وباستخدام متحكم ANN 125
- الشكل (5- 25) صورة واجهة منصة RT-LAB 127
- الشكل (5- 26) منابع DC 128
- الشكل (5- 27) واجهة المضخمات (Amplifier) 128
- الشكل (5- 28) واجهة لوحة القياسات في منصة RT-LAB 128

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

- الشكل (5- 29) المخطط الصندوقي لطريقة DTC في بيئة RT-LAB 129
- الشكل (5- 30) المخطط الصندوقي لطريقة DTC في بيئة RT-LAB بعد عملية التجميع..... 129
- الشكل (5- 31) استجابة كل من السرعة والعزم لطريقة DTC التقليدية..... 130
- الشكل (5- 32) المخطط الصندوقي لطريقة DTC-ANN في بيئة RT-LAB 130
- الشكل (5- 33) المخطط الصندوقي لطريقة DTC-ANN في بيئة RT-LAB بعد عملية التجميع.... 131
- الشكل (5- 34) استجابة كل من السرعة والعزم لطريقة DTC-ANN المطورة..... 131
- الشكل (5- 35) المخطط الصندوقي لطريقة DTC-FUZZY في بيئة RT-LAB 132
- الشكل (5- 36) المخطط الصندوقي لطريقة DTC-FUZZY في بيئة RT-LAB بعد عملية التجميع. 132
- الشكل (5- 37) استجابة كل من السرعة والعزم لطريقة DTC-FUZZY المطورة..... 133
- الشكل (5- 38) منحنيات السرعة والعزم لمنهجيات DTC و DTC-ANN و DTC-FLE في حالة مسار (استواء - صعود - هبوط)..... 133
- الشكل (5- 39) تجهيزات المنصة المخبرية المنفذة..... 134
- الشكل (5- 40) واجهة المستخدم لقيادة المحرك التحريضي؛ باستخدام DTC التقليدية..... 135
- الشكل (5- 41) السرعة على واجهة المستخدم قبل التحميل، والمقاسة على محور المحرك عند تطبيق عزم $2[N.M]$ 135
- الشكل (5- 42) منحنيات السرعة والعزم الناتجة من تطبيق الطريقة التقليدية للتحكم المباشر بالعزم على الحمل الفيزيائي (محرك التحريضي ثلاثي الأطوار)..... 136
- الشكل (5- 43) واجهة المستخدم لقيادة المحرك التحريضي؛ باستخدام DTC-ANN المطورة..... 136
- الشكل (5- 44) السرعة على واجهة المستخدم قبل التحميل، والمقاسة على محور المحرك عند تطبيق عزم $2[N.M]$ 137

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

الشكل (5- 45) منحنيات السرعة والعزم الناتجة من تطبيق طريقة DTC-ANN للتحكم المباشر بالعزم على

الحمل الفيزيائي (محرك التحريضي ثلاثي الأطوار)..... 137

الشكل (5- 46) واجهة المستخدم لقيادة المحرك التحريضي؛ باستخدام DTC-FUZZY المطورة..... 138

الشكل (5- 47) السرعة على واجهة المستخدم قبل التحميل، والمقاسة على محور المحرك عند تطبيق

عزم 2[N.M]..... 138

الشكل (5- 48) منحنيات السرعة والعزم الناتجة من تطبيق طريقة DTC-FUZZY ؛ للتحكم المباشر بالعزم

على الحمل الفيزيائي (محرك التحريضي ثلاثي الأطوار)..... 139

قائمة المعادلات

39.....	2-1
42.....	2-2
43.....	2-3
44.....	2-4
44.....	2-5
46.....	2-6
47.....	2-7
50.....	2-8
51.....	2-9
52.....	2-10
53.....	2-11
82.....	3- 1
82.....	3- 2
82.....	3- 3
85.....	3- 4
86.....	3- 5
86.....	3- 6
86.....	3- 7
87.....	3- 8
87.....	3- 9

120 5- 1

123 5- 2

جدول المصطلحات العلمية

Direct Torque Control (DTC)	تقنية التحكم المباشر بالعزم وبفيض الثابت
Adaptive Motor Model	نموذج المحرك المتكيف
Direct Self Control (DSC)	التحكم الذاتي بالعزم
Weighting Factor	عامل الوزن
activation function	تابع التفعيل
training algorithm	خوارزمية التدريب
Perceptron	البيرسبترون (أحد أنواع الشبكات العصبونية)
Feedforward Neural networks	شبكات عصبونية أمامية التغذية
Backpropagation Feedforward Neural networks	شبكات عصبونية أمامية التغذية خلفية النقل
Back Propagation algorithm	أحد أهم خوارزميات التعلم للشبكات العصبونية
regenerative Braking System	نظام الكبح بإعادة التوليد
PI (Proportional Integral)	المتحكم التناسبي التكاملي
fuzzy logic	المنطق العائم
Direct Torque Control – Fuzzy Logic Estimator (DTC-FLE)	خوارزمية التحكم المباشر بالعزم المحسنة بالمنطق العائم
Membership Function	توابع الانتماء
fuzzy rules	قواعد التعميم
Real Time Laboratory (RT-LAB)	المحاكاة بالزمن الحقيقي
Direct Torque Control Artificial Neural networks (DTC-ANN)	خوارزمية التحكم المباشر بالعزم المحسنة بالشبكات العصبونية الصناعية
Look up table	جدول التبديل لخوارزمية التحكم المباشر بالعزم
Mean Square Error (MSE)	معيار حساب متوسط مربع الخطأ
SOC (State of Charge)	معيار حالة شحن المدخرة

الملخص

تستخدم منهجية التحكم المباشر بالعزم في تصميم نظم القيادة الكهربائية؛ للتحكم بالمحركات الكهربائية لتزويد المركبات الكهربائية بالحركة، لكنها تعاني من بعض السلبيات عند السير في شروط خاصة. يهدف البحث لتطوير طريقة التحكم المباشر بالعزم بطريقتين. الأولى: باستخدام الشبكات العصبونية، والثانية: بالاعتماد على المنطق العائى، حتى يمكن تقدير الفيض بطرائق أدق من المنهجية التقليدية؛ من خلال ترشيح التغيرات والاضطرابات التي تطرأ على قيمة مقاومة ثابت المحرك التحريضي؛ نتيجة تغير الحمولة وفقاً لمسار المركبة، وانتقالها من مسار مستقيم إلى صاعد ثم نازل بواسطة تقدير القيمة الصحيحة؛ بالاعتماد على قيم التيارات المستجرة للمحرك؛ مما يسبب عزم كهرومغناطيسياً بأقل خطأ ديناميكي وستاتيكي؛ مقارنة بالطريقة التقليدية، وضحت طريقة إجراء منهجية التحكم المباشر بالعزم، وكيفية تطويرها؛ باستخدام الطريقتين (الشبكات العصبونية والمنطق العائى)، وتمت نمذجة ومحاكاة المحرك التحريضي في بيئة ماتلاب، وقيادته بالمنهجية التقليدية، والمدعمة بالشبكات العصبونية ثم بالمنطق العائى، ومن ثم محاكاة هذه الطرائق في بيئة RT-LAB وإيجاد استجابتي السرعة والعزم، وإشارات الخطأ لكلا الطريقتين المطورتين؛ فضلاً عن الطريقة التقليدية، وإجراء مقارنة فيما بينهم؛ بالاعتماد على معيار متوسط مربع الخطأ؛ إذ أثبتت النتائج تفوق المنهجية المطورة؛ باستخدام المنطق العائى على الطريقة التقليدية والطريقة المطورة؛ باستخدام الشبكات العصبونية، كما أن طريقة الشبكات العصبونية تفوقت على الطريقة التقليدية، مما يؤدي للحصول على عزم كهرومغناطيسياً بأقل خطأ ديناميكي وستاتيكي، ومن ثم التأكد من صحة هذه النتائج من خلال التطبيق العملي للمنهجية التقليدية والمطورة؛ باستخدام المنصة البحثية المنفذة، ومن خلال مقارنة نتائج التطبيق العملي بنتائج المحاكاة بالزمن الحقيقي نلاحظ أن نتائج التطبيق العملي قريبة جداً من نتائج المحاكاة؛ مما يدعم صحة هذه النتائج.

الكلمات المفتاحية: عزم، عصبونية، العائى، استجابة، نمذجة، تأرجحات، المحاكاة بالزمن الحقيقي.

الفصل الأول

الإطار العام للبحث

1-1 المقدمة Introduction

يُعدُّ المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار أحد أهم المحركات الكهربائية التي تعمل بكفاءة عالية تصل إلى 92% على الأقل [2,1] ، ويتمتع ببنية متينة قادرة على مقاومة الظروف البيئية الصعبة، إلى جانب الكلفة المنخفضة نسبياً، وسهولة التصنيع، كما يعطي عزوماً حركيةً عاليةً نسبياً باستطاعة كهربائية أقل من تلك الاستطاعة التي يحتاج إليها أي محرك آخر ليعطي ذات العزم؛ فضلاً عن ذلك، يمتاز المحرك التحريضي أيضاً بأداء عالٍ خاصة في منطقة الاستطاعة الثابتة والتي تكون مناسبة للعربات الكهربائية، وذلك عند تشغيله مع أجهزة تخفيض السرعة أو المسننات [2]. من بين جميع الآلات التي يمكن استخدامها في تطبيقات المركبات الكهربائية وظفت مزايا المحرك التحريضي في صناعة هذه المركبات، فانتشرت صناعة المركبات الكهربائية؛ باستخدام المحركات التحريضية خاصة في الولايات المتحدة الأمريكية وأوروبا؛ الأمر الذي أدى بالضرورة؛ لاستخدام طرائق للتحكم بالمحرك التحريضي من أجل تقديم منظومة تحكم وقيادة بالمركبة الكهربائية أكثر فاعلية وملائمة للسائقين.

وقد انتشر عددٌ من طرائق القيادة للتحكم بالمحركات التحريضية المستخدمة بالمركبة الكهربائية، من أبرز

هذه الطرائق [4,3]:

1- طريقة التحكم بنسبة الجهد إلى التردد ثابتة $V/f = const$ يتم في هذه الطريقة التحكم بالسرعة؛

مع الحفاظ على عزم دوران ثابت، وتعدُّ هذه الطريقة بسيطة وسهلة، لكنها لا تعطي تحكماً دقيقاً بالسرعة، وبالأخص في الحالات العابرة.

2- طريقة التحكم الشعاعي vector control: يطلق عليه اسم التحكم الموجه بالحقل field-

oriented control (FOC).

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

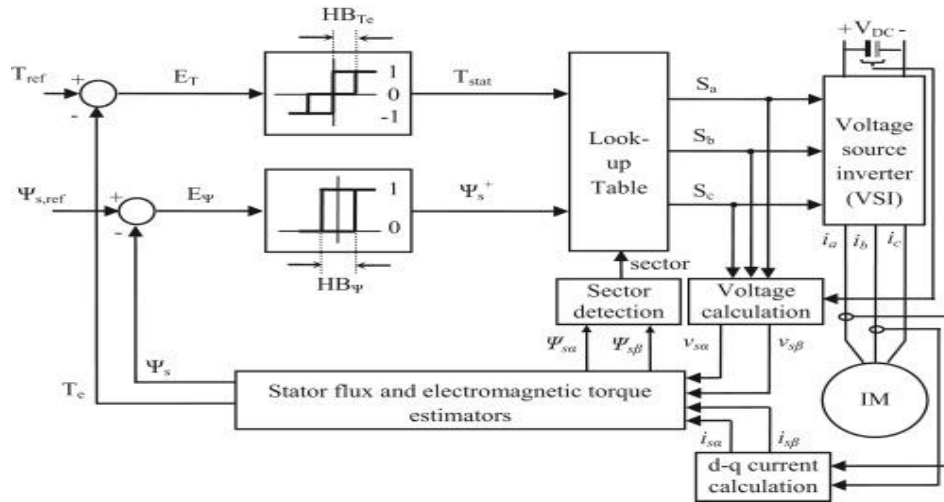
وفي هذه الطريقة يتم التحكم بفصل عزم الدوران عن التدفق، ويتم التحكم بكل منهما بصورة مباشرة ومستقلة؛ من أجل التحكم بسرعة المحرك وعزمه، ولكنها تتأثر بصورة كبيرة بتغير محددات الآلة، وتحتاج إلى زمن حسابي كبير بظروف تشغيل بسرعات صفرية أو قريبة من الصفر [5].

3- طريقة التحكم المباشر بالعزم (DTC) Direct Torque Control: تشبه هذه الطريقة من حيث

المبدأ طريقة التحكم الشعاعي إلا أنها تتميز بحساسيتها الكبيرة تجاه تغير محددات الآلة، وعدم حاجتها إلى متحكمات التيار وإلى عملية التحويل بين المحاور؛ مما يعني أن استجابة العزم أسرع بكثير في هذه الطريقة من طريقة التحكم الشعاعي.

تستخدم طريقة DTC كما هو مبين بالشكل 1-1 حلقتا تحكم؛ حلقة تحكم بالسرعة أو الفيض لوجود ترابط بينهما، وحلقة تحكم بعزم الدوران، تعمل حلقتا التحكم معاً؛ مع وجود نموذج رياضي؛ لتقدير جزء الفيض الخاص بالثابت، وعزم الدوران للمحرك؛ إذ تقاس تيارات المحرك وجهوده، ثم تُطبَّق قيم هذه الجهود والتيارات على نموذج التقدير الذي يستعمل خوارزميات رياضية متقدمة؛ لإنتاج قيم دقيقة لتدفق الجزء الثابت، وعزم دوران المحرك، هاتان القيمتان تقارنان بالقيم المرجعية لحلقتي التحكم (حلقة السرعة، وحلقة العزم)؛ لتحصيل النبضات المناسبة لقدح

ترانزستورات المعرج inverter؛ للحصول على السرعة والعزم المرغوبين.



الشكل (1-1) المخطط الصندوقي لتوضيح مبدأ عمل منهجية التحكم المباشر بالعزم [6].

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

يمكن القول إذاً أن خوارزمية التحكم المباشر بالعزم هي أكثر خوارزميات التحكم والقيادة المستخدمة لقيادة المحركات التحريضية ثلاثية الأطوار [7]، التي تعد الجزء الأساسي في صناعة المركبات الكهربائية ذات المحرك التحريضي. وذلك لما تتمتع به خوارزمية DTC من مزايا؛ إذ تستطيع التحكم بكل من عزم المحرك التحريضي وسرعته، بسرعة ودقة عالية لقيادة المحرك التحريضي الذي يزود المركبة الكهربائية بالعزم والسرعة المناسبين.

وبناء على ما سبق لُحِظ في السنوات الأخيرة اهتمام كبير من قبل المراكز البحثية في مختلف أنحاء العالم فيما يتعلق بتطوير المركبات الكهربائية في أجزائها المختلفة، وذلك لما له من أثر كبير وإيجابي في البيئة [8]؛ بتقديم حلٍ بديل مناسب للمركبات التي تعمل على الديزل، وذلك للتقليل من التلوث الناتج عن هذه المركبات، والحد من الاعتماد على الوقود الاحفوري [9,8]، إذ إن التقدم الكبير في صناعة هذه المركبات جاء نتيجة تطور دارات القيادة الكهربائية للمحركات الكهربائية ثلاثية الأطوار ونظمها، إذ تمتاز هذه المحركات الكهربائية باستطاعتها العالية، وقدرتها على العمل لساعات طويلة دون ضجيج. وتعدُّ طريقة التحكم المباشر بالعزم من أكثر الطرائق شيوعاً في نظم القيادة الكهربائية؛ وذلك لأنها أثبتت فاعلية عالية في قيادة المحرك الكهربائي ثلاثي الطور، إلا أنها تعاني من بعض السلبيات عند وجود شروط خاصة لقيادة المركبة؛ وبالأخص عند تغير الحمل أو مسار المركبة والذي يؤثر في محددات الآلة.

1-2 مشكلة البحث:

يقوم جوهر طريقة التحكم المباشر بالعزم على تقدير جزأي الفيض والعزم الخاصين بثابت المحرك؛ للحصول على إمكانية التحكم الدقيق والسريع بسرعة المحرك وعزمه، يعتمد جزء التقدير على النموذج الرياضي للمحرك أو معادلات خاصة لتقدير الفيض والعزم، وبالأخص أن بعض نماذج التقدير تدخل فيها قيم مقاومة ثابت المحرك والتي تكون متغيرة مع تغير التيارات التي يسحبها المحرك، والتي - التيارات - تتأثر بالأحمال المتغيرة، فعند الأحمال الكبيرة نسبياً تتغير قيمة مقاومة الثابت التي تدخل كمحدد أساسي في معادلات التقدير؛ ومن ثمَّ تتغير دقة التقدير، وبما أن دقة خوارزمية DTC تعتمد على دقة المقدر المستخدم لتقدير جزأي الفيض والعزم الخاصين

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

بالثابت، ومن ثمَّ ستتأثر دقة التقدير؛ أي ستتغير دقة خوارزمية DTC. يتضح أنه كلما كان التقدير دقيقاً كان التحكم أكثر دقة؛ يشكل ذلك مشكلة البحث؛ إذ عند التقدير غير الدقيق بسبب تغير مقاومة الثابت يكون التحكم في نقطة زمنية ما غير دقيق؛ مما يؤدي إلى وجود ارتدادات بالعزم أو السرعة تظهر على شكل تموجات في إشارتي الاستجابة للسرعة، والعزم الخاصين بالمحرك؛ مما دفع الباحثين إلى التسابق في البحث؛ لإيجاد طرائق لتحسين DTC؛ لجعلها أدق بحيث يُقلل من الارتدادات والقفزات في استجابتي العزم والسرعة للمحرك؛ مما يعني تأمين حركة المركبة الكهربائية بسرعة وسلاسة أكثر وبعزم أكبر، إذ تعاني طريقة التحكم المباشر بالعزم التقليدية من بعض السلبيات، وذلك عند سير المركبة في شروط خاصة، وذلك عند تغير الحمولة أو مسار المركبة؛ ومن هذه السلبيات تغيّر محددات الآلة، وذلك عند الحمولات الكبيرة نتيجة للأثر الحراري الذي يؤدي إلى تغير في قيم محددات المحرك الذي بدوره يؤدي إلى تأرجح في العزم عند القيادة باستخدام طريقة التحكم المباشر بالعزم التقليدية.

3-1 هدف البحث وأهميته Objectives

يشكل تطوير المركبات الكهربائية بتحسين عملية التحكم بالمحرك الكهربائي المستخدم فيها هدفاً للبحث، وذلك من خلال استخدام نظرية التحكم المباشر بالعزم بعد تحسين عملية التقدير فيها؛ بالاعتماد على الذكاء الصناعي؛ يتم ذلك بتحسين عملية التقدير في نظرية التحكم المباشر بالعزم باستخدام الذكاء الصناعي؛ لتطوير عملية التحكم بالمحرك الكهربائي التحريضي المستخدم بالمركبات الكهربائية؛ مما ينعكس إيجاباً على دقة التقدير في خوارزمية التحكم المباشر بالعزم DTC، ومن ثم يطور من أدائها، ويقلل من التموجات في استجابتي السرعة والعزم وبالنتيجة الحصول على أداء أفضل لهذه المركبات. وتبرز أهمية البحث في مجال صناعة المركبات الكهربائية التي تتطلب وجود نظم قيادة كهربائية دقيقة ذات استجابة سريعة، وخالية من الانتقالات الحادة بين مستويات العزم المختلفة، وتؤمن انتقالاً ناعماً وسلساً من مستوى عزم لآخر مناسب للمركبة الكهربائية؛ مع اختلاف حمولتها التي تتغير وفقاً لعدد الأشخاص والأمتعة التي تحملها؛ مع الحفاظ على مستوى السرعة المطلوبة.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

يؤدي التقدير الأدق إلى تحسين طريقة التحكم المباشر بالعزم، والحصول على أداء أفضل، واستجابة أنعم

بأقل التأرجحات للعزم، فينعكس إيجاباً على أداء المركبة الكهربائية.

كما أن للبحث أهمية كبيرة في موضوع الكبح بإعادة التوليد في المركبات الكهربائية؛ بالحفاظ على استقرار

المركبة عند عزوم عالية؛ مع تخزين تيار راجع؛ بإعادة شحن المدخرة؛ مما يطيل من مدة تشغيلها. تناولت الأطروحة

هذا المجال البحثي باقتراح تصميم متحكم عصبوني ذكي قادر على تنظيم الكبح؛ بإعادة التوليد مع الأخذ بالحسبان

وجود نظام طاقة مساعد لحماية المدخرة الخاصة بالمركبة الكهربائية من التيارات الكبيرة؛ والحفاظ على استقرارها

عند العزوم العالية؛ إذ يعمل المتحكم الذكي بدلاً من المتحكم التكاملي والتناسبي (proportional PI

integral)؛ لإجراء الكبح؛ مع إعادة التوليد بوجود نظام طاقة مساعد، وهذا الأمر ضروري لمنع احتراق المدخرة

في حال كبح المركبة عند التحرك بعزوم عالية نسبياً؛ إذ تكون التيارات المتولدة كبيرة نسبياً، وقد أُجريت محاكاة

باستخدام بيئة ماتلاب لكلا النظامين الكبح بإعادة التوليد بوجود متحكم PI وبوجود متحكم عصبوني؛ وتحصيل

النتائج، والمقارنة فيما بينهما.

1-4 نطاق البحث: The Scope

يندرج البحث في نطاق تحسين نظم القيادة من خلال تطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم DTC التي

تعد الأساس في برمجة المتحكمات المستخدمة في صناعة دارات القيادة المبرمجة الحديثة، والتي تمتاز فيما بينها

بقوة وصلابة ومتانة خوارزمية القيادة والتحكم المستخدمة؛ ما يميز دارة قيادة كهربائية مبرمجة عن أخرى هو فاعلية

خوارزمية القيادة المستخدمة في برمجتها وتصميمها، حيث يركز البحث على توظيف الذكاء الاصطناعي (الشبكات

العصبونية أو المنطق العائلي) لتطوير منهجية DTC بحيث تعطي أداء أفضل ومتانة في القيادة أعلى من خلال

تقليل التأرجحات الناتجة عند استخدام مثل هذه الدارات في قيادة المحركات التحريضية ثلاثية الأطوار، كما يقدم

البحث حالة دراسية من خلال توظيف المحرك التحريضي مع دارات القيادة المطورة؛ باستخدام منهجية DTC

محسنة بالذكاء الصناعي في مجال صناعة المركبات الكهربائية.

5-1 منهجية البحث Methodology

أنجزَ هذا البحث، وفق المراحل، والخطوات الآتية:

1- دراسة المحركات الكهربائية المستخدمة في المركبات الكهربائية؛ من حيث تعريفها، وتصنيفها، ومكوناتها، ومبدأ عمل كل منها. يركز البحث على المحركات التحريضية المستخدمة في صناعة المركبات الكهربائية. يضاف إلى ذلك نمذجة المحرك الكهربائي التحريضي المستخدم في هذا البحث لاقتراح تصميم نظام قيادة للمركبة الكهربائية، كما تجدر الإشارة أنه تُمدج المحرك الكهربائي ثلاثي الأطوار؛ وفقاً لمجال المحاور الإحداثية الثنائية q-d.

2- دراسة نظم القيادة الكهربائية المستخدمة في المركبات الكهربائية، من حيث ظهورها- تعريفها- وأجزائها، والتركيز على نظام القيادة؛ باستخدام خوارزمية التحكم المباشر بالعزم التي هي موضوع الرسالة.

3- دراسة منهجية التحكم المباشر بالعزم؛ مع نمذجة المحرك الكهربائي التحريضي؛ وفقاً لمنهجية التحكم DTC التقليدية، ودراسة قيادة المحرك التحريضي بطريقة التحكم المباشر للعزم التقليدية. ثم اقتراح فكرة وآلية لتطوير منهجية DTC؛ باستخدام الذكاء الصناعي سواء كان الشبكات العصبونية أو المنطق العائ.م.

4- دراسة الشبكات العصبونية الصناعية، وكيفية استخدامها في نظم القيادة والتحكم، ثم تطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم باستخدام الشبكات العصبونية الصناعية، واقتراح منهجية التطوير لخوارزمية DTC؛ باستخدام الشبكات العصبونية الصناعية؛ أي تطوير طريقة التحكم المباشر بالعزم؛ بإضافة شبكة عصبونية لإجراء التقدير، واستخدام طريقة التحكم المباشر بالعزم المطورة بالشبكة العصبونية DTC-ANN لقيادة المحرك الكهربائي التحريضي.

5- دراسة المنطق العائ.م، وكيفية استخدامه في نظم القيادة والتحكم ثم تطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم؛ باستخدام المنطق العائ.م، واقتراح منهجية التطوير لخوارزمية DTC؛ باستخدام المنطق العائ.م. أي تطوير

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

طريقة التحكم المباشر بالعزم بإضافة المنطق العائم لإجراء التقدير، واستخدام طريقة التحكم المباشر بالعزم المدعومة بالمقدر العائم DTC-FLE لقيادة المحرك الكهربائي التحريضي.

6- نمذجة المحرك الكهربائي التحريضي؛ باستخدام برنامج الماتلاب مع تطبيق منهجية التحكم المباشر

بالعزم DTC؛ وفق طرائق ثلاث وهي:

- تطبيق نظرية التحكم المباشر بالعزم قبل التطوير على نموذج المحرك الكهربائي التحريضي وتحصيل النتائج.

- تطبيق نظرية التحكم المباشر بالعزم بعد التطوير؛ باستخدام الشبكات العصبونية على نموذج المحرك الكهربائي التحريضي، وتحصيل النتائج.

- تطبيق نظرية التحكم المباشر بالعزم بعد التطوير؛ باستخدام المنطق العائم على نموذج المحرك الكهربائي التحريضي، وتحصيل النتائج.

- إجراء مقارنة بين أداء خوارزمية التحكم المباشر بالعزم قبل التطوير وبعده، وحساب مقدار التحسين.

7- تطوير نظام الكبح بإعادة التوليد؛ باستخدام الشبكات العصبونية الصناعية من أجل تقليل التيار

الكهربائي المستهلك في أثناء قيادة المركبة الكهربائية، وإعادة شحن مدخرة السيارة، والحفاظ على نسبة شحن عالية نسبياً من خلال الخطوات الآتية:

- دراسة نظام الكبح؛ بإعادة التوليد التقليدي بوجود متحكم PI.
- عرض نظام الكبح بإعادة التوليد بوجود نظام طاقة مساعد؛ باستخدام متحكم عصبوني مقترح.
- توضيح بنية المتحكم العصبوني المقترح.
- إجراء عملية محاكاة لنظامي الكبح بإعادة التوليد التقليدي والمقترح؛ باستخدام بيئة ماتلاب، وتحصيل النتائج النهائية، ومناقشتها لمعرفة مدى التحسين.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

8- تطبيق منظومة القيادة المصممة والمكونة من المحرك المقاد؛ باستخدام نظرية التحكم المباشر بالعزم

المطورة في المركبة الكهربائية، وإجراء التجارب والاختبارات على النموذج؛ باستخدام منصة RT-LAB، وتحصيل النتائج، وتحديد التوصيات والمقترحات.

6-1 الدراسة المرجعية Background Review

تعد تقنية التحكم المباشر بالعزم من أبرز التقانات وأهمها التي حظيت باهتمام الباحثين في مختلف التطبيقات الكهربائية ونظم القيادة المقترحة والمطورة، لملاءمتها لنظام الدفع في المركبات الكهربائية، التي تعتمد على قياس تيارات دخل المحركات لحساب الفيض والعزم. حازت هذه التقنية على اهتمام الباحثين والصناعيين منذ منتصف ثمانينيات القرن الماضي. وتمتاز هذه التقنية، ببنيته البسيطة واستجابتها السريعة للفيض والعزم، ولكنها لا تخلو من بعض المساوئ - كما أسلفنا - كنموذج العزم الكبيرة، وتردد تبديل متغير، وصعوبة التحكم بكل من الفيض والعزم بالسرعات المنخفضة؛ لذلك ركزت الأبحاث العلمية على تطويرها لتحسينها، بإدخال طريقة ما لها كطريقة التعديل الفراغي أو تقنية الشبكات العصبونية؛ أو غيرها من التقانات، وفيما يلي عدد من الدراسات المرجعية التي تناولت موضوع تطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم؛ بالاعتماد على تقنيات الذكاء الصناعي:

1-6-1 تطوير تقنية التحكم المباشر بالعزم؛ باستخدام الشبكات العصبونية:

طورت طريقة التحكم المباشر بالعزم لقيادة المحركات التحريضية في المركبات الكهربائية؛ اعتماداً على تقنية الشبكات العصبونية؛ لتصميم مفاضل حركي لقيادة المركبة الكهربائية؛ بالاعتماد على تقدير السرعة بوساطة الشبكات العصبونية [10]. أثبت استخدام تقنية الشبكات العصبونية الصناعية (Artificial Neural Network) للتحكم بسرعة قارب بخاري فاعلية عالية، ومتانة في التحكم مع خطأ ساكن قليل نسبياً؛ عن طريق استخدام الشبكات العصبونية، لتقدير السرعة والاستغناء عن حساس السرعة إذ استُعيض عنه بشبكة عصبونية تُقدّر السرعة؛ بالاعتماد على قيم التيارات والجهود والفيوض، كما استخدمت لتطويرها بإدخال الشبكات

أحمد الحمود العريفي

العصبونية الصناعية كمتحكمات للعزم والفيض بحيث يمكن تقليل التآرجح للعزم الناتج على محور المحرك التحريضي [13,12,11].

1-6-2 تطوير تقنية التحكم المباشر بالعزم؛ باستخدام المنطق العائم:

لم تقتصر عملية تطوير منهجية DTC على دمجها بتقنية ANN. فقد تناول عددٌ من الدراسات المرجعية تطوير منهجية DTC بدمجها مع تقنيات تحكم حديثة مغايرة لتصميم نظم قيادة أكثر فاعلية؛ إذ طُوِّرت بدمجها مع تقنيات التحكم العائم، وقد طورت منهجية DTC بإدخال متحكم عائم يُقَدِّر نسبة دورة التبديل؛ بغية إنقاص التآرجحات في إشارة العزم من خلال تخمين نسبة دورة التبديل؛ بالاعتماد على الخطأ في العزم والفيض، ويتكون المتحكم العائم المستخدم في هذه الدراسة من ثلاث مجموعات انتماء لكلٍ من متحولات الدخل والخرج، ويعتمد على (12) قاعدة فك تعويم [14]، استخدم باحثون آخرون المنطق العائم لتطوير منهجية DTC؛ لإجراء عملية التبديل بالاعتماد عليه؛ يحتوي على ثلاث مجموعات انتماء لثلاث متحولات دخل ومتحول خرج، وعلى (24) قاعدة فك تعويم يقوم المتحكم العائم بتقدير قيمة التبديل؛ بالاعتماد على خطأ الفيض، وخطأ العزم وزاوية الفيض [15]. 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 تعويم [16]. وقد ركَّز باحثون على عملية معايرة المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي (PID) المستخدم في منهجية DTC بواسطة المنطق العائم وخوارزمية أسراب الطيور؛ بهدف الحصول على أقل تعرج وتآرجح في العزم [17]. وقد استبدل جدول التبديل في منهجية التحكم المباشر بالعزم بمتحكم عائم يقوم بعملية التبديل بواسطة متحولي دخل؛ هما الفيض وخطأ العزم بستَ مجموعات انتماء؛ بهدف تقليل التآرجح في العزم، وقورن مع منهجية DTC التقليدية، وقد أثبت تفوقه عليها من خلال إجراء محاكاة بواسطة برنامج MATLAB؛ لتحصيل النتائج [18]. وقد اكتفى آخرون باستخدام المتحكم العائم لتنظيم السرعة في منهجية DTC، باستخدامه كمنظم ومتحكم في حلقة تنظيم السرعة مستعملين

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

(7) مجموعات انتماء لمتحولي دخل المتحكم العائم، وهما: الخطأ في السرعة، وتغير خطأ السرعة، واعتمدوا على (49) قاعدة غموض لإجراء فك التعويم، وأجريت محاكاة بوساطة MATLAB وأعطت النتائج فاعلية عالية في إنقاص معدل التآرجح في العزم [19]. وقد طُوِّرت DTC باستخدام المنطق العائم؛ انطلاقاً من المشكلة الرئيسية الموجودة فيها، وهي معدل التآرجح العالي في العزم؛ مستخدمين المتحكم العائم 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 بوساطة بيئة MATLAB؛ بغية إيجاد النتائج [20]. واستخدم المتحكم العائم لكلٍ من حلقة التحكم بالعزم والسرعة؛ بالاعتماد على الخطأ، وتغير الخطأ، ويتكون المتحكم من (7) مجموعات انتماء و(49) قاعدة غموض؛ بهدف تقليل التآرجحات في العزم، وأوجدت النتائج بالاعتماد على محاكاة في بيئة MATLAB [21]. اقتُبست آلية التطوير السابقة نفسها؛ من أجل تطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم بواسطة تغير قانون التحكم بالمنطق العائم؛ بهدف تقليل التآرجحات في العزم. وقد أجريت محاكاة في بيئة MATLAB أيضاً [22].

يُلاحظ أن الدراسات المرجعية السابقة ركزت على تطوير منهجية التحكم المباشر بمنحى محدد؛ باستخدام المنطق العائم؛ بهدف الحصول على قيادة ناعمة وسلسة بتقليل تآرجحات العزم والسرعة الناتجة عن عملية القيادة؛ وفق شروط وظروف حركة متغيرة.

1-6-3 تطوير تقنية التحكم المباشر بالعزم، باستخدام طرائق ذكاء أخرى:

إن تقانات الذكاء الصناعي لا تقتصر على الشبكات العصبونية والمنطق العائم؛ بل توجد طرائق أخرى عديدة، فعلى سبيل المثال طريقة التعديل الفراغي التي استخدمت في تطوير تقنية DTC؛ بغية التغلب على تغيرات العزوم الناتجة عن شروط تغير مسار حركة المركبة. استعملت هذه التقنية لقيادة مركبة كهربائية بأربع عجلات، وبمحرك لكل عجلة، لكنها ذات كلفة عالية [23,24,25]. وقد دَعَمَ باحثان هنديان DTC بمتحكم صناعي

أحمد الحمود العريفي

عصبوني عائم (Neuro-fuzzy) لإجراء عملية التحكم بالعزم [26]. كما طوّرت مجموعة باحثين DTC بإدخال المتحكم العائم كمتحكم للسرعة؛ بالاعتماد على خطأ، وتغيير 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 فورنت الطريقة المدعمة مع الطريقة التقليدية؛ لتوضيح مدى أهمية الطريقة المطورة من خلال حساب معدل التآرجح بعد إجراء عملية المحاكاة في بيئة MATLAB [27].

1-6-4 استخدام تقنية التحكم المباشر بالعزم مع أنواع محركات أخرى:

إن تقنية التحكم المباشر بالعزم ذات أهمية كبيرة في مجال القيادة الكهربائية، ولأهميتها لم يقتصر استخدامها في المحركات التحريضية، بل استخدمت أيضاً في قيادة محركات التيار المستمر عديمة المسفريات BLDC، في نموذج قيادة الأربع عجلات؛ بالاعتماد على تقنية DTC أخذين بالحسبان شروط تغيرات مسار المركبة الكهربائية [29,28].

ومنه نجد أن الدراسات المرجعية السابقة ركّزت على تطوير تقنية التحكم المباشر بالعزم بتقنية التعديل الشعاعي أو المنطق العائم أو تقنية الشبكات العصبونية الصناعية لتطويرها أو تطبيقها بمنحى محدد، وذلك من خلال إضافة التقنية لمرحلة من مراحل طريقة التحكم المباشر والهدف الرئيس من أي تطوير الحصول على قيادة انسيابية وسلسة لتقليل تآرجحات العزم والسرعة الناتجان عن عملية القيادة، وفق شروط الحركة المتغيرة وظروفها. ومن ثمّ يمكن القول إن تقنية التحكم المباشر حظيت باهتمام كبير بتطويرها باستخدام تقنيات الذكاء الصناعي سواء الشبكات العصبونية الصناعية أو المنطق العائم. بمعنى آخر أن تقانات الذكاء الصناعي كان لها دور كبير في تطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم بطرائق مختلفة كما بيناه في الدراسات المرجعية السابقة، بل إن تقانات الذكاء الصناعي تعدت ذلك لتطوير عملية الكبح أيضاً، التي -عملية الكبح بإعادة التوليد- تعدّ إحدى أهم طرائق توفير الطاقة الكهربائية بالنسبة للعربات الكهربائية، لما لها من دور إيجابي في إعادة شحن المدخرة؛ فضلاً عن ميزة الكبح الناعم للمركبة عن طريق محركها الكهربائي، بدلاً من الكبح الميكانيكي. لذلك أخذت الأبحاث في هذا المجال

أحمد الحمود العريفي

مناحي عديدة أيضاً؛ لأن الكبح بإعادة التوليد لا يقتصر على موضوع كبح المركبة الكهربائية، بل يتعدى ذلك إلى مفاهيم عديدة تتعلق بأدائها؛ إذ إن الأداء المطور في المركبات الكهربائية الحديثة يمكن أن يؤثر على كفاءة المركبة واستقرارها، وفي عوامل البيئة، وأن نظام الكبح لا يعمل على إيقاف المركبة فحسب؛ بل يؤثر في دقة عمل نظم عديدة موجودة على لوحة التحكم الخاصة بالمركبة؛ كالنظم الحرارية والميكانيكية الموجودة في المركبة الكهربائية، وفيما يلي بعض الدراسات المرجعية المتعلقة باستخدام الذكاء الصناعي في الكبح بإعادة التوليد:

1-6-5 تطوير تقنية الكبح بإعادة التوليد، باستخدام طرائق ذكاء مختلفة:

طرح إحدى الدراسات طريقة لإجراء الكبح بالتوليد لعجلتين في آن واحد، ودرست سرعة المركبة في حالتي الكبح الميكانيكي والكبح بإعادة التوليد، والاستجابة لكل منهما [30]. وانطلقت دراسة أخرى [31] من الدور المهم والأساسي لتقنية التحكم بالكبح بإعادة التوليد في المركبات الكهربائية لحفظ الطاقة وحماية البيئة. وعدت وجود عاملين أساسيين بالغ الأهمية في عملية الكبح بالتوليد؛ الأول: الحفاظ على استقرار المركبة في أثناء عملية الكبح للحفاظ عليها، والثاني: تقليل الطاقة المستهلكة اللازمة لتشغيل المركبة، واستعادة أكبر قدر ممكن من الطاقة. واقترحت استراتيجية لإجراء الكبح بإعادة التوليد لتحقيق العاملين السابقين، تعتمد على تصميم متحكم تنبئي لتوزيع عزم الكبح بين الكبح الهيدروليكي والكهربائي على أربع عجلات، وأجريت محاكاة بالاعتماد على MATLAB Simulink / لأربعة نماذج لمحركات العجلات كل على حدة. وطوّرت استراتيجية جديدة لتوزيع قوة الكبح من المحور الأمامي إلى الخلفي للتحكم بالكبح بإعادة التوليد لسيارة كهربائية تتحرك بسرعة عالية. تولّدت الطريقة المقترحة بين استرداد الطاقة من المحرك الكهربائي في أثناء الكبح، وتحقيق متطلبات السلامة. وتتميز منهجية التحكم بعملية الكبح بإعادة التوليد بوجود وحدة تحكم بالقوى المولدة أثناء عملية الكبح، والتي لها دور بارز في تعزيز أداء الكبح والمردود الكهربائي منه. وقد نُفذَ التحكم في الكبح بإعادة التوليد بدقة عالية، إذ خُلّلت فاعلية النظام وأداء الكبح بإعادة التوليد. وقد أثبتت النتائج أن نظام الكبح بإعادة التوليد حسّن فاعلية استرداد المركبة الكهربائية للطاقة؛ وخُلصت الدراسة إلى أنه يمكن تصميم متحكم مقترح خاص بعملية الكبح بإعادة التوليد الذي

أحمد الحمود العريفي

يحقق مفهومي السلامة والمردود العالي [32]. كما بينت دراسة [33] أن منهجية الكبح بإعادة التوليد فاعلة جداً في زيادة المدة الزمنية لقيادة السيارات الكهربائية، واقترحت منهجية ذكية للكبح بإعادة التوليد قائمة على المنطق العائم للحصول على مستوى عالٍ في حفظ الطاقة الكهربائية وتوفيرها، آخذين بالحسبان مفهوم أمن السيارة الكهربائية في أثناء عمليات الكبح بإعادة التوليد؛ لمنع حدوث ظاهرتي انزلاق المركبة أو قفل المركبة في أثناء عملية الكبح. واقترح باحثون إيطاليون منهجية لعملية الكبح في السيارات الكهربائية، بغية استعادة الطاقة الناتجة عن عملية الكبح بإعادة التوليد بشكل أمثل، وقد طُبِّقَ باستخدام محركين، محرك لكل عجلة خلفية وطُبِّقت عملية الكبح بإعادة التوليد مع الاستراتيجية المقترحة ومن دونها؛ إذ تبين بالشروط المثلى أنه يمكن استعادة طاقة عند كل سرعة محددة [34]. ولم تقتصر عملية الكبح بإعادة التوليد على المحركات التحريضية؛ بل استخدمت في محركات التيار المستمر عديمة المسفرات ثلاثية الطور؛ من أجل زيادة مدة استخدام المدخرة في المركبات الكهربائية [35]. وانطلاقاً من مفهوم إمكانية استعادة الطاقة الكهربائية عن طريق الكبح بإعادة التوليد في عدد من السيارات الكهربائية، اقترحت استراتيجية تحكم لتحقيق ذلك تتكون من ثلاثة مستويات للتحكم بعملية الكبح بإعادة التوليد بحيث تشمل عدة مسارات واحتمالات لقيادة المركبة؛ بدءاً من السائق والأوامر المتعلقة به في الطبقة العليا إلى خوارزمية الأمثلة في الطبقة الوسطى انتهاءً بالطبقة الدنيا المتضمنة النظام الهيدروليكي لإجراء عملية الكبح بإعادة التوليد [36]. ولكثرة الأبحاث المتعلقة بموضوع الكبح بإعادة التوليد قَدَّمت بعض الدراسات مراجعة شاملة للدراسات التي تناولت الكبح بإعادة التوليد من حيث المزايا والمساوئ؛ وذلك انطلاقاً من أهمية زيادة فاعلية الكبح في المركبات وتقليل الضياعات الحرارية الموجودة في نظام الفرملة الميكانيكية [37]. يعتمد مبدأ الكبح بإعادة التوليد على مبدأ تحويل الطاقة الميكانيكية إلى كهربائية من خلال تحويل عمل محرك السيارة الكهربائية إلى مبدأ التوليد، وجعله يعمل كمولد عبر تحويل الطاقة الميكانيكية الخاصة بالكبح إلى كهربائية تحوّل من متناوبة إلى مستمرة عبر المبدل ثم تذهب إلى شحن المدخرات [38]. اقترحت دراسة أخرى استراتيجية لإجراء الكبح بإعادة التوليد لتحقيق هدفين أساسيين؛ وهما استعادة أكبر قدر ممكن من الطاقة، والحفاظ على أمان المركبة واستقرارها، فقَدَّمت نمذجة رياضية

أحمد الحمود العريفي

لعملية الكبح بإعادة التوليد، وتطوير خوارزمية الكبح، وخلصت إلى نتيجة تضمنت زيادة الدورة الزمنية الخاصة بفترة عمل المدخرة قبل شحنها من جديد [39]. جوهر الأبحاث في مجال الكبح بإعادة التوليد في المركبات الكهربائية هو اقتراح خوارزمية تحكم قادرة على التعامل مع الحالات الصعبة بدون أن يتأثر النظام مع تحقيق مردود عالٍ لتيار الناتج عن الكبح بإعادة التوليد؛ حيث نجد أنه اعتمدت خوارزمية التحكم المبنية على شبكة عصبونية [40] والمتحول المتحكم به هو العزم، في حين في أغلب المقالات المرجعية هو السرعة. كما تجدر الإشارة إلى أن بعض الدراسات ركزت على موضوع التقليل من التيار الراجع في أثناء عملية الكبح بإعادة التوليد؛ لمنع احتراق مدخرة المركبة الكهربائية، باستخدام نظام هيدروليكي يمثل نظام قيادة مساعد لإجراء عملية الكبح؛ لتخفيف أثر التيار الراجع من عملية الكبح بإعادة التوليد في المدخرة؛ مع وجود متحكم عائم [41].

ومنه نخلص من الدراسات المرجعية السابقة إلى أن تقانات الذكاء الصناعي سواء الشبكات العصبونية أو المنطق العائم (وبالأخص الشبكات العصبونية الصناعية) استخدمت بكثرة في تطوير نظم القيادة الكهربائية الخاصة بالمركبات الكهربائية، وبالأخص في منهجيات التحكم والقيادة (على وجه الخصوص منهجية التحكم المباشر بالعزم DTC)، وفي دارات قيادة الكبح بإعادة التوليد. وقد أستعرض كثير من الدراسات المرجعية كأمثلة على ذلك على سبيل الذكر لا الحصر.

1-7 الخاتمة

قدم هذا الفصل فكرة البحث، وأهميته، وهدفه؛ إذ يندرج البحث في موضوع تطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم؛ باستخدام تقانتي الشبكات العصبونية والمنطق العائم؛ من خلال تطوير الجزء الخاص بعملية التقدير التي هي أساس دقة منهجية التحكم المباشر؛ إلى جانب ذلك تطوير موضوع الكبح بإعادة التوليد، واستخدام المنهجية المطورة لقيادة محرك تحريضي ثلاثي الطور؛ لتزويد مركبة كهربائية بالحركة مع منظومة قيادة، وتحكم تؤمن قيادة بسرعات وعزم مختلفة بدقة عالية؛ مع تقليل التأرجحات أو التذبذبات في استجابات العزم والسرعة رغم تغير الحمولة للمركبة أو تغير مسارها الذي يؤثر في تغير عزم حمولة المحرك الكهربائي؛ مما يؤدي إلى تغير قيم التيارات

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

المستجرة التي تؤثر في قيم محددات المحرك التحريضي؛ ومن ثم في عملية التقدير، وقد استعرض عددًا من الدراسات المرجعية بهذا الصدد، واندرجت هذه الأطروحة وفق الفصول الآتية:

الفصل الأول: الإطار العام للأطروحة الذي قدم فكرة البحث، وهدفه، وأهميته، ونطاقه، والدراسات المرجعية فيه.

الفصل الثاني: المحركات التحريضية المستخدمة في المركبات الكهربائية ونظم قيادتها، تضمن هذا الفصل المحركات المستخدمة في المركبات الكهربائية بشكل موجز، وركز على المحركات التحريضية مع طرائق قياداتها بعد بيان سبب اعتماد المحرك التحريضي؛ لتزويد المركبة الكهربائية بالحركة. وقدم كيفية نمذجة هذا المحرك مع التركيز على نظام القيادة بمنهجية التحكم المباشر بالعزم، استعرضت نظم الدفع في المركبة الكهربائية.

الفصل الثالث: ركّز على منهجية التحكم المباشر؛ مع ذكر فوائدها وإيجابياتها وسلبياتها، ومناحي تطويرها والمنحى المقترح لتطويرها. واستعرض تطوير منهجية التحكم المباشر؛ باستخدام الشبكات العصبونية الصناعية بعد إجراء دراسة لآلية تصميم الشبكات العصبونية الصناعية، وكيفية الوصول إلى مخطط التطوير المقترح. وكذلك تصميم متحكم عصبوني ذكي قادر على تنظيم الكبح بإعادة التوليد مع الأخذ بالحسبان وجود نظام طاقة مساعد لحماية المدخلة الخاصة بالمركبة الكهربائية من التيارات الكبيرة، والحفاظ على استقرارها عند العزوم العالية.

الفصل الرابع: استعرض تطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم؛ باستخدام المنطق العائم بعد إجراء دراسة لآلية تصميم المخمنات العائمة، وكيفية الوصول إلى مخطط التطوير المقترح.

الفصل الخامس: **التطبيق العلمي؛ باستخدام منصة RT-LAB**، وذلك بالاعتماد على النموذج الرياضي للمحرك المستخدم من خلال نمذجته ومحاكاته في بيئة ماتلاب، ومن ثم تحضير نموذج الماتلاب لاستخدامه مع RT-LAB؛ وفق مرحلتين:

الأولى: وهي عبارة عن محاكاة النموذج ضمن Simulators والذي هو عبارة عن محاكي بالزمن الحقيقي.

الثاني: وهو عبارة عن تطبيق النموذج فيزيائياً؛ وذلك من خلال الربط مع حمل خارجي (المحرك المقود).

ومن ثم مقارنة نتائج الماتلاب ب RT-LAB للمحرك المقود بالطرائق المقترحة.

الفصل الثاني

المحركات الكهربائية المستخدمة في المركبات الكهربائية، ونظم قيادتها

1-2 مقدمة

إن السيارة الكهربائية لا تحتوي على محرك تقليدي؛ بل تستخدم بدلاً منه محركاً كهربائياً يستمد الطاقة من مدخرات قابلة للشحن. وللمحرك الكهربائي دور كبير، وأثر عالٍ بسبب اختلافه عن المحرك التقليدي الذي يعمل بالوقود الأحفوري، وأبرز هذه التأثيرات: [47,46,45,44,43,42]

- 1- المحرك الكهربائي يعمل على الطاقة الكهربائية المستمدة من المدخلة، ولا يحتوي على أية انبعاثات غازية، في حين يعمل المحرك التقليدي على الوقود الأحفوري الذي له انبعاثات ضارة على البيئة.
- 2- المحرك الكهربائي صامت نسبياً فيما إذا قورن بالمحرك التقليدي وعند قيادة السيارة الكهربائية تكون صامتة تقريباً على عكس سيارة الديزل أو البنزين.
- 3- السيارة الكهربائية يتم تغيير سرعتها من خلال التحكم بالمحرك الكهربائي، ولا تحتاج إلى أجزاء ميكانيكية؛ كالتروس أو نواقل الحركة أو عادم للانبعاثات التي تحتاج إليها سيارة الديزل أو البنزين.
- 4- إن التكلفة الأساسية لمحرك كهربائي بالاستطاعة نفسها أقل بكثير من محرك الاحتراق الداخلي.
- 5- يمتلك المحرك الكهربائي دورة حياة أطول من محرك الديزل أو البنزين؛ بوجود جزء متحرك واحد فيه.
- 6- يعطي المحرك الكهربائي إذا تمت صيانته ما يقارب 30 ألف ساعة من العمل دون الحاجة لإصلاحات رئيسية، مما يعني أن المحركات الكهربائية تتطلب قدراً أقل من خدمات الصيانة؛ مقارنة بمحركات الديزل أو البنزين التقليدية.
- 7- المحركات الكهربائية ذات كفاءة في استهلاك الطاقة؛ لأنها أقل هدراً للطاقة عن طريق كبح المحرك في أثناء التوقف، وشحن المدخلة عند الكبح بتقنية إعادة التوليد.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

إن الاختلافات السابقة جعلت المحرك الكهربائي يحلّ محلّ محرك الديزل أو البنزين، ومنه ظهرت المركبات الكهربائية التي تعتمد على المحرك الكهربائي الذي يستمد قوته من مدخرات قابلة للشحن. إن المدخرات هي مصدر الطاقة في السيارات الكهربائية التي تؤمّن تغذية المحرك الكهربائي الذي يُعدّ الأساس في المركبات الكهربائية؛ لأنه يؤمّن لها الدفع والتوجيه اللازمين لسيورها، وتستخدم المحركات الكهربائية بنوعيتها؛ المستمرة DC أو المحركات المتناوبة على حدّ سواء في صناعة المركبات الكهربائية، إلا أن الشركات بدأت بالتوجه أكثر إلى استخدام محركات التيار المتناوب في المركبات الكهربائية الحديثة لعدد من الأسباب التي سنتذكر في الفقرة التالية.

2-2 محركات الجرّ في المركبات الكهربائية.

كما بيّنا في الفقرة السابقة أنّ المركبات الكهربائية تمتلك محرك تيار مستمر أو متناوب، لكن لكل من المحركات المستمرة أو المتناوبة أنواع عديدة. تبين هذه الفقرة أنواع المحركات المستخدمة في المركبات الكهربائية على شكل نبذة مختصرة، ونخلص لمقارنة بين هذه الأنواع كما سيأتي [49,48]:

أنواع المحركات الكهربائية للسيارات:

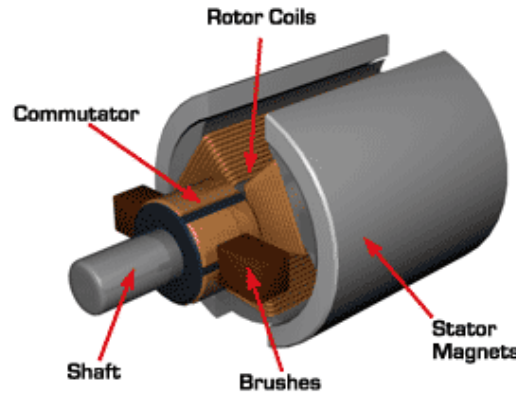
- محركات التيار المُستمر Motor DC Series.
- محركات التيار المُستمر عديمة المسفرات Brushless DC Motors.
- المحرك المُتزامن ذو المغناطيس الدائم PMSM.
- المحركات التحريضية ثلاثية الطور Three Phase AC Induction Motors.
- محركات ذات الممانعة المتغيرة Switched Reluctance Motors SRM.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

2-2-1 محرك التيار المستمر: DC motor

إن محرك التيار المستمر هو من أبسط أنواع المحركات الكهربائية والأكثر استخداماً في أوائل القرن العشرين، لما له من مزايا عديدة؛ منها سهولة التحكم بسرعه، وإمكانية التحميل المفاجئ أو تغيير الحمل المفاجئ، لكن من أبرز عيوبه وجود المبدلات النحاسية والمسفرات من الكربون كثيرة العطب؛ ومن ثمَّ حاجته إلى صيانة مستمرة؛ فضلاً عن كبر حجمه، مقارنة بالاستطاعة نفسها التي تقدمها بقية الأنواع.



الشكل (2 - 1) محرك التيار المستمر، وأبرز مكوناته.

2-2-2 محرك التيار المستمر عديم المسفرات: brushless DC motor [50]

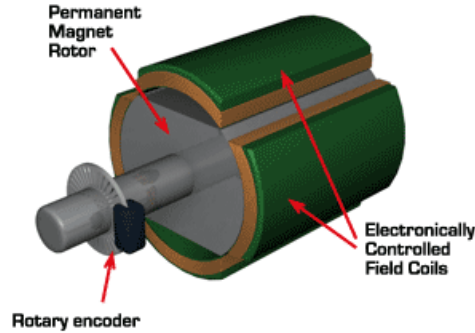
إن العيب الرئيس الموجود في محركات التيار المستمر؛ المتمثلة بحاجتها إلى صيانة دورية، وارتفاع تكاليف صيانتها؛ بسبب وجود المسفرات الكهربائية؛ مما دفع الباحثين في مجال تصميم المحركات الكهربائية إلى إيجاد محرك تيار مستمر بدون مسفرات؛ ومن ثم التخلُّص من عملية الصيانة الدورية وتكاليفها؛ فضلاً عن ذلك تتميز هذه الأنواع من المحركات بعزم دوران كبير نسبياً وكفاءة عالية تتراوح بين 95% إلى 98%، وتتواجد هذه المحركات على شكلين رئيسيين [51,50] :

1- محركات التيار المستمر عديم المسفرات ذات الدوار الداخلي in runner brushless DC motor

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

إذ يكون الدوار عبارة عن مغناطيس دائم. أما الجزء الثابت فهو عبارة عن ملفات تتوضع حول الدوار، إلا أن هذه النظام من المحركات يتطلب لوجود ناقل للحركة من المحرك إلى عجلات المركبة الكهربائية؛ مما يجعل حجمه أكبر من النوع التالي من محركات التيار المستمر عديمة المسفرت.



الشكل (2-2) محرك تيار مستمر عديم المسفرت ذو الدوار الداخلي.

2- محرك التيار المستمر عديم المسفرت ذو الدوار الخارجي Out runner brushless DC motor

لا يتطلب هذه النوع من المحركات نظام نقل للحركة؛ مما يجعل هذا النوع من المحركات أصغر حجماً من المحرك السابق، يكون الجزء الدائر في هذه النوع من المحركات موجوداً في الخارج، أما الجزء الثابت ففي الوسط، ويطلق على هذا النوع من المحركات اسم المحركات المحورية، تُركَّب العجلات مباشرة على الدوار الخارجي بشكل متصل به، ويطلق على العجلات المستخدمة في هذا النوع من المحركات اسم العجلة الكهربائية.



الشكل (2-3) محرك تيار مستمر عديم المسفرت ذو الدوار الخارجي والعجلة الكهربائية.

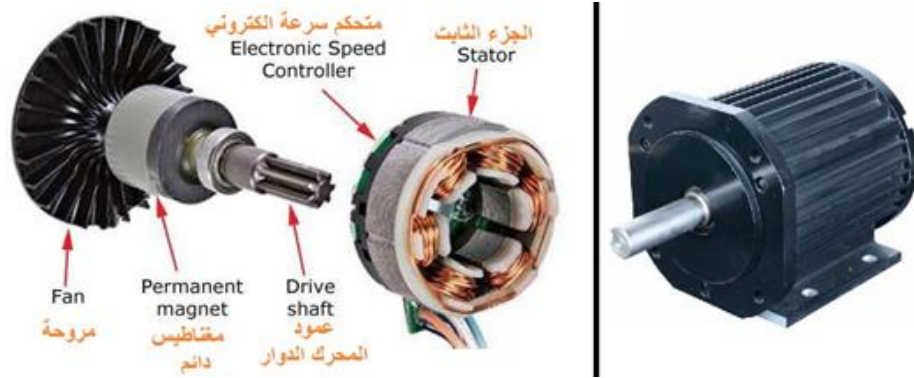
التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

2-2-3 المحرك المتزامن ذو المغناطيس الدائم: (PMSM) permanent magnet

synchronous motor

يشبه هذا النوع من المحركات من ناحية البنية محرك التيار المستمر عديم المسفرات ذو الدوار الداخلي؛ حيث يوجد مغناطيس دائم على الدوار، وتتمتع هذا المحركات بكفاءة عالية، وكثافة طاقة مغناطيسية كبيرة؛ بسبب وجود المغناطيس الدائم الذي ينتج حقلاً مغناطيسياً؛ فضلاً عن الحقل المغناطيسي الكهربائي. إن الكفاءة وكثافة الطاقة العاليتين اللتين يتمتع بهما هذا المحرك جعله أكثر استخداماً في السيارات الكهربائية والهجينة [52]. إلا أن هذا النوع من المحركات يستخدم معادن عبارة عن مغناط نادرة وبمواصفات محددة؛ مما جعلها غالية الثمن.



الشكل (2-4) المحرك المتزامن ذو المغناطيس الدائم ومكوناته

2-2-4 المحرك التحريضي ثلاثي الطور: Three Phase AC Induction Motor

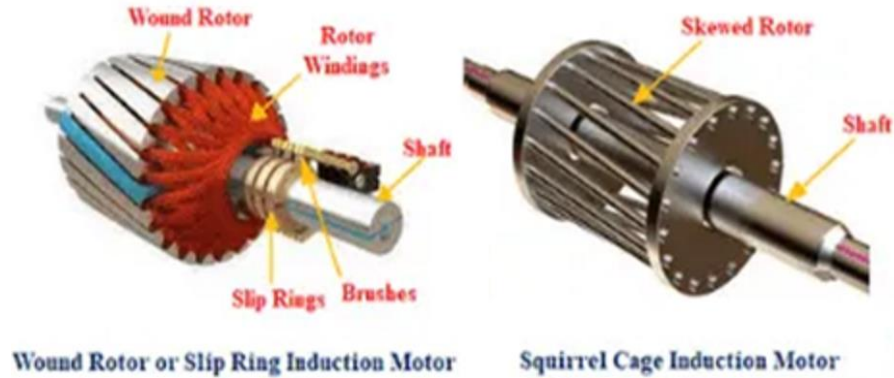
يُعدُّ محرك التيار المتناوب (التحريضي) ثلاثي الطور الأكثر انتشاراً في عالم الصناعة [53] وهذا لما يتمتع به من ميزات، مثل: المتانة وبساطة التركيب، وانخفاض ثمنه؛ مقارنة بالمحركات الأخرى. يتكون المحرك ثلاثي الطور من عنصرين رئيسيين، هما الجزء الثابت Stator والجزء الدائر Rotor. يوجد نوعان مختلفان في التركيب للجزء الدائر أو الدوار ومتقاربان في الخواص الكهربائية، وهما:

الدوار الملفوف wound type induction motor

أو (ذو القفص السنجابي) squirrel cage type induction motor

ويسمى المحرك التحريضي عادة باسم الدوار للتمييز بين نوعيه.

أحمد الحمود العريفي



الشكل (2-5) المحرك التحريضي بنوعيه.

أما مبدأ عمله، فهو بكل بساطة يعتمد على وجود قوة كهرومغناطيسية تعطيه العزم اللازم للدوران تنتج عن وجود تيار في الناقل (سواء كان قضبان في القفص السنجابي أو ملفات في ذي الدوار الملفوف) المتوضع في مجال مغناطيسي. وينقسم المحرك التحريضي ثلاثي الطور إلى قسمين:

القسم الأول الثابت (**Stator**): وفيه ثلاث مجموعات من الملفات متساوية العدد، وهي أطوار التشغيل (الطور الأول والثاني والثالث) وكل مجموعة تحتوي على عدد زوجي من الملفات، وهذا العدد هو الذي يشكل أقطاب المحرك وبين هذه الأقطاب زاوية مقدارها 120 درجة [54]

القسم الثاني الدوار (**Rotor**): أو المتحرض وهو عبارة عن ملفات ضمن أخاديد في محركات الدوار الملفوف أو صفائح معدنية متصلة مع بعضها مشكلة أسطوانة دائرية الشكل، هذه الأسطوانة فيها تقوَب طولية على طول الأسطوانة تتوضع فيها قضبان ألومنيوم أو نحاس ومقصورة بصورة محكمة من طرفي الأسطوانة؛ مشكلة ملفات الدوار في محركات الدوار ذي القفص السنجابي.

عند تطبيق جهد متناوب ثلاثي على ملفات الجزء الثابت، فإنه يمر بهذه الملفات تيار متناوب مُحدِثاً مجالاً مغناطيسياً دواراً يقطع ملفات الدوار (ملفات الدوار الملفوف أو القضبان المقصورة التي تسمى قفص السنجابي)، ويولد بالتحريض قوة محرّكة كهربائية في ملفاته (لذلك يسمى المحرك التحريضي)؛ وبما أن ملفات الدوار موصولة مع بعضها بعضاً، فهي تشكل دائرة مغلقة تسمح بمرور تيار كهربائي، وهذا التيار بدوره يولّد

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

سيالة مغناطيسية أخرى، وبسبب التأثير المتبادل بين هاتين السياتين (سيالة الثابت وسيالة الدوار) ينتج قوة كهرومغناطيسية وعنها ينتج عزمًا كهرومغناطيسي يعمل على دوران الدوار بسرعة n هي دوماً أقل من السرعة التزامنية n_s (التي يحددها عدد أزواج الأقطاب P وتردد منبع التغذية المقدر بالهرتز وهو في الشبكة الكهربائية السورية 50 Hz) وذلك بسبب ضياع جزء من استطاعة المجال المغناطيسي الدوار في التغلب على المفاقد الحديدية والميكانيكية، والتي تسبب فاقد في السرعة يسمى سرعة الانزلاق Slip speed، أي أن الجهد الكهربائي المتولد في ملفات العضو الدوار يعتمد على السرعة النسبية بين الدوار وسرعة المجال المغناطيسي الناتج من الثابت، فإذا كانت سرعة المجال المغناطيسي للثابت هي n_s وسرعة الدوار n ، فإن السرعة النسبية الناتجة عن الفرق بين سرعة الدوار وسرعة المجال المغناطيسي للثابت تسمى سرعة الانزلاق، مما يسبب أن السرعة الحقيقية للدوار n أقل من السرعة التزامنية n_s ، ولذلك سميت بالمحركات التحريضية اللاتزامنية، وتعطى سرعة المحرك التزامنية بالعلاقة:

$$n_s = 60 \frac{f}{p} \quad 2-1$$

إذ:

f : تردد المنبع بالهرتز Hz

P : عدد أزواج الأقطاب

تتمتع هذه الأنواع من المحركات بعمر طويل وبالأخص نوع القفص السنجابي [56,55] ويمكن تصميمها بكفاءة عالية لا تقل عن 92% إلى 95% مما دفع العديد من الشركات المصنعة للمركبات الكهربائية إلى استخدام هذا النوع من المحركات كشركة تسلا أس والكثير من الشركات الهندية كشركة ماهيندرا وشركة تاتا بل تعدى ذلك إلى قيام بعض الشركات الهندية المختصة بالسكك الحديدية الكهربائية إلى استخدام هذه النوع من المحركات واستبدال محركات تيار المستمر بهذا النوع [57]، إلا أن العيب الوحيد لهذه المحركات حاجتها إلى نظم

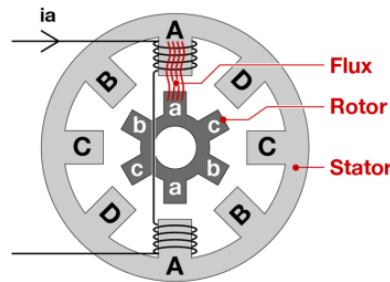
التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

قيادة معقدة نسبياً إذ تحتوي مبدلات inverters ودارات مبرمجة لإجراء عملية القيادة بالاعتماد على خوارزميات قيادة، وتحكم من أبرزها خوارزمية التحكم المباشر بالعزم.

5-2-2 المحرك ذو الممانعة المتغيرة (SRM) Switched reluctance motor

هو محرك كهربائي يعمل بعزم دوران ناتج عن ممانعة متغيرة. وذلك على عكس محركات التيار المستمر؛ إذ يكون الدوار عبارة عن قطعة من الفولاذ الرقائقي ولا يحتوي على ملفات أو مغناطيس دائم، يتم توصيل الطاقة إلى الملفات الموجودة في الجزء الثابت بدلاً من الدوار. فتتولد تيارات قصر ذاتية في الجزء الدوار؛ مما يسبب حقلاً مغناطيسياً ناتجاً عنها يتفاعل مع حقل الثابت مسبباً الدوران، وبنية القصور الذاتي للدوار تؤدي دوراً كبيراً في عملية التسارع؛ إذ كلما كانت ذات بنية تجعل تيارات القصر في الدوار تولّد حقلاً مغناطيسياً أكبر كان التفاعل بين هذا الحقل المغناطيسي والحقل المغناطيسي الناتج عن الثابت أكبر؛ مما يجعل التسارع أعلى؛ الأمر الذي يؤثر في التصميم الكهربائي له، ويجعله أعقد. إن وجود الممانعة المتغيرة التي ينشأ عن تياراتها التحريض المغناطيسي بسبب بعض الضجيج في الدوار. ويمتلك هذا المحرك موثوقية عالية مقارنة بمحرك التيار المستمر، ويتمتع بعزم ابتدائي عالٍ، وله قدرة كبيرة على التكيف، وتحمل درجات الحرارة. أما أبرز عيوبه، فهي: أن علاقة التيار مع العزم غير خطية؛ بسبب وجود الممانعة المتغيرة؛ الأمر الذي يسبب مشاكل في عملية التحكم، ويجعلها أصعب. ويسبب ضجيجاً عالياً.



الشكل (2-6) المحرك ذو الممانعة المتغيرة [58].

يبين الجدول (2-1) مقارنة بين المحركات الكهربائية المستخدمة في تصميم المركبات الكهربائية

وصناعتها من حيث الكلفة، والفاعلية، والضجيج، واهتزاز التشغيل، وقابلية التحكم والمردود [58]؛ إذ نجد أن

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

المحرك التحريضي ثلاثي الطور هو الأقل تكلفة، وضجيجاً، واهتزازاً في أثناء التشغيل، والأعلى مردوداً وفاعليةً إلا أنه من ناحية قابلية التحكم، فهو الأصعب في القيادة والتحكم، ويحتاج إلى منهجيات ذات تعقيد عالٍ نسبياً؛ مقارنة بباقي المحركات؛ مما دفع شركات تصنيع المركبات الكهربائية إلى اعتماده بعد توفير منهجية تحكم مناسبة له؛ الأمر الذي حثَّ الباحثين على البحث في إيجاد منهجيات للتحكم بهذا المحرك أو تطوير منهجيات تحكم خاصة. ومن أبرز هذه المنهجيات منهجية التحكم المباشر بالعزم. كما تجدر الإشارة إلى أن أغلب منهجيات قيادة المحرك التحريضي تحتاج إلى عملية نمذجة هذا المحرك، وإيجاد المعادلات الرياضية الممثلة له.

الجدول (2- 1) مقارنة بين أنواع المحركات الكهربائية المستخدمة بالمركبات الكهربائية [58-63]:

نوع المحرك motor type	DC	brushless DC	PMSM	3 Phase Induction	SRM
التكلفة Cost	70%	77%	80%	الأقل 60%	الأعلى 100%
الكفاءة Efficiency	89%	90%	86%	الأعلى 97%	90%
الضجيج والاهتزاز Noise & Vibration	20%	15%	18%	الأقل 8%	52%
قابلية التحكم Controllability	الأسهل 100%	95%	80%	الأصعب 40%	68%
المردود	92%	92%	90%	-92% 95%	90%

2-3 نمذجة المحرك الكهربائي التحريضي ثلاثي الأطوار.

إن عملية إجراء التطبيق المباشر لمنهجيات التحكم على المحرك تتطلب كثيراً من الوقت والجهد، فضلاً عن التكلفة العالية، والتي قد تؤدي في بعض الأحيان إلى احتراق المحرك أو نظام التحكم والقيادة أو كلاهما؛ الأمر الذي دفع أغلب الباحثين إن لم نقل جميعهم إلى اعتماد النمذجة والمحاكاة لإجراء الأبحاث والدراسات فيما يخص تطوير أو إيجاد منهجيات قيادة وتحكم بالمحرك التحريضي؛ لتجنب التكاليف العالية أو التعرض لخطورة ما قد تحدث في أثناء التجريب. يشكل المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار نظاماً كهروميكانيكياً بجزء كهربائي،

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

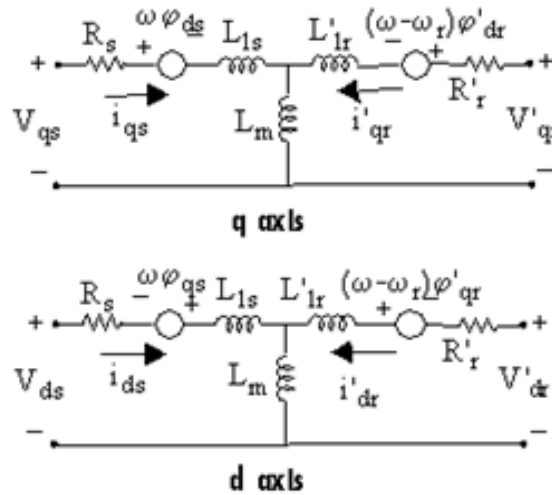
أحمد الحمود العريفي

وآخر ميكانيكي، يُمثَّل في نظام المحاور المتعامدة d-q؛ انطلاقاً من الدارات المكافئة، كما في الشكل (7-2).

وتتحدد معادلات الجهود والعزم والفيض من خلال مركباتها في نظام المحاور المتعامدة، واستناداً إلى الدارات

المبين بالشكل (7-2)؛ وفق الآتي [65,64]:

$$\begin{aligned}
 V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{\partial \varphi_{qs}}{\partial t} + \omega \varphi_{ds} \\
 V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{\partial \varphi_{ds}}{\partial t} - \omega \varphi_{qs} \\
 V'_{qr} &= R'_r i'_{qr} + \frac{\partial \varphi'_{qs}}{\partial t} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr} \\
 V'_{dr} &= R'_r i'_{dr} + \frac{\partial \varphi'_{dr}}{\partial t} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr} \\
 T_e &= 1.5p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \\
 \varphi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \\
 \varphi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i'_{qr} \\
 \varphi'_{qr} &= L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \\
 \varphi'_{dr} &= L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \\
 L_s &= L_{ls} + L_m \\
 L'_r &= L'_{lr} + L_m
 \end{aligned}
 \tag{2-2}$$



الشكل (7-2) الدارات المكافئة لمحرك تحريضي ثلاثي الطور في الإحداثيات المتعامدة q,d.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

تحدد معادلة توازن العزوم للمحرك والحمل الميكانيكي؛ وفق الآتي:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \omega_m}{\partial \tau} &= \frac{1}{j} (T_e - F \omega_m - T_m) \\ \frac{\partial \theta_m}{\partial t} &= \omega_m \end{aligned} \right\} \quad 2-3$$

يبين الجدول (2-2) دلالة كل رمز في مجموعتي المعادلات (2-2) و (2-3) كالآتي:

الجدول (2-2) دلائل رموز المحرك التحريضي

الرمز	الدلالة
R_s, L_{ls}	المقاومة والمحاوضة التسريبية للثابت
L_s	المحاوضة الكلية للثابت
i_{ds}, V_{ds}	توتر الثابت وتياره وفق المحور d
ω_m	السرعة الزاوية الميكانيكية للدائر (على محور المحرك)
ω_r	السرعة الزاوية الكهربائية تساوي $\omega_r = p \omega_m$
P	عدد أزواج الأقطاب
T_m	العزم الميكانيكي لمحرك كهربائي ثلاثي الطور
J	معامل العطالة للحمولة وممانعة المسار
L'_{lr}, R'_r	المقاومة والمحاوضة التسريبية للجزء الدائر المنسوبة للثابت
i'_{dr}, V'_{dr}	توتر الدائر وتياره وفق المحور d المنسوبة للثابت
L_m	المحاوضة المغنطيسية
i_{qs}, V_{qs}	توتر الثابت وتياره وفق المحور q
ϕ_{ds}, ϕ_{qs}	فيض الثابت؛ وفق المحور d و q
θ_m	زاوية موضع المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار
θ_r	زاوية الموضع الكهربائية للجزء الدائر تساوي $\theta_r = p \theta_m$
ω	السرعة الزاوية للإطار المرجعي
T_e	العزم الكهرومغنطيسي
F	معامل الاحتكاك للمركبة
i'_{qr}, V'_{qr}	توتر الدائر وتياره وفق المحور q المنسوبة للثابت
ϕ'_{dr}, ϕ'_{qr}	فيض الدائر؛ وفق المحور d و q المنسوبة للثابت
L'_r	المحاوضة الكلية للجزء الدائر

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

تتم عملية الانتقال من الإحداثيات الثلاثية abc إلى الإحداثيات الثنائية q-d أو العكس؛ باستخدام

تحويل بارك؛ إذ تُعطى تحويلات بارك للتوترات؛ وفق المعادلات الآتية [66,65]:

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 \cos \theta & \cos \theta + \sqrt{3} \sin \theta \\ 2 \sin \theta & \sin \theta + \sqrt{3} \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{abs} \\ V_{bcs} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V'_{qr} \\ V'_{dr} \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 \cos \beta & \cos \beta + \sqrt{3} \sin \beta \\ 2 \sin \beta & \sin \beta + \sqrt{3} \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{abr} \\ V'_{bcr} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad 2-4$$

وتُعطى تحويلات بارك العكسية للتيارات؛ وفق المعادلات الآتية [67,66,65]:

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\cos \theta}{2} & \frac{\sin \theta}{2} \\ \frac{-\cos \theta + \sqrt{3} \sin \theta}{2} & \frac{-\sqrt{3} \cos \theta - \sin \theta}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i'_{ar} \\ i'_{br} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\cos \beta}{2} & \frac{\sin \beta}{2} \\ \frac{-\cos \beta + \sqrt{3} \sin \beta}{2} & \frac{-\sqrt{3} \cos \beta - \sin \beta}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix} \\ i_{cs} &= -i_{as} - i_{bs} \\ i'_{cr} &= -i'_{ar} - i'_{br} \end{aligned} \right\} \quad 2-5$$

يمثل الجزء الدائر الإطار المرجعي لتحويلات بارك؛ إذ تكون الزوايا $\theta = \theta_r, \beta = 0$ ، وتتخذ النمذجة للمحرك

التحريضي ثلاثي الأطوار؛ استناداً إلى مجموعة المعادلات (2-2) و (3-2) و (4-2) و (5-2)، وذلك لتمثيل

الجزئين الكهربائي والميكانيكي للنظام المحرك-الحمل، ثم تجري التحويلات من محاور الأطوار الثلاثة abc إلى

المحاور المتعامدة q-d وبالعكس، ويتمثل دخل النموذج بجهود التغذية $(V_{abs}, V_{bcs}, V'_{abr}, V'_{bcr})$. ويتمثل خرج

النظام بالعزم الميكانيكي على محور المحرك T_m المقابل لعزم الحموله والسرعة التي يقدمها المحرك أيضاً

للمحمولة. أما عملية قيادة المحرك؛ فتكون وفق نظام أو منهجية قيادة محددة، ومعتمدة. وفي الفقرة التالية نبين

أبرز هذه النظم.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

2-4 نظم قيادة المحركات الكهربائية التحريضية.

هناك كثير من نظم قيادة المحركات التحريضية، من أبرزها [68]:

- التحكم بنسبة الجهد إلى التردد ثابتة $V/f = const$
- نظم التحكم بإلغاء الاضطراب أو التشويش الفعال (ADRC) active disturbance rejection control
- التحكم الحثلي الموجه (FOC) field oriented control
- التحكم المباشر بالعزم (DTC) direct torque control

وفيما يلي نبذة عن كل نظام تحكم من حيث مبدأ العمل، ومزايا كل من نظم القيادة السابقة ومساوئها:

2-4-1 التحكم بنسبة الجهد إلى التردد ثابتة:

تضمن هذه الطريقة في قيادة المحركات التحريضية تنظيم السرعة بوساطة تغيير الجهد مع التردد وفق نسبة ثابتة $V/f = const$ والتحكم في الدوار والتحكم المباشر في عزم الدوران. وفقاً لمعادلة سرعة الساحة المغناطيسية المعطاة بالعلاقة (1-2)، يمكن ضبط سرعة المحرك التحريضي بالطرائق الثلاث الآتية:

1- عن طريق تغيير تردد الجهد AC ثلاثي الطور بوساطة مبدل ثلاثي الطور، يمكن التحكم بسرعة الساحة المغناطيسية للمحرك التحريضي غير المتزامن، وبالتالي ضبط سرعة الدوار للمحرك غير المتزامن. إذ بتغيير تردد الجهد ثلاثي الأطوار يتم تُغيّر السرعة.

2- تغيير عدد أزواج الأقطاب المغناطيسية، وذلك بزيادتها أو إنقاصها للتغيير من سرعة الساحة المغناطيسية. وهذا الأمر يحتاج لتغيير في البنية التصميمية للمحرك في أثناء التصنيع، وهو أمر يستحيل تنفيذه إلا من أجل التحكم بمستويات سرعة محددة تضبط في أثناء تصميم المحرك إلا أن هذه الطريقة مستبعدة في مجال محركات المركبات الكهربائية.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

3- تغيير معامل الانزلاق، وذلك عند سرعة تزامنية ثابتة: ويتم ذلك بزيادة الفيض المغناطيسي للدوار بواسطة ملفات تحريض ثانوية إضافية أو إنقاص ملفات، وهذه الطريقة أيضاً تحتاج للتدخل ببنية المحرك، وهي قليلة الاستخدام، ولا تؤمن إلا مستويات محدودة للسرعة [69,68].

لذلك فإن الطريقة الأنجع للتحكم بسرعة محرك تحريضي هي تغيير من تردد الجهد ثلاثي الطور المطبق على المحرك عن طريق مبدلة ثلاثية. ومن ميزات هذا النوع من نظام تنظيم السرعة أن قيمة الجهد وتردده المطبق على الجزء الثابت للمحرك يُضبطان في الوقت نفسه الذي تُضبط فيه سرعة المحرك، ومن ثم، يمكن نقل الخصائص الميكانيكية لنظام تنظيم السرعة بسلسلة للأعلى والأسفل؛ الأمر الذي يتوافق مع زيادة استهلاك الطاقة أو إنقاصها، ومنه الحصول على كفاءة التشغيل العالية.

عندما يُطبّق جهدٌ متناوبٌ ثلاثي الطورٍ على ملف الجزء الثابت، فإن التيار ثلاثي الطور المار في ملف الجزء الثابت يولد مجالاً مغناطيسياً دائرياً، يولّد مجالاً مغناطيسياً من قبل الجزء الثابت، وهو يحرض مجالاً مغناطيسياً في ملف الدوار، وعن مجال الثابت يتولد قوة محرك كهربائية في الثابت معطاة بالعلاقة:

$$E_1 = 4.44 K_{N1} f_1 N_1 \phi_m \quad 2-6$$

E_1 : القوة المحركة الكهربائية للطور المتولدة بملف الثابت.

K_{N1} : معامل اللف لملف الثابت.

f_1 : تردد الجهد ثلاثي الطور المطبق على الثابت.

N_1 : عدد لفات الثابت.

ϕ_m : الفيض المغناطيسي الأساس.

وبما أن معامل اللف K_{N1} وعدد اللفات للثابت N_1 قيم ثابتة، ومن ثم عند تغيير الجهد مع التردد $v1/f1$

يُغيّر الفيض المؤثر في الدوار ϕ_m ؛ وفق المعادلة (2-6) بعد إصلاحها بالشكل:

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

$$\phi_m = \frac{E_1}{4.44 K_{N1} f_1 N_1} \quad 2-7$$

إن المعادلة (2-7) تبين أن جوهر طريقة التحكم بنسبة التردد إلى الجهد ثابتة؛ وفق الحالات الآتية:

- عند تغيير التردد فقط وعدم تغيير الجهد: في حال زيادة التردد ينقص الفيض المؤثر في الدوار ومنه

ينقص عزم الدوار مع نقصان السرعة والعكس بالعكس.

- عند تغيير قيمة الجهد مع تثبيت التردد: نميز حالتين: في حال زيادة الجهد يزداد عزم الدوار، وفي حال

نقصان الجهد ينقص عزم الدوار لزيادة الفيض ونقصانه المؤثر في الدوار مع زيادة الجهد ونقصانه

المطبق على الثابت، وحيث العزم يتناسب مع مربع الجهد.

ومنه جاءت فكرة أن يتم التحكم بتغيير التردد مع الجهد بحيث تبقى نسبتهما ثابتة، ومنه ثبات عزم

الدوار لثبات الفيض المؤثر في الدوار رغم تغيير السرعة.

لكن من مساوئ هذه الطريقة أن التحكم يكون بالحلقة المفتوحة، ولا يوجد معرفة عن حالة الخرج، ولا

يوجد تنظيم للسرعة؛ فضلاً عن ذلك عدم إمكانية التحكم بالعزم، وهبوط العزم عند مستويات سرعات منخفضة؛

مما دفع الباحثين إلى السعي للتوصل إلى طريقة تحكم تتجاوز هذه المساوئ.

2-4-2 نظم التحكم بإلغاء الاضطراب الفعال [71,70]:

التحكم الفعال بإلغاء الاضطراب (ADRC) يعتمد على وجود متحكم تناسبي - تكاملي بدون تفاضلي

أو معه (PI) أو (PID) proportional-integral-derivative في حلقة تغذية عكسية للتحكم بالسرعة

من أجل إلغاء الضجيج أو الاضطراب، وذلك عند التحكم بالسرعة. وهذا النظام يسمى وحيد الدخل وحيد الخرج

(SISO) single Input single Output، أو وجود متحكمين (PI) أو (PID) في حلقتا تغذية عكسية؛

حلقة للتحكم بالسرعة وحلقة للتحكم بالعزم، وهذا للتحكم بالسرعة والعزم، وهو عبارة عن نظام تحكم متعدد الدخل

متعدد الخرج (MIMO) Multi Input Multi Output. وتعد طريقة التحكم هذه قوية وفاعلة وتعتمد في

تصميمها على إيجاد النموذج الرياضي للمحرك التحريضي المبين في الفقرة (2-3) أو إيجاد فراغ الحالة المكافئ

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

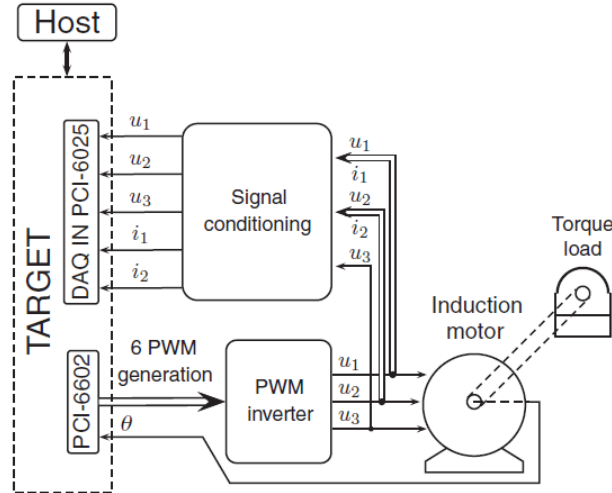
له ثم تقدير مجموع الاضطرابات الداخلية والخارجية، والتي يُشار إليها عادةً على أنها الاضطراب الكلي، وهي الفرق بين السرعة المرغوبة والسرعة الفعلية في نظام قيادة (SISO)، ويضاف إليها الفرق بين العزم المرغوب والعزم الفعلي في نظام قيادة (MIMO) وتستخدم إشارات الخطأ في توليد إشارة التحكم من أجل فصل الاضطراب الفعلي الذي يحدث في عملية القيادة عن المحرك، ونبذ الضجيج أو رفضه، بمعنى آخر ترشيح الضجيج. تتيح ميزة إلغاء الاضطراب للمستخدم قيادة المحرك بصورة أكثر فاعلية؛ إذ تُعرّف السرعة والعزم الفعليين للمحرك عن طريق حلقتا التغذية العكسية في نظام (MIMO)؛ بدلاً من التحكم المفتوح، كما هو الحال في طريقة $V/F=const$ [73,72].

ومن مزايا هذه الطريقة قدرتها على قيادة المحرك التحريضي دون المعرفة الدقيقة لكل محددات نموذج المحرك التحريضي أو بعضها. لكن إن عدم المعرفة الدقيقة لمحددات نموذج المحرك تؤدي إلى وجود تأرجحات بإشارة العزم، وكلما كانت القيم التقريبية للمحددات بعيدة عن القيم الحقيقية زادت تأرجحات إشارة العزم، تُطبّق هذه الطريقة كما هو مبين بالشكل (2-8) عبر وجود حساس سرعة لقياس سرعة المحرك التحريضي وحساسات تيارات وجهود، وتدخل هذه الإشارات إلى وحدة تحكم (Target) ليتم تطبيق منهجية التحكم ADRC؛ من خلال مقارنة إشارتي السرعة والتيار (المكافئ للعزم) مع السرعة والعزم المرغوبين لحساب إشارتي الخطأ؛ وتطبيقهما على متحكمي ADRC أحدهما خاص بالسرعة والآخر بالعزم، وإيجاد إشارتي التحكم اللتين تطبقان على شكل تعديل نبضة على مبدلة تشغيل المحرك التحريضي، وتعاني هذه الطريقة من وجود اضطرابات وتأرجحات في إشارتي العزم والسرعة ناتجة عن القيادة عن طريق المبدل بوساطة تعديل عرض النبضة (PWM) رغم استخدام متحكم (PID) والذي في جزئه التقاضي يلاحق الإشارة الهدف، ويحاول إلغاء التأرجحات. إن وجود التأرجحات في إشارتي العزم والسرعة؛ وبالأخص إشارة العزم هو نتيجة الربط الموجود بين عزم المحرك التحريضي، وتدفق الفيض المغناطيسي؛ إذ لا يُفصل بينهما؛ وإنما يُعامل معهما في الوقت نفسه من خلال التيار؛ إذ يكون هدف منهجية ADRC التحكم بالعزم من خلال التيار دون الاكتراث إلى الفيض الذي

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

بدوره يؤدي إلى وجود تأرجحات في إشارة العزم؛ مما دفع الباحثين في التفكير في طريقة يُفصل فيه العزم عن الفيض، لتحقيق تحكم موجّه للعزم دون التأثير في الفيض المغناطيسي [68].



الشكل (2-8) المخطط العملي والتنفيذي لمنهجية التحكم بألغاء الاضطراب ADRC بوساطة وحدة تحكم مركزية عبر

بطاقة هدف Target.

2-4-3 التحكم الحقلي الموجه:

في هذه الطريقة كما بيّنا في مقدمة الفصل الأول؛ يتم التحكم بفصل عزم الدوران عن التدفق، ويتم التحكم بكل منهما بصورة مباشرة ومستقلة من أجل التحكم بسرعة وعزم المحرك، ولكنها تتأثر بصورة كبيرة بتغير محددات الآلة، وتحتاج إلى زمن حسابي كبير [68].

يمثل الشكل (2-9) المخطط الصندوقي لدارة التحكم بالمحرك التحريضي؛ باستخدام الحقل الموجه

لفيـض الدوار، إذ يوجد أربعة منظمات؛ اثنان للسرعة ω_m والفيض ψ_r واثنان لمركبتي تيار الثابت i_{sq}^*, i_{sd}^* ؛

تحتاج منهجية التحكم الموجه إلى متحكمات؛ فمن خلال تنظيم السرعة والفيض نحصل على القيمة المرجعية

للمركبة العمودية والأفقية للتيار i_{sq}^*, i_{sd}^* ونحصل على مركبتي الجهد المرجعية u_{sq}^*, u_{sd}^* من خلال تنظيم

مركبتي التيار بوساطة حلقتا تنظيم مركبتي التيار، وتحول هاتين المركبتين إلى إشارة جهد مرجعية ثلاثية الطور

u_{sabc}^* ؛ باستخدام تحويل بارك العكسي، ثم تولّد نبضات القذح الخاصة بالمبدلة S_{sabc} عن طريق تعديل عرض

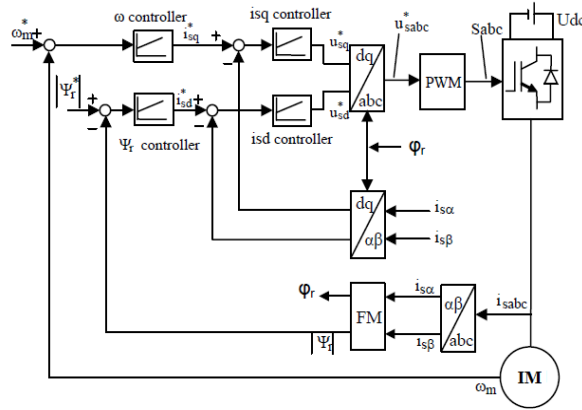
التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

النبضة التي تقارن فيها إشارة الجهد المرجعية ثلاثية الطور؛ مع إشارة مثالية لتوليد إشارة عرض النبضة التي

تطبق على قواعد ترانزستورات المبدلة لتوليد الجهد المتناوب ثلاثي الطور المناسب؛ لتشغيل المحرك التحريضي

بالسرعة والعزم المرجعيين [49,48]



الشكل (2-9) المخطط الصندوقي لمنهجية التحكم الحثلي الموجه.

تعتمد منهجية التحكم الحثلي الموجه على نموذج الفيض (Flux Model (FM) الذي يعطى وفق المعادلات

الآتية [36-33] :

$$\left. \begin{aligned} |\psi_r| &= \sqrt{\psi_{r\alpha}^2 + \psi_{r\beta}^2} \\ \tan \phi_r &= \frac{\psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}} \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} &= -\frac{R_r}{L_r} \psi_{r\alpha} - \omega \psi_{r\beta} + \frac{R_r}{L_r} L_m i_{s\alpha} \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} &= -\frac{R_r}{L_r} \psi_{r\beta} - \omega \psi_{r\alpha} + \frac{R_r}{L_r} L_m i_{s\beta} \end{aligned} \right\} \quad 2-8$$

إن الغاية الأساسية من نموذج الفيض حساب الفيض المرجعي الخاص بالعزم بعد فصله إلى قيمتين؛

المطال والزاوية، ومنه التحكم الموجّه بالعزم. إلا أنه من أبرز عيوب منهجية التحكم الحثلي الموجه وجود نموذج

رياضي معقد يحتوي على معادلات تفاضلية؛ مما يزيد من تعقيد نظام التحكم، ويضيف أعباء مادية عند التنفيذ

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

العملي له؛ بسبب الحاجة إلى معالجات بسرعات تنفيذ كبيرة نسبياً قادرة على حل هذه المعادلات التفاضلية خلال أزمنة مناسبة للزمن التحكم الحقيقي.

4-4-2 التحكم المباشر بالعزم:

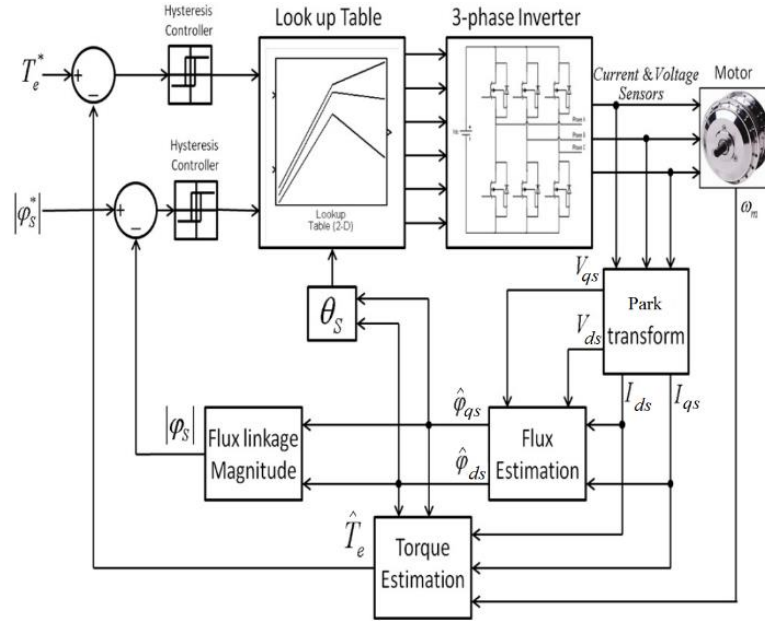
إن تقنية التحكم المباشر بالعزم هي التقنية الأحدث والتي جاءت فكرتها من الاستفادة من زاوية الفيض؛ لإجراء عملية القرح والتبديل الخاصة بالقالبة أو المبدلة [74]، وهي موضوع هذا الرسالة؛ لذلك ستُشرح بشيء من التفصيل. وهذه الطريقة تشبه من حيث المبدأ طريقة التحكم الشعاعي إلا أنها تتميز بحساسيتها الكبيرة تجاه تغير محددات الآلة، وعدم حاجتها إلى منظمات التيار؛ مما يعني أن استجابة العزم أسرع بكثير في هذه الطريقة من طريقة التحكم الحثلي الموجّه.

تعتمد تقنية التحكم المباشر بالعزم على إيجاد قيم الجهود V_{abs} و V_{bcs} والتيارات i_{as} و i_{bs} ، عن طريق تركيب حساسات الجهود والتيارات على ملفات ثابت المحرك، كما يبين المخطط الصندوقي في الشكل (2-10)، وتستخدم تحويلات بارك بعد ذلك لحساب قيم الجهود V_{ds} و V_{qs} والتيارات i_{ds} و i_{qs} ؛ وفقاً لمجموعة المعادلات (2-4) و (2-5)، بعد ذلك يُنقل لمرحلة تقدير الفيض والعزم [74].

تعتمد مرحلة تقدير مركبات الفيض $\hat{\phi}_{ds}$ و $\hat{\phi}_{qs}$ على مركبات التيارات والجهود الناتجة من تحويل بارك على نظام المحاور d-q؛ ومن ثم يمكن بناءً على ذلك حساب فيض الثابت $|\phi_s|$ وزاويته θ_s ؛ وفق العلاقات [75,74]:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\phi}_{ds} &= \int (V_{ds} - R_s i_{ds}) \cdot dt \\ \hat{\phi}_{qs} &= \int (V_{qs} - R_s i_{qs}) \cdot dt \\ |\phi_s| &= \sqrt{\hat{\phi}_{ds}^2 + \hat{\phi}_{qs}^2} \\ \theta_s &= \tan^{-1} \left(\frac{\hat{\phi}_{ds}}{\hat{\phi}_{qs}} \right) \end{aligned} \right\} \quad 2-9$$

أحمد الحمود العريفي



الشكل (2- 10) المخطط الصندوقي لتقنية DTC التقليدية للتحكم بسرعة المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار وعزمه.

تتمثل المرحلة التالية بتقدير قيمة العزم $\hat{T}_e$ بناءً على التيارات والجهود الناتجة من تحويل بارك؛ فضلاً

عن السرعة المقاسة؛ وفق مجموعة المعادلات الآتية:

$$\left. \begin{aligned}
 \hat{\phi}_{qr} &= \hat{\phi}_{qs} - L_s i_{qs} \\
 \hat{\phi}_{dr} &= \hat{\phi}_{ds} - L_s i_{ds} \\
 e_q &= \frac{d\hat{\phi}_{qr}}{dt} \\
 e_d &= \frac{d\hat{\phi}_{dr}}{dt} \\
 \hat{T}_e &= \frac{3P}{2} \left(\frac{e_q}{\omega} i_{qs} + \frac{e_d}{\omega} i_{ds} \right)
 \end{aligned} \right\} \quad 2-10$$

إذ تتضمن مجموعة المعادلات السابقة:

e_q و e_d القوة المحركة الكهربائية على المحاور q و d على الترتيب. تحسب قيمة الخطأ لكلٍ من العزم والفيض

dT و $d\phi$ ؛ وهي الفرق بين قيمة العزم المقدرة $\hat{T}_e$ وقيمة العزم المرجعي المرغوب T_e^* وبين قيمة الفيض $|\phi_s|$

أحمد الحمود العريفي

المقدرة، وقيمة فيض الثابت المرجعي المرغوب $|\varphi_s^*|$ على الترتيب، لتجري بعد ذلك عملية الإبطاء من الدرجة

الثانية hysteresis في متحكم الإبطاء، وذلك وفق المعادلتين الآتيتين لخطأ العزم والفيض [74,65]:

$$\left. \begin{aligned} dT &= \begin{cases} -1; T_e^* - \hat{T}_e < 0 \\ 0; T_e^* - \hat{T}_e = 0 \\ +1; T_e^* - \hat{T}_e > 0 \end{cases} \\ d\varphi &= \begin{cases} 1; |\varphi_s^*| - |\varphi_s| > 0 \\ 0; |\varphi_s^*| - |\varphi_s| \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad 2-11$$

تجدر الإشارة إلى أن شعاع الفيض المغناطيسي يتغير في زمنياً وفراغياً، وينتج عن فيوض الأطوار الثلاثة للثابت، ومن ثم يشارك في توليده ست أشعة للأطوار الثلاثة في كل موضع؛ بما يتوافق مع الوضعيات المناسبة لمفاتيح مبدلة القدرة الإلكترونية. يقسم الفراغ إلى ست قطاعات مع أشعة أمواج الجهود للأطوار الثلاثة لأنصاف الموجة الموجبة والسالبة؛ وفقاً للشكل (2-11)؛ إذ تتوافق معها أشعة تيارات الأطوار وفيوضها. يجري زيادة الفيض أو العزم وتخفيضهما وفقاً للجدول (2-3) [74,66]:

الجدول (2-3) جدول زيادة العزم وإنقاظه بناء على موضع شعاع الفيض المغناطيسي للثابت

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}

تتم عملية التحكم المباشر بالعزم في المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار؛ من خلال تحديد الانحراف عن القيم المطلوبة؛ من خلال تحديد الزيادة أو النقصان في عزم المحرك، وإعادته للقيمة المرجعية؛ وفقاً للجدول (2-4).

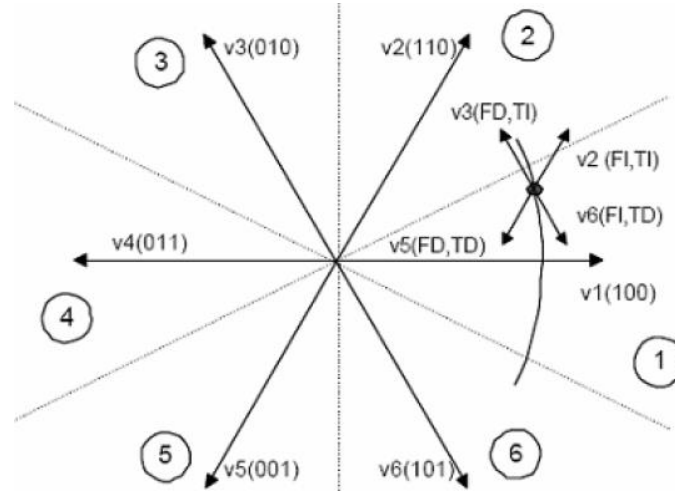
يعود مقترح هذا الجدول إلى الباحث (Takahashi)، ويستند إلى تحديد زاوية فيض الثابت θ_s ؛ لتحديد القطاع

في الفراغ من S_1 حتى S_6 . يجري بعد ذلك تحديد خطأ العزم وخطأ الفيض؛ وفقاً لمجموعة المعادلات (2-11)

لتحديد التبديل المناسب في مفاتيح المبدلة والحصول على العزم المطلوب والموافق.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي



الشكل (2- 11) توضع شعاع تدفق الثابت؛ وفق جميع حالات مفاتيح المبدل **switching inverter**

FD: flux decrease. FI: flux increases. TD: torque decrease.

TI: torque increase.

الجدول (2- 4) جدول التبديل في 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

2-5 نظم الدفع في المركبات الكهربائية:

قد صُمِّمت المركبات الكهربائية بنظم دفع متنوعة، وتصنف نظم الدفع من ناحية مصدر الدفع، كما هو

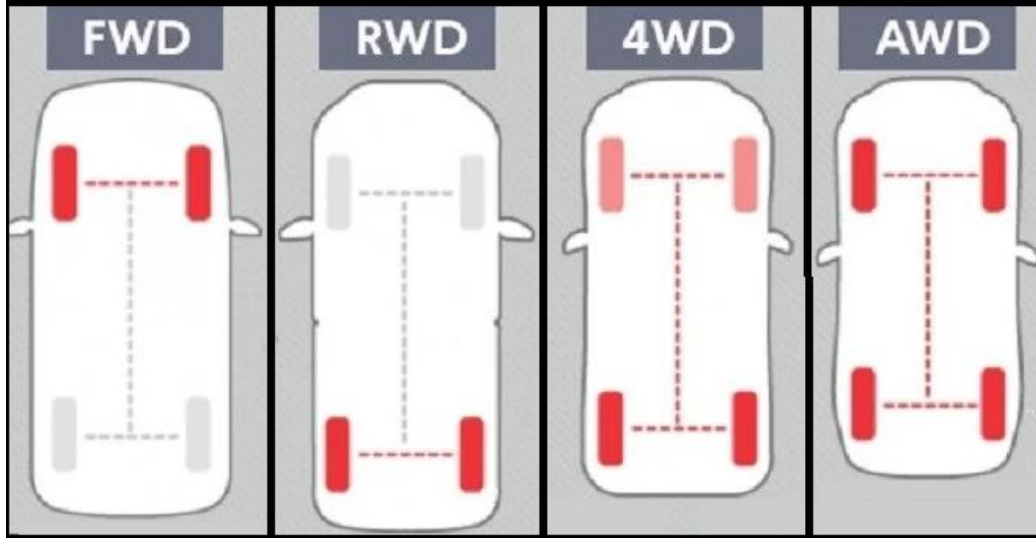
مبين بالشكل (2-12) إلى الأصناف الآتية [84,76]:

1- نظم الدفع الثنائية: وتتواجد إما على شكل نظام دفع أمامي أو خلفي.

2- نظم الدفع الرباعية.

3- نظم الدفع بالعجلات الأربعة.

أحمد الحمود العريفي



الشكل (2- 12) أنواع نظم الدفع في المركبات الكهربائية من ناحية مصدر الدفع.

كما تصنف نظم الدفع من ناحية توضع محرك الدفع إلى أصناف عدة، كالاتي [84,77]:

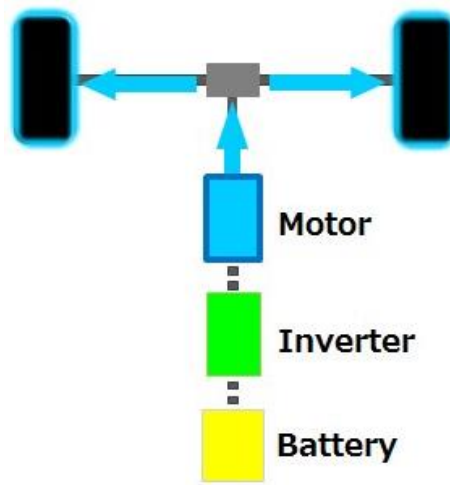
- 1- نظم الدفع الرئيسية: وتوجد هذه النظم على شكل نظام دفع ثنائي أو رباعي فقط.
- 2- نظم الدفع داخل العجلة: تتواجد هذه النظم على شكل نظام دفع ثنائي أو رباعي، كما يضاف لها نظم العجلات الكلية.
- 3- نظم الدفع المستقلة: إذ يكون لكل عجلة محرك مستقل، وهي تتواجد على شكل نظم دفع العجلات الكلية فقط.

2-5-1 نظم الدفع الرئيسية في المركبات الكهربائية:

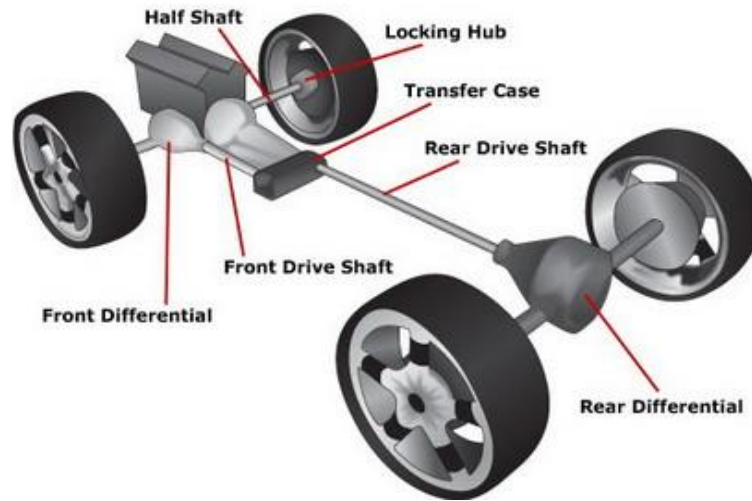
في هذا النوع من نظم الدفع يشغل المحرك عجلتين في نظم الدفع الثنائية، وهما إما: العجلتين الأماميتين أو الخلفيتين كما هو مبين بالشكل (2-13)، وإما بتزويد الحركة إلى العجلات الأربع في نظم الدفع الرباعية كما هو مبين بالشكل (2-14). ونظم الدفع الثنائية شراؤها أرخص وأكثر اقتصاداً من سيارات الدفع الرباعي. تحتوي نظم الدفع الثنائية على محور ناقل للحركة وعلى مفاضل وحيد، في حين تحتوي نظم الدفع الرباعية على محورين ناقلين للحركة ومفاضلين؛ محور ومفاضل للعجلات الأمامية، وآخرين للعجلات الخلفية [84,78].

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي



الشكل (2- 13) شكل نظام الدفع بمحرك رئيس ذي نظام دفع ثنائي.



الشكل (2- 14) نظام الدفع بمحرك رئيس ذي نظام دفع الرباعي.

2-5-2 نظم الدفع داخل العجلة:

تستخدم هذه النظم محركات كهربائية مختلفة، لكن الأكثر استخداماً هو محرك التيار المستمر عديم المسفرات ذو

الدوار الخارجي لملاءمته لعمل هذه النظم، تصنف هذه النظم إلى ثلاثة أصناف، وهي [78-80,84] :

1- نظم الدفع الثنائية

2- نظم الدفع الرباعية

3- نظم الدفع بالعجلات الأربعة

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

1- الدفع الثنائي (Two-wheel drive (2WD)

إن معظم المركبات الكهربائية هي ذات نظام دفع ثنائي، والتي يمكن أن تأتي في أحد شكلين: الدفع الأمامي (Front Wheel Drive (FWD أو الدفع الخلفي (Rear wheel drive (RWD. وفيما يلي ميزات كلٍّ من الشكلين:

مميزات الدفع الأمامي (FWD)

- 1- يقع المحرك وناقل الحركة فوق العجلات الأمامية مباشرة؛ مما يوفر قوة جرٍ أفضل عند تسلق التلال أو الصعود أو القيادة على طرائق زلقة.
- 2- توفر مساحة أكبر بمقصورة السيارة ومساحة أكبر للأرجل في الخلف؛ لأن جميع المعدات في المقدمة.
- 3- يحتوي نظام الدفع بالعجلات الأمامية على عدد من القطع أقل من أي نظام دفع آخر؛ مما يجعل السيارة أخف وزناً، ويحسن اقتصاد السيارة للكهرباء، ويقلل من استهلاك مدخراتها، ولهذا السبب فإن معظم السيارات الاقتصادية تعتمد نظام الدفع الأمامي (FWD).
- 4- يوفر رد فعل أعلى عبر عجلة القيادة، وخاصة في حالة انزلاق العجلات.
- 5- نظام الدفع بالعجلات الأمامية هو نظام أبسط بالمجمل، وأقل تكلفة للشراء والصيانة.
- 6- مناسب للبلدان ذات المناخ الجاف أو الممطر؛ لأنه يحتوي على نظام الفرامل المانعة للانغلاق (Anti-lock braking systems (ABS ونظام التحكم في الجر؛ مما يجعله مناسباً للمناخات الجافة والرطوبة وحتى في حالات تساقط الثلوج الخفيفة أيضاً.

مميزات الدفع الخلفي (RWD):

- 1- يعمل على تحسين التحكم في التسارع، وتوزيع الوزن بصورة متساوية.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

2- الدفع بالعجلات الخلفية أقل تكلفة للصيانة لعدم وجود عدد من الأجزاء المعبأة في مساحة صغيرة،

في حين تكلف صيانة السيارات الدفع الأمامي أكثر، لأنه يتعين إزالة المزيد من الأجزاء والقطع للوصول إلى الجزء المراد تغييره.

3- سهولة التوجيه (توجيه عزم الدوران) ، وهو الاتجاه الذي يجب أن تنحرف فيه سيارات الدفع الأمامي إلى اليمين أو اليسار في أثناء التسارع.

4- قدرتها على سحب الأحمال الكبيرة؛ لأن العجلات التي تسحب تقع أسفل الحمولة؛ لأن العجلات الخلفية توفر القوة، بينما تقوم العجلات الأمامية بعملية التوجيه.

أما مساوئ النظامين الدفع الأمامي (FWD) والدفع الخلفي (RWD) وعيوبهما، هما:

مساوئ الدفع الأمامي (FWD):

1- يحتاج إلى مساحة كبيرة في مقدمة السيارة

2- صعوبة التوجيه؛ إذ يحتاج إلى نظم توجيه أكثر تعقيداً؛ من أجل إمكانية الدفع الأمامي والقيادة

في آن واحد.

3- يحتاج إلى محركات ذات عزوم كبيرة قادرة على السحب.

4- التحكم أقل فاعلية عند السرعات العالية.

5- قدرة ضعيفة على سحب الأحمال؛ وبالأخص عند توزيعها في الجزء الخلفي من المركبة الكهربائية.

عيوب الدفع الخلفي (RWD):

1- الحاجة لمنظومة توجيه ميكانيكية أو كهروميكانيكية.

2- مساحة داخلية أقل في مقصورة السيارة؛ بسبب الحاجة لمساحة أكبر لنقل الحركة وعمود التوجيه.

ومساحة أقل لصندوق الأمتعة؛ لأنه يجب وضع المزيد من المعدات أسفل الصندوق.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

3- يضيف عمود الدفع الذي يربط المحرك الأمامي بالمحور الخلفي وزناً زائداً للسيارة؛ مما يجعل

السيارات ذات الدفع الخلفي أعلى من السيارات ذات الدفع الأمامي، لكن بالطبع أقل من نظم الدفع الرباعي،

ونظام الدفع بالعجلات الأربع (All Wheel Drive (AWD)

4- الدفع الخلفي يدفع السيارة بدلاً من سحبها؛ إذ إن السيارات ذات نظام الدفع الخلفي تواجه صعوبة

أكبر في المناورة في الظروف الرطبة والثلجية، لكن مع التكنولوجيا الحديثة بإدخال منهجيات قيادة متطورة مكنتها

من الثبات والتحكم في الجر وتم تقليل هذا العيب بصورة كبيرة.

عند المقارنة بين ميزات كلا نظامي الدفع الأمامي والخلفي وعيوبهما يمكن الاستنتاج أن لكلٍ ميزاته

وعيوبه، فقرار أيهما أفضل يعود لاحتياجات القيادة وتفضيلاتها، فإذا كانت المطلوب هو الأداء الأعلى مقرونًا

بمساحة أصغر واستهلاك كهرباء أقل وهناك قدرة على تحمل تكاليف تصميم نظم تحكم وقيادة دقيقة، فنظام الدفع

الخلفي هو الأفضل.

أما إذا كانت نقطة التفضيل الاقتصاد في السعر، ومساحة أكبر للمقصورة لسيارة عملية الغرض منها هو

النتقل بأبسط أشكاله من نقطة لنقطة بأمان وبأقل تكلفة، فنظام الدفع الأمامي هو الأفضل.

2- الدفع الرباعي

تصنف بعض الدراسات هذه النظم إلى نظامين؛ نظام الدفع الرباعي، ونظام الدفع بالعجلات الأربع.

وهناك اختلافات مهمة بين نظم الدفع الرباعي 4x4 ونظام الدفع بالعجلات الأربع (AWD)، لكنهما نوعان من

نظم الدفع التي تنقل القوة من المحرك إلى العجلات الأربع للسيارة الكهربائية، يُطبَّق نظام الدفع الرباعي على

مجموعات الدفع التي تشتمل على تفاضل بين أعمدة الدفع الأمامية والخلفية. أما نظام الدفع بالعجلات الأربع،

فيكون المحرك داخل أو مخصص لكل عجلة، تتحرك العجلات الأربع بوقت واحد. ويرمز للنظام الدفع الرباعي

برمز (4x4) أو (4WD)، وهي مفيدة للسيارات التي تسير على طرائق غير ممهدة، أو التي من المحتمل

دخولها تلك الطرائق، وتحتوي السيارة على صندوقين، أحدهما صندوق السرعات الأساسي، والثانية علبة التعشيق،

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

والهدف منه إعطاء عزم كبير للسيارة على الطرائق الوعرة، وتوزيع هذا العزم على العجلات الأربع؛ للتغلب على العقبات التي قد تقابلها السيارة، وعند عدم تعشيق نظام الدفع الرباعي لصندوق التعشيق يكون اثنان من العجلات يعملان فقط هما المزودان للحركة، وعند التعشيق تكون السيارة ذات دفع رباعي.

أنواع نظم عمل الدفع الرباعي

يمكن القول إن نظام الدفع الرباعي نظام مرن بفضل خاصية الفصل التي تمكّن السائق من قيادة المركبة بنظام كامل أو جزئي، يعرف النظام الكلي أو نظام الدفع الرباعي المستمر بأنه مشابه لنظام الدفع الكلي بالعجلات الأربع؛ إذ تتوزع الطاقة على جميع العجلات بصورة متساوية ومستمرة، ويناسب القيادة على الطرائق الوعرة. كما أن القوة والثبات والتسارع الممتاز من أبرز ميزات الدفع الرباعي المستمر التي يتمتع بها هذا النوع من المركبات والتي تميزهم عن غيرهم بصورة كبيرة [79-82,84].

أما النظام الجزئي في الدفع الرباعي، فتتحول به المركبة إلى نظام دفع ثنائي؛ بالاعتماد على عجلتين فقط، ويناسب القيادة في الشوارع الممهدة، وهذا الفرق بين نظام الدفع الرباعي الكلي والجزئي. من ميزات الدفع الرباعي القدرة على الفصل بين نظامين، الكلي والجزئي حسب الرغبة، وتمتلك بعض سيارات الدفع الرباعي إمكانية التحويل التلقائي بين النوعين.

مكونات نظام الدفع الرباعي

تختلف آلية عمل نظام الدفع الرباعي عن النظم الأخرى، وهي الأكثر تعقيداً بسبب الأجزاء الإضافية التي يشتمل عليها. إن أجزاء نظام الدفع الرباعي في المركبة: [82-84]

- ناقل الحركة
- الأقطار الخارجية: وهي الأقطار الواصلة بين العجلات وناقل الحركة التي تعمل على توزيع الدفع بصورة متساوية.
- صندوق السرعة الإضافية.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

• محاور الدوران.

• مفاضل الحركة.

مميزات نظام الدفع الرباعي

1- يتميز هذا النظام بأنه يعطي أفضل أداء جرّ على الطرق غير الممهدة. وله قدرة على القيادة، وصعود التلال دون قلق من الانزلاق.

2- يمكن إيقاف الدفع بالأربع عجلات؛ لتقليل معدل استهلاك الوقود.

3- استقرار العجلات وثباتها على المنحدرات ومنعطفات الطريق، فهو مناسب للطرق الوعرة، وفي المناطق الثلجية أو الرملية.

4- توزيع المحرك للطاقة على العجلات الأربع بصورة متساوية، إذ تتوزع طاقة المحرك بنسب متساوية على العجلات الأمامية والخلفية، مانحة المركبة قوة جر كبيرة تمكنها من السير على الطرق الوعرة بصورة ممتازة، وتعزز من ثباتها وتماسكها على الطريق؛ فضلاً عن تسارع ممتاز على الطرق غير المستقرة، مثل: الطرق الموحلة، والمثلجة، والمليئة بالصخور

5- القدرة على العمل بإحدى نظامي الدفع الكلي أو الجزئي بحسب الرغبة. وقدرة كبيرة على سحب السيارات والأجسام الثقيلة عند العمل بنظام الدفع الكلي.

وتجدر الإشارة إلى أن عدداً من شركات تصنيع السيارات استحدثت أنواع سيارات دفع رباعي للقيادة على الطرقات المعبدة داخل المدن.

أما عيوب الدفع الرباعي:

(a) غير مناسب للمناخات المعتدلة والخالية من الثلوج وللطرقات الإسفلتية العادية.

(b) الحاجة لمساحات كبيرة ضمن المركبة بسبب زيادة المعدات.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

(c) أهم عيوب الدفع الرباعي تأتي من نواحي التكلفة بكل أشكالها، بدءاً من سعر السيارة؛ مروراً بتكلفة الصيانة الأعلى؛ وصولاً إلى التكاليف الأعلى بكثير في استهلاك الطاقة الكهربائية، والمدخرات، وكل القطع الاستهلاكية الأخرى.

(d) زيادة وزن منظومة الدفع، وتعقيدها.

(e) أكثر تكلفة مقارنة بنقل نظم الدفع عن طريق عجلتين فقط.

3- نظم الدفع الكلي

يرمز إليها برمز (AWD) ، ويكون في هذا النوع من منظومات الدفع ناقل حركة وحيد لتوزيع السرعة على العجلات الأربع، لتطبيق قوة الدفع عليها طوال الوقت كما هو مبين بالشكل (2-15)، ومع استخدام أجهزة استشعار وحساسات لمراقبة سرعة كل عجلة وتماسكها، توزيع نسبة الدفع بين المحورين الأمامي والخلفي. يتميز هذا النظام بأنه يحسن التحكم في السيارة تحت جميع الظروف كتعرج الطرق أو ميلها، ويحسن من الأداء الحركي لها. ومن عيوبه يزيد من الوزن، وتعقيد منظومة الدفع، ويرفع من استهلاك الكهرباء، ولا يقدم على الطرقات الوعرة أداء بجودة منظومة الدفع الرباعي الاعتيادية نفسها. [84,83]



الشكل (2-15) نظام الدفع الكلي (AWD).

أحمد الحمود العريفي

يمكن القول إن الفرق الأساسي يكمن في مبدأ عمل كل منهما، ففي نظام الدفع الكلي توزّع طاقة المحرك بصورة غير متساوية على العجلات الأربع كلّ حسب الحاجة، لكن في نظام الدفع الرباعي توزّع الطاقة بالتساوي على العجلات الأمامية والخلفية؛ مما يسمح للسائق بالتغيير إلى نظام الدفع الثنائي، وهو نظام الدفع بالعجلتين الذي يلائم القيادة على الطرق المعبدة .

يمكن تلخيص مزايا نظم الدفع ومساوئه بالجدول (2-5) الذي يبين مقارنة بينهما من خلال معايير عدة، أبرزها: التكلفة، وكلفة الصيانة، والعزم، ونظم التوجيه، وغيرها؛ إذ نجد من ناحية العزم أن نظم الدفع الرباعية والكلية هي التي تعطي عزمًا أكبر ثم تأتي نظم الدفع الخلفية، أما من ناحية التوجيه، فنظم الدفع الخلفية هي الأسهل للتوجيه، لأن منظومة التوجيه فيها منفصلة عن منظومة الدفع، أما نظم الدفع الأمامية، فتكون منظومة التوجيه مرتبطة مع منظومة الدفع، وهناك صعوبة في التوجيه، في حين أن نظامي الدفع الرباعي والكلية أيضاً يحتاج إلى ترابط منظومة التوجيه مع منظومة الدفع؛ مما يضيف صعوبات في توجيه المركبة. أما الكلفة فنظم الدفع الخلفي هي الأقل كلفة؛ لأنها تحتاج إلى منظومة توجيه مستقلة على عكس منظومات الدفع الأخرى التي تحتاج إلى منظومات توجيه أكثر تعقيداً لترابطها مع منظومات الدفع وتقاطع عملهما. وقد تضمنت المقارنة موضوع استهلاك التيار، وعمر المدخرة؛ إذ إن نظام الدفع الخلفي هو الأقل استهلاكاً؛ ومن ثمّ يكون عمر المدخرة هو الأطول ثم يأتي بالمرتبة الثانية نظام الدفع الأمامي؛ وذلك لحاجته لعزم أكبر من نظام الدفع الخلفي لسحب المركبة الكهربائية أما نظم الدفع الرباعية والكلية، فهي الأكثر استهلاكاً للتيار الكهربائي؛ الأمر الذي يسبب قصر عمر المدخرة الافتراضي. ومن ناحية الوزن فنظم الدفع الخلفي هي الأقل وزناً، أما المساحة أو الحيز الذي يشغله نظام الدفع فنظم الدفع الأمامي بالمرتبة الأولى. يلحظ مما سبق أن نظم الدفع الخلفي هي الأكثر مزايا، وتتفوق على باقي النظم؛ الأمر الذي يفسر أن أغلب شركات تصنيع المركبات الكهربائية يستعملون هذا النظام إلا أن لهذه النظام سلبية وهي أن درجة تعقيد خوارزمية قيادته والتحكم به عالية، وتحتاج إلى منهجيات تحكم، وقيادة أكثر دقة وفاعلية؛ مما تحتاج إليه النظم الأخرى؛ لتأمين عزم وثبات للمركبة الكهربائية، في حين أن

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

باقي النظم تعتمد على التصميم الميكانيكي؛ لتحقيق عزم أكبر وثبات أعلى؛ مما يسهل عملية قيادتها والتحكم بها.

الجدول (2- 5) جدول مقارنة بين نظم الدفع المختلفة [76-84]:

نوع نظام الدفع	أمامي (FWD)	خلفي (RWD)	رباعي (4WD)	كلي (AWD)
العزم	70%	90%	الأعلى 100%	الأعلى 100%
التوجيه	الأصعب 40%	الأسهل 100%	70%	65%
الكلفة	80%	الأرخص 100%	الأعلى 30%	40%
استهلاك الكهرباء	95%	الأقل 100%	الأعلى 20%	25%
عمر المدخرة	95%	الأطول 100%	50%	60%
الوزن	90%	الأخف 100%	الأثقل 40%	60%
المساحة أو الحيز	الأقل 100%	90%	الأكثر 40%	50%
درجة تعقيد	50%	الأعقد 40%	90%	الأقل 100%

2-6 أهمية المحرك في نظم الدفع للمركبات الكهربائية

يعتمد نظام الدفع في المركبات الكهربائية في عمله على محركات قوية؛ إذ يعد المحرك مصدر الطاقة الحركية في المركبة الكهربائية، ويعتمد نظام الدفع عليه بشدة؛ بسبب حاجته لكميات كبيرة من الطاقة الحركية؛ إذ يقوم المحرك بإرسال الحركة عبر ناقل الحركة إلى محور العجلات، الذي يقوم بدوره بتوزيع الطاقة بين العجلات الأمامية أو/والخلفية بنسب متساوية؛ وفقاً لنوع نظام الدفع المستخدم في السيارة. هذا ويمكن تشغيل ناقل الحركة وإيقافه؛ عن طريق إيقاف المحرك الكهربائي وتشغيله في بعض السيارات؛ بحسب الحاجة، وأيضاً الاختيار بين مستويات السرعة والتحكم بها؛ وذلك وفقاً لمنهجية القيادة المعتمدة للمحرك، ووفقاً لنوع المحرك.

يُصنَّع نظام الدفع باحترافية ممتازة بعدد قطع مناسب لرفع كفاءة عمل النظام دون زيادة وزن المركبة الكهربائية، إلا أن العنصر الأهم هو اختيار محرك مناسب، وقيادته بمنهجية تحكم فاعلة وقوية ومتينة تمكّن نظام الدفع من التغلب على العوائق بأنواعها المختلفة ومصادرها سواء كانت بسبب وعورة الطريق أو صعوده أو

أحمد الحمود العريفي

بسبب تغير حمولة المركبة الكهربائية أو بسبب وحولة الطريق أو بسبب تغير مناخ المنطقة، فإذا كانت منهجية قيادة المحرك فاعلة جداً وكان المحرك بعزم عالٍ عندها يكون نظام الدفع فاعلاً، ويتمتع بجميع الإمكانيات التي تمكنه من التغلب على جميع العقبات، وتجاوز السلبات.

7-2 الخاتمة:

استُعرض في هذا الفصل أبرز المحركات الكهربائية وأهمها المستخدمة في صناعة المركبات الكهربائية، والمقارنة فيما بينها؛ إذ خُلصنا إلى أن المحرك التحريضي هو الأكثر مزايا؛ الأمر الذي جعل من شركات صناعة المركبات الكهربائية تتجه نحو اعتماده في صناعتها، وقد اعتمدته في هذه الأطروحة، ثم نُمدج هذا المحرك واستُعرض النموذج الكهروميكانيكي له وبيّن أنه عبارة عن نظام كهربائي وميكانيكي، وقد تمت النمذجة في محاور الإحداثيات الثنائية؛ بالاعتماد على تحويلات بارك، كما دُرست أبرز منهجيات التحكم بهذا المحرك مع التوسع بمنهجية التحكم المباشر بالعزم التي هي موضوع الرسالة، ثم شرعنا إلى دراسة نظم الدفع في المركبات الكهربائية بجميع أنواعها الثنائية (الخلفية والامامية) والرباعية و الكلية، وتحديد محاسن كل نظام دفع ومساوئه، وإجراء مقارنة بينهما خُلصنا من خلالها إلى اعتماد نظام الدفع الثنائي الخلفي. ومنه في هذه الرسالة سيُعتمد نظام الدفع الخلفي الثنائي للمركبة الكهربائية؛ نظراً لأن مصدر الحركة هو المحرك التحريضي الذي سيُقاد بمنهجية التحكم المباشر بالعزم قبل تطويرها وبعده كما سيوضّح في الفصل التالي.

الفصل الثالث

استخدام الشبكات العصبونية لتطوير تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC والكبح بإعادة التوليد

3-1 مقدمة

إن الشبكات العصبونية أحد أهم أفرع الذكاء الصناعي وأبرزها، وهي واسعة الاستخدام في مجالات عديدة، وأبرز هذه المجالات هي الصناعة، وفي هذا البحث وظّفت الشبكات العصبونية في تطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم وتقنية الكبح بإعادة التوليد المستخدمتين في صناعة السيارات الكهربائية، إذ طوّرت مرحلة التقدير في منهجية DTC؛ باقتراح فكرة تصميم مقدر عصبوني يعمل على تقدير قيمة مقاومة الثابت التي لها دور بالغ في عملية التقدير؛ من خلال إبراز مراحل خوارزمية DTC والتوسع بمرحلة التقدير، وبيناً أثر مقاومة الثابت في مرحلة التقدير، وتأثيرها المباشر فيها، ثم بدأنا بفكرة تصميم مقدر عصبوني، وبيان مراحل هذا التصميم والمخطط الصندوقي المقترح له، كما وظّفت الشبكات العصبونية لتطوير عملية الكبح بإعادة التوليد من خلال اقتراح فكرة تصميم متحكم عصبوني؛ بدلاً من متحكم التكامل التناسبي التفاضلي التقليدي PID والتوصل إلى اقتراح مخطط التصميم، ومراحله.

3-2 مدخل إلى تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC

التحكم المباشر في العزم هي إحدى الطرائق المستخدمة للتحكم بالمحركات الكهربائية التحريضية من حيث عزم الدوران والسرعة، وتتكون من ثلاثة عناصر [85-87]:

- 1- المحرك الكهربائي التحريضي.
- 2- المقاييس التي تتضمن مقاييس التيارات والجهود.
- 3- التحكم الذي ينطوي على تقدير الفيض المغناطيسي، وعزم دوران المحرك على أساس القيم المقاسة للجهود، وللتيار من المحرك التحريضي.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

وقد سُجِّلَت براءة اختراع DTC من قبل Manfred Depenbrock في الولايات المتحدة [85] وفي ألمانيا [86]، أُودِعَت براءة الاختراع الأخيرة في 20 أكتوبر 1984، إذ سُمِّيت كلتا براءات الاختراع بالتحكم الذاتي المباشر (DSC). ومع ذلك، قدم Isao Takahashi و Toshihiko Noguchi تقنية تحكم مماثلة تسمى DTC في ورقة IEEJ المقدمة في سبتمبر عام 1984 [87]؛ وفي ورقة IEEE نُشِرَت في أواخر عام 1986 [88]؛ ومن ثم يُنسب ابتكار DTC إلى الأفراد الثلاثة.

يتمثل الاختلاف الوحيد بين DTC و DSC في شكل المسار الذي يتم التحكم على طوله في شعاع التدفق؛ إذ يكون المسار الأول شبه دائري، بينما يكون الأخير سداسياً؛ ليكون تردد تبديل DTC أعلى من DSC. وفقاً لذلك، يستعمل DTC في قيادة محركات التحريضية باستطاعات مختلفة، بينما يستعمل DSC عادةً لمحركات ذات استطاعة أعلى [89].

منذ بدء ظهور التطبيقات الصناعية في منتصف الثمانينيات في القرن العشرين، استُخدمت DTC للاستفادة منها بسبب بساطتها واستجابتها السريعة للغاية لعزم الدوران والتحكم في التدفق؛ لتحقيق أداء عالٍ للمحرك التحريضي (IM)؛ ومن ثمَّ للمركبة الكهربائية بالنسبة لبحثنا. إن تطبيقات منهجية DTC عديدة وبالأخص تلك التي تحتاج إلى محرك تحريضي، وقد طُبِّقت DTC للتحكم في الآلة في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين [90] التي تُستخدم مولدات التغذية المزدوجة بصورة شائعة في تطبيقات عنفات الرياح باستطاعة [1-3MW] ونظراً للأداء العالي والقدرة على التحكم بعزم الدوران في منهجية DTC فقد استخدمت لتطوير محركات سيرفو من قبل شركة ABB في أول إصدار لسلسلة محركات ACSM1 في عام 2007 [91]، لكن تطلب تنفيذ الخوارزمية DTC أجهزة أكثر تعقيداً وتطوراً من تلك التي تطلبتها خوارزمية التحكم الشعاعي الموجه (FOC) الأمر الذي دفع إلى تطوير هذه المنهجية منذ نهاية التسعينيات من القرن الماضي، وقد نُشِرَ عددٌ من الأوراق البحثية حول DTC وتعديلاته، مثل تعديل متجه فراغ التبديل، والذي يوفر تردد تبديل ثابت [92]. وفي منتصف العقد الأول

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

من القرن الحادي والعشرين ظهر عدد من براءات اختراع الخاصة بتطوير منهجية DTC وتطبيقاتها في الصناعة لعدد من الشركات؛ كشركة Depenbrock، والشركات الأخرى منها ABB وغيرها. وتُعدّ منهجية DTC حلاً بديلاً لمنهجيات التحكم الشعاعي الموجّه التقليدية لإمكانية التحكم المباشر بالعزم [93]، وقد استخدمت في التحكم بمحركات ذات استطاعات عالية أيضاً [94]، ولم يقتصر استخدامها على محركات الكهربائية التحريضية؛ بل تعدت ذلك إلى أنواع أخرى من المحركات؛ كمحركات التيار المستمر عديمة المسفرات، وقد أعطت استجابات ديناميكية عالية، وأثبتت فاعليتها [95].

3-3 أهمية تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC في الصناعة

تُعدّ منهجية DTC من أبرز خوارزميات القيادة والتحكم المستخدمة في الصناعة، وفي عدد من المنتجات الصناعية الناجحة التي تتمتع بمزايا وقدرات عالية، ومن أبرز الشركات التي استخدمت هذه المنهجية والتي طورتها هي الشركة الألمانية ABB؛ إذ برعت في استخداماتها الصناعية التي تضمنت تطبيقات الجر من أواخر الثمانينيات للقاطرات [96-98]، وقد استخدمت في قطارات طراز DE502 و DE10023 التي تعمل بالديزل والكهرباء [99]، وأدى استخدام خوارزمية DTC إلى إطلاق عائلة محركات ACS600 عام 1995. وقد تبعت محركات ACS600 منذ ذلك الحين سلسلة محركات تستخدم خوارزمية DTC للقيادة والتحكم، منها محركات ACS800 و ACS880، وجميعها تستخدم منهجية DTC للقيادة والتحكم [100-104].

ويعود تطبيق منهجية DTC بصورة واسعة في الصناعة لأسباب عديدة، وتمتعها بكثير من الخصائص والميزات والتي يمكن وصفها على النحو الآتي [100-108]:

1- يمكن تغيير عزم الدوران والتدفق بسرعة كبيرة عن طريق تغيير القيم المرجعية.

2- أبدت كفاءة عالية، وضياعات قليلة.

3- استجابة العزم والسرعة لا تحتوي على تجاوزات كبيرة.

4- تتم جميع الحسابات في نظام الإحداثيات الديكارتية.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

- 5- إمكانية التحكم بعزم الدوران بصورة خطية.
 - 6- تردد تبديل الترانزستورات ليس ثابتاً. ومع ذلك، من خلال التحكم في عرض النبضة، يمكن الاحتفاظ بمتوسط تردد التبديل تقريباً عند قيمته المرجعية. هذا أيضاً يحافظ على تموج التيار، وعزم الدوران.
 - 7- تتم عملية التبديل بصورة عشوائية؛ وفقاً لقيم زاوية الفيض، ومطاله المقدرين؛ فضلاً عن العزم المقدر؛ ومن ثمّ لن نحصل على جهود تحكم بالآلة طنينية؛ مما يؤدي إلى تخفيض الضوضاء المسموعة للآلة.
 - 8- إمكانية العمل باستطاعة ثابتة للحصول على عزم منخفض عند سرعات كبيرة أو عزم مرتفع عند سرعات منخفضة.
 - 9- دقة عالية في السرعة الثابتة والديناميكية.
 - 10- يمكن التحكم بأنواع مختلفة من المحركات بواسطة DTC؛ بما في ذلك المغناطيس الدائم.
 - 11- لا حاجة لمعرفة سرعة المحرك في 95% من التطبيقات؛ ومن ثمّ يمكن تجنب تركيب أجهزة التشفير والحساسات المكلفة.
 - 12- إمكانية العمل بعزم ثابت بصورة مستقلة عن السرعة.
 - 13- إمكانية العمل بعزم متغير أيضاً عند وجود حمولة متغيرة.
- هذه المزايا الواضحة لمنهجية DTC تقابلها الحاجة إلى معدل أخذ عينات أعلى (يصل إلى 40 KHZ)؛ مما يؤدي إلى زيادة فقدان التبديل. وفي حالة التشغيل بسرعات منخفضة؛ بما في ذلك التشغيل ذي التردد الصفري، ولحل هذه المشكلة يمكن إضافة حساس السرعة والموضع إلى النظام؛ مما يضيف زيادة في التكاليف وحجم الدارة. لكن عند استخدام حساس في منهجية DTC ، فإنه يمكن الحفاظ على الدقة العالية لعزم الدوران والتحكم في السرعة في نطاق السرعة بالكامل، والتحكم الدقيق في عزم الدوران والسرعة؛ وصولاً إلى السرعات المنخفضة، وكذلك عزم الدوران الكامل لبدء التشغيل حتى الصفر.

3-4 مبدأ تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC

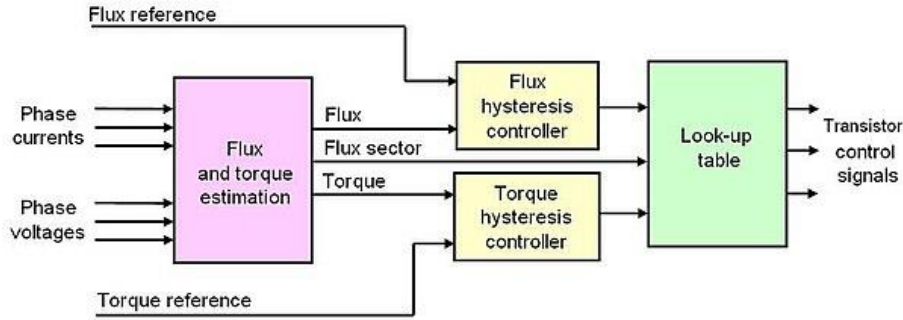
تمكنت منهجية DTC من تحقيق أداء غير مسبوق في المحركات التحريضية ثلاثية الطور، ووفرت بصورة كبيرة الطاقة الكهربائية المستهلكة من خلال مطابقة سرعة المحرك، وعزم الدوران مع متطلبات الحمل. وبما أن عملية التحكم بالمحركات التحريضية ثلاثية الطور تعتمد على مرحلة التبديل التي تعمل على ضبط مدخلات الجهد والتردد للمحرك في أغلب خوارزميات التحكم كما هو الحال بخوارزمية $V/F = const$ ، ولكن هذا الأمر يسبب تأخيراً زمنياً في معالجة إشارات التحكم. لذلك، فإن منهجية DTC تستخدم تحكماً مباشراً في عزم الدوران المحرك التحريضي ثلاثي الطور؛ مما يؤدي إلى زيادة استجابة عزم دوران المحرك بصورة كبيرة. ومنه توفر تقنية DTC مزايا تجعل من محركات التحريضية ثلاثية الطور ذات أداء عالٍ؛ لأن تقنية التحكم المباشر في عزم الدوران (DTC) تتحكم في تدفق المحرك، وعزم الدوران بصورة مباشرة؛ بدلاً من محاولة التحكم في التيارات الكهربائية بصورة غير مباشرة، مما يعني دقة أفضل، ومطابقة لمتطلبات حمل المحرك.

أما مبدأ عملها، فيقوم على توليد نبضات قرح المبدلة بناء على تقدير التدفق أو الفيض للجزء الثابت من خلال دمج مركبات التدفق للجزء الثابت بعد تقديرها من قيم الجهود المقاسة. ثم يقدّر عزم الدوران كخرج مقدر العزم المرتبط بالتيارات اللازمة لتقدير التدفق للجزء الثابت المقدر، وقيمة سرعة المحرك. ثم يُقارن حجم التدفق المقدر وعزم الدوران بقيمتيهما المرجعية. إذا انحرف التدفق المقدر أو عزم الدوران بعيداً عن التسامح المرجعي، تولّد نبضات قرح لإيقاف تشغيل الترانزستورات الخاصة بمحرك التيار التحريضي ثلاثي الطور وتشغيله، بطريقة تعود فيها أخطاء التدفق وعزم الدوران إلى مجالاتها المسموحة بأسرع ما يمكن. ومن ثم، فإن التحكم المباشر في عزم الدوران هو أحد أشكال التحكم في التباطؤ أو التسارع للمحرك. ويمكن القول إن خلاصة مبدأ عملها، كما هو مبين بالشكل (3-1) تُقاس التيارات phase currents والجهود phase voltages، ثم عن طريقها يُقدّر الفيض flux وزاوية الفيض flux sector، والعزم، ثم يقارن الفيض المقدر مع الفيض المرجعي flux reference في حلقة التحكم الخاصة بالفيض، في حين يقارن العزم المقدر مع العزم المرجعي في حلقة التحكم

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

الخاصة بالعزم، وبناءً على مخرجات حلقتا التحكم وزاوية الفيض المقدرة، تُحدّد إشارات التحكم بالترانزستورات عن طريق قيم مرجعية مجدولة؛ كما هو موضح بالجدول 2-4 لتوليد جهود تشغيل المحرك حتى تُلغى قيم الخطأ أو تُقلّل في الفيض والعزم.



الشكل (3-1) مخطط مبدأ خوارزمية التحكم المباشر بالعزم.

3-5 مرحلة التقدير في تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC

كما يتضح من الفقرة السابقة أن أساس توليد إشارات التحكم بالترانزستورات، هو مخرجات حلقتا التحكم وزاوية الفيض المقدرة؛ فضلاً عن أن حلقتي التحكم تعتمدان أيضاً على القيم المقدرة؛ إذ إن الأداء الدقيق لهذه الخوارزمية يتضمن الحفاظ على التقدير الدقيق؛ ومن ثمّ تُعدّ مرحلة التقدير جزءاً أساسياً وجوهرياً في خوارزمية التحكم المباشر بالعزم؛ حيث إنه إذا لم يكن التقدير دقيقاً سيُحدّد شعاع الجهد المطلوب بصورة خاطئة، وقد يؤدي هذا إلى فشل الخوارزمية تماماً، كما أن وجود مرحلة التقدير يؤدي إلى عدم الحاجة لحساسات السرعة أو الموضع؛ لذلك فإن عملية التقدير حظيت باهتمام بالغ والتي يمكن إنجازها بآليات عديدة، من أبرزها؛ نموذج محرك التقدير لكنه يُعدّ أكثر تعقيداً، لكن هذا النموذج استخدم في عدد من الشركات، منها شركة ABB، كما هو مبين بالشكل (3-2)، يُلاحظ من الشكل أن عملية التقدير تتم من خلال نموذج محرك متكيف adaptive motor model، وقد أضيفت إلى حلقة التحكم بالفيض إمكانية فصل الطاقة، وفصل التدفق المرجعي، لكن تُعدّ هذه الإضافات عبارة عن عمليات تحكم، أما خوارزمية التحكم المباشر بالعزم الأساسية تتكون من ثلاث مراحل، وهي:

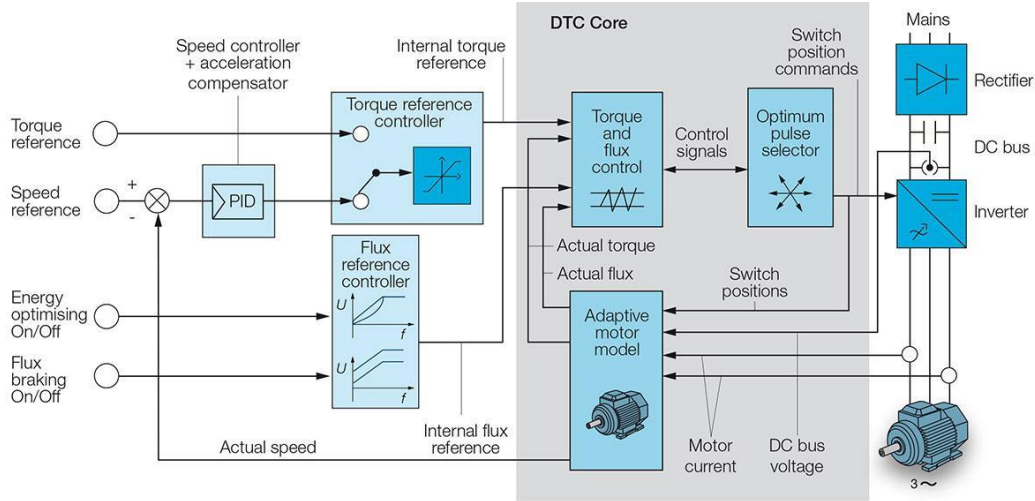
التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

1- وحدة التقدير: وهي في النموذج المبين بالشكل (2-3) نموذج المحرك المتكيف.

2- حلقتي التحكم بالعزم والفيض.

3- توليد النبضات الخاصة بفتح ترانزستورات المبدل وإغلاقها.



الشكل (2-3) خوارزمية التحكم المباشر بالعزم المستخدمة في شركة ABB.

ويجب ألا تحتوي قيم الجهد المقاسة للجزء الثابت على خطأ في قيمتها، وإن وجد هذا الخطأ يجب أن يكون منخفضاً قدر الإمكان؛ من أجل الحفاظ على انخفاض خطأ تقدير التدفق. تعمل طريقة التحكم المباشر بالعزم بصورة جيدة للغاية حتى بدون حساسات للسرعة. ومع ذلك، فإن تقدير التدفق يعتمد عادة على تكامل جهد الطور الحركي كما هو مبين بالمعادلات (2-9)، وتعدُّ عملية التقدير من خلال مكاملة الجهود من أكثر الطرائق المستخدمة في عملية التقدير؛ لأنها أقل تعقيداً من استخدام نموذج محرك في عملية التقدير، وتعطي تقديراً مباشراً لمركبتي الفيض، لكنها تتعلق بمقاومة الثابت، ولها أثر كبير فيها، ومنه، فإن مقدار الفيض بكل أنواعه يتأثر بتغير محددات المحرك من جهة، ومن جهة أخرى يتأثر بالضجيج، وإن المقدّر هو عبارة عن نظام غايته تقدير الفيض والعزم [109-111].

ومنه يمكن القول إن خلاصة مرحلة التقدير في عملية التحكم المباشر بالعزم، تعد عملية أساسية وجوهرية في التحكم المباشر بالعزم، ومهمتها تقدير الفيض، وزاويته والعزم اللازمين لحلقتي التحكم، وتتأثر بمحددات المحرك؛

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

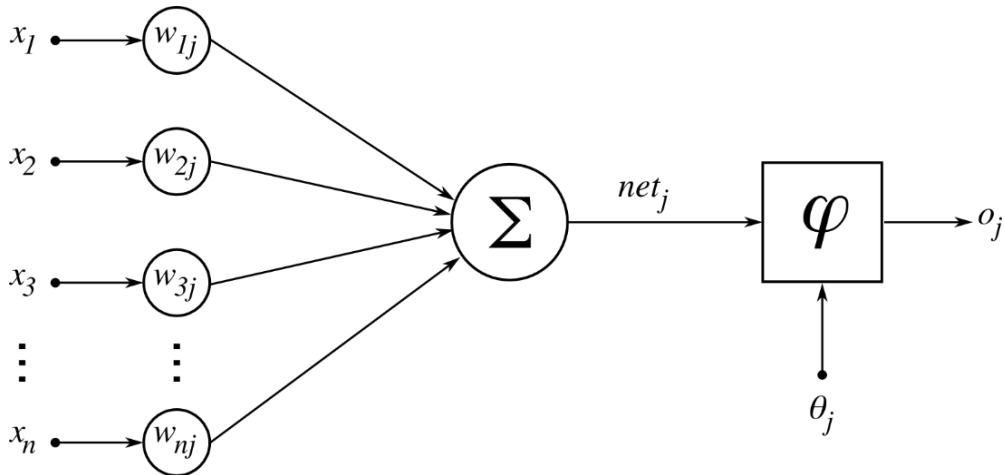
وبالأخص مقاومة الثابت بأنواع المقدرات المختلفة سواء كانت نموذجاً مرجعياً أو معادلات تكامل [110-112]. ومنه يجب دراسة تأثير مقاومة الثابت على عملية التقدير.

3-6 تغيير Rs في تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC

كما بيناه في الفقرة (2-4-4) ومجموعة المعادلات (9-2)، فإن لمقاومة الثابت أثر كبير في عملية تقدير الفيض وزاويته، ففي السرعات العالية، لا تكون خوارزمية DTC حساسة لأيّ من محددات المحرك بشكل كبير إذا لم تكن هناك حمولات كبيرة على المحرك المتحكم به. ومع ذلك، عند السرعات المنخفضة، يصبح الخطأ في مقاومة الجزء الثابت المستخدم في تقدير تدفق فيض الثابت حرجاً؛ بسبب الأخطاء الحتمية في قياس الجهد، وتقدير مقاومة الجزء الثابت، تميل التكاملات إلى أن تصبح خاطئة عند السرعة المنخفضة. ومن ثم لا يمكن التحكم في المحرك إذا كان تردد خرج محرك التحريضي ثلاثي الطور صفراً أو قريباً من الصفر. كما أن ارتفاع درجة حرارة المحرك تغير من قيمة مقاومة الثابت بصورة مؤكدة؛ مما يؤثر بصورة كبيرة في عملية التقدير في خوارزمية التحكم المباشر بالعزم [112-114] ومع ذلك، من خلال التصميم الدقيق للمقدر الذي يُعدّ الأساس في حلقتي التحكم، من الممكن أن يكون الحد الأدنى للتردد في نطاق 0.5 هرتز إلى 1 هرتز أو حتى أقل، وهو ما يكفي لإتاحة بدء تشغيل المحرك التحريضي بعزم دوران كامل من حالة التوقف التام. ويمكن أيضاً عكس اتجاه الدوران إذا كانت السرعة تمرّ عبر النطاق الصفري بسرعة كافية لمنع انحراف تقدير التدفق المفرط. وفي هذه الأطروحة صممنا مقدرًا عصبونيًا بالاعتماد على الشبكات العصبونية حتى يتمّ تحسين عملية التقدير؛ مما ينعكس إيجاباً على منهجية التحكم المباشر بالعزم، وذلك لما لمرحلة التقدير من أثر كبير في أداء خوارزمية DTC؛ وبالأخص مقاومة الثابت التي تتغير بتغير الأحمال، ودرجة الحرارة.

7-3 بناء مقدر عصبوني في تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC

بصورة عامة يمكن القول إن كل شبكة عصبونية ترتب بصورة طبقات من الخلايا الصناعية؛ وهذه الطبقات هي: طبقة الدخل، وطبقة الخرج، وطبقات بينهم تسمى طبقات خفية تتواجد بين طبقتي الدخل والخرج. كل خلية في إحدى هذه الطبقات تسمى عصبوناً، ويتصل خرجها بجميع العصبونات الموجودة في الطبقة التالية، وجميع العصبونات في الطبقة السابقة. وهذا العصبون الصناعي هو عبارة عن محاكاة لأداء العصبون البيولوجي، وقد تدرجت عملية تطوير هذه المحاكاة حتى الوصول إلى بنية العصبون المبينة في الشكل (3-3)، إذ في البداية وجد العلماء أن الخلايا العصبية تقوم بعملية جمع الإشارات القادمة إليها من وصلات الدخل؛ فإذا كان لدينا خلية عصبية ذات وصلتين مثلاً، فكل وصلة تحمل إشارة وتكون النتيجة، هي محصلة الإشارات بالجمع العادي، وثم وجدوا أن كل عصبون يستطيع أن يقوم بتكبير الإشارات الواردة إليه أو تصغيرها على وصلاته، فأضيف عامل اسمه عامل الوزن (Weighting Factor)، فإذا كان هناك خلية لها مدخلان مثلاً فتُضرب الإشارة الأولى في معامل الوزن الخاص بدخل العصبون الأول، وكذلك الأمر نفسه للدخل الثاني، ومن ثم تُجمع النواتج، كما وجد أن نواة العصبون تتفاعل مع ناتج الجمع؛ لتعطي خرجاً هو الناتج النهائي للعصبون، وعلى ذلك بُني النظام الهندسي للخلايا الصناعية، كما هو مبين بالشكل (3-3) [116-114].



الشكل (3-3) بنية العصبون الصناعي.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

تتصل عصبونات الشبكة الصناعية ببعضها البعض، وكلّ اتصال بين عصبون، وآخر يتميز بقيمة تدعى الوزن (Weighting) وهي تشكل مدى أهمية الارتباط بين هذين العنصرين، يقوم العصبون بضرب كل قيمة دخل واردة من عصبونات الطبقة السابقة بأوزان وصلاته مع هذه العصبونات، ثم جمع نواتج الضرب جميعاً، ثم إخضاع النتيجة لتابع تحويل أو تفعيل يختلف حسب نوع العصبون، ناتج تابع التحويل أو التفعيل يُعدّ خرج العصبون الذي ينقل إلى عصبونات الطبقة اللاحقة، كما هو مبين بالشكل (3-3)؛ إذ إنّ:

X_1 : الدخل الأول.

X_2 : الدخل الثاني.

X_n : الدخل رقم n .

w_{1j} : الوزن الواصل بين الدخل الأول والعصبون j .

w_{nj} : الوزن الواصل بين الدخل n والعصبون j .

net_j : خرج ناتج عقدة الجمع في العصبون j .

θ_j : الانزياح في العصبون j .

O_j : خرج العصبون j .

φ : تابع التفعيل، وهو أحد توابع التفعيل المبينة في الجدول (3-1).

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

الجدول (3-1): توابع التفعيل المستخدمة في العصبونات الاصطناعية:

Activation function	Equation	Example	1D Graph
Unit step (Heaviside)	$\phi(z) = \begin{cases} 0, & z < 0, \\ 0.5, & z = 0, \\ 1, & z > 0, \end{cases}$	Perceptron variant	
Sign (Signum)	$\phi(z) = \begin{cases} -1, & z < 0, \\ 0, & z = 0, \\ 1, & z > 0, \end{cases}$	Perceptron variant	
Linear	$\phi(z) = z$	Adaline, linear regression	
Piece-wise linear	$\phi(z) = \begin{cases} 1, & z \geq \frac{1}{2}, \\ z + \frac{1}{2}, & -\frac{1}{2} < z < \frac{1}{2}, \\ 0, & z \leq -\frac{1}{2}, \end{cases}$	Support vector machine	
Logistic (sigmoid)	$\phi(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$	Logistic regression, Multi-layer NN	
Hyperbolic tangent	$\phi(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}}$	Multi-layer Neural Networks	
Rectifier, ReLU (Rectified Linear Unit)	$\phi(z) = \max(0, z)$	Multi-layer Neural Networks	
Rectifier, softplus	$\phi(z) = \ln(1 + e^z)$	Multi-layer Neural Networks	

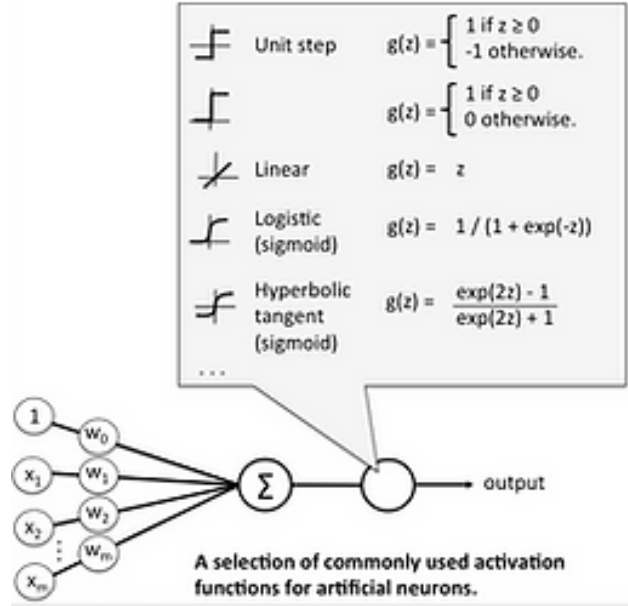
Copyright © Sebastian Raschka 2016
(<http://sebastianraschka.com>)

تُعدُّ وظيفة التنشيط أو التفعيل activation أو تسمى أيضاً التحويل أو النقل transferring مفهوماً مهماً في الذكاء الصناعي. فمن المهم تنشيط الخلية العصبية؛ بإدخال تابع تنشيط إلى عصبونات الشبكة العصبية. والغرض الرئيس من هذه الوظيفة هو تحويل إشارة الدخل للخلايا العصبية، وإنتاج مخرجات لتغذيتها في الخلية العصبية التالية في الطبقة التالية. يوضّح الشكل (3-4) كيف تعمل وظيفة التنشيط في الشبكة العصبية، حيث هناك عدد

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

من أنواع توابع التنشيط التي يمكن استخدامها في الشبكات العصبية. ويبين الجدول (3-1) توضيح بعض التوابع شائعة الاستخدام، مثل Sigmoid.



الشكل (3-4) نموذج العصبون الصناعي.

إن النموذج المبين بالشكل (3-4) هو محاكاة لأبسط أشكال الخلايا العصبية الصناعية المكونة من عصبون واحد، أما الخلايا العصبية البيولوجية، فهي أكثر تعقيداً، فالخلايا العصبية البيولوجية قادرة على تغيير معاملات العصبونات Plasticity وهذا معناه أنها قادرة على تغيير تشكيلها لمناسبة أقصى مجهود مطلوب بأقل الوصلات. وتتم عملية التغيير هذه بطريقتين: إما طريقة اسمها Long Term Plasticity وهذا معناه تغيير معاملات العصبونات، وتغيير وظيفة الخلايا الصناعية، وهذا معروف فمثلاً خلايا النظر في الكفيف تغير وظيفتها بعد زمن معين من عدم العمل إلى وظيفة خلايا سمعية، وهذا يتم عن طريق تغيير المعاملات. والطريقة الأخرى هي Short Term Plasticity وهذا معناه أن الخلايا العصبية قادرة على تغيير حجم الإشارة الخارجة منها حسب الوقت والظروف؛ بمعنى أنه في بعض الأحيان يكون الخارج منها مكبراً بصورة كبيرة، وبعض الأحيان الأخرى يكون الخارج مصغراً، ما زالت الأسباب غير معروفة حتى الآن، لذلك فإنه لا يوجد قاعدة حتمية لبناء

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

شبكة عصبونية ببنية محددة من عدد الطبقات والعصبونات في كل طبقة ثلاث مسألة علمية ما. أما مجالات

تطبيق الشبكات العصبونية، فهي متنوعة منها [114-118] :

- الذكاء الاصطناعي أو ما يسمى ذكاء الآلة.

- التعرف إلى الأشخاص

- التعرف إلى الصوت أو الصورة أو غيرهما.

- التعرف إلى الخطوط والكتابة باليد.

- التحكم، والقيادة الآلية.

- محاكاة النظم.

- النمذجة.

- الترشيح.

- التقدير.

وموضوع بحثنا هو في مجال التقدير لتحقيق أفضل عملية تقدير لمقاومة الجزء الثابت للمحرك التحريضي ثلاثي

الأطوار بالشبكات العصبونية الاصطناعية؛ مما ينعكس إيجاباً على عملية التقدير؛ ومن ثم على حلقتي التحكم

الموجودة في منهجية DTC، ومنه إلى تحديد حالات أدق لفتح الترانزستورات وإغلاقها الخاصة بالمبدل؛ مما

يؤدي بالنتيجة إلى تحسين أداء خوارزمية التحكم المباشر بالعزم؛ مما ينعكس على عملية قيادة المركبة الكهربائية

ذات المحرك التحريضي المستخدم فيها كمصدر للتزويد بالحركة. ومنه يجب علينا الفهم الدقيق للشبكات

العصبونية، وصولاً لاقتراح وتصميم مخمن أو مقدر عصبوني لمقاومة الجزء الثابت في المحرك التحريضي.

تعدّ الشبكات العصبونية الاصطناعية، أو اختصاراً الشبكات العصبونية: مجموعة متوازية من وحدات المعالجة

الصغيرة والبسيطة التي تدعى بالعقد أو العصبونات المبينة بالشكل (3-3)، في حين تكتسب الوصلات البينية

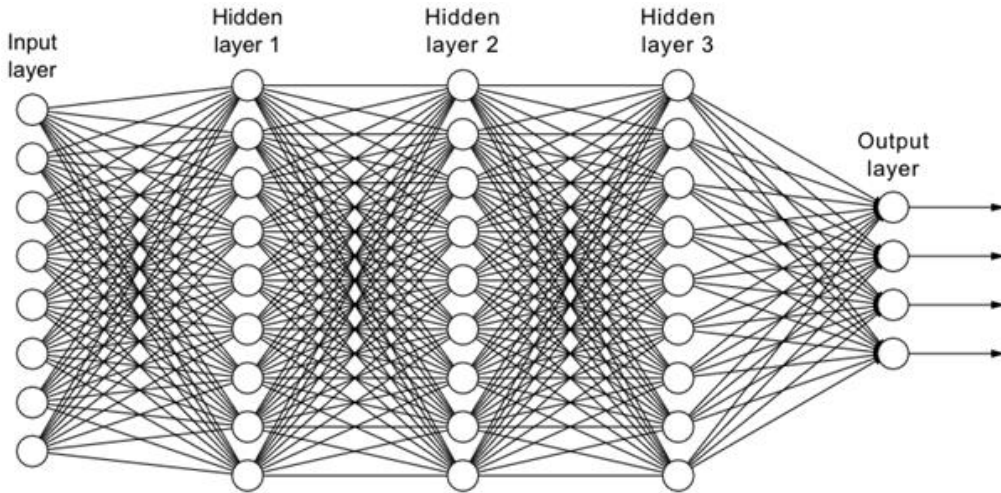
بين مختلف هذه الوحدات أهمية خاصة؛ لأنها تقوم بدور كبير في تحقيق ذكاء الشبكة، لكن رغم أن الفكرة أساساً

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

مستوحاة من آلية عمل العصبونات الدماغية، فيجب ألا نخلط كثيراً أو نشابه بين الدماغ والشبكات العصبونية، فالشبكات العصبونية أصغر وأبسط من العصبونات البيولوجية، وهي مجرد وحدات افتراضية تُنشئها برامج الحاسب، كما إن آلية عمل العصبونات الاصطناعية تحاكي بعض ميزات العصبون البيولوجي ولا تشابهه تماماً؛ بالمقابل قد أُضيف عددٌ من ميزات المعالجة وتقاناتها إلى العصبونات الاصطناعية بناءً على أفكار رياضية أو هندسية، وهذه الإضافات أو أساليب العمل الجديدة بعضها مقتبس من الرياضيات أو من نظرية المعلومات، ولا ترتبط بالعصبونات البيولوجية أبداً. بالمقابل تبدي الشبكات العصبونية ميزة مهمة كان الدماغ يتفرد بها ألا وهي التعلم، وهذا ما يمنح هذه الشبكات أهمية خاصة في الذكاء الصناعي.

يبين الشكل (3-5) بنية شبكة عصبونية مكونة من طبقات عدة، فكل عقدة عصبونية تتلقى مجموعة من المدخلات عن طريق وصلاتها بالعصبونات السابقة، وكل عقدة لها تابع تفعيل activation function أو تابع تحويل transfer function، يحدد للعقدة متى وكيف تعمل في أي لحظة، وقيمة الخرج التي يجب أن تعطىها [115-117].



الشكل (3-5) بنية شبكة عصبونية صناعية.

إن أبسط توابع التحويل هو تابع قيمة العتبة الذي يعمل العصبون على أساسه: معطياً قيمة 1 إذا كان المجموع لقيم الدخل أكبر من قيمة معينة تدعى العتبة و 0 إذا كان المجموع أقل من العتبة. لكن توابع التحويل يمكن لها

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

أن تأخذ أشكالاً أخرى أكثر تعقيداً أهمها تابع السيغمويد (التابع الأسّي). بصورة عامة معظم توابع التحويل تحول قيمة المجموع لقيم الدخل إلى قيمة وحيدة محصورة في المجال $[0,1]$.

كما تجدر الإشارة إلى أنه يوجد أنواع مختلفة من الشبكات العصبونية، وإن من أهم أنواع الشبكات العصبونية: الشبكة العصبونية أمامية التغذية، وهي مجموعة عقد عصبونية مرتبة بصورة طبقات. ترتبط هذه العصبونات ببعضها عادة، لكي يرتبط كل عصبون في طبقة ما بجميع العصبونات في الطبقة التالية، ولا ترتبط عصبونات الطبقة نفسها ببعضها، كما بيّنا في الشكل (3-5)، والشكل النموذجي لهذه الشبكات هو ثلاث طبقات عصبونية على الأقل تدعى: طبقة دخل input layer، وطبقة مخفية hidden layer، وطبقة خرج output layer.

طبقة الدخل لا تقوم بأي عملية معالجة، فهي ببساطة مكان تغذية الشبكة بشعاع البيانات، وتقوم طبقة الدخل بعد ذلك بتغذية نقل المعلومات إلى الطبقة المخفية، ثم تغذي الطبقة المخفية طبقة الخرج. إن المعالجة الفعلية للبيانات Data تتم في الطبقة المخفية، وطبقة الخرج أساساً.

عندما يكون هناك عدد كافٍ من العصبونات لجعل الشبكة قادرة على التدريب training للقيام بأشياء مفيدة؛ بالاستعانة بخوارزميات التدريب training algorithm. تعتبر الشبكات أمامية التغذية مهمة جداً؛ خاصة في استخدامات التقدير والتصنيف.

ومن أبرز أنواع الشبكات العصبونية [115-119]:

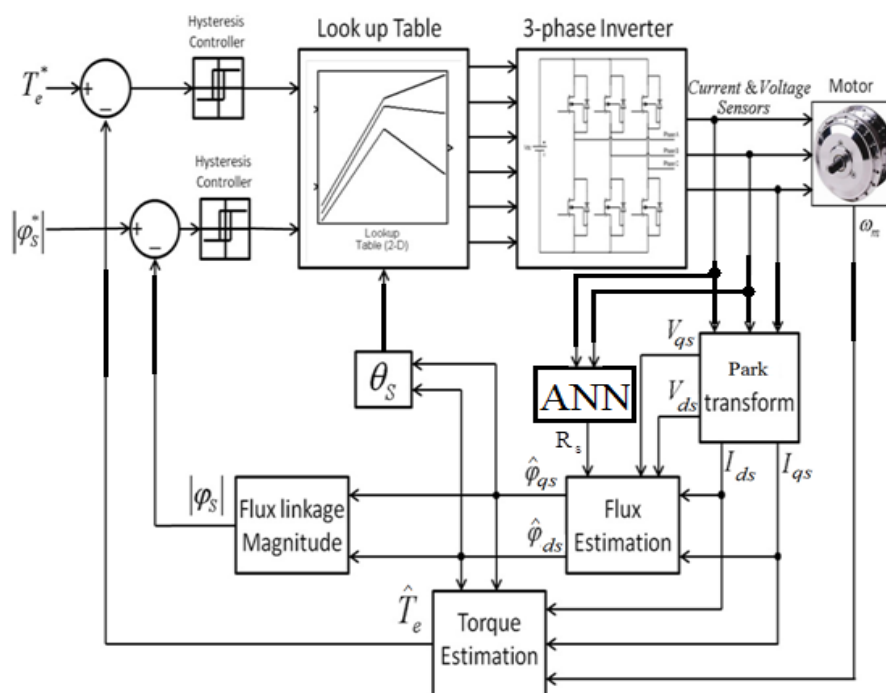
- البيروسترون Perceptron
- شبكات عصبونية أمامية التغذية Feedforward Neural networks، أهمها: شبكات عصبونية أمامية

التغذية خلفية النقل Backpropagation Feedforward Neural networks.

وفي بحثنا سنستخدم الشبكات العصبونية ذات التغذية العكسية لتقدير قيمة مقاومة الثابت، وإن عملية تصميم هذه الشبكة تحتاج لمعرفة البنية بعد اعتماد آلية تعليم للشبكة العصبية، وهناك عددٌ من خوارزميات التعلم، أهمها Back Propagation algorithm، وهي خوارزمية تعتمد على نشر الخطأ من الأمام إلى الخلف لضبط

أوزان الشبكة. إن هذه الخوارزمية المعتمدة في بحثنا، وكما أسلفنا تعاني طريقة التحكم المباشر بالعزم التقليدية عند وجود أحمال كبيرة من تغير قيمة مقاومة الثابت R_s نتيجة الأثر الحراري للتيارات الكبيرة نسبياً، كما بيّنا في فقرة (2-4-4)، يؤدي التغير في قيمة مقاومة الثابت إلى عدم الدقة في تقدير الفيض، كما تشير مجموعة المعادلات (2-9)، لذلك اقترح في هذا البحث إضافة شبكة عصبونية لطريقة DTC لتقدير قيمة مقاومة الثابت من تيارات دخل المحرك في أثناء الأحمال الكبيرة، كما يبين الشكل (3-6). وقد حدّدت ببنية الشبكة العصبونية بناءً على عدد مداخلها ومخارجها كما يأتي:

2- طبقة الخرج: تحتوي على عصبون واحدٍ ليقابل قيمة مقاومة الثابت R_s .



الشكل (3-6) المخطط الصندوقى لتقنية التحكم المباشر بالعزم المطورة بالشبكة العصبونية DTC-ANN.

يبين الشكل (3-7) بنية الشبكة العصبونية المستخدمة وشكلها؛ لتطوير تقنية التحكم المباشر بالعزم؛ إذ لم تُعَدَّ بنية الشبكة العصبونية لهدفين:

1-التقليل من الكلفة الحسابية.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

2- ملائمة البيئة المقترحة مدخلات الشبكة، ومخرجاتها.

يعطى نموذج الشبكة العصبونية المقترح بالمعادلة الآتية:

$$R_s = f_2(W_s f_1(W_I I + B_I) + b_3) \quad 3-1$$

إذ: b_3 -انزياح عصبون الخرج.

B_I - مصفوفة انزياحات طبقة الأولى (الخفية) $B_I = [b_1 \quad b_2]^T$

W_I - مصفوفة أوزان عصبونات طبقة الأولى (الخفية) $W_I = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} \\ w_{21} & w_{22} \end{bmatrix}^T$

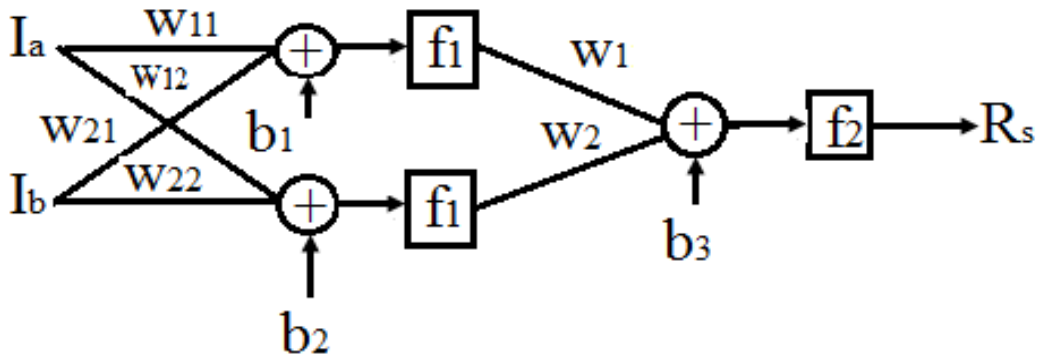
f_1 - تابع تنشيط طبقة الدخل وهو تابع tangent sigmoid ويعطى بالمعادلة الآتية:

$$f_1(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad 3-2$$

W_s - مصفوفة أوزان عصبون طبقة الخرج $W_s = [w_1 \quad w_2]^T$

f_2 - تابع تنشيط طبقة الخرج، وهو تابع Linear، ويُعطى بالمعادلة التالية:

$$f_2(x) = x \quad 3-3$$



الشكل (3-7) بنية متحكم الشبكة العصبونية الصناعية المستخدمة؛ لتطوير تقنية التحكم المباشر بالعزم

DTC-ANN.

3-8 مبدأ الكبح بإعادة التوليد

نظام الكبح بإعادة التوليد regenerative Braking System هو نظام فرملة يُولّد طاقة كهربائية في أثناء عمل الفرملة، وذلك بتحويل الطاقة الحركية إلى طاقة كهربائية، وتستخدم الطاقة المولّدة لشحن المدخّرة لتشغيل المركبة فيما بعد، ويقوم مبدأ الكبح بإعادة التوليد على "قانون الحفاظ على الطاقة" الذي ينص على ما يأتي: "الطاقة لا تفنى ولا توجد من العدم؛ بل تتحول من شكل إلى آخر". ومنه كما هو مبين بالشكل (3-8) في نظام الكبح بإعادة التوليد نميز حالتين:

1- عند تشغيل المركبة تتحول الطاقة الكهربائية الموجودة في المدخّرة إلى طاقة حركية في دوران العجلة بوساطة المحرك الذي يستجّر الطاقة من المدخّرة.

2- عند تطبيق الكبح: تتحول الطاقة الحركية الموجودة في دوران العجلة إلى طاقة كهربائية تستخدم في إعادة شحن المدخّرة بوساطة المحرك الذي يعمل كمولّد في الاتجاه المعاكس.

ويمكن توضيح مراحل الكبح بإعادة التوليد بالمرحلتين الآتيتين:

• في أثناء سير المركبة الكهربائية: تتم الخطوات الآتية:

(1) عند بدء تشغيل السيارة، تزوّد وحدة التحكم الطاقة الكهربائية من المدخّرة إلى المحرك.

(2) لذلك يبدأ المحرك بالدوران؛ أي إنه يحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية.

(3) بسبب دوران المحرك، تبدأ عجلات السيارة أيضًا بالدوران مع المحرك. ويصبح لديها طاقة حركية.

• أما عند تطبيق الكبح تتم الخطوات الآتية:

(1) عندما يُطبّق السائق الفرامل، يفصل جهازُ التحكم مصدرَ الطاقة الكهربائية عن المحرك.

(2) في هذه اللحظة تمتلك العجلاتُ طاقةً حركيةً تزود المحركَ بالطاقة الدورانية، ويدور المحرك مع العجلات.

(3) لذلك يعمل المحرك كمولّد وينتج الطاقة الكهربائية.

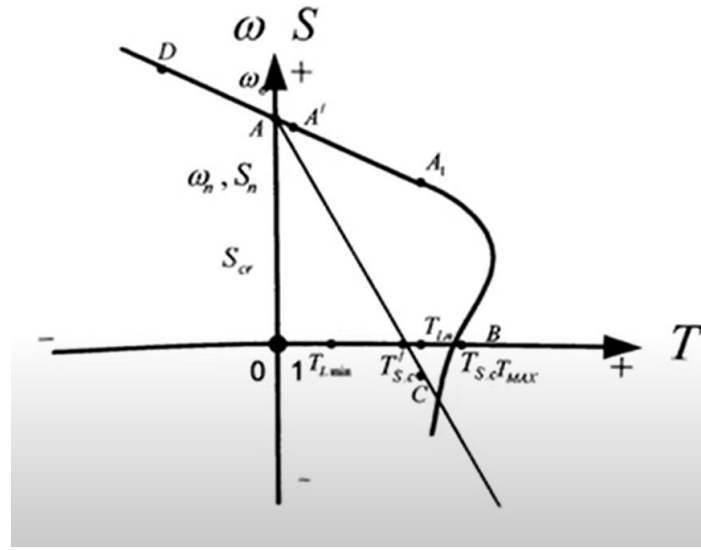
(4) تستقبل وحدة التحكم هذه الطاقة الكهربائية من المولّد ثم يبدأ شحنُ المدخّرة.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

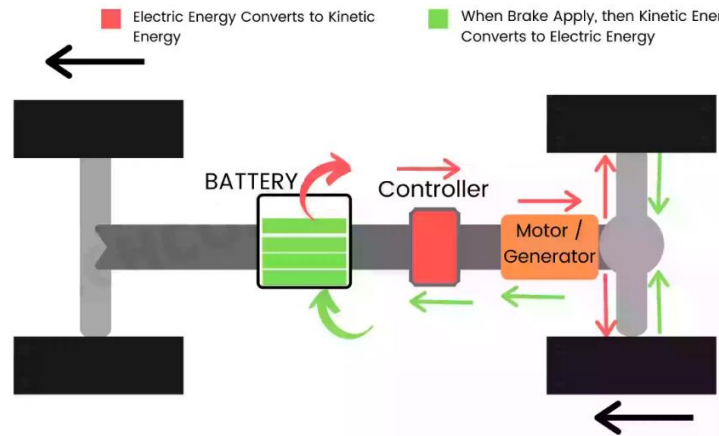
(5) عندما يدور المحرك بسبب الطاقة الحركية للعجلات، ينتج المحرك القوة المحركة الكهربائية العكسية التي تساعد على إيقاف دوران العجلة.

ويظهر في الشكل (8-3) منحنى الخاصية الميكانيكية للمحرك والذي يظهر آلية انتقال المحرك من حالة العمل في الربع الأول إلى حالة الكبح مع إرجاع القدرة إلى المصدر (العمل كمولد) في الربع الثاني.



الشكل (8-3) منحنى الخاصية الميكانيكية للمحرك التحريضي ثلاثي الأطوار

كما تجدر الإشارة إلى أن عملية الكبح بإعادة التوليد ليست مطبقة في المركبات الكهربائية فقط، بل طُبِّقت في القطارات الكهربائية أيضاً.

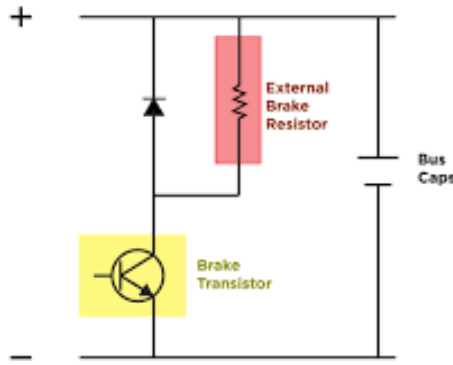


الشكل (9-3) مبدأ الكبح بإعادة التوليد في السيارات الكهربائية.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

يعتمد نظام الكبح بإعادة التوليد على وجود مدخلة موصولة على التفرع من قطبيها الموجب والسالب مع نظام طاقة مساعد يتكون من مكثف على التفرع، ومقاومة شحن موصولة على التسلسل مع مفتاح إلكتروني، كما هو مبين بالشكل (3-10). يتم التحكم بالمفتاح الإلكتروني عن طريق منظم تناسبي تكاملي PI الذي سيُشرح في الفقرة التالية، أما المنهجية المتبعة في هذه الأطروحة، فهي تصميم متحكم عصبوني، بدلاً منه والتي سيُتطرق لها في الفقرة التي تلي فقرة منظم PI.



الشكل (3-10) دائرة الكبح بإعادة التوليد في المركبات الكهربائية.

3-9 المتحكم التناسبي التكاملي التقليدي

يبين الشكل (3-11) نموذج متحكم تناسبي تكاملي (Proportional Integral) PI. تُعطى معادلاته الزمنية بالعلاقة الآتية:

$$g(t) = k_p V(t) + k_I \int_0^t v(t).dt \quad 3-4$$

إذ:

g : خرج المتحكم وهو الجهد المطبق على قاعدة المفتاح الإلكتروني.

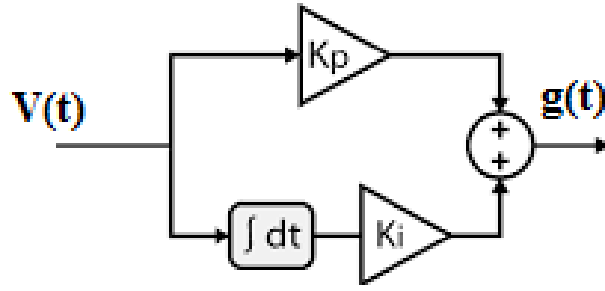
k_p : ثابت التناسبي.

k_I : ثابت التكاملي.

$V(t)$: جهد الخرج وهو جهد دخل المتحكم، وهو جهد المدخلة والمكثف.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي



الشكل (3- 11) نموذج متحكم تناسبي تكاملي.

10-3 بناء متحكم عصبوني

يبين الشكل (3-12)، نظام الكبح المقترح، بوجود متحكم عصبوني صناعي، يتكون هذا المتحكم من طبقتين من

العصبونات، ويُعطى بالمعادلة الآتية:

$$g = f_2(w_2 f_1(w_g g_{-1} + w_u u_{-1} + w_r r + b_1) + b_2) \quad 3- 5$$

إذ:

w_2 : وزن الطبقة الثانية.

b_2 : انزياح الطبقة الثانية

f_2 : تابع تنشيط الطبقة الثانية، وهو تابع الخطي، يُعطى بالعلاقة:

$$y = x \quad 3- 6$$

w_g : وزن الطبقة الأولى الموصول إلى خرج المتحكم بعد تأخيره بمقدار واحد g_{-1} .

w_u : وزن الطبقة الأولى الموصول إلى خرج النموذج المتحكم به بعد تأخيره بمقدار واحد u_{-1} .

w_r : وزن الطبقة الأولى الموصول إلى خرج النموذج المرجعي بعد تأخيره بمقدار واحد r_{-1} .

f_2 : تابع تنشيط الطبقة الأولى، وهو تابع tansig، يُعطى بالعلاقة [118-119]:

$$y = (2/(1+e^{-2x})) - 1 \quad 3- 7$$

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

أما نموذج المدخنة، فهو نموذج مدخنة الليثيوم، ويعطى بالمعادلة الآتية [120]:

$$I_{bat} = V_{bat} + R_{int} E_{bat} \quad 3-8$$

إذ:

I_{bat} : تيار المدخنة

V_{bat} : جهد المدخنة.

R_{int} : المقاومة الداخلية للمدخنة.

E_{bat} : القوة المحركة الكهربائية للمدخنة: وهي عبارة عن منبع جهد متحكم به يتغير؛ وفقاً لحالة المدخنة؛ إذ نميز

حالتين؛ حالة تفريغ: يكون فيها تيار الحالة العابرة $i^* > 0$. وحالة شحن: يكون تيار الحالة العابرة $i^* < 0$ ،

ويعطى بالعلاقة:

$$E_{bat} = \begin{cases} E_0 - K \frac{Q}{Q - i_t} i^* - K \frac{Q}{Q - i_t} i_t + Ae^{-Bi_t} & i^* > 0 \\ E_0 - K \frac{Q}{0.1.Q + i_t} i^* - K \frac{Q}{Q - i_t} i_t + Ae^{-Bi_t} & i^* < 0 \end{cases} \quad 3-9$$

إذ:

E_0 : الجهد الثابت، ويقدر بالفولط.

K : ثابت بولتزمن (Ah^{-1}) أو مقاومة بولتزمن (Ω).

Q : السعة الأعظمية للمدخنة، وتقدر بالأمبير الساعي Ah .

i_t : السعة المسحوبة من المدخنة وتقدر بالأمبير الساعي Ah .

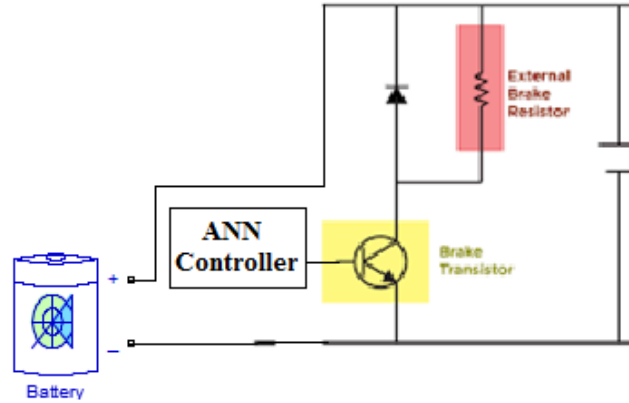
A : الجهد الأسّي، ويقدر بالفولط.

B : السعة الأسية، وتقدر (Ah^{-1}).

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

تعمل المدخنة بنظام الشحن عند إجراء الكبح بإعادة التوليد؛ إذ يكون التيار سالباً؛ أي إن اتجاه التيار من محرك المركبة الكهربائية إلى المدخنة. أما عند سير المركبة، فتعمل المدخنة بحالة التفريغ، وتكون مصدر التغذية لمحرك المركبة.



الشكل (3- 12) نظام الكبح المقترح بإعادة التوليد بوجود متحكم عصبوني.

11-3 - الخاتمة

اقترح في هذا الفصل تطوير تقنية التحكم المباشر بالعزم، باستخدام الشبكات العصبونية لمعالجة أثر تغير قيمة مقاومة ملفات ثابت المحرك لتقدير العزم. تُقدر هذه التقنية قيمة المقاومة؛ بالاعتماد على التيارات المستجرة للمحرك؛ مما يسهم في تحسين عملية التقدير التي بدورها تؤثر إيجاباً في عملية التحكم المباشر بالعزم؛ من خلال تحسين العزم الكهرومغناطيسي، وتقليل الخطأ الساكن والديناميكي لعزم المحرك، وإنقاص التأرجح فيه. وينعكس كل ذلك على الانسيابية والسلاسة في قيادة المحرك المستخدم لتحريك المركبة الكهربائية. كما دُرِس في هذا الفصل الشبكات العصبونية، ومبدأ الكبح بإعادة التوليد، واقتراح آلية تطوير أداء مركبة كهربائية؛ من خلال زيادة عزم محركها، واستجابتها لمستويات سرعات عالية نسبياً دون حدوث قصور في الأداء أو انخفاض سرعتها؛ نتيجة انخفاض العزم اللازم لحركتها، وذلك من خلال الحفاظ على مستويات مناسبة لجهد مدخنة المركبة الكهربائية، بوساطة شحنها عن طريق التيار الناتج عن الكبح بإعادة التوليد؛ مع وجود نظام طاقة مساعد؛ إذ اقترح تطوير أداء نظام الكبح بإعادة التوليد فيها بتطوير متحكم عصبوني؛ بدلاً من متحكم تناسبي تكاملي.

الفصل الرابع

استخدام المنطق العائم لتطوير خوارزمية DTC

4-1 مقدمة

قد بينا في الفصول السابق مدى أهمية خوارزمية التحكم المباشر بالعزم، وأنها مستخدمة بصورة واسعة في مجالات صناعية عديدة، ومنها صناعة السيارات الكهربائية. وتعود أهميتها لسببين رئيسيين؛ الأول: إمكانية التحكم المباشر بالعزم عن طريق حلقة التحكم بالعزم؛ بدلاً من التحكم بالفيض، والسبب الثاني: هو عدم الحاجة إلى حساسات سرعة للتحكم بالسرعة، وهذا السبب الأجدى اقتصادياً الذي جعلها أكثر استخداماً، ويعود هذا السبب لوجود مرحلة التقدير estimation في هذه الخوارزمية التي تقدر الفيض، وعلى أساسه يتم التحكم بالسرعة والعزم؛ بمعنى آخر أن هذه الخوارزمية قائمة على عملية التقدير فيها، وتبرز قوتها من قوة المقدر، وبما أن المقدر يعتمد على مقاومة الثابت، التي قد تتغير مع تغير درجات الحرارة والتيارات المسحوبة من قبل المحرك بسبب تأثيرها الحراري، لذلك كان لابد من إعطاء قيمة مقاومة الثابت بدقة لمرحلة التقدير؛ مما يؤدي إلى تقدير أفضل للفيض، وزيادة دقة خوارزمية التحكم المباشر بالعزم؛ لذلك في هذا الفصل سنطور هذه الخوارزمية بتطوير مرحلة التقدير فيها، باستخدام مقدر عائم يقدر قيمة مقاومة الثابت بدقة؛ مما يؤدي إلى زيادة دقة أداء خوارزمية التحكم المباشر بالعزم، وتقليل التذبذبات والتأرجحات في إشارة العزم للمحرك المتحكم به، وذلك بعد دراسة مفهوم المنطق العائم ومبدأ عمله، وكيفية انتقاء مجموعات الانتماء، وتصميم محرك الغموض؛ بهدف بناء مقدر عائم لتقدير مقاومة ثابت المحرك؛ بغاية تطوير مرحلة التقدير في خوارزمية DTC؛ مما يزيد من دقتها وفعالية أدائها.

4-2 مفهوم المنطق العائم:

المنطق العائم fuzzy logic هو أحد أشكال المنطق الذي يستخدم في بعض النظم الخبيرة، وتطبيقات الذكاء الاصطناعي، أنشأه عام 1965 العالم أذربيجاني الأصل (لطف زاده) من جامعة كاليفورنيا إذ طوره ليستخدمه كطريقة لمعالجة البيانات بصورة أفضل، لكن نظريته لم تلق اهتماماً حتى عام 1974؛ إذ استخدم المنطق العائم في تنظيم سرعة محرك بخاري، ثم تطورت تطبيقاته حتى وصلت لتصنيع شريحة منطق عائم، والتي استعملت في عددٍ من المنتجات كآلات التصوير. هناك عددٌ من الأسباب التي دفعت العلماء إلى تطوير علم المنطق العائم. فمع تطور الحاسوب والبرمجيات نشأت الرغبة في اختراع نظم أو برمجتها يمكنها التعامل مع المعلومات غير الدقيقة على غرار الإنسان، وهذا الأمر حلّ مشكلة كبيرة، وهي عدم إمكانية الحاسوب التعامل إلا مع معطيات دقيقة ومحددة، فمثلاً عندما يقال: الشاب طويل فإنه قد أعطى المتغير «الشاب» القيمة «طويل»، وهي قيمة غير محددة تماماً في المنطق التقليدي، في حين يمكن إعطاؤها معنىً محدداً في المنطق العائم؛ لأنه بالإمكان استنتاج معلومات عن متغير لغوي من متغير لغوي آخر، مثل قول: "إذا كانت الأرض زلقة، خفف السرعة"؛ ومن ثَمَّ من المتغير اللغوي، وهو "زلقة" استنتج وجود "التخفيف" ومقدار هذا التخفيف يحدده مقدار زلقة الأرض، والأمر نسبي بغض النظر عن قيمة محددة. ومنه فإن المنطق العائم يقوم بالتوجه إلى التعامل مع المعطيات النسبية غير محددة القيمة لحل المسألة العلمية. وقد نتج عن هذا التوجه ما يعرف بالنظم الخبيرة أو الذكاء الاصطناعي؛ إذ يُعد علم المنطق العائم أحد النظريات التي يمكن من خلالها بناء مثل هذه النظم. يُعد المنطق العائم بالمعنى العام منظومة منطقية تعم على المنطق التقليدي ثنائي القيم، وذلك للاستدلال على القيم بدقة في ظروف غير محددة. وبالمعنى الخاص فهو نظريات وتقنيات تستخدم المجموعات العائمة التي هي مجموعات بلا حدود قطعية. ويمثل المنطق العائم طريقة سهلة لتوصيف الخبرة البشرية وتمثيلها، كما أنه يقدم الحلول العملية للمشاكل الواقعية، وهي حلول بتكلفة فعالة ومعقولة. ويُستخدم المنطق العائم في عدد من

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

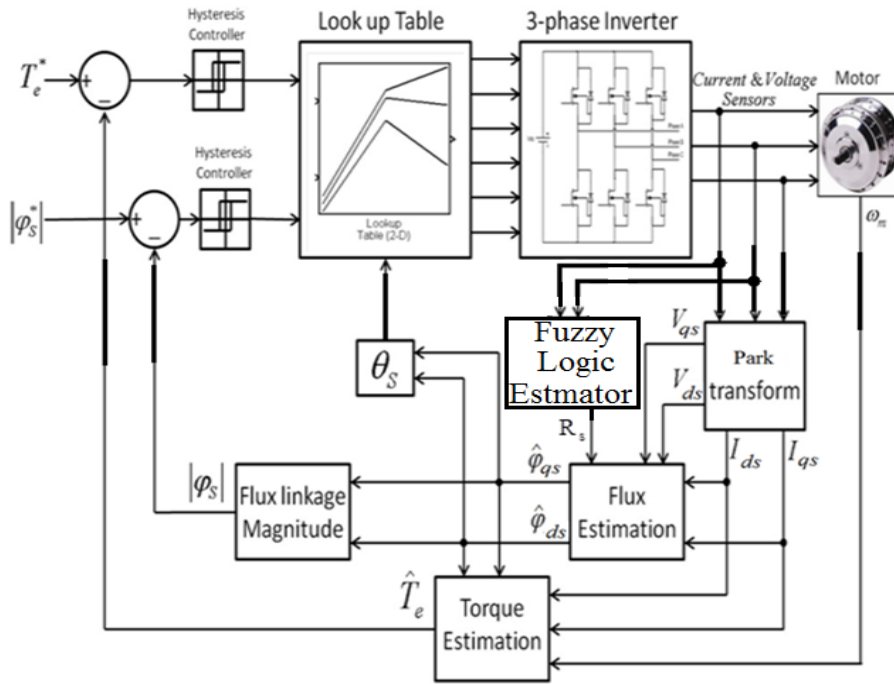
أحمد الحمود العريفي

المجالات، وأبرزها: مجالا الذكاء الاصطناعي، وتحكم العمليات وهما مجالا رسالتنا فقد استُخدم الذكاء الاصطناعي في الفصل الثالث للتحكم في العمليات الخاصة بتقدير قيمة مقاومة الثابت [121-125]. ويستخدم في تحكم العمليات؛ إذ يرتبط تحكم العمليات process control بالتحكم الآلي automatic control، لذلك كما هو مبين بالشكل 4-1 سيُستخدم في رسالتنا لتطوير خوارزمية التحكم المباشر بالعزم؛ بدلاً من استخدام الشبكات العصبونية الذي تم في الفصل الثالث؛ إذ يقدّر المقدّر العائم قيمة مقاومة ملف الثابت من التيارات المسحوبة؛ ليقدمها إلى مرحلة تقدير التدفق؛ مما يزيد من دقة خوارزمية DTC التي اصطلحنا عليها اسم خوارزمية التحكم المباشر المحسّنة بالمنطق العائم DTC-FLE (Direct Torque Control – Fuzzy Logic Estimator).

كما تجدر الإشارة إلى أن المنطق العائم يطبق على عدد من المجالات، وتتضمن معظم تطبيقات المنطق العائم في تقدير المتغيرات للآلة بناء على المدخلات الآتية من الحساسات. وفيما يأتي بعض تطبيقات المنطق العائم:

- آلات تصوير الفيديو الآلية: التي تقوم على حساس حركة الأشياء التي تصورها الكاميرا [121].
- السيارات: توفير إمكانية التحكم في السرعة cruise control؛ إذ تحسب دارة المنطق العائم التسارع والتحكم في حقن المزيد من الوقود أو تشغيل الفرامل [122].
- التكييف: تكون مهمة المنطق العائم القيام بتخفيض الحرارة أو رفعها تدريجياً حتى الوصول إلى المستوى المطلوب [123].
- غلايات السفن: يراقب المنطق العائم درجة الحرارة والضغط والمحتوى الكيميائي؛ للمحافظة على الاستقرار [124].
- الغسالات الآلية: مراقبة الحمل، ونوعية الأنسجة، وكمية المنظف؛ لتحقيق الأمثلة optimize the cycle في دورة الغسل [125].

أحمد الحمود العريفي



الشكل (4-1) المخطط الصندوقي لمنهجية التحكم المباشر بالعزم المطورة بالمخمن العائم DTC-FLE.

من المعروف في المنطق التقليدي أن المتغير يأخذ إحدى القيمتين $\{0, 1\}$ أي $\{F, T\}$ ؛ أي {False خطأ، True صح}، فإذا أُخذت على سبيل المثال المجموعة الشاملة X ، وكانت A هي مجموعة جزئية من المجموعة X ؛ فإن أي عنصر من عناصر المجموعة الشاملة إما أن ينتمي إلى المجموعة الجزئية A ، وإما لا ينتمي إلى هذه المجموعة. فإذا أخذت مجموعة أشخاص كمجموعة شاملة، وأخذت مجموعة الأطفال الذين عمرهم $10 \leq$ سنوات كمجموعة جزئية A من مجموعة الأشخاص، فإن الشخص إما أن ينتمي إلى مجموعة الأطفال A ، وإما لا ينتمي، وبذلك يكون الشخص الذي عمره عشر سنوات ويوم واحد قد فقد طفولته فجأة.

يقدم المنطق العائم حلاً مناسباً لمثل هذه الحالات، إذ تُسند درجة انتماء للمتغير من المجال الحقيقي $[0,1]$ ؛ بدلاً من المجموعة $\{0,1\}$ تساعد على تحديد انتماء العنصر إلى المجموعة الجزئية، مثلاً يسند للشخص الذي عمره 3 سنوات درجة انتماء لمجموعة الأطفال 0.8 والشخص في سن 10 سنوات درجة انتماء 0.4، وأما في سن 13 سنة درجة انتماء 0.1.

أحمد الحمود العريفي

وقد حقّق المنطق العائم تطورات كبيرة في شتى مجالات التطبيقات، وقد استخدمت مفاهيمه في بناء أول فرن لصناعة الإسمنت في الدانمارك عام 1975. وما لبث أن تبعته منتجات عدة تراوحت بين آلات الغسيل، وآلات التصوير، فمكيفات الهواء الصناعية، والمضخات وكان لها تطبيقات مثلى في بناء النظم الخبيرة خاصة الطبية. من اللافت أن هذا العلم، ومنذ البداية استحوذ على اهتمام كبير من قبل الصينيين واليابانيين، وتم تجاهله من قبل الولايات المتحدة الأمريكية والدول الأوروبية، إلا أنه في أواخر الثمانينيات من القرن العشرين حدثت تطورات كبيرة، وظهرت أفكار عديدة في هذا الاختصاص؛ مما دعا الجميع للاهتمام به. وتلاحقت في الآونة الأخيرة المنتجات والابتكارات والأفكار الصناعية التي تعتمد على أفكار المنطق العائم كأساس لها.

4-3 مبدأ المنطق العائم

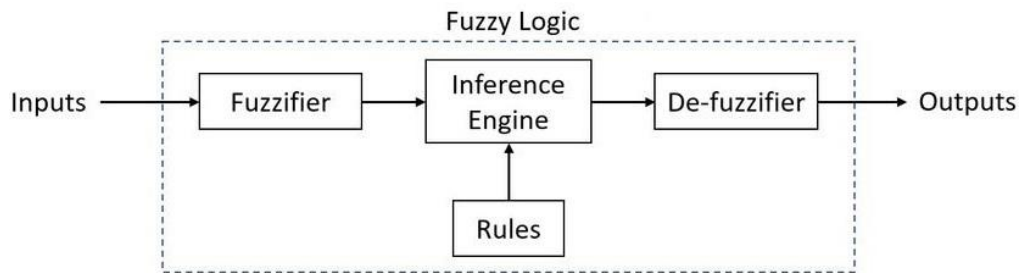
المنطق العائم: هو طريقة رياضية تسمح بحل المشاكل العلمية مع عدد من متغيرات المدخلات والمخرجات، وهو قادر على إعطاء نتائج على شكل توصية لفترة محددة من حالة الخرج؛ لذلك من الضروري أن تُميز هذه الطريقة الرياضية بدقة عن منطق جبر بول الأكثر شيوعاً. تحتوي هذه الفقرة على نظرة أساسية لمبادئ المنطق العائم. عادة ما توصف نظم التحكم أو نماذج التقدير من خلال النماذج الرياضية التي تتبع قوانين الفيزياء أو النماذج العشوائية أو النماذج التي ظهرت من المنطق الرياضي، كمثال على ذلك في بحثنا نموذج التقدير الذي يعتمد على معادلات التقدير أو الذي يعتمد على نمذجة المحرك التحريضي ثلاثي الطور. لكن تتمثل الصعوبة العامة لإيجاد هذه النماذج في كيفية الانتقال من مشكلة معينة إلى نموذج رياضي مناسب، وبالأخص عند عدم معرفة آلية التغير في مسائل التقدير كما هو الحال في بحثنا؛ إذ يكون تغير مقاومة الثابت تبعاً للتيارات المسحوبة التي تتعلق بالحمولة المتغيرة بصورة غير محددة، وذلك وفقاً لحمولة المركبة الكهربائية. لكن مما لا شك فيه أن تكنولوجيا الحاسوب المتقدمة تجعل ذلك ممكناً؛ من خلال تصميم مقدر بطريقة قادرة على التعامل مع تغير مقاومة الثابت غير المحددة، ومثل هذه النظم لا تزال معقدة للغاية من الناحية الرياضية في جبر بول. أما في المنطق العائم؛ فيمكن تبسيط هذه النظم المعقدة من خلال استخدام هامش مقبول لمقدار معقول

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

من عدم الدقة، والغموض، وعدم اليقين في أثناء مرحلة النمذجة. ونتيجة لذلك، لم يظهر نظام كامل تماماً، لكن مع ذلك، فإنه في معظم الحالات يكون النموذج قادراً على حل المشكلة بالطريقة المناسبة. حتى معلومات الدخل الناقصة تظهر بالفعل على أنها كافية في النظم القائمة القائمة على المعرفة، وليس المقادير الدقيقة. يسمح المنطق العائم بتقليل التعقيد من خلال السماح باستخدام المعلومات غير الكاملة بطريقة معقولة. ويمكن تنفيذه في الأجهزة أو البرامج أو كليهما. بعبارة أخرى، إن نهج المنطق العائم للتحكم في المشكلات يحاكي الطريقة التي يتخذ بها الشخص القرارات، ولكن بصورة أسرع. يمكن وصف طرائق التحليل المنطقي العائم والتحكم الموضحة في الشكل 2-4 على النحو الآتي:

- 1- يتم تلقي عدد واحد أو أكثر من القياسات أو المحددات الخاصة بتقويم الظروف الموجودة في نظام ما سيتم تحليله أو التحكم فيه وتخضع لعملية التعميم fuzzification بوساطة ما يسمى المعمم fuzzifier.
- 2- تعالج جميع المدخلات المستلمة، وفقاً لقواعد العموم (الغموض) "if-then" المبهمة المستندة إلى خبرة الإنسان، والتي يمكن التعبير عنها بكلمات لغة بسيطة، ودمجها مع المعالجة التقليدية غير القائمة في محرك الربط interface engine.
- 3- يُحسب المتوسط وتُرجَّح النتائج من جميع القواعد الفردية في قرار أو إشارة خرج واحدة تحدد ما يجب فعله أو تخبر النظام الخاضع للرقابة بما يجب القيام به؛ وفقاً لعملية فك التعميم defuzzification التي يقوم بها فاك التعميم De-fuzzifier. إشارة الخرج الناتجة هي قيمة محددة نسبية. فيما يأتي رسم تخطيطي لطريقة التحليل؛ وفق المنطقي العائم:



الشكل (2 - 4) المخطط الصندوقي لنظام المنطق العائم.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

من أجل تفعيل المنطق العائم، يجب تمثيله بالأرقام أو الأوصاف فعلى سبيل المثال، يمكن تمثيل السرعة بقيمة 5m/sec أو بالوصف "بطيء". لكن يمكن أن يكون لمصطلح "بطيء" معنى مختلف إذا استخدمه أشخاص مختلفون، ويجب تفسيره وفقاً للبيئة المرصودة. إنه من السهل تصنيف القيم العددية لأنها محددة، بينما يصعب تحديد القيم الوصفية؛ بسبب فهم الإنسان للمواقف بطريقة مختلفة. فيمكن للمرء أن يقول "بطيء"، بينما يمكن للآخر أن يقول "ليس سريعاً" عند وصف السرعة نفسها. لذلك تُميّز هذه الاختلافات بمساعدة ما يسمى بالمجموعات العائمة أو ما يطلق عليها بمجموعات الانتماء التي تمثل وفق توابع رياضية. وتستخدم هذه المجموعات في مرحلتي التعميم وفك التعميم، إذ عادةً ما يتكون النظام المنطقي العائم من أربعة عناصر رئيسية كما هو مبين في الشكل 4-2، واجهة التعميم، ومحرك الاستدلال العائم، ومصفوفة قواعد التعميم، وواجهة إلغاء التعميم. سنُشرّح مجموعات الانتماء، وكل جزء مع العمليات المنطقية العائمة الأساسية بمزيد من التفصيل في الفقرة التالية.

4-4-4 توابع الانتماء ، ومجموعاته

قبل الحديث عن توابع الانتماء ومجموعاته يجب معرفة بعض العمليات الأساسية في المنطق العائم؛ والمصطلحات الأساسية المتعلقة بهذه المجموعات من أجل فهم آلية عمل المنطق العائم بصورة كاملة [126].

المجال العام **Universe of Discourse**: هو مجال القيم التي تضم جميع الاحتمالات الممكنة لمدخلات المنطق العائم. وفي بحثنا هو مجال تيارات الدخل الموضّحة بالشكل 4-1، والتي تكون ضمن نطاق قيم تيارات المحرك المستخدم.

مجموعة التعميم **Fuzzy Set**: هي المجموعة الكلية لدرجات انتماء مجموعة القيم الجزئية المشكلة

للمجموعات الجزئية للقيمة X

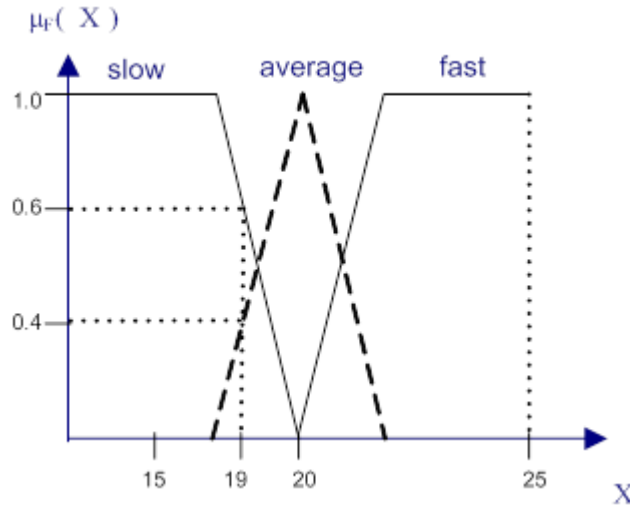
$$\mu: X \rightarrow [0,1]$$

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

توابع الانتماء Membership Function: هو تمثيل بياني يحدد توزيع درجات الانتماء لكل

مجموعة جزئية، كما هو مبين بالشكل 3-4، الذي يبين توابع الانتماء لثلاث مجموعات تعميم، وهي بطيء (slow) ومتوسط (average) وسريع (fast) لمتحول التعميم وهو السرعة، المجال العام يظهر جميع القيم الممكنة للسرعة، مثال $X=19$ فهذا يعني أن السرعة $X=19\text{km/h}$ ، وهي بالنسبة لمجموعة التعميم "بطيء" تعطي درجة انتماء 0.6، أي $\mu_{\text{slow}}(19) = 0.6$ وبشكل مشابه، فإن درجة انتماء هذه السرعة لمجال السرعة المتوسطة $\mu_{\text{average}}(19) = 0.4$ أم لمجال السرعة العالية $\mu_{\text{fast}}(19) = 0$.



الشكل (3-4) مثال عن توابع الانتماء في نظام المنطق العائم.

الإسناد Support: إسناد المجموعة العائمة F هو مجموعة القيم الواضحة من الفضاء أو المجال

العام U التي تابع الانتماء عندها لا يساوي الصفر.

$$\mu_F(u) > 0$$

نقطة التقاطع أو العبور Crossover point: هي قيمة في المجال العام U التي تجعل قيمة تابع

الانتماء 0.5.

المركز Centre: مركز مجموع التعقيم هو القيمة أو القيم التي تجعل قيمة تابع الانتماء يأخذ أعظم

قيمة.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

أشكال توابع الانتماء :

يبين الشكل (4-4) أشكال توابع الانتماء المختلفة المستخدمة في المنطق العائم [127]. وهذه

التوابع هي كالآتي:

a- التابع المثلثي: triangular هو التابع الأكثر استخداماً في المنطق العائم؛ لأنه يعطي توزعاً منظماً؛ وفق النسبة الأعظمية في مجموعة جزئية، وهو ما يلائم المنطق العائم، ويستعمل في أغلب المسائل البحثية؛ كالتقدير، والتنبؤ، والتنظيم، والتحكم، واتخاذ القرار.

b- تابع شبه المنحرف: trapezoidal يستخدم في الحالات التي تتطلب وجود ثبات مجالين عند القيمة الأعظمية، وغالباً ما سٌستخدم في المسألة التنظيمية.

c- تابع غاوص: Gaussian يستخدم في الحالات التي تتطلب وجود ثبات عند القيمة الأعظمية؛ مع تغيرات ناعمة عند أطراف مجموعة الانتماء الجزئية.

d- تابع غاوص ثنائي الجانب: Two sided Gaussian يستخدم في الحالات التي تتطلب وجود ثبات مجالي عند القيمة الأعظمية؛ مع تغيرات ناعمة عند أطراف مجموعة الانتماء الجزئية.

e- تابع الجرس: bell يستخدم في الحالات نفسها التي يستخدم فيها غاوص ثنائي الجانب.

f- تابع sigmoid الأيمن: يستخدم في الحالات التي تكون فيها المجموعة الجزئية التالية محققة لانتماء ما قبلها.

g- تابع sigmoid الأيسر: يستخدم في الحالات التي تكون فيها المجموعة الجزئية التالية نافية لانتماء ما قبلها.

h- تابع sigmoid التفاضلي: وهو يستعمل في الحالات التي تكون فيها المجموعة الجزئية التالية غير محققة وغير نافية لانتماء ما قبلها.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

i- تابع sigmoid الجدائي: يستخدم في الحالات التي تكون فيها المجموعة الجزئية التالية غير

محقة، وغير نافية لانتماء ما قبلها.

j- تابع كثير الحدود polynominal Z : يستخدم في الحالات التي تكون فيها المجموعة الجزئية

التالية نافية لانتماء ما قبلها.

k- تابع كثير الحدود polynominal S : يستخدم في الحالات التي تكون فيها المجموعة الجزئية

التالية محقة لانتماء ما قبلها.

l- تابع كثير الحدود polynominal PI : يستخدم في الحالات التي تكون فيها المجموعة الجزئية

التالية غير محقة، وغير نافية لانتماء ما قبلها.

والشكل الأكثر شيوعاً هو: الشكل المثلثي، إذ يختار الشكل المناسب وفقاً للمسألة العلمية البحثية

المدرسة، ولكن يمكن أيضاً استخدام شكل الجرس، أو شبه المنحرف، أو الغاوصي. لن تتطلب التتابع الأكثر

بساطة حوسبة معقدة؛ ومن ثمّ التقليل من التعقيد الحسابي، ومنه لن تفرط في التنفيذ، ولن تأخذ زمناً كبيراً نسبياً،

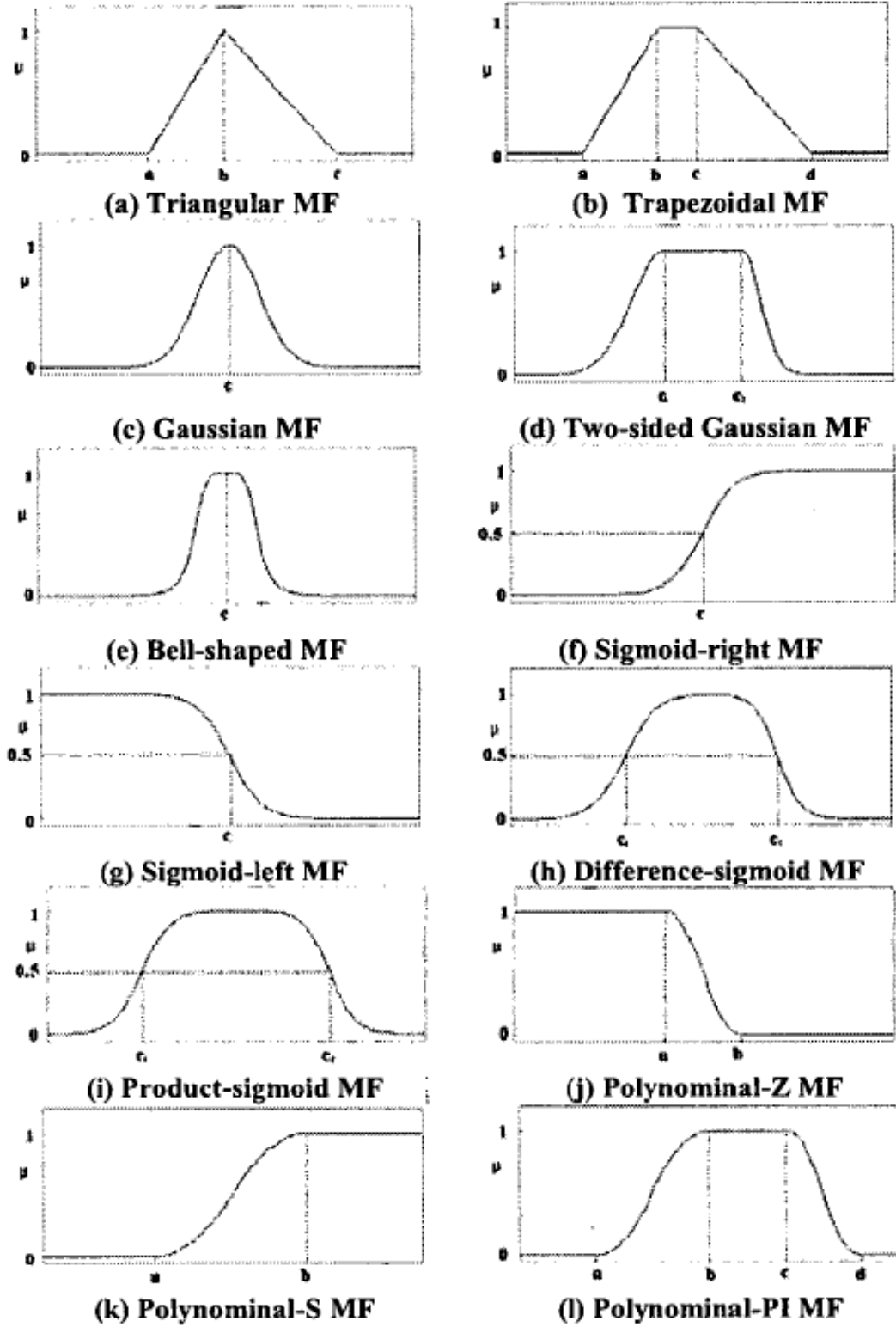
ولن يكون هناك تأخير؛ ومن ثمّ سرعة تنفيذ أعلى، هذه الأسباب جعلت من التابع المثلثي أكثر استخداماً. فضلاً

على أن تابع المثلثي يعطي توزيعاً منتظماً على كل الجانبين؛ لأنه متناظر بالنسبة لمحوره، كما يؤمن تداخلاً بين

مجموعات الانتماء أقرب للواقع وأكثر ملاءمة لمنطق المنطق العائم ومفهومه.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي



الشكل (4-4) أشكال أشهر توابع الانتماء في المنطق العائم.

4-5 محرك وقواعد المنطق العائم

تتمثل المرحلة الأولى من إجراء المنطق العائم في تقديم معلومات الدخل لنظام عائم معين بناءً على نتيجة القياس، التي ستكون في مشروعا التيارات التي سحبها المحرك. تعمّم هذه المعلومات، وتوزّع على مجموعات التعميم؛ باستخدام توابع الانتماء الخاصة بالإدخال المحددة مسبقاً، والتي يمكن أن يكون لها أشكال مختلفة، كما بيّناه في الفقرة السابقة؛ وفقاً لأشكال توابع الانتماء، وقد اختير التابع المثلثي للأسباب التي ذُكرت في فقرة أشكال توابع الانتماء، تُحدّد درجة الانتماء عن طريق وضع متغير الدخل على المحور الأفقي، فيظهر المحور الرأسي تقديراً كمياً لدرجة انتماء متغير الدخل. الشرط الوحيد الذي يجب أن يتحقق في عملية الانتماء أو التعميم هو أن قيمة الانتماء يجب أن تكون بين الصفر والواحد. وتعني القيمة صفراً أنّ متغير الدخل ليس عضواً في المجموعة العائمة ولا ينتمي لها، بينما تعني القيمة واحداً أن متغير الدخل هو عضو كامل في المجموعة العائمة. يجب أن يكون لكل معلومة دخل تابع انتماء فريد أو عضوية يرتبط بها. في حال الارتباط بأكثر من تابع انتماء يُستخدم عامل ترجيح لقيم كل المدخلات، وفق قواعد التعميم. تحدد عوامل الترجيح درجة التأثير أو درجة العضوية لكل قاعدة فاعلة. من خلال حساب المنتج المنطقي لأوزان العضوية لكل قاعدة فاعلة أو نشطة، تُنتج مجموعة من مقادير، كاستجابة للدخل، وإعطاء الخرج العائم. وكل ما يتبقى هو الجمع بين الاستجابات الناتجة، ومعرفة تأثيرها من خلال فك تعميمها [123].

قواعد التعميم fuzzy rules:

تُستخدم مجموعة قواعد لوصف مجموعات العوم وعواملها في شكل عبارات شرطية. يمكن أن تشكل

العبارة الشرطية if-then قاعدة تعميم واحدة على النحو الآتي:

If x is A then y is Z ,

حيث: x دخل المنطق العائم و A مجموعة من الشروط التي يجب استيفائها، و Z مجموعة من النتائج

التي يمكن استنتاجها من خرج المنطق العائم y أو ناتجه.

4-6 بناء المقدر العائم

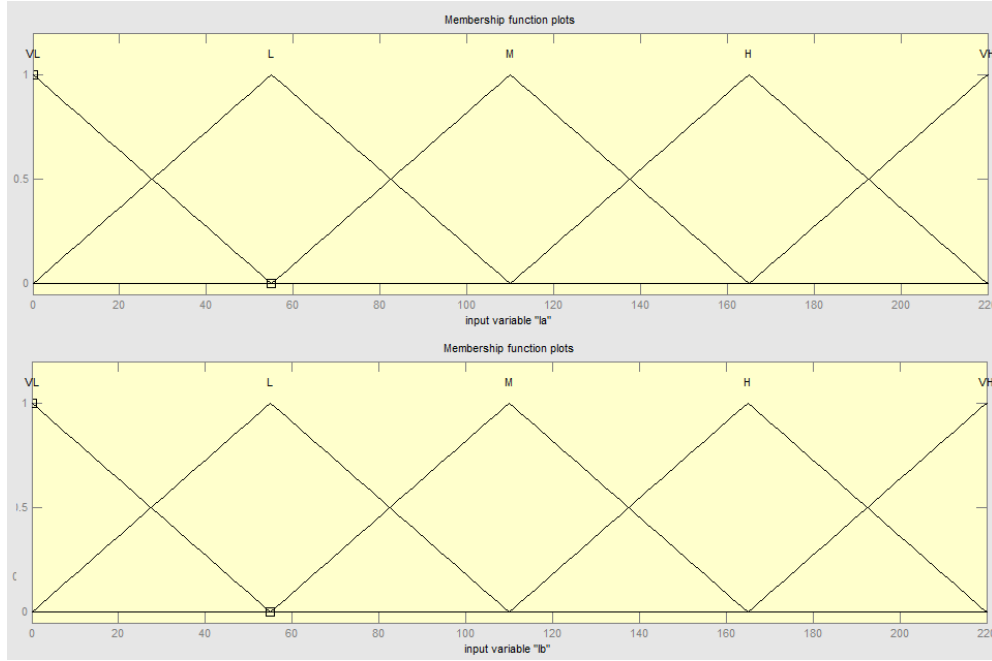
كما بيّنا في الفقرة 2-4-4 ومجموعة المعادلات 2-9 فإن لمقاومة الثابت أثراً كبيراً في عملية تقدير الفيض وزاويته، ففي السرعات العالية، لا تكون خوارزمية DTC حساسة لأيّ من محددات المحرك بصورة كبيرة إذا لم تكن هناك حمولات كبيرة على المحرك المتحكّم به.

كما يعدّ تغير قيمة مقاومة الثابت R_s نتيجة الأثر الحراري للتيارات عند الأحمال العالية نسبياً من أبرز مساوئ طريقة التحكم المباشر بالعزم التقليدية. يعود عدم دقة تخمين (تقدير) الفيض إلى مشاركة مقاومة الثابت في معادلات التخمين (2-9). يعتمد تطوير طريقة DTC بإدخال المنطق العائم لحساب قيمة مقاومة الثابت من تيارات دخل المحرك عند الأحمال المتغيرة كما هو مبين بالشكل 4-1، تمثل قيمتا التيار $I = [i_a \ i_b]^T$ دخلاً للمخمن العائم، ويمثل خرجه قيمة مقاومة الثابت R_s .

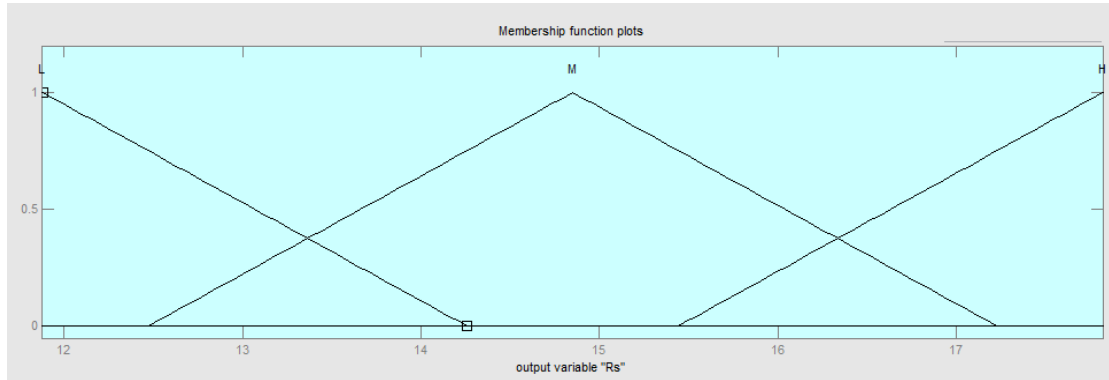
يبين الشكل 4-5 و 4-6 آلية إجراء التعويم fuzzification، وتوزع مجموعات انتماء دخل المخمن العائم وخرجه على الترتيب؛ إذ إن الدخل هو تيار المحرك المسحوب على الطور a، والطور b، ويتوزع التيار على المجال $A[0,220]$. والخرج هو مقاومة الثابت، وتتوزع على المجال $\Omega[11.88,17.82]$ وذلك بالنسبة لمحددات المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار والذي استُخدم في عملية المحاكاة، 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؛ إذ يتوزع الدخل على خمس مجموعات {VL,L,M,H,VH} والخرج على ثلاث مجموعات {L,M,H}.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي



الشكل (4-5) توزيع مجموعات انتماء دخل المخمن العائم المستخدمة؛ لتطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم DTC-FLE.



الشكل (4-6) توزيع مجموعات انتماء خرج المخمن العائم المستخدمة؛ لتطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم DTC-FLE.

يبين الجدول 1-4 قواعد محرك العوم لإجراء فك التعويم defuzzification؛ إذ يحتوي على (25)

قاعدة، ويشير تقاطع انتماء الدخل إلى انتماء الخرج؛ ليشكل بمجمله قاعدة العوم، كما هو مبين بالمثل الآتي:

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

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

الجدول (4-1) جدول قواعد محرك العزم

$I_b \backslash I_a$	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

7-4 الخاتمة

اقترح في هذا الفصل تطوير تقنية التحكم المباشر بالعزم، باستخدام المنطق العائم لمعالجة أثر تغير مقاومة ملفات ثابت المحرك لتقدير العزم. تقدر هذه التقنية قيمة مقاومة الثابت؛ بالاعتماد على التيارات المسحوبة للمحرك؛ بالاعتماد على مخزن عائم يتكون من خمس مجموعات انتماء لمتحولي دخل، وثلاث مجموعات انتماء لمتحول الخرج، ومحرك استدلال عائم يتألف من (25) قاعدة عموم؛ مما قد يسهم في تحسين عملية التقدير التي بدورها تؤثر إيجاباً في عملية التحكم المباشر بالعزم؛ من خلال تحسين العزم الكهرومغناطيسي، وتقليل الخطأ الساكن والديناميكي لعزم المحرك، وإنقاص التآرجح فيه. وينعكس كل ذلك على الانسيابية والسلاسة في قيادة المحرك المستخدم لتحريك المركبة الكهربائية.

الفصل الخامس

التطبيق العملي

التحكم بسرعة المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار؛ بتقنية التحكم المباشر بالعزم المطورة؛

استناداً للذكاء الصناعي، باستخدام المنصة المخبرية RT-LAB.

يتضمن التطبيق العملي تنفيذ النمذجة والمحاكاة لنظام التحكم المطور باستخدام الذكاء الصناعي (الشبكات العصبونية، المنطق العائم)، باستخدام منصة RT-LAB، وتنفيذ التحكم على المحرك التحريضي وحمله الميكانيكي في المخبر -قسم هندسة الطاقة الكهربائية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية.

1-5 النمذجة والمحاكاة للمحرك التحريضي ثلاثي الأطوار؛ وقيادته بالتحكم المباشر

بالعزم DTC التقليدية والمطورة؛ بالذكاء الصناعي، في بيئة الماتلاب؛ إجراء مقارنة

بين طرائق التحكم قبل التطوير وبعده، وحساب مقدار التحسن بالأداء.

أُجريت محاكاة المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار لقيادة المركبة الكهربائية بناءً على مجموعة المعادلات من 2-2 إلى 2-5 في البيئة البرمجية MATLAB-Simulink. تم اختيار المحرك باستطاعة 150kw ويضم

الجدول 1-5 محددات المحرك.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

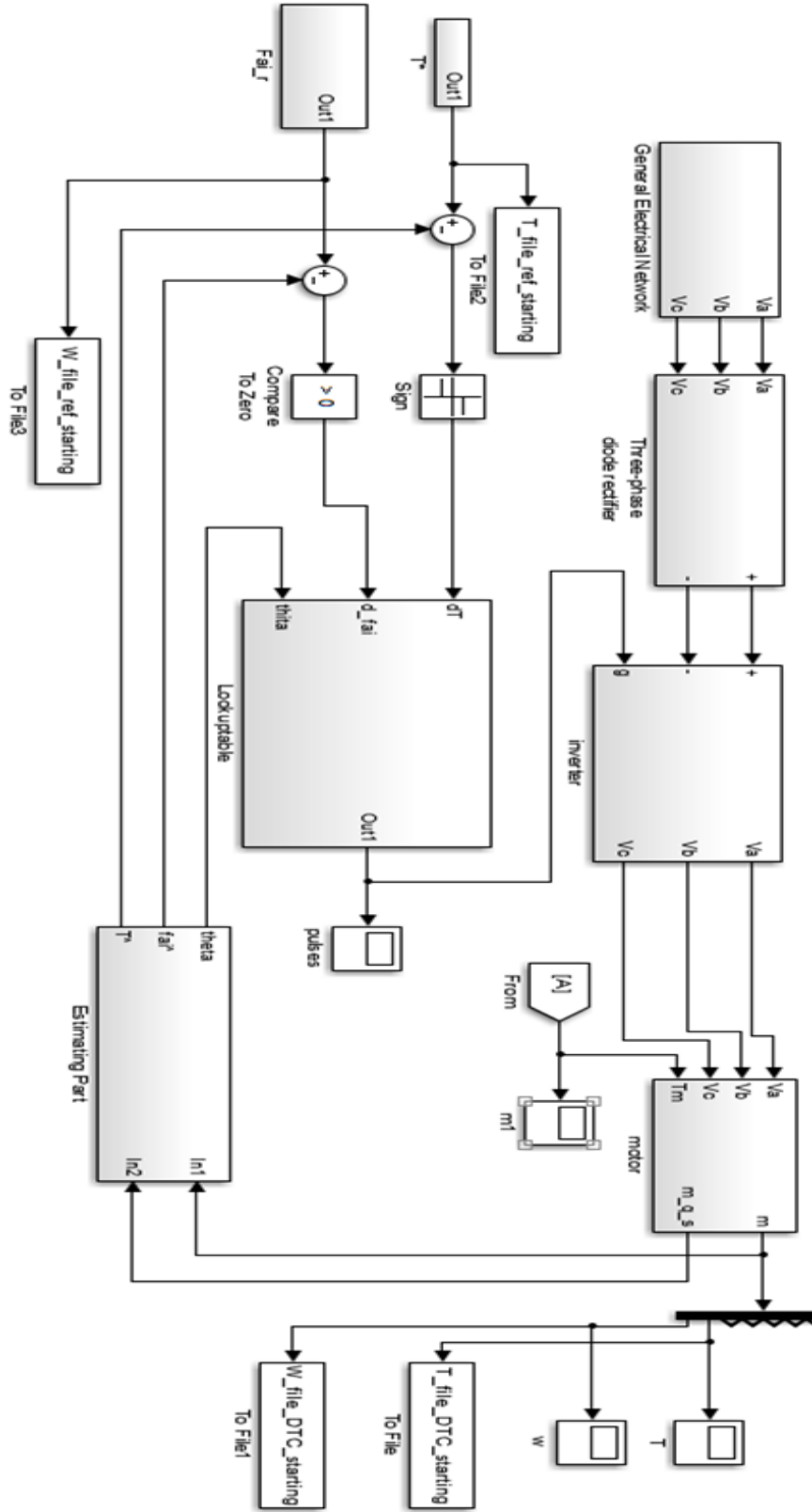
أحمد الحمود العريفي

الجدول (5-1) محددات المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار، ومواصفاته.

المحدد	القيمة
الاستطاعة الاسمية	150KW
التوتر الاسمي	380V
التردد	50HZ
عدد أزواج الأقطاب	2
مقاومة الثابت	14.85mΩ
محارضة الثابت x_1	0.3027mH
مقاومة الدائر	9.295mΩ
محارضة الدائر x_2	0.3027mH
عزم العطالة	3.1Kg.m ²
معامل الاحتكاك	0.08N.m. s

تستند الدراسة على مخطط محاكاة منهجيتي التحكم المباشر بالعزم DTC التقليدية والمطورة باستخدام الشبكات العصبونية الصناعية DTC-ANN، كما يبين الشكل 5-1، الذي يضم مجموعة من نظم المحاكاة الفرعية، يمثل كل منها مجموعة معادلات نمذجة المحرك، ومنهجية التحكم المباشر بالعزم DTC، وفقاً لمجموعة المعادلات 2-2 إلى 2-5 ومن 2-9 إلى 2-11 على التوالي.

أحمد الحمود العريفي

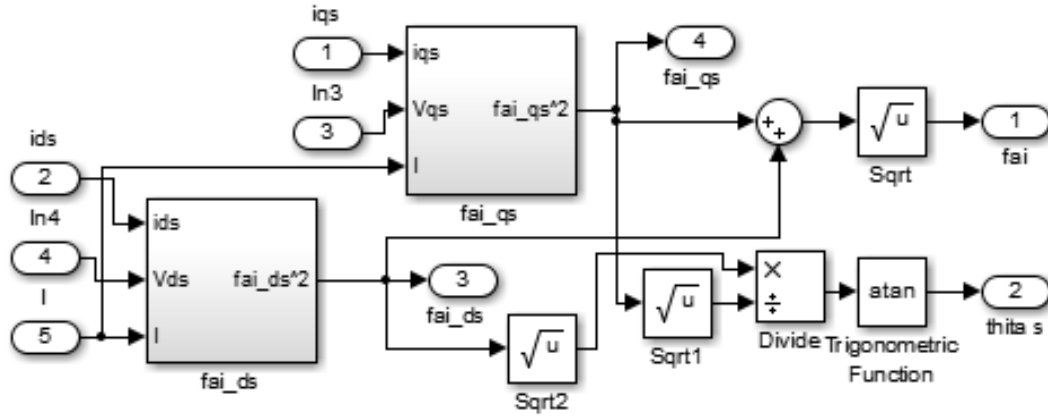


الشكل (5- 1) مخطط محاكاة المحرك ونظام قيادته ب DTC.

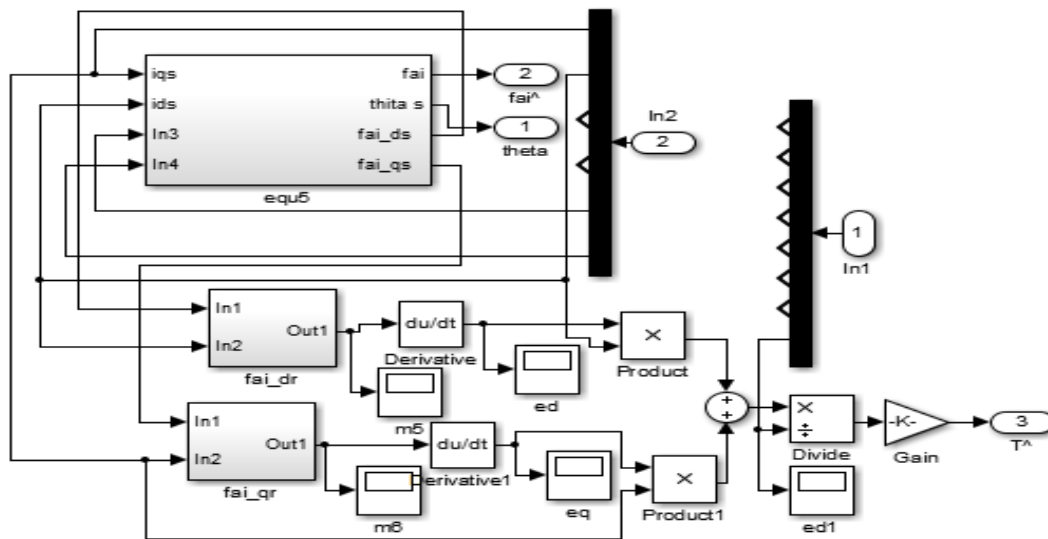
أحمد الحمود العريفي

تستند محاكاة منهجية DTC-ANN على معادلات الشبكة العصبونية التي تم ذكرها سابقاً في الفصل الثالث من 3-1 إلى 3-3، وتطبيقها في جزء التخمين Estimating Part الموضح بالشكل 5-2. بين بالشكل 3-5 مخطط محاكاة النظام الفرعي equ5، ويتضمن نظامين فرعيين fai-qs و fai-ds لتحديد مركبات الجهود والتيارات على المحاور q و d على التوالي.

تدخل الشبكة العصبونية في النظام الفرعي fai-qs كما هو مبين بالشكل 5-4؛ بالاعتماد على تابع ملائمة الشبكة العصبونية function fitting neural network الموضح بالشكل 5-5.

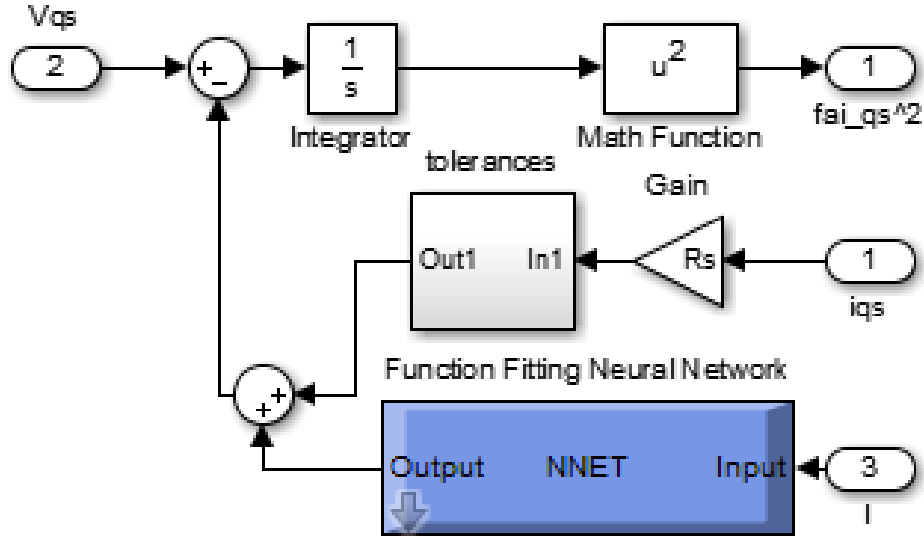


الشكل (5 - 2) مخطط المحاكاة لجزء التخمين Estimating Part.

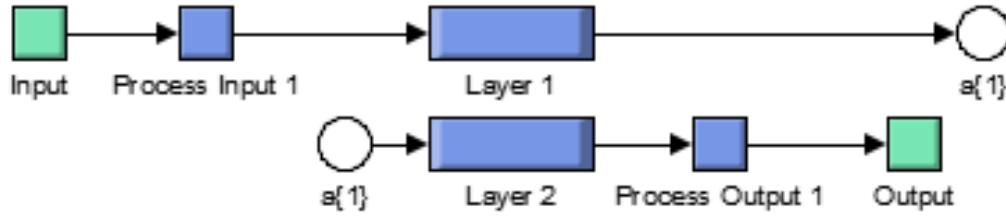


الشكل (5 - 3) مخطط المحاكاة للنظام الفرعي equ5.

أحمد الحمود العريفي



الشكل (5-4) مخطط المحاكاة للنظام الفرعي fai-qs.



الشكل (5-5) مخطط محاكاة بنية الشبكة العصبونية المستخدمة.

أجريت المحاكاة من خلال النموذج المبين بالشكل 5-1 كما بيناه سابقاً، حيث كل صندوق يمثل نموذجاً فرعياً يحتوي على جميع المعادلات اللازمة والمستخدم في النمذجة لمحاكاة نظام القيادة وعمله، نفرض أجزاء النظام كما يلي:

1- الصندوق General Electrical Network: يمثل محاكاة الشبكة الكهربائية ثلاثية الأطوار.

2- الصندوق Three Phase rectifier: يمثل مقوماً جسياً ثلاثي الطور حتى نحصل على جهد مستمر،

يستعمله المعرج (المبدل)؛ تجدر الإشارة إلى أنه في السيارة الكهربائية يُستبدل المقوم الجسري، والشبكة

العامة بمدخرة تقدم الجهد المستمر للمبدل-المعرج.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

3- الصندوق inverter: يحتوي على مبدل ثلاثي الطور عبارة عن ترانزستورات استطاعية. تُقدَح عن طريق

النبضات الناتجة عن منهجية التحكم المباشر بالعزم التقليدية أو المطورة.

4- الصندوق motor: يمثل محاكاة المحرك ثلاثي الطور؛ من خلال مجموعتي المعادلات 2-2 و 2-3. وقد

تم إضافة تحويلات باراك له؛ الممثلة بالمعادلات 2-4 و 2-5.

5- الصندوق Estimating Part: يمثل الجزء الخاص بالتخمين، الممثل بالمعادلات 2-9 و 2-10، المبينة

بالشكلين 2-5 و 3-5، وذلك في منهجية التحكم المباشر بالعزم التقليدية، ويضاف لها الشبكة العصبونية في

منهجية التحكم المباشر المطورة بالشبكة العصبونية الصناعية المبينة بالشكل 5-5.

6- الصندوق sign والمقارن بالصفري؛ يحاكي المتحكم البطائي hysteresis وفقاً للمعادلة 2-11، يرتبط

بعقدتي المقارنة بالقيم المرجعية.

7- الصندوق Look up table: يمثل جدول التبديل 4-2 لتشغيل مفاتيح المعرج.

وقد أجريت محاكاة حركة المركبة الكهربائية على مسار بجزء أفقي بحمولة 100N.m، وجزء صاعد

بميل يتطلب مرة ونصفاً من عزم المحرك السابق، والجزء الثالث من الطريق منحدر بميل يحتاج إلى نصف العزم

50N.m؛ مع سرعة ثابتة للمحرك 90rpm. استندت عملية نمذجة تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC على

مجموعة المعادلات من 2-9 إلى 2-11؛ فضلاً عن قيم جدول الاختيار؛ وفق الخطوات المبينة في فقرة

(2-4-1-4) لتوليد نبضات قذح المبدلة-المعرج inverter؛ لإجراء عملية التحكم بمحرك المركبة الكهربائية

ثلاثي الطور، وإدخال السرعة، والعزم المرجعيين المطلوبين لمعرفة مدى فاعلية طريقة DTC، للحصول على

هذا المسار؛ مع الأخذ بعين الاعتبار وجود تأرجحات في قيمة مقاومة الثابت؛ بسبب تغير الحمل، وتتراوح قيمة

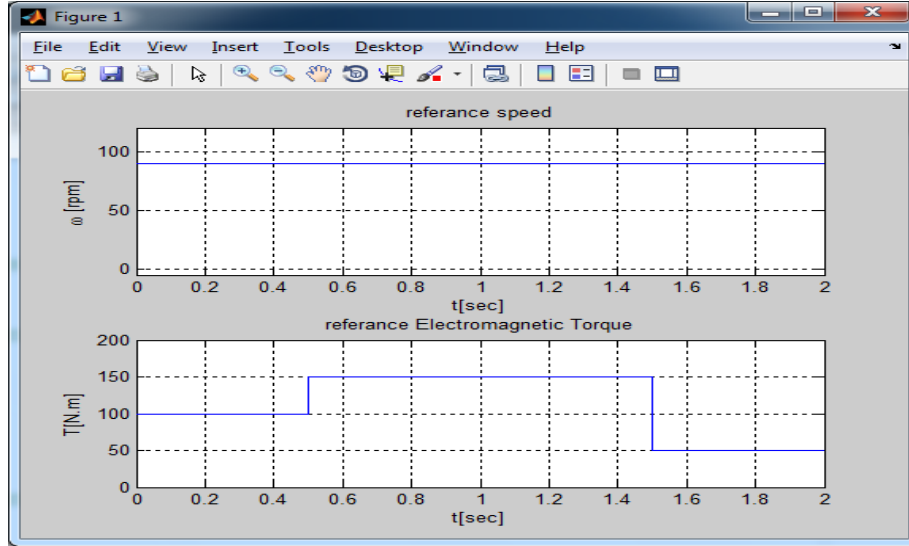
هذه التغيرات ضمن $\pm 20\%$ لكل من مقاومتي الثابت والدائر، وتحصيل العزم والسرعة، وفقاً لتقنية التحكم

.DTC

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

يبين الشكل 5-6 السرعة والعزم المرجعيين (الأمثليين) المطلوبين لسير المركبة؛ وفق التصور السابق.



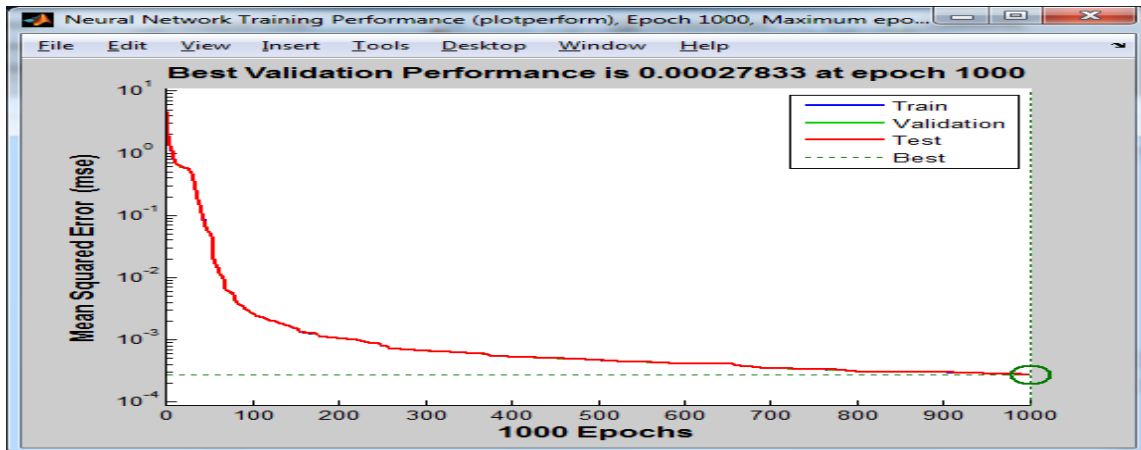
الشكل (5-6) السرعة والعزم الكهرومغناطيسي المرجعيان المطلوبان لمسار المركبة: استواء - صعود - هبوط.

أعيدت المحاكاة بالشروط السابقة بنفسها؛ باستخدام الشبكة العصبونية التي وُضِّحت في الفقرة 3-7؛ من خلال برمجة المعادلة 1-3. وأجريت عملية التدريب للشبكة العصبونية، لتحسين تقدير المحددات، وتطوير تقنية التحكم المباشر بالعزم.

يوضح الشكل 5-7 منحنى تدريب الشبكة العصبونية الذي يبين وصول الشبكة العصبونية لأداء عالٍ، إذ بلغت

قيمة متوسط مربع الخطأ (Mean Square Error (MSE) 2.78×10^{-4} ، والتي تمثل الخطأ في عملية

التدريب، حيث نلاحظ من الشكل تطابق منحنيات التدريب والتحقق والاختبار واقتربها بشكل كبير من الصفر.

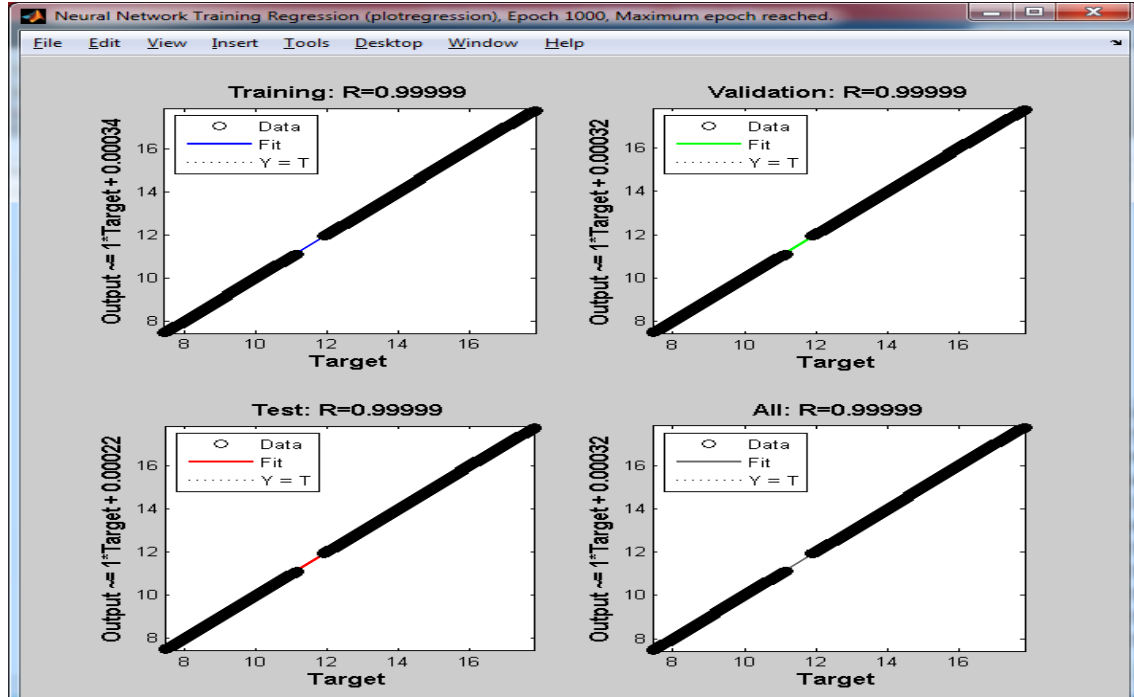


الشكل (5-7) منحنى تدريب الشبكة العصبونية المستخدمة للتقنية المطورة DTC-ANN.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

يبين الشكل 5-8 منحنى الملاءمة؛ إذ بلغت نسبة الملاءمة 99.999% لكافة البيانات التدريبية، والتحقق، والاختبار، والكلية.



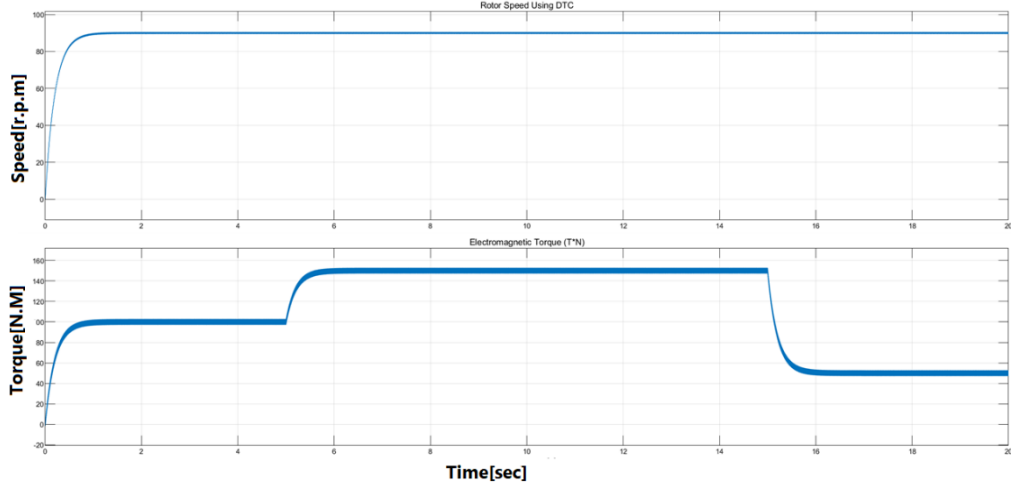
الشكل (5-8) منحنى الملاءمة للشبكة العصبونية المستخدمة للتقنية المطورة DTC-ANN.

يبين الشكلان 5-9 و 5-10 السرعة والعزم الناتجين عن تطبيق كلٍ من منهجيتي DTC و DTC-ANN على المسار المحدد (أفقياً-صعوداً-هبوطاً)، تشير النتائج إلى وجود تغيرات وتأرجحات بسيطة في السرعة، ولكنها كبيرة في العزم عند القيادة؛ وفق تقنية DTC، يعود ذلك إلى زيادة الخطأ الساكن في عملية قيادة المحرك بقيم ملحوظة ومؤثرة في العزم. تجدر الإشارة إلى أن تغيرات قيم مقاومة الثابت تنعكس على حسابات العزم، يتضح ذلك من المعادلات 9-2 و 10-2؛ إذ إن قيمة مقاومة الثابت تتبع لتقدير الفيض والذي بدوره يؤثر في العزم الكهرومغناطيسي للمحرك، تؤدي تغيرات الحموله، تبعاً للمسار إلى سحب تيارات مواكبة لها كبيرة نسبياً، ينتج عنها تأثيرات حرارية في قيمة مقاومة ملفات الثابت، التي بدورها تسبب تغيراً في قيمة الفيض المغناطيسي. تنعكس الاضطرابات المغناطيسية في تأرجح العزم وعدم استقراره، وزيادة الخطأ الساكن في عملية القيادة للمركبة، تؤثر هذه الاضطرابات المشار إليها في الخطأ الديناميكي أيضاً. يتضح ذلك من الشكل 5-10؛ إذ تترافق

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

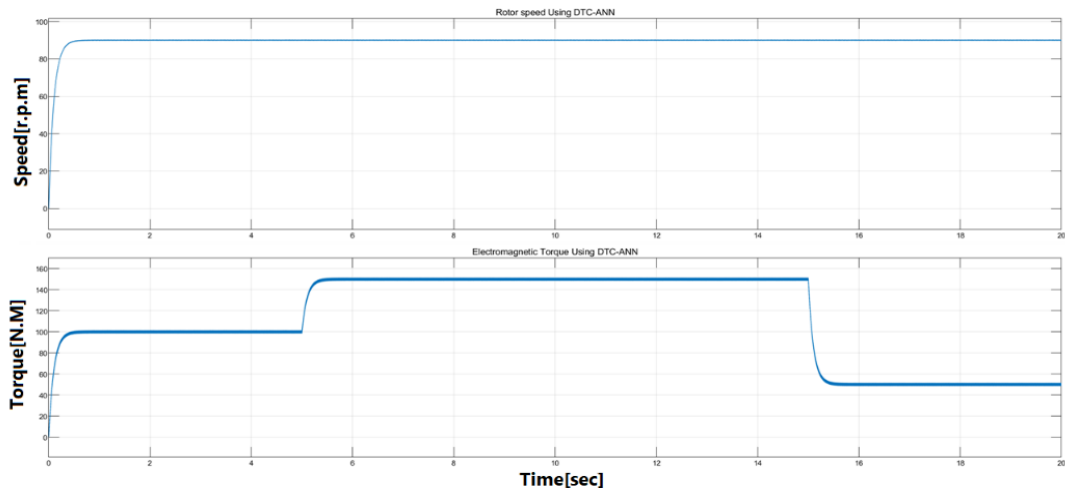
أحمد الحمود العريفي

الاضطرابات مع إشارة العزم في أثناء الإقلاع والانتقالات بين مستويات العزم اللازمة لتحريك المركبة؛ وفق المسار المحدد.



الشكل (5- 9) السرعة والعزم الناتجة عن تطبيق التحكم المباشر بالعزم التقليدي.

عند قيادة المحرك، وفق طريقة DTC-ANN تحسّن الشبكة العصبونية عملية تقدير العزم من خلال تحسين تقدير قيمة الفيض؛ لأنها تقوم بدور مرشح للتغيرات التي تطرأ على مقاومة الثابت، من خلال تقدير القيمة الصحيحة وتقديرها عن طريق قياس التيارات المستجرة للثابت؛ مما يؤدي بالنتيجة لتحسين قيمة العزم المطبق على المركبة كما هو مبين بالشكل 5-10، مما يقلّل الخطأ الستاتيكي والديناميكي في العزم المخمّن؛ مع الحفاظ على سرعة المركبة والمساهمة في تقليل الخطأ فيها.



الشكل (5- 10) السرعة والعزم الناتجة عن تطبيق تقنية التحكم المباشر بالعزم المطورة باستخدام الشبكات العصبونية

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

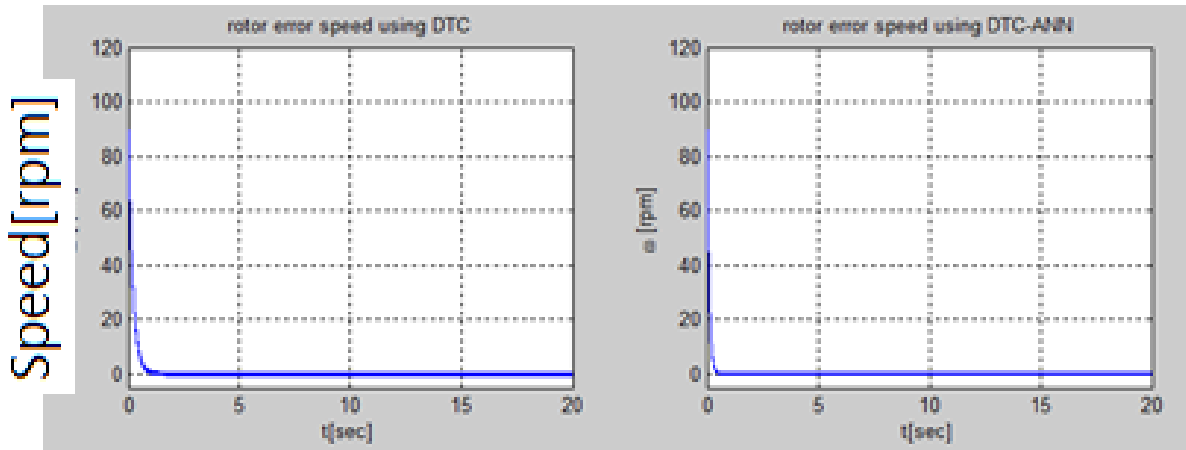
يبين الشكلان 5-11 و 5-12 إشارتي الخطأ لكل من العزم والسرعة عند القيادة، وفق منهجيتي DTC

و DTC-ANN وقد حُسِبَت قيمة متوسط مربع الخطأ (MSE) لكلٍ من إشارتي الخطأ للسرعة، والعزم لطريقتي

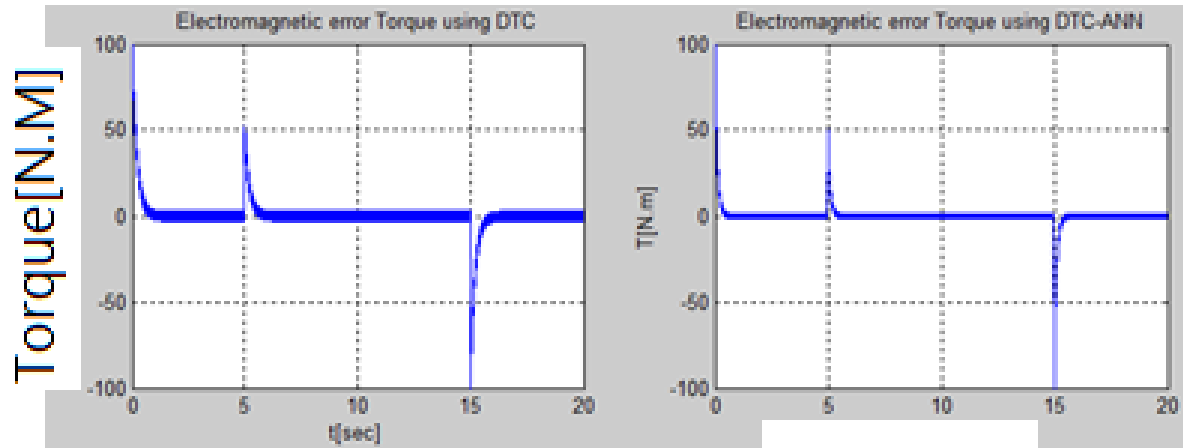
التحكم DTC و DTC-ANN، وأدرجت بالجدول 5-2؛ إذ تبين تفوق طريقة DTC-ANN على DTC

والحصول على قيم MSE أقل؛ مما يعني وجود خطأ ديناميكي وستاتيكي أقل وإنقاص التأرجح في إشارة العزم؛

يسهم بقيادة المركبة الكهربائية بصورة مرنة وناعمة.



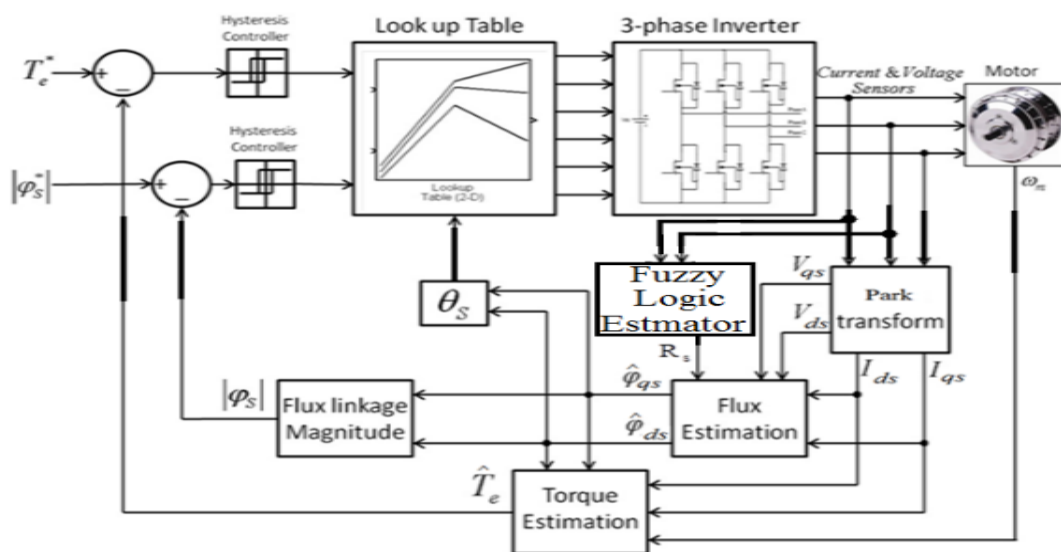
الشكل (5 - 11) قيمة خطأ السرعة الناتجة عن تطبيق DTC و DTC-ANN.



الشكل (5 - 12) قيمة خطأ العزم الناتجة عن تطبيق DTC و DTC-ANN

خطأ العزم	خطأ السرعة	التقنية
$116.5274 \cdot 10^{-7}$	$40.6179 \cdot 10^{-7}$	DTC
$57.2824 \cdot 10^{-7}$	$20.2681 \cdot 10^{-7}$	DTC-ANN

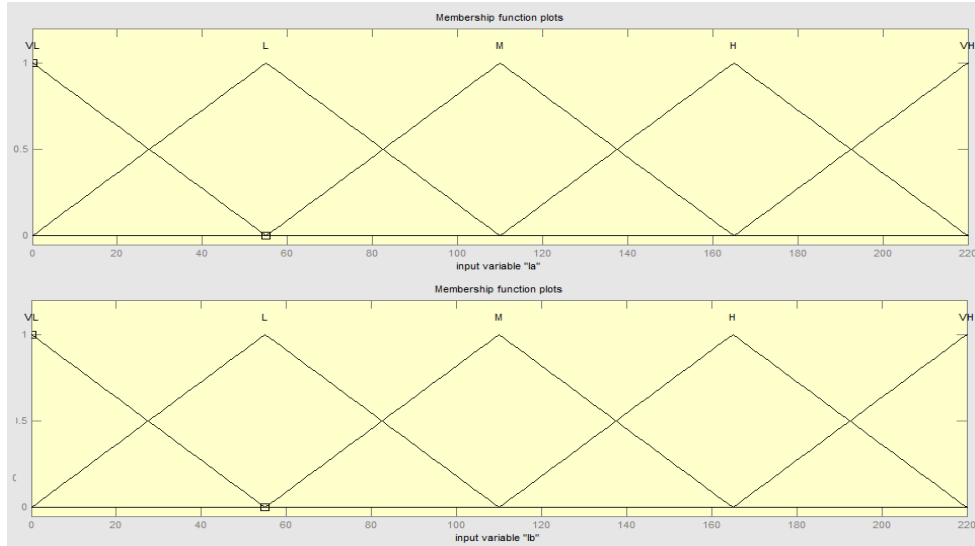
يُلاحظ تقليل قيمة الخطأ؛ وبالأخص بالنسبة للعزم، وذلك لأن الطريقة المطورة تُسهم في التخفيف من التعرجات والتموجات الحادة في إشارة العزم، كما هو مبين بالشكل 10-5، والشكل 5-12؛ إذ بلغت قيمة متوسط مربع الخطأ (MSE) $116.5274 \cdot 10^{-7}$ بالنسبة لطريقة التحكم المباشر بالعزم التقليدية DTC، في حين بلغت قيمته $57.2824 \cdot 10^{-7}$ بالنسبة للطريقة المطورة DTC-ANN كما يوضحه الجدول 5-2؛ مما يُسهم بتقليل التأرجحات التي يتعرض لها نظام القيادة ككل. يُعدّ تغير قيمة مقاومة الثابت R_s نتيجة الأثر الحراري للتيارات الكبيرة نسبياً عند الأحمال الكبيرة من أبرز مساوئ طريقة التحكم المباشر بالعزم التقليدية، إن سبب عدم دقة تخمين الفيض وجود مقاومة الثابت في معادلات التخمين، كما في المعادلات 9-2. اقترح تطوير طريقة DTC بالمنطق العائلي لتخمين قيمة مقاومة الثابت من تيارات دخل المحرك في أثناء الأحمال الكبيرة، كما يبين الشكل 13-5؛ إذ تكون قيمتا التيار $I = [i_a \quad i_b]^T$ دخل للمخمن العائلي، وخرجه قيمة مقاومة الثابت R_s .



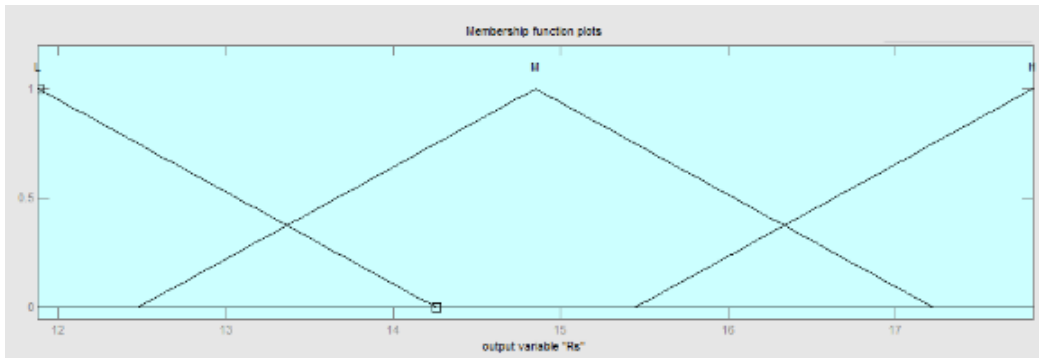
الشكل (5- 13) المخطط الصندوقي لمنهجية التحكم المباشر بالغرم المطورة بالمخمن العائم DTC-FLE

أحمد الحمود العريفي

يبين الشكل 5-14 و 5-15 آلية إجراء التعويم fuzzification، وتوزع مجموعات انتماء دخل المخمن العائم وخرجه على الترتيب؛ حيث إن الدخل هو تيار المحرك المسحوب على الطور a ، والطور b ، ويتوزع التيار على المجال $A[0,220]$ ، والخرج هو مقاومة الثابت، وتتوزع على المجال $\Omega[11.88,17.82]$ ، 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، إذ يتوزع الدخل على خمس مجموعات $\{VL,L,M,H,VH\}$ ، والخرج على ثلاث مجموعات $\{L,M,H\}$.



الشكل (5-14) توزع مجموعات انتماء دخل المخمن العائم المستخدمة لتطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم DTC-FLE.



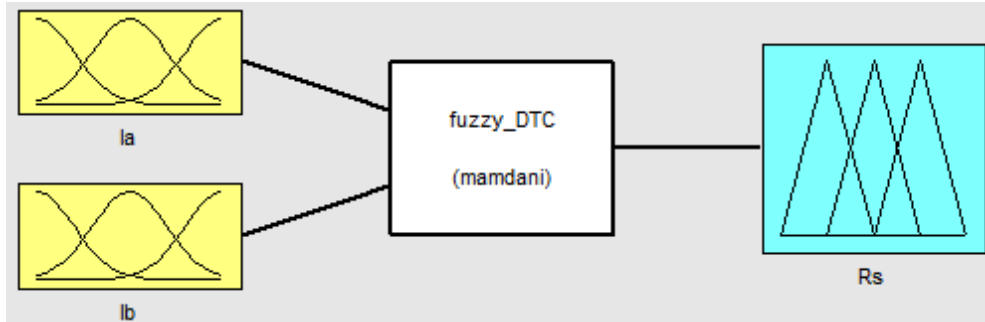
الشكل (5-15) توزع مجموعات انتماء خرج المخمن العائم المستخدمة لتطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم DTC-FLE.

أحمد الحمود العريفي

كما هو مبين في الجدول 4-1 جدول قواعد محرك العوم؛ لإجراء فك التعويم defuzzification؛ حيث يحتوي على 25 قاعدة، ويشير تقاطع انتماء الدخل إلى انتماء الخرج؛ ليشكل بمجمله قاعدة العوم، كما هو مبين بالمثل الآتي:

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

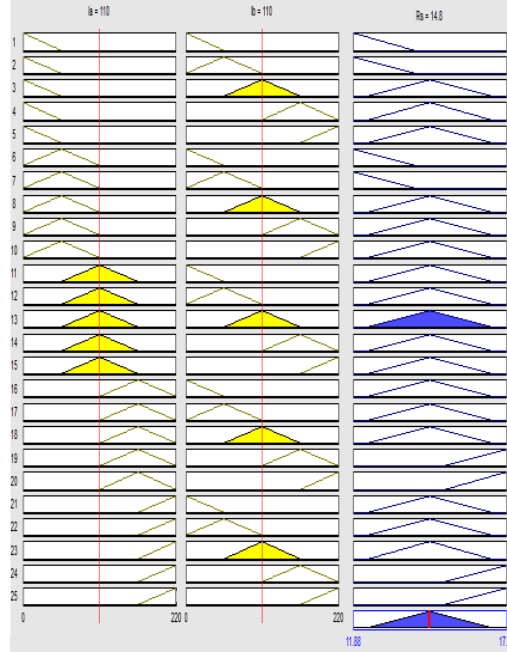
بني المقدّر العائم؛ باستخدام أدوات برنامج ماتلاب لتصميم النظم العائمة؛ حيث صمم المقدّر العائم كما هو مبين بالشكل 5-16 بمتحولي دخل، وهما التياران I_a و I_b الخاصان بالطور الأول والذين يستجرهما المحرك. وخرجه هو مقاومة الثابت؛ حيث توزعت قيم مجموعات الدخل للمتولين I_a و I_b ضمن مجال تغير التيار $A [0, 220]$ ، أما توزع قيم مجموعة الخرج، فهو ضمن التغيرات المجالية الأصغرية والأعظمية لمقاومة الثابت؛ وهو $\Omega [11.88, 17.82]$ استُخدمت التوابع المثلثية لتمثيل مجموعات الانتماء، أما قواعد العوم فهي 25 قاعدة عائمة المبينة بالشكل 5-17، والموزعة؛ وفقاً لمتحولي دخل المتحكم العائم مع خرجه.



الشكل (5-16) المخمن العائم المستخدم في DTC-FLE.

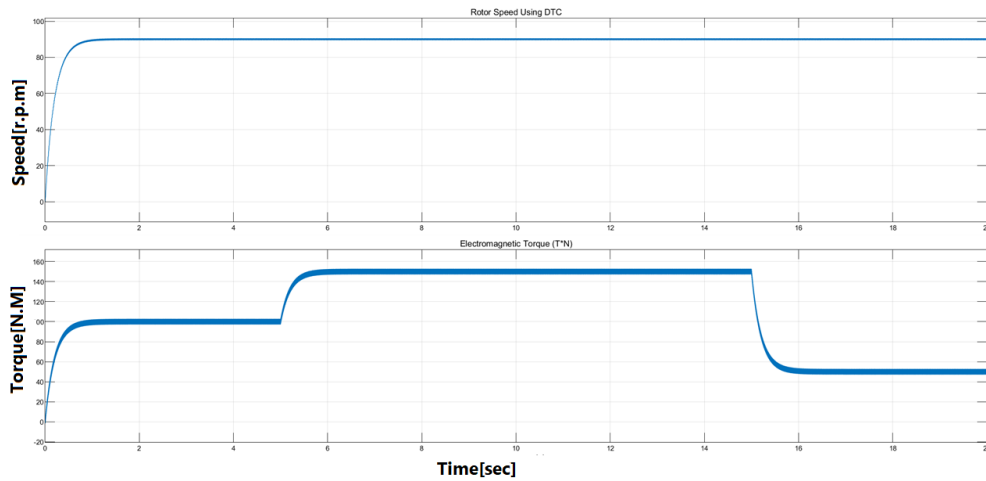
التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي



الشكل (5-17) توزيع قواعد العزم، وفق متحولات دخل المخمن العائم وخرجه المستخدم في DTC-FLE.

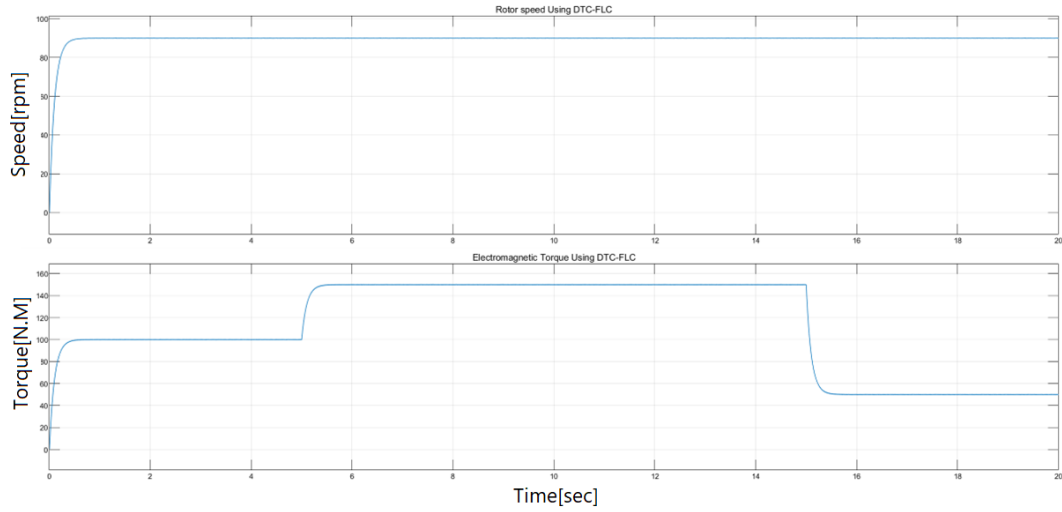
حُصِلت نتائج المحاكاة بإيجاد العزم والسرعة؛ وفقاً لمنهجية التحكم DTC، كما هو مبين بالشكل 5-18



الشكل (5-18) السرعة والعزم الناتجان عن منهجية DTC.

وأجريت عملية المحاكاة نفسها للمسار نفسه لطريقة التحكم المباشر بالعزم المطورة بالمخمن العائم DTC-FLE. يبين الشكل 5-19 نتيجة السرعة والعزم لتطبيق هذه الطريقة على المسار المحدد (استواء-صعود-هبوط).

أحمد الحمود العريفي



الشكل (5- 19) السرعة والعزم الناتجان عن منهجية DTC-FLE.

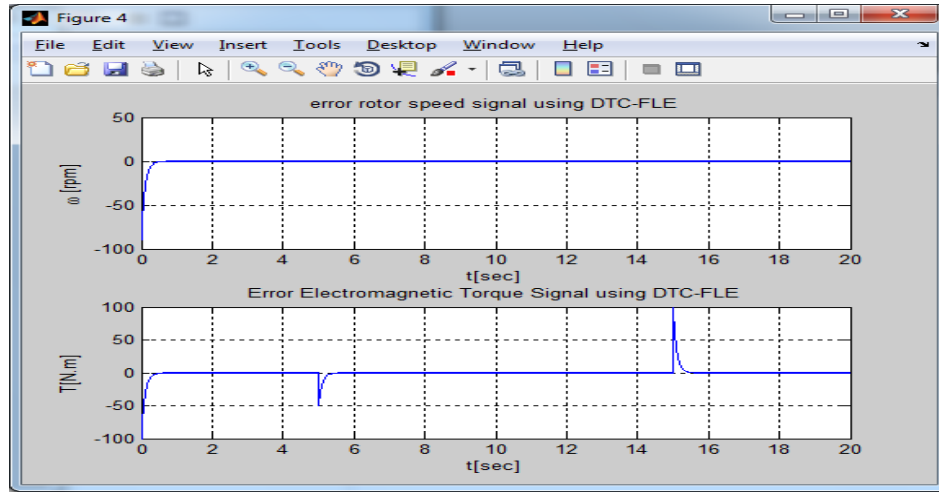
يُلاحظ وجود تغيرات وتذبذبات كبيرة في السرعة والعزم عند القيادة؛ وفق منهجية DTC؛ مقارنة بطريقة DTC-FLE؛ مما يتسبب في زيادة الخطأ الستاتيكي لعملية قيادة المحرك، وهذه التغيرات هي أكبر في العزم وأكثر وضوحاً، ويعود سبب ذلك إلى أن تأثير تغير قيمة مقاومة الثابت كبير في عملية تخمين العزم، كما هو واضح في مجموعتي المعادلات 9-2 و 10-2؛ حيث إن قيمة مقاومة الثابت تتعلق بتخمين الفيض الذي بدوره يدخل بتخمين العزم الكهرومغناطيسي. وهكذا عند تغير الحمولة نتيجة وجود مسار متغير، تُستجَر 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 المقدر. يسبب ذلك زيادة في الخطأ الستاتيكي لعملية قيادة المحرك، وعلى الخطأ الديناميكي أيضاً، كما أن الخطأ بين خرج النموذج والإشارات المرجعية تؤكد ذلك، كما هو مبين في الشكل 5-20. تتوافق الاضطرابات مع إشارة العزم في أثناء

الإقلاع والانتقالات بين مستويات العزم اللازمة لتحريك المركبة؛ وفق المسار المحدد صعوداً وهبوطاً مسببة تأرجحاً واضحاً في العزم.

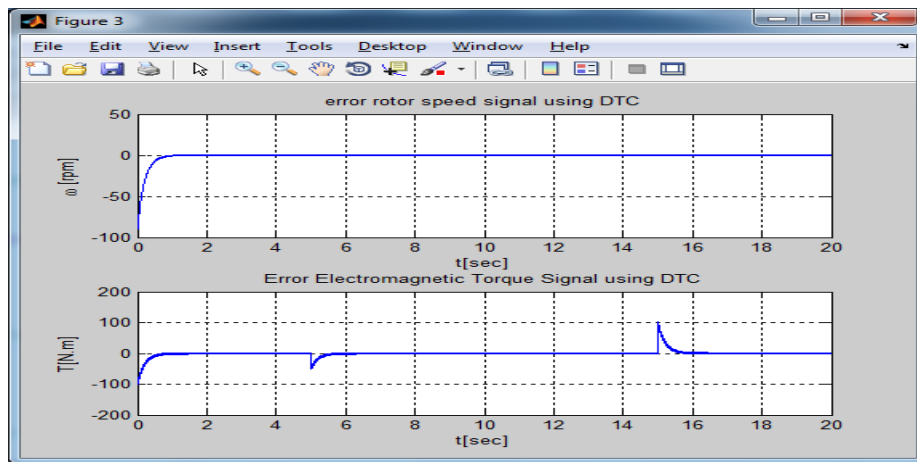
التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي



الشكل (5-20) إشارات الخطأ للسرعة والعزم الناتجة عن منهجية DTC للمسار: استواء - صعود - هبوط.

عند قيادة المحرك، وفق طريقة DTC-FLE يُقدَّر المقدَّر العائم قيمة مقاومة الثابت أقرب ما يمكن إلى القيمة الحقيقية؛ وفقاً لتغيرات تيارات الحمل. يطور تقدير العزم من خلال تقنية المنطق العائم، وتقدير الفيض يعمل مخمّن 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 المركبة، وتقليل الخطأ الستاتيكي والديناميكي في العزم المخمّن، مع الحفاظ على سرعة المركبة كما هو مبين في الشكل 5-21 والذي يوضح إشارتي الخطأ لكل من العزم والسرعة عند القيادة، وفق منهجية DTC-FLE:



الشكل (5-21) إشارات الخطأ للسرعة والعزم الناتجة عن منهجية DTC-FLE للمسار: استواء - صعود - هبوط.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

وقد حُسبت قيمة متوسط مربع الخطأ (MSE) Mean Square Error لكلٍ من إشارتي الخطأ

للسرعة والعزم في حالتي التحكم DTC و DTC-FLE، والمبينة في الجدول 5-3، وفق العلاقة الآتية:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (T - T_r)^2}{N} \quad 5-1$$

إذ:

MSE : متوسط مربع الخطأ.

T : العزم الناتج من تطبيق إحدى المنهجيتين.

T_r : العزم المرجعي (المرغوب).

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، وانخفاض التأرجح في العزم، والذي يؤدي إلى قيادة المركبة الكهربائية بسلاسة ومرونة.

الجدول (5-3) قيم MSE كلٍ من السرعة والعزم لكل من طريقتي التحكم DTC و DTC-FLE:

خطأ العزم	خطأ السرعة	التقنية
116.5274×10^{-7}	40.6179×10^{-7}	DTC
56.3230×10^{-7}	20.2532×10^{-7}	DTC-FLE

قورنت نتائج هذه الطريقة بالطرائق السابقة، وأثبتت الطريقة المتبعة تفوقها على منهجية التحكم المباشر

بالعزم المطورة؛ باستخدام الشبكات العصبونية.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

الجدول (4-5) قيم MSE كل من السرعة والعزم لكل من طريقتي التحكم DTC-ANN و DTC-FLE :

خطأ العزم	خطأ السرعة	التقنية
$57.2824 \cdot 10^{-7}$	$20.2681 \cdot 10^{-7}$	DTC-ANN
$56.3230 \cdot 10^{-7}$	$20.2532 \cdot 10^{-7}$	DTC-FLE

نلاحظ من الجدول 4-5 أن المنطق العائم أثبت فاعليته في تقدير قيمة مقاومة الثابت، وحقق تطوراً ملحوظاً

في منهجية التحكم المباشر بالعزم، كما أنه تفوق على الشبكات العصبونية الصناعية في المهمة نفسها؛ 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 لتقدير السرعة والعزم

كما بينته المراجع؛ مع مراعاة البنية التصميمية لمجال استخدام المنطق العائم؛ حيث تختلف طريقة تصميمه، وفقاً

للهدف والمهمة الموكلة له، ويمكن إجراء تصميمات أخرى لتقدير السرعة و العزم والتحكم بهما، أو تقدير أحد

المحددات، لكن وفق المحددات التصميمية للمسألة المدروسة، وطريقة التطوير المراد تحقيقها.

وإعادة شحن مدخرة السيارة، والحفاظ على نسبة شحن عالية نسبياً.

محرك دفع قفص سنجابي تحريضي ثلاثي الأطوار؛ وفقاً إلى المواصفات المعطاة في الجدول 5-1 (كروس،

[illegible]

الشكل (5- 22) نموذج محاكاة أداء مركبة كهربائية تستخدم محرك دفع ثلاثي الطور؛ مع وجود كبح بإعادة التوليد.

تم محاكاة حركة المركبة الكهربائية بسرعة متزايدة بعزوم مختلفة، وبوجود نظام الكبح بإعادة التوليد، مع نظام

الطاقة المساعد، وذلك للحالتين الآتيتين:

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

الحالة الأولى: استخدام متحكم تناسبي تكاملي، كما هو مبين بالشكل (A-23-5)؛ تبين النتائج أن سرعة المركبة الكهربائية تصل إلى سرعة 5.8m/sec ، في حين أن السرعة المطلوبة 8.4m/sec ؛ لأن العزم الحركي للمركبة يتأرجح عند 14N.m ، ولا يصل إلى العزم المطلوب، وهو 20N.m .

الحالة الثانية: استخدام متحكم عصبوني، كما هو مبين بالشكل (B-23-5)، توضّح النتائج أن المركبة تسير بالسرعة المطلوبة بالعزم المطلوب منها.

يُلاحظ من النتائج المبينة بالشكل (23-5) تفوق أداء المركبة الكهربائية عند استخدام متحكم عصبوني ANN على حالة استخدام متحكم تناسبي تكاملي PI ويرجع ذلك بسبب زيادة مقدار شحن المدخنة عند استخدام متحكم ANN؛ يكون تيار المولد نتيجة الكبح بإعادة التوليد أكبر منه في حالة استخدام متحكم PI كما هو مبين بالشكل (A-24-5)؛ مما يتسبب بضعف تيار مدخنة المركبة الكهربائية، بسبب نقصان نسبة الشحن للمدخنة عند استخدام متحكم PI الذي بدوره يؤدي إلى نقصان جهد المدخنة، كما هو مبين بالشكل (B-24-5)؛ إذ يكون جهد المدخنة أعلى عند استخدام متحكم ANN مما هو عليه عند استخدام متحكم PI في نظام الكبح بإعادة التوليد للمركبة الكهربائية.

أجريت مقارنة بين أداء نظامي الكبح بإعادة التوليد، وفق معيار حالة شحن المدخنة (SOC (State of Charge)، كما هو مبين بالجدول (5-5) والذي يُعطى بالعلاقة الآتية (تريمبلاي، وآخرون، 2009):

$$SOC = 100 \left(1 - \frac{1}{Q} \int_0^t I_{bat} dt \right)$$

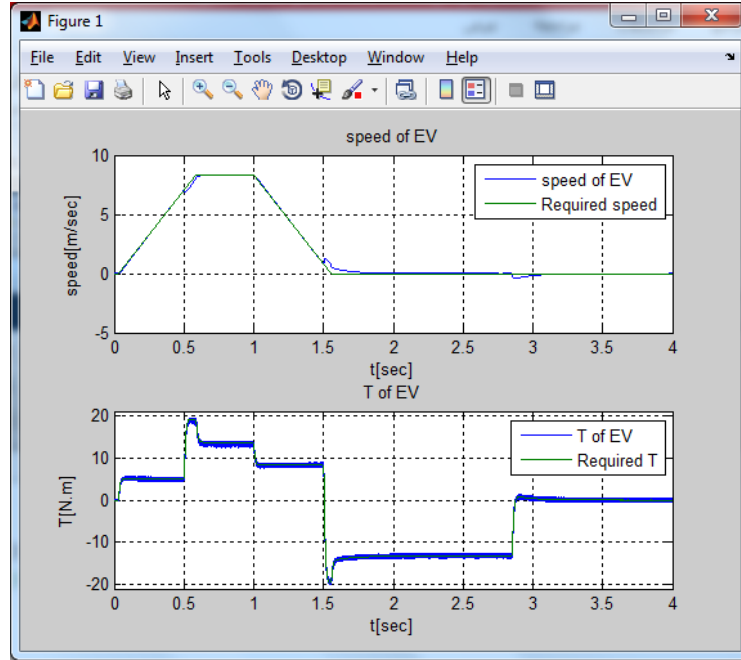
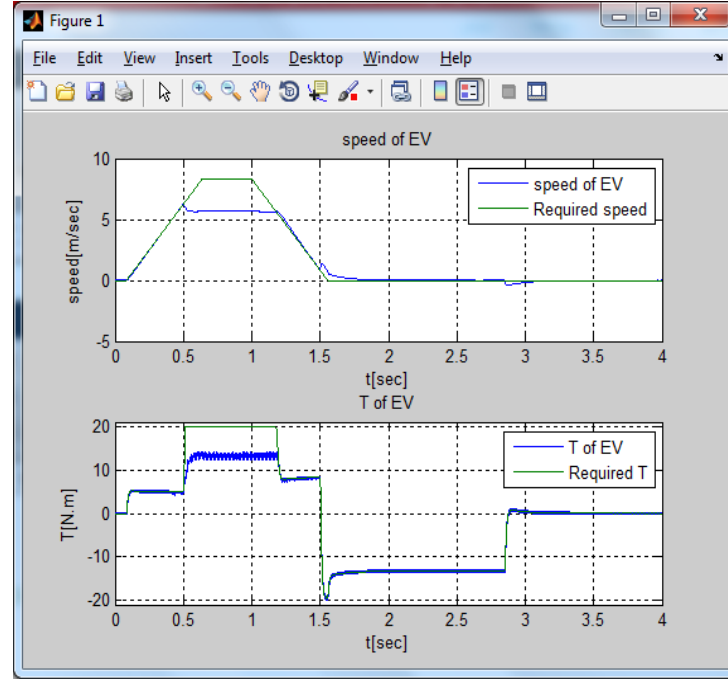
5- 2

الجدول (5-5) مقارنة SOC لمدخنة المركبة الكهربائية في حالتي الكبح بإعادة التوليد باستخدام المتحكم PI والمتحكم ANN:

المتحكم المستخدم	SOC
PI	87.22%
ANN	97.96%

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي



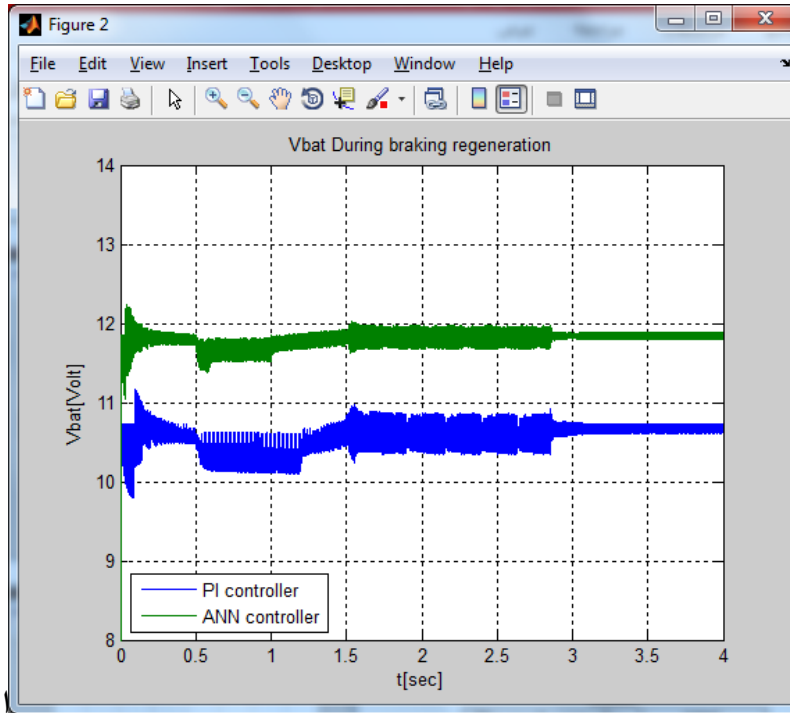
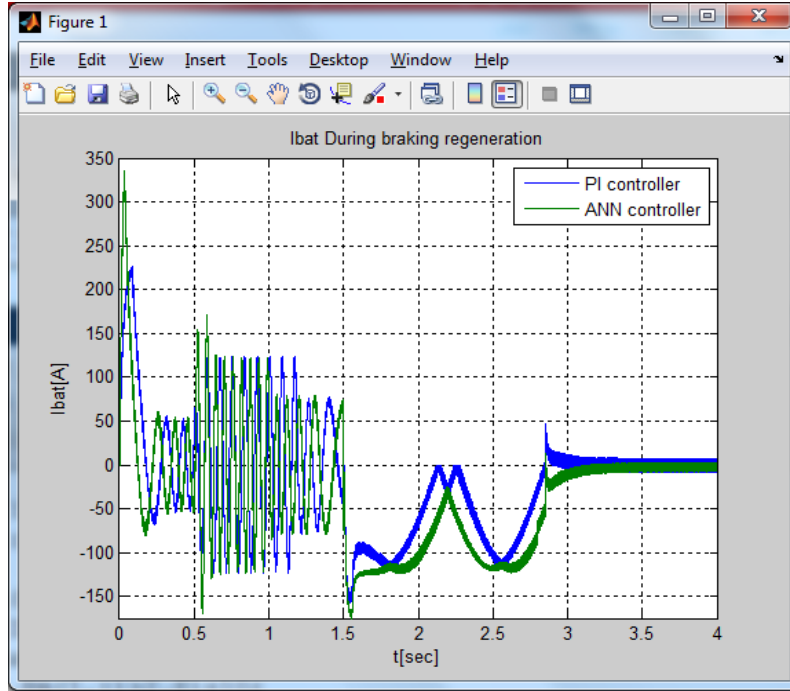
الشكل (5- 23) منحنيات السرعة والعزم الناتجة عن قيادة المركبة الكهربائية، بوجود الكبح بإعادة التوليد.

A- منحنيات السرعة والعزم؛ بوجود متحكم PI.

B- منحنيات السرعة والعزم؛ بوجود متحكم ANN.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي



الشكل (5- 24) منحنيات التيار والجهد لمُدخِرة المركبة الكهربائية؛ بوجود نظام الكبح بإعادة التوليد مع وجود APS. في حالتين: باستخدام متحكم PI؛ وباستخدام متحكم ANN.

A- تيار مدخِرة EV.

B- جهد مدخِرة EV.

5-3 تطبيق منظومة القيادة المصممة والمكونة من المحرك المقاد، باستخدام نظرية

التحكم المباشر بالعزم المطورة، وإجراء التجارب والاختبارات على النموذج، وتحصيل

النتائج؛ باستخدام منصة RT-LAB، ومقارنتها بنتائج النمذجة والمحاكاة.

تطبيق نماذج النمذجة لنظام القيادة المطورة؛ باستخدام الذكاء الصناعي والتي بُنيت بالاعتماد على المعادلات

الرياضية في بيئة MATLAB على المنصة المخبرية RT-LAB.

وتمت عملية الاختبار على مرحلتين:

1-تهيئة النماذج، ومحاكاتها بالزمن الحقيقي.

2-الربط مع حمل خارجي، والذي هو عبارة عن المحرك المقاد والذي طبقنا نماذج القيادة المطورة عليه.

المنصة المخبرية RT-LAB، وهو عبارة عن جهاز يقوم بمحاكاة النماذج المبنية في بيئة MATLAB

بالزمن الحقيقي؛ أي حسابات واقعية حقيقية.

يظهر الشكل 5-25 التالي صورة منصة RT-LAB، والتي تتألف من ثلاثة منابع DC باستطاعة 10KW

لكل منها، حيث تظهر في الشكل 5-26، ومن ثم ثلاث مضخات (مقومات جسمية) تعطي في خرجها تغذية

متناوبة بتوتر وتردد متغيرين، يبينها الشكل 5-27، يعرض على واجهة المنصة أربع شاشات إظهار رقمية والتي

هي عبارة عن محلل إشارة كما في الشكل 5-28.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي



الشكل (5 - 25) صورة واجهة منصة RT-LAB.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي



الشكل (5- 26) منابع DC.



الشكل (5- 27) واجهة المضخمات (Amplifier).



الشكل (5- 28) واجهة لوحة القياسات في منصة RT-LAB.

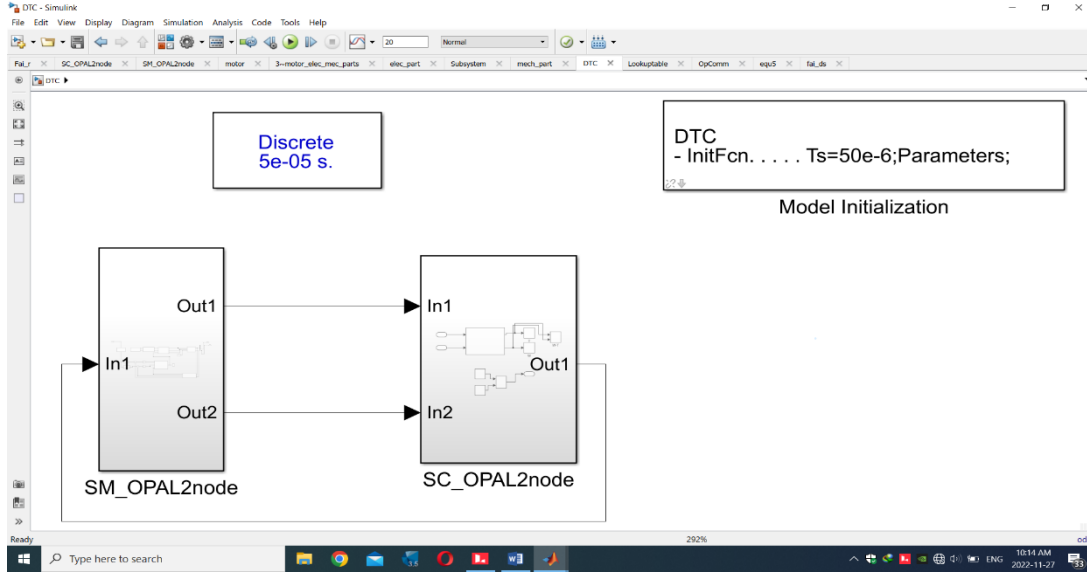
التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

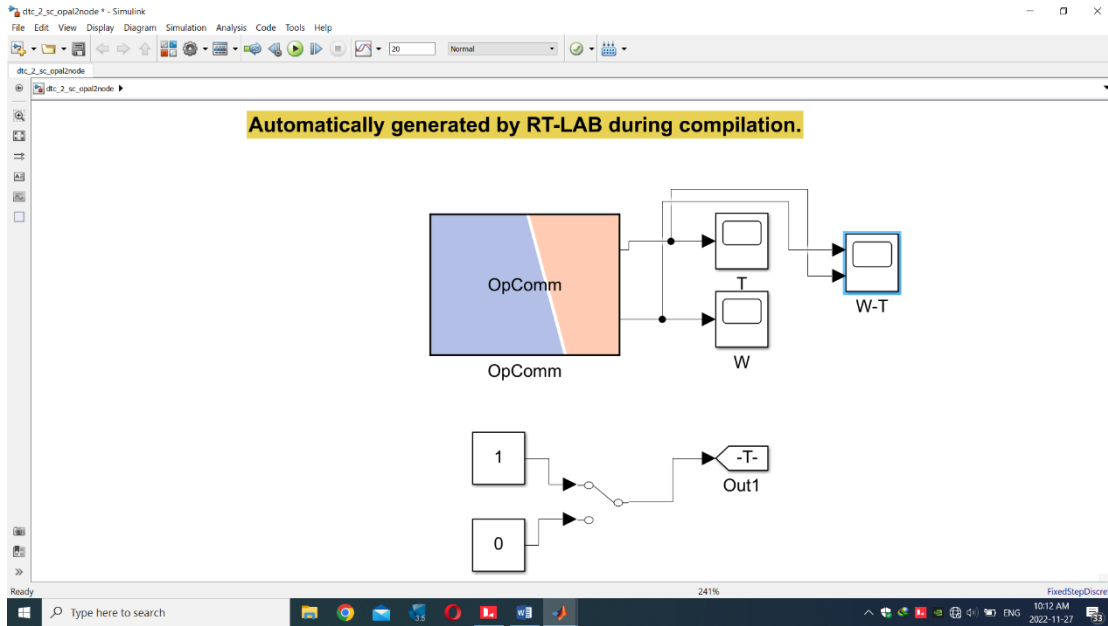
5-3-1 تطبيق طريقة DTC التقليدية في بيئة RT-LAB

يظهر في الشكل 5-29 نموذج المحرك المقود باستخدام طريقة التحكم DTC؛ وذلك باستخدام المحاكاة

بالزمن الحقيقي:



الشكل (5-29) المخطط الصندوقي لطريقة DTC في بيئة RT-LAB.

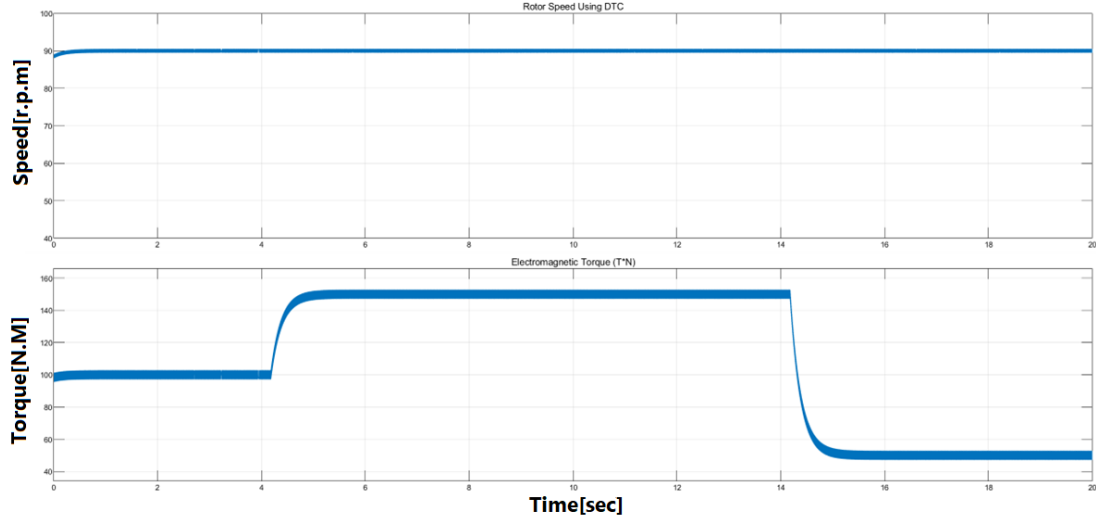


الشكل (5-30) المخطط الصندوقي لطريقة DTC في بيئة RT-LAB بعد عملية التجميع.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

ويظهر في الشكل 5-31 أشارتا السرعة والعزم لطريقة DTC التقليدية:

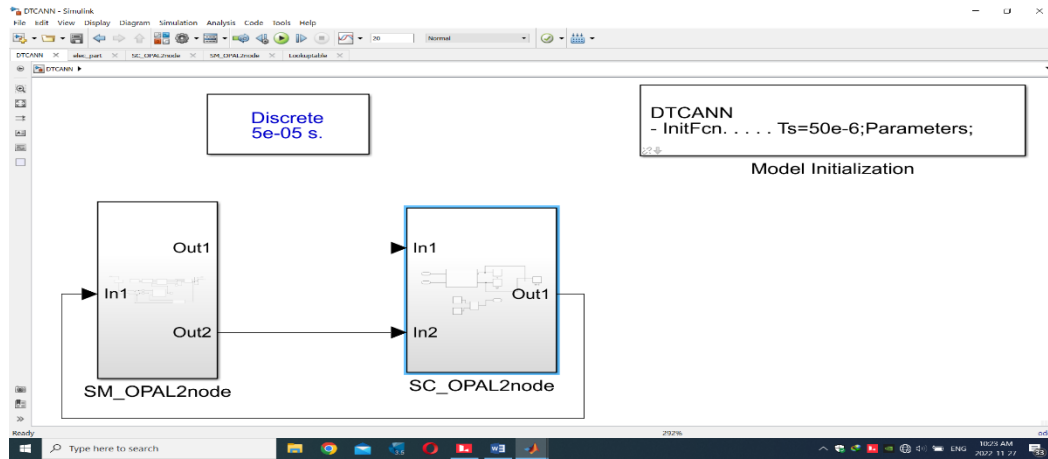


الشكل (5-31) استجابة كل من السرعة والعزم لطريقة DTC التقليدية.

5-3-2 تطبيق طريقة DTC-ANN في بيئة RT-LAB

يظهر في الشكل 5-32 نموذج المحرك المقود باستخدام طريقة التحكم DTC-ANN؛ وذلك

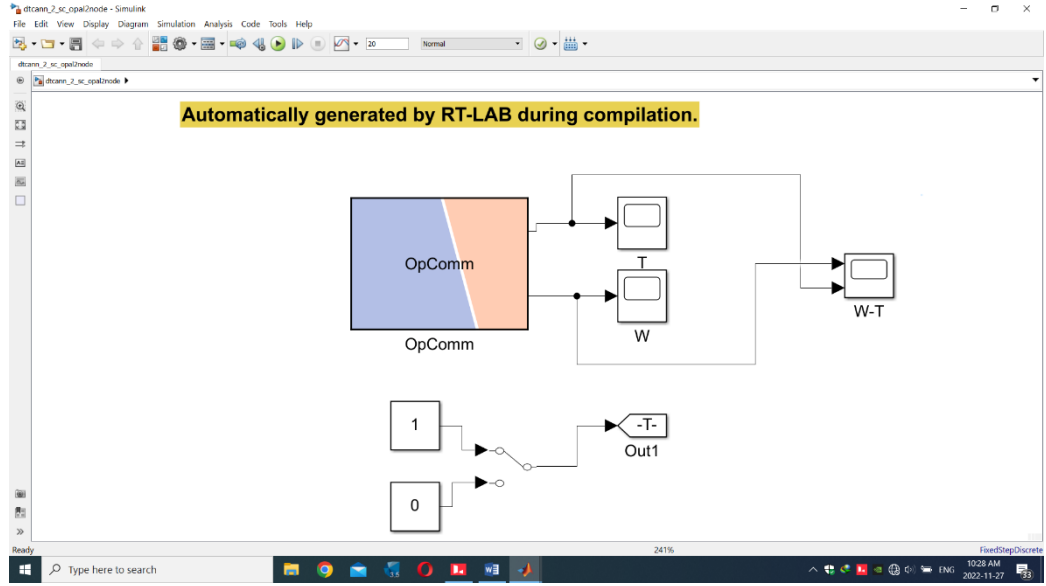
باستخدام المحاكاة بالزمن الحقيقي:



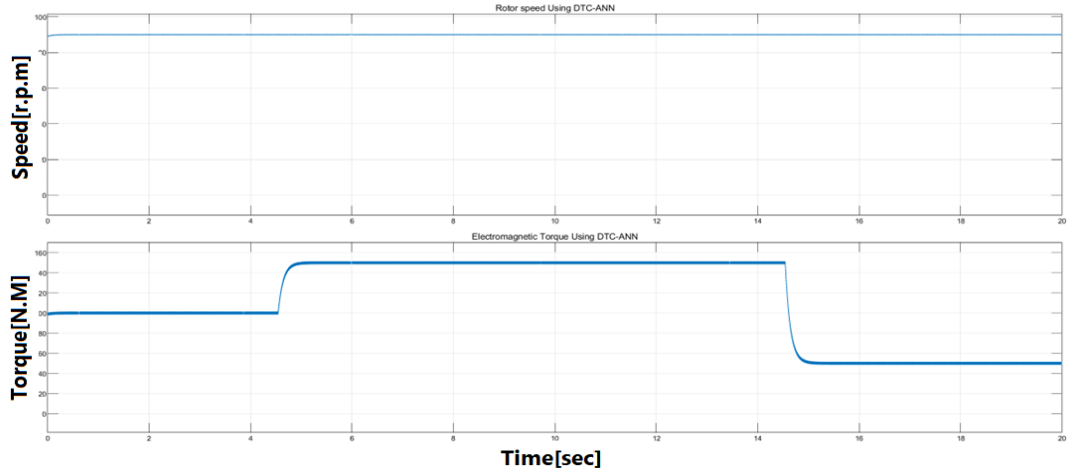
الشكل (5-32) المخطط الصندوقي لطريقة DTC-ANN في بيئة RT-LAB.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي



الشكل (5-33) المخطط الصندوقي لطريقة DTC-ANN في بيئة RT-LAB بعد عملية التجميع.



الشكل (5-34) استجابة كل من السرعة والعزم لطريقة DTC-ANN المطورة.

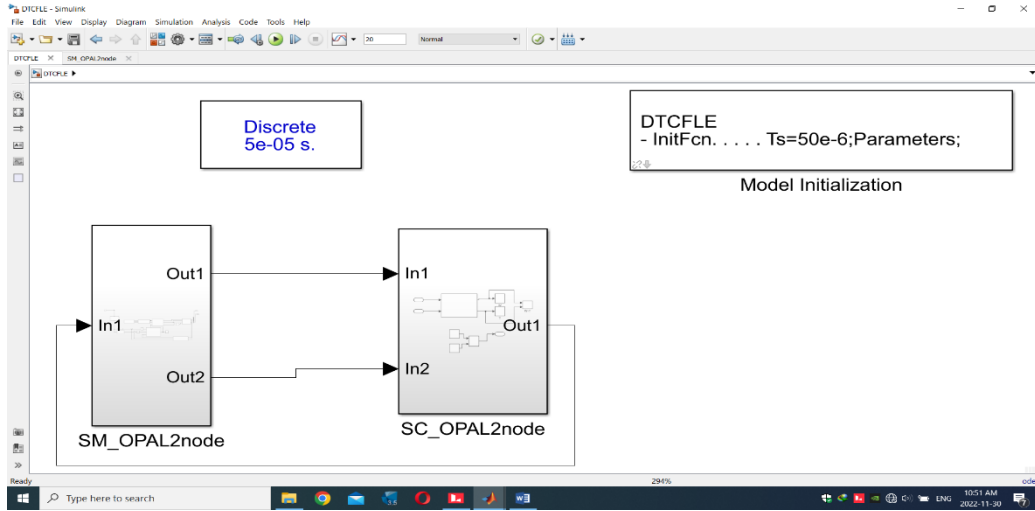
التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

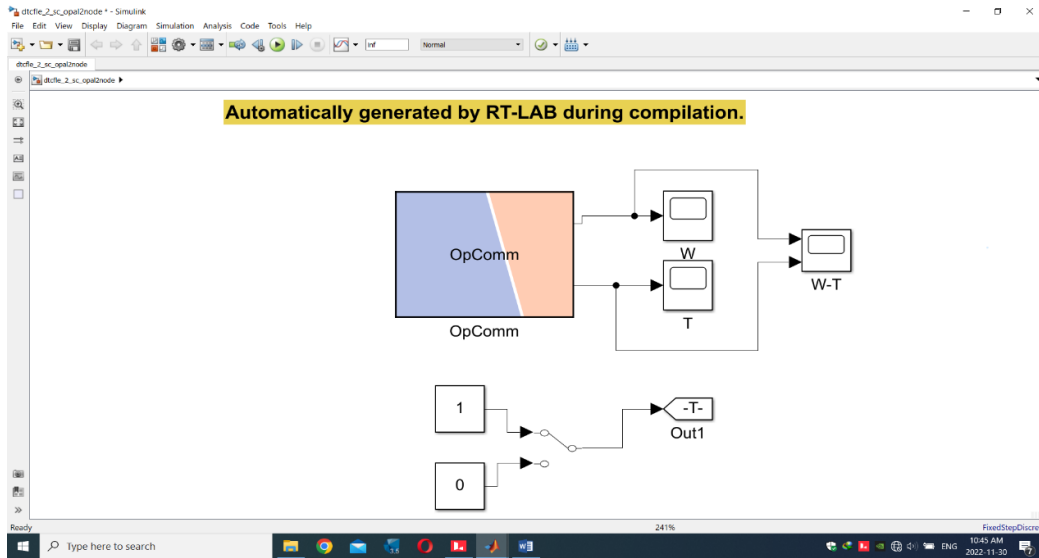
3-3-5 تطبيق طريقة DTC-FUZZY في بيئة RT-LAB

يظهر في الشكل 35-5 نموذج المحرك المقود باستخدام طريقة التحكم DTC-FUZZY، وذلك

باستخدام المحاكاة بالزمن الحقيقي:



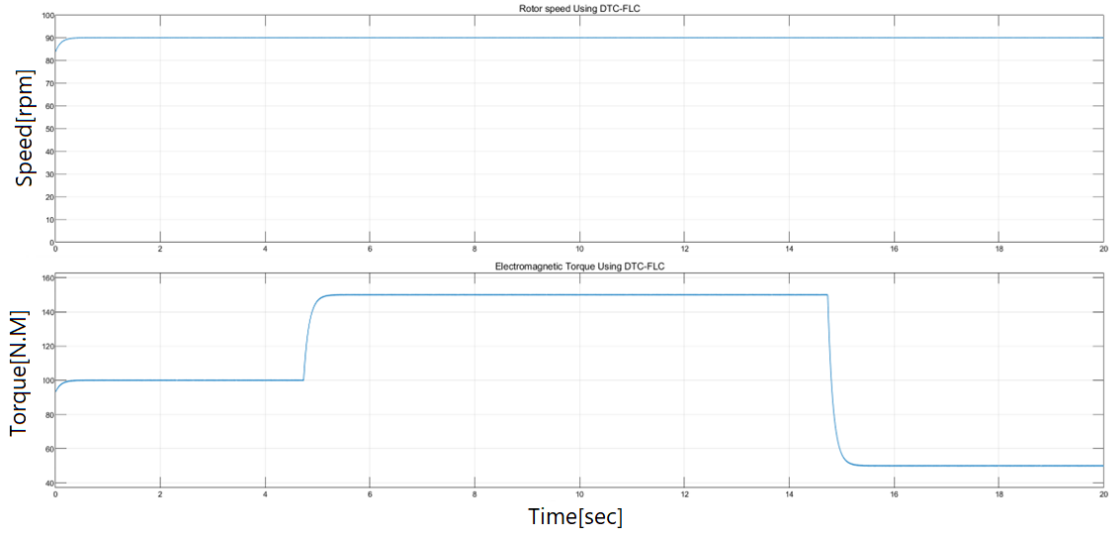
الشكل (5- 35) المخطط الصندوقي لطريقة DTC-FUZZY في بيئة RT-LAB.



الشكل (5- 36) المخطط الصندوقي لطريقة DTC-FUZZY في بيئة RT-LAB بعد عملية التجميع.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

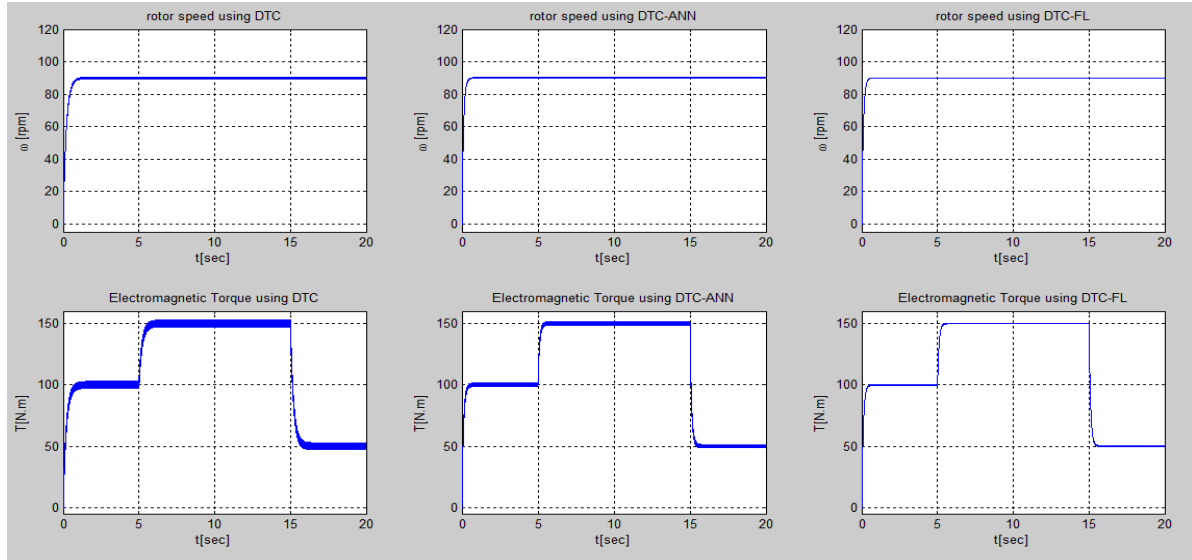


الشكل (5-37) استجابة كل من السرعة والعزم لطريقة DTC-FUZZY المطورة.

4-3-5 المقارنة بين نتائج النمذجة للطرائق الثلاثة للتحكم المباشر بالعزم (التقليدية-

الذكاء الصناعي) الناتجة، باستخدام منصة **RTLAB**.

يبين الشكل 5-38 منحنيات السرعة والعزم لمنهجيات DTC و DTC-ANN و DTC-FLE في حالة مسار (استواء - صعود - هبوط).



الشكل (5-38) منحنيات السرعة والعزم لمنهجيات DTC و DTC-ANN و DTC-FLE في حالة مسار (استواء - صعود - هبوط).

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

مقارنة كل من خطأ السرعة والعزم لكل من طرائق التحكم DTC و DTC-ANN و DTC-FLE، وفق معيار MSE (mean square error) متوسط مربع الخطأ.

الجدول (5-6) مقارنة خطأ السرعة والعزم لطرائق التحكم، وذلك من خلال محاكاتها بالزمن الحقيقي:

المنهجية	خطأ السرعة	خطأ العزم
DTC	40.6179×10^{-7}	116.5274×10^{-7}
DTC-ANN	20.2681×10^{-7}	57.2824×10^{-7}
DTC-FLE	20.2532×10^{-7}	56.3230×10^{-7}

5-3-5 قيادة الحمل الفيزيائي (المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار)؛ باستخدام طريقة

التحكم المباشر بالعزم التقليدية DTC والمطبقة؛ من خلال المنصة المخبرية المنفذة

وعند دوران المحرك بسرعة $750[\text{rpm}]$.

يظهر في الشكل 5-39 المنصة المخبرية التي اختبرنا من خلالها طريقة التحكم التقليدية والطرائق المطورة:



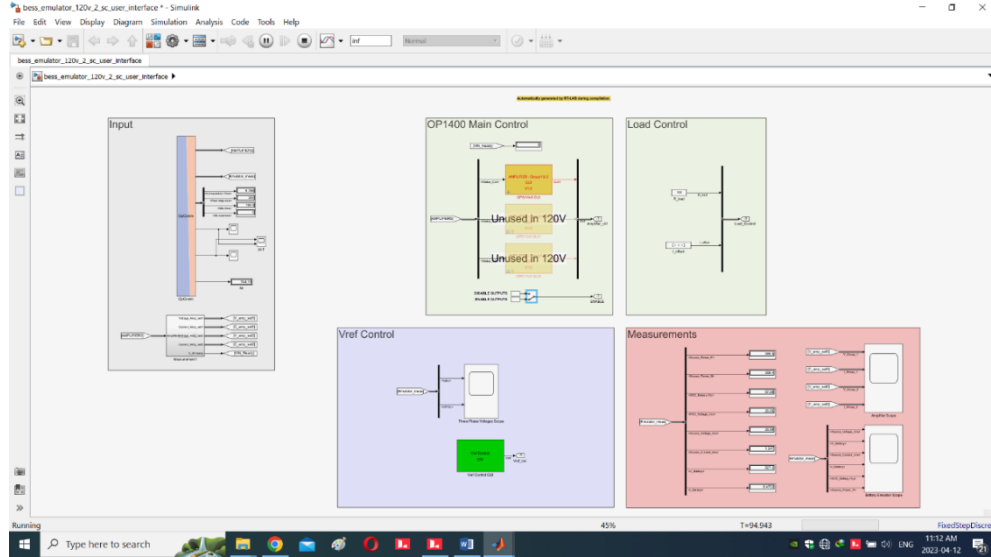
الشكل (5-39) تجهيزات المنصة المخبرية المنفذة.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

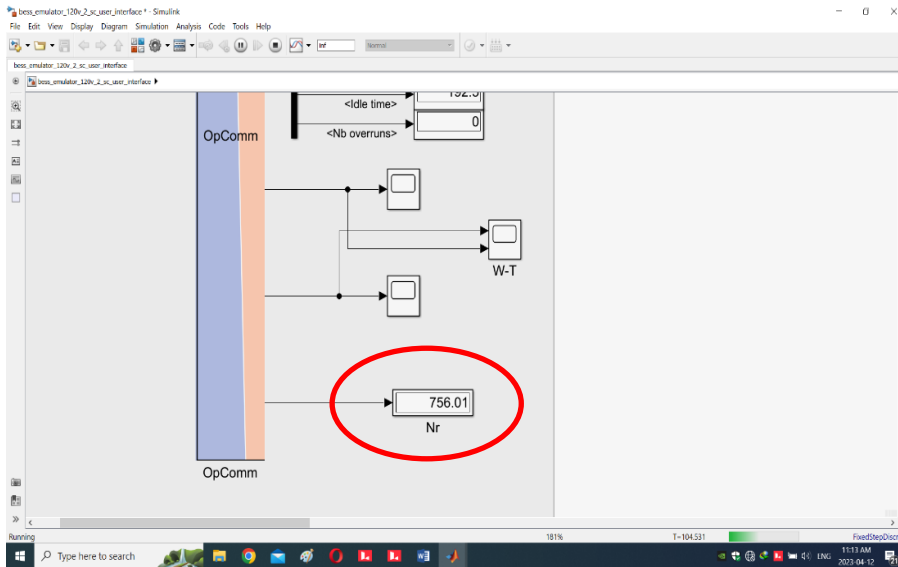
أحمد الحمود العريفي

اختبرنا نظام القيادة المصمم من خلال تطبيقه على محرك تحريضي ثلاثي الطور فيزيائياً، ومراقبة إشارات

السرعة والعزم؛ ومن ثم مقارنة نتائج الطريقة الفيزيائية بطريقتي المحاكاة السابقتين؛ باستخدام الماتلاب والمحاكاة بالزمن الحقيقي.



الشكل (5- 40) واجهة المستخدم لقيادة المحرك التحريضي؛ باستخدام DTC التقليدية.

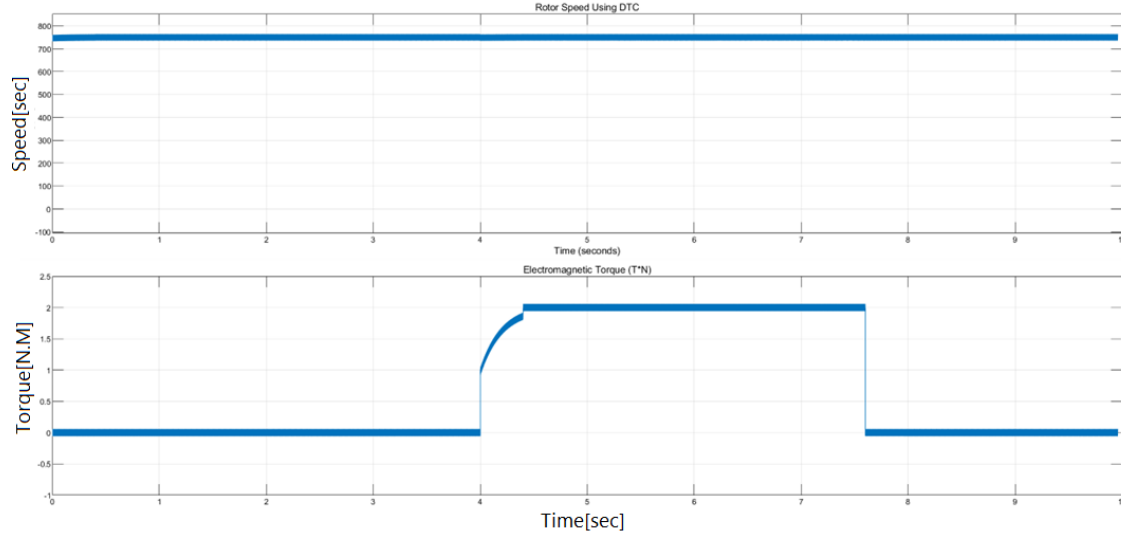


الشكل (5- 41) السرعة على واجهة المستخدم قبل التحميل، والمقاسة على محور المحرك عند تطبيق عزم

$2[N.M]$.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي



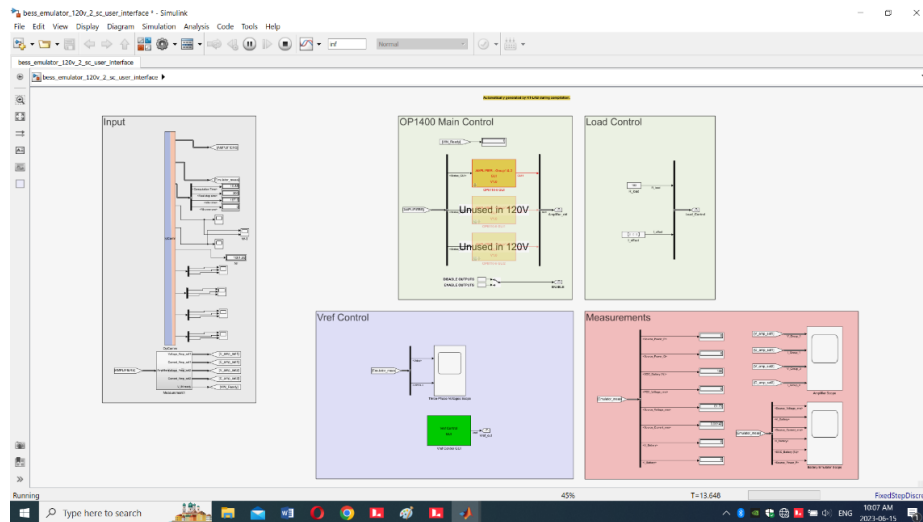
الشكل (5- 42) منحنيات السرعة والعزم الناتجة من تطبيق الطريقة التقليدية للتحكم المباشر بالعزم

على الحمل الفيزيائي (محرك التحريضي ثلاثي الأطوار).

5-3-6 قيادة الحمل الفيزيائي (المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار)؛ باستخدام طريقة

التحكم المباشر بالعزم المطورة DTC-ANN، والمطبقة من خلال المنصة المخبرية

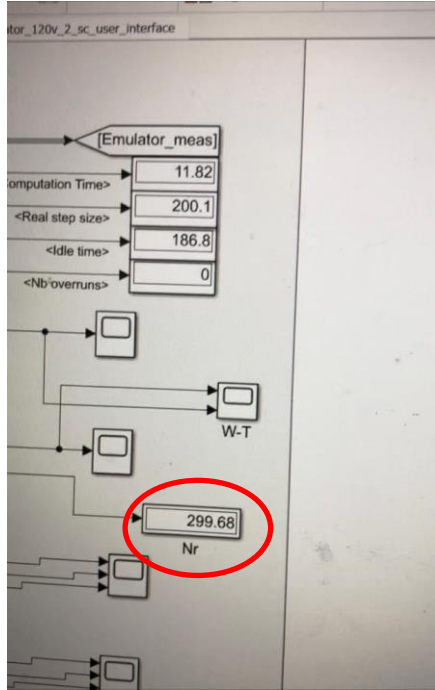
المنفذة وعند دوران المحرك بسرعة 300[rpm].



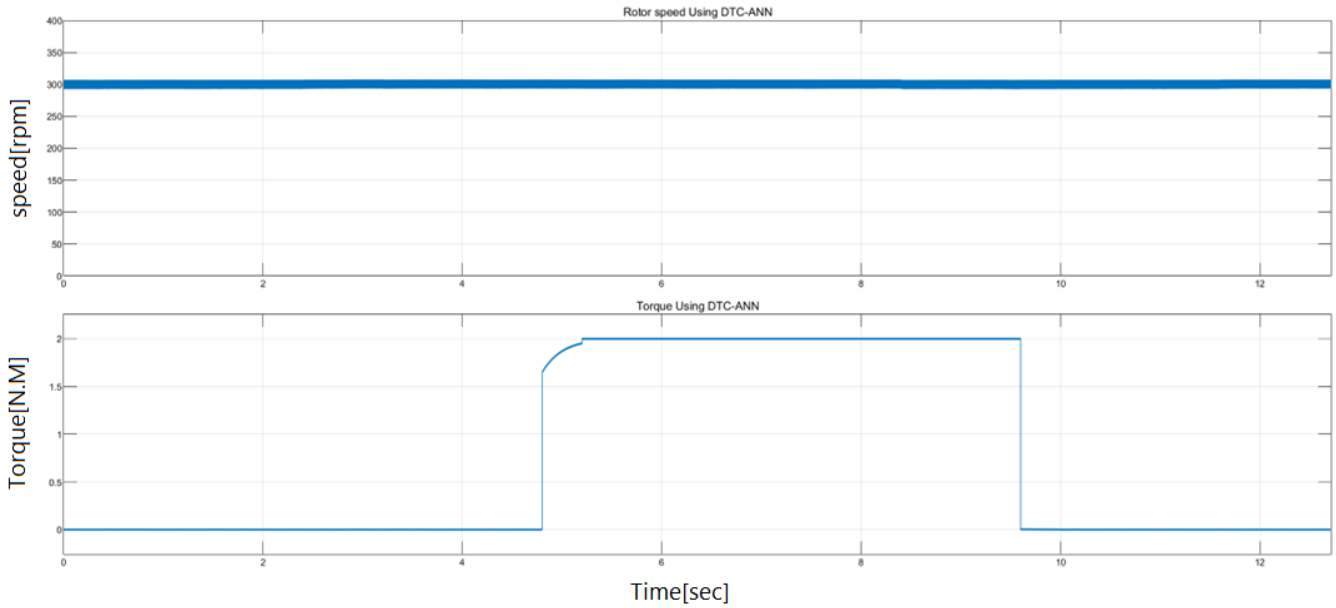
الشكل (5- 43) واجهة المستخدم لقيادة المحرك التحريضي؛ باستخدام DTC-ANN المطورة.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي



الشكل (5- 44) السرعة على واجهة المستخدم قبل التحميل، والمقاسة على محور المحرك عند تطبيق عزم 2[N.M].



الشكل (5- 45) منحنيات السرعة والعزم الناتجة من تطبيق طريقة DTC-ANN للتحكم المباشر بالعزم على الحمل الفيزيائي (محرك التحريضي ثلاثي الأطوار).

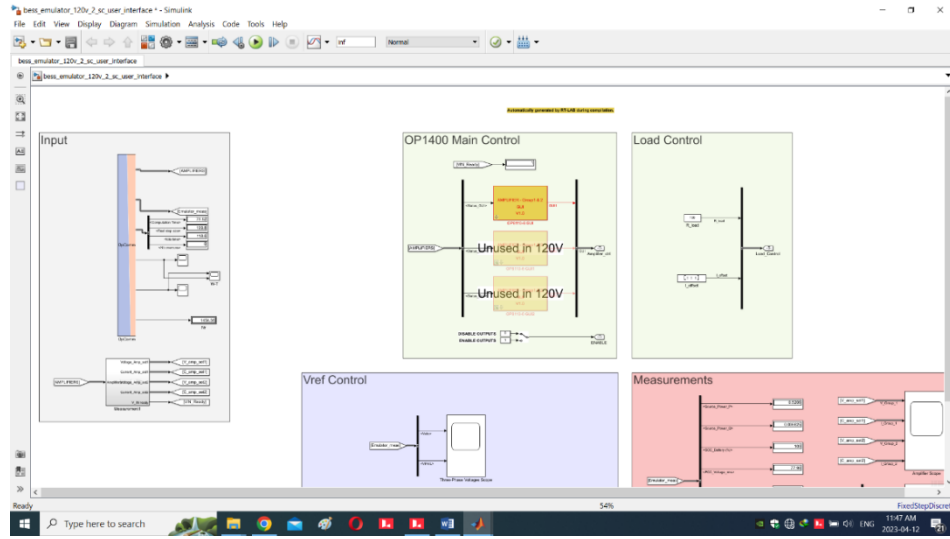
التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

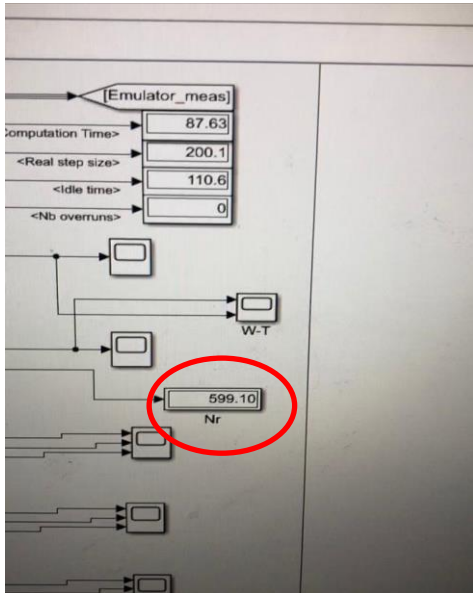
5-3-7 قيادة الحمل الفيزيائي (المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار)؛ باستخدام طريقة

التحكم المباشر بالعزم المطورة DTC-FLC؛ والمطبقة من خلال المنصة المخبرية

المنفذة، وعند دوران المحرك بسرعة $600[\text{rpm}]$.



الشكل (5-46) واجهة المستخدم لقيادة المحرك التحريضي؛ باستخدام DTC-FUZZY المطورة.

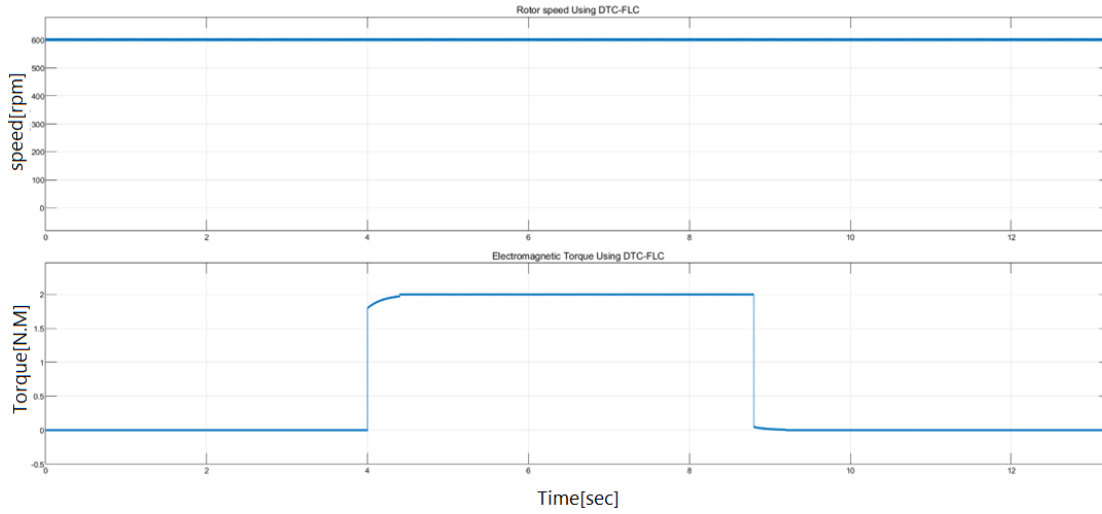


الشكل (5-47) السرعة على واجهة المستخدم قبل التحميل، والمقاسة على محور المحرك عند تطبيق عزم $2[\text{N.M}]$.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

يظهر الشكل 5-47 منحنيات السرعة والعزم الناتجة من تطبيق الطريقة المطورة DTC-FUZZY للتحكم المباشر بالعزم على الحمل الفيزيائي (محرك التحريضي ثلاثي الأطوار)، ونلاحظ من هذه الطريقة تقليل التآرجحات بصورة واضحة حول القيمة المرجعية بالنسبة لمنحني السرعة والعزم وبصورة خاصة منحني العزم؛ مما ينعكس إيجاباً على استقرار نظام القيادة.



الشكل (5 - 48) منحنيات السرعة والعزم الناتجة من تطبيق طريقة DTC-FUZZY ؛ للتحكم المباشر بالعزم على الحمل الفيزيائي (محرك التحريضي ثلاثي الأطوار).

بالنسبة لمقارنة كل من خطأ السرعة والعزم لكل من طرائق التحكم DTC و DTC-ANN و DTC-FLE وفق معيار MSE (mean square error) متوسط مربع الخطأ، وذلك للتطبيق العملي، نلاحظ تفوق الطرائق المطورة على الطريقة التقليدية وبالأخص طريقة DTC-FLE.

الجدول (5 - 7) مقارنة خطأ السرعة والعزم لطرائق التحكم وذلك من خلال التطبيق العملي:

المنهجية	خطأ السرعة	خطأ العزم
DTC	48.5381×10^{-7}	125.3719×10^{-7}
DTC-ANN	25.1739×10^{-7}	63.8824×10^{-7}
DTC-FLE	24.9025×10^{-7}	63.2501×10^{-7}

من خلال مقارنة نتائج التطبيق العملي بنتائج المحاكاة بالزمن الحقيقي نلاحظ أن نتائج التطبيق العملي قريبة جداً من نتائج المحاكاة؛ مما يدعم صحة النتائج.

5-4 الخاتمة

عُرض في هذا الفصل إجراءات المحاكاة بطريقة التحكم المباشر بالعزم التقليدية، والطرائق المطورة المقترحة، باستخدام الذكاء الصناعي (الشبكات العصبونية-المنطق العائم) وذلك في بيئة MATLAB، اعتمدنا معيار متوسط مربع الخطأ لمقارنة نتائج الطرائق الثلاث، وتبين أفضلية وتفوق الطرائق المطورة على الطريقة التقليدية لـ DTC، لناحية تقليل التأرجحات حول القيمة المرجعية لكل من السرعة والعزم، أجريت المحاكاة بالتقنيات الثلاث في بيئة RT-LAB، وبينت النتائج تطابقها مع النتائج في بيئة MATLAB، أجري التطبيق العملي باستخدام محرك تحريضي ثلاثي الأطوار وحمل ميكانيكي على منصة RT-LAB، وبينت النتائج تقاربها مع نتائج النمذجة والمحاكاة؛ مما يدعم صحة وصوابيه ودقة التقنية المقترحة وتأثيرها على أداء نظام القيادة والمركبة.

النتائج و التوصيات

الخاتمة

يعدُّ المحرك التحريضي ثلاثي الأطوار أحد الخيارات العملية المناسبة لجر وقيادة المركبات الكهربائية، توجد تقنيات وطرائق مختلفة للتحكم بسرعته، وتعدُّ طريقة التحكم المباشر بالعزم إحدى أهم الطرائق المناسبة للجر في المركبات الكهربائية. تناول البحث نمذجة ومحاكاة المحرك ونظام قيادته، باستخدام تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC التقليدية و المطورة باستخدام الذكاء الصناعي (الشبكات العصبونية، والمنطق العائم) وذلك في بيئتي MATLAB وRTLAB؛ فضلاً عن التطبيق العملي؛ باستخدام المنصة البحثية OP4510، في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية قسم هندسة الطاقة الكهربائية، أجريت مقارنة نتائج النمذجة والمحاكاة في الماتلاب مع نتائج المنصة البحثية، أظهرت النتائج أفضلية وتُفوق الطرائق المطورة في تخفيض سوية التآرجحات في إشارتي العزم والسرعة عن القيمة المرجعية المطلوبة.

نعرض أهم النتائج للبحث، ونختم ببعض التوصيات:

النتائج:

- تم تطوير طريقة تقدير فيض الثابت والعزم الكهرطيسي كمقادير خاضعة للتحكم في تقنية DTC التقليدية، استند البحث إلى مقدرات تعتمد تقنيات الذكاء الصناعي (الشبكات العصبونية-المنطق العائم)؛ انعكس ذلك في تحسين المقدرات ومتانتها ورفع سوية أدائها.
- يساهم استخدام المقدرات المطورة في تقليل سوية التمرجات والاهتزازات حول القيمة المرجعية للعزم، التي ترافق عمل المتحكمات البطائية في حلقة تنظيم العزم.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

- أثبتت تقنية التحكم المباشر بالعزم باستخدام الذكاء الصناعي الاستجابة الديناميكية العالية لإشارة العزم في الحالة العابرة، والانتقال بسلاسة ونعومة وبزمن استجابة سريع بين سويات العزم المختلفة.
- أثبتت مقارنة نتائج المحاكاة بين الطريقة التقليدية، والطرائق المطورة؛ باستخدام الذكاء الصناعي وذلك في بيئتي MATLAB وRTLAB، قدرة الطرائق المطورة على تخفيض مطال التأرجحات في استجابتي العزم والسرعة حول القيمة المرجعية، وذلك في الحالة المستقرة والعابرة.
- بينت نتائج الاختبارات العملية على المحرك التحريضي بحمل ميكانيكي مع الربط على منصّة RTLAB؛ باستخدام تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC التقليدية والمطورة باستخدام الذكاء الصناعي أفضلية هذه الأخيرة. وكذلك أثبتت تقارب النتائج العملية مع نتائج النمذجة والمحاكاة؛ في بيئتي MATLAB وRTLAB، صحة نتائج البحث.
- تبين من استعراض الدراسات المرجعية المتعلقة بموضوع بحثنا في السنوات العشر الأخيرة، اعتمادها على قيم ثابتة لمحددات الدارة المكافئة للمحركات المستخدمة في جرّ المركبات الكهربائية. على الرغم من انعكاس ذلك سلباً على أداء المركبة الكهربائية ونظام قيادتها، اعتمدت الدراسة-البحث على الأخذ بالحسبان تغيرات محدّدات المحرك أثناء التشغيل، مثل تغيرات مقاومة ملفات الثابت مع تغير عزم حمولة المحرك؛ وانعكاس قيمتها بشكل واضح على أداء نظام القيادة ودقته ومتانته وقوته وثباته.

التحكم المباشر بالعزم (DTC) باستخدام الذكاء الاصطناعي لقيادة المحركات التحريضية (تطبيقها بالمركبات الكهربائية)

أحمد الحمود العريفي

التوصيات:

- 1- تبرز الحاجة إلى إجراء أبحاث معمقة باستخدام تقنيات الذكاء الصناعي في مختلف تقنيات أنظمة القيادة الكهربائية؛ والتي ستعكس أيجاباً على دقة ومتانة هذه النظم، وتحسين أدائها.
- 2- يعتمد عمل خوارزميات نظم القيادة الكهربائية المركبة على خوارزمياتها الفرعية؛ ويقود تحسين الأداء لهذه الخوارزميات بصورة عامة، لتجنب المساوئ التي تعاني منها الخوارزميات الفرعية.
- 3- يعد مخبر الشبكات الذكية وتجهيزاته وبرمجياته أحد المخابر المهمة في إجراء الأبحاث العلمية؛ في مجالات هندسة الطاقة الكهربائية والطاقات المتجددة، ويمكن اعتماده كمخبر بحثي لطلاب الدراسات العليا والباحثين في مختلف التطبيقات، ومنها في مجال نظم القيادة الكهربائية الحديثة، وتأتي منظومة OP4510 في مقدمة تجهيزات المنصة المخبرية.

المراجع

1. Electrical4U. (2020, October 25). Advantages and Disadvantages of Induction Motor.
2. de Souza, D.F., Salotti, F.A.M., Sauer, I.L., Tatizawa, H., de Almeida, A.T., & Kanashiro, A.G. (2022). A Performance Evaluation of Three-Phase Induction Electric Motors between 1945 and 2020. *Energies*, 15, 2002. <https://doi.org/10.3390/en15062002>
3. Marulasiddappa, H.B., & Pushparajesh, V. (2021). Title of the conference paper. In IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 1055, 012142.
4. Lahon, P., Kandali, A.B., Panda, G., & Patowary, M. (2022). A Review on Control Methods Used in Renewable Energy Source-Fed Induction Motors. In *Sustainable Energy and Technological Advancements* (pp. 279-292).
5. Imtiyaz, T., Prakash, A., Bakhsh, F.I., & Jain, A. (2022). Modelling and Analysis of Indirect Field-Oriented Vector Control of Induction Motor (IM). In *Power Electronics and High Voltage in Smart Grid* (pp. 215-228).
6. ToleSutikno, NikIdris, N.R., & Jidin, A. (2014). A review of direct torque control of induction motors for sustainable reliability and energy-efficient drives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 548-558.
7. Sung, G.M., Tung, L.F., Huang, C.C., & Huang, H.Y. (2022). Modified Predictive Direct Torque Control ASIC with Multistage Hysteresis and Fuzzy Controller for a Three-Phase Induction Motor Drive. *Electronics*, 11(11), 1802. <https://doi.org/10.3390/electronics11111802>
8. Kazemzadeh, E., Koengkan, M., & Fuinhas, J.A. (2022). Effect of Battery-Electric and Plug-In Hybrid Electric Vehicles on PM2.5 Emissions in 29 European Countries. *Sustainability*, 14, 2188. <https://doi.org/10.3390/su14042188>
9. Ravi, S.S., & Aziz, M. (2022). Utilization of Electric Vehicles for Vehicle-to-Grid Services: Progress and Perspectives. *Energies*, 15, 589. <https://doi.org/10.3390/en15020589>
10. Sargolzaee, N., & Ghaseminezhad, M. (2016). Control of an EV Electrical Differential based on Neural Network Based. *World Essays Journal*, 4(2), 62-69.
11. Orille, A.L., & Sowilam, G.M.A. (1999). APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR DIRECT TORQUE CONTROL. *Computers & Industrial Engineering*, 37, 391-394.
12. Purwahyudi, B., Soebagio, & Ashari, M. (2011). NEURAL NETWORK TECHNIQUE FOR DIRECT TORQUE CONTROL OF INDUCTION MOTOR

أحمد الحمود العريفي

USED IN ELECTRICALLY DRIVEN MARINE PROPELLER. INTERNATIONAL JOURNAL of ACADEMIC RESEARCH, 3(5).

13. Bouhoune, K., Yazid, K., Boucherit, M.S., & Mobarakeh, B.N. (2018). Simple and Efficient Direct Torque Control of Induction Motor Based on Artificial Neural Networks. In Proceedings of a national research project, under the A01L07UN16042014115 code (pp. 1-6). IEEE.
14. RamaKrishna, G.V. (2007). TORQUE RIPPLE REDUCTION IN DIRECT TORQUE CONTROLLED INDUCTION MOTOR DRIVE BY USING FUZZY CONTROLLER. Department of Electrical Engineering National Institute of Technology, 3, 236-242.
15. Sudheer, H., Kodad, S.F., & Sarvesh, B. (2017). 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), 6(2), 79-90.
16. Mohanapriya, P., & Umadevi, K. (2018). DIRECT TORQUE CONTROL OF THREE PHASE INDUCTION MOTOR USING NEURAL NETWORK-FUZZY LOGIC TECHNIQUES. International Journal of Development Research, 8(1), 18233-18239.
17. Boukhalfa, G., Belkacem, S., Chikhi, A., & Benaggoune, S. (2018). Direct torque control of dual-star induction motor using a fuzzy-PSO hybrid approach. Computing and Informatics.
18. El Ouanjli, N., Motahhir, S., Derouich, A., El Ghzizal, A., Chebabhi, A., & Taoussi, M. (2019). Improved DTC strategy of doubly fed induction motor using fuzzy logic controller. Energy Reports, 5, 271-279.
19. Kumar, D.K., & Das, G.T.R. (2020). 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, 13(2).
20. Ecole Nationale Polytechnique d'Oran Maurice Audin. (2019). FIVE-LEVEL DTC CONTROL OF INDUCTION MACHINE DRIVE USING FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR LOW TORQUE RIPPLE. A CTA TECHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering Tome XII [2019], Fascicule 2, April - June.
21. Lallouani, H., Saad, B., & Letfi, B. (2019). DTC-SVM based on Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller of Double Stator Induction Machine fed by Six-Phase Inverter. I.J. Image, Graphics and Signal Processing, 7, 48-57.
22. Ammar, A. (2019). Performance improvement of direct torque control for induction motor drive via fuzzy logic-feedback linearization: Simulation and

أحمد الحمود العريفي

- experimental assessment. COMPEL International Journal of Computations and Mathematics in Electrical, 38(2), 672-692.
23. User, Y., & Tabanli, N. (2017). Development of Induction Motor Torque Control Algorithm for Electric Vehicles on Inclined Roads. In International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN).
 24. Gasbaoui, B., Nasri, A., (2012). A Novel 4WD Electric Vehicle Control Strategy Based on Direct Torque Control Space Vector Modulation Technique. Intelligent Control and Automation, 3, 236-242.
 25. Tashakori, A., & Ektesabi, M. (2012). Direct Torque Controlled Drive Train for Electric Vehicle. In Proceedings of the World Congress on Engineering Vol II WCE 2012, July 4 - 6, 2012, London, U.K.
 26. Mohanapriya, P., & Umadevi, K. (2018). DIRECT TORQUE CONTROL OF THREE PHASE INDUCTION MOTOR USING NEURAL NETWORK-FUZZY LOGIC TECHNIQUES. International Journal of Development Research, 8(1), 18233-18239.
 27. Jeyashanthi, J., & Santhi, M. (2020). Performance of Direct Torque Controlled Induction Motor Drive by Fuzzy Logic Controller. JOURNAL OF CONTROL ENGINEERING AND APPLIED INFORMATICS.
 28. Gasbaoui, B., Chaker, A., Laoufi, A., Allaoua, B., & Nasri, A. (2011). The Efficiency of Direct Torque Control for Electric Vehicle Behavior Improvement. SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING, 8(2), 127-146.
 29. Gowri, G.A., & Prince, A. (2014). Optimised Direct Torque Control of Induction Motor for Electric Vehicle Propulsion. International Journal of Scientific and Research Publications, 4(1).
 30. Pugi, L., Favilli, T., Berzi, L., Locorotondo, E., & Pierini, M. (2019). Application of Regenerative Braking on Electric Vehicles. IEEE, 3(19).
 31. Xu, W., Zhao, H., Ren, B., & Chen, H. (2020). A regenerative braking control strategy for electric vehicle with four in-wheel motors. Jilin University Department of Control Science and Engineering, Changchun, 130025, P. R. China. n/a(n/a).
 32. Karyotakis, E., Mongellaz, R., & Lidberg, M. (2021). Regenerative braking for an electric vehicle with a high-speed drive at the front axle. Resource Efficient Vehicles Conference – rev2021, n/a(n/a), n/a.
 33. Xu, G., Li, W., Xu, K., & Song, Z. (2011). An Intelligent Regenerative Braking Strategy for Electric Vehicles. Energies, 4, 1461-1477. doi:10.3390/en4091461

أحمد الحمود العريفي

34. Rizzo, G., Tiano, F.A., Mariani, V., & Marino, M. (2021). Optimal Modulation of Regenerative Braking in Through-The-Road Hybridized Vehicles. *Energies*, 14(6835), 2-15. <https://doi.org/10.3390/en14206835>
35. Long, B., Lim, S.T., Ryu, J.H., & Chong, K.T. (2014). Energy Regenerative Braking Control of Electric Vehicles Using Three-Phase Brushless Direct-Current Motors. *Energies*, 7, 99-114. doi:10.3390/en7010099
36. Li, L., Ping, X., Shi, J., Wang, X., & Wu, X. (2020). Energy recovery strategy for regenerative braking system of intelligent four-wheel independent drive electric vehicles. *IET Intelligent Transportation Systems*, 15(2021), 119-131. <https://doi.org/10.1049/itr2.12009>
37. Jamadar, N.M., & Jadhav, H.T. (2021). A review on braking control and optimization techniques for electric vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, n/a(n/a), 1-12. DOI: 10.1177/0954407021996906
38. Totev, V., Gueorgiev, V., & Rizov, P. (2019). Regenerative braking of electric vehicles. *IEEE*, 5(19), n/a.
39. Peng, F., Fang, B., & Shen, Z. (2021). Research on Regenerative Braking Control of Electric Vehicle Based on Multi-objective. *Asia-Pacific Conference on Communications Technology and Computer Science (ACCTCS)*, 2021(n/a), 338-343. DOI 10.1109/ACCTCS52002.2021.00074
40. Manriquez, E.Q., Sanchez, E.N., Toledo, M.E.A., & Munoz, F. (2021). Neural control of an induction motor with regenerative braking as electric vehicle architecture. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 104, 1-14.
41. Zhao, Q., Zhang, H., & Xin, Y. (2021). Research on Control Strategy of Hydraulic Regenerative Braking of Electrohydraulic Hybrid Electric Vehicles. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*, 2021(5391351), 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/5391351>
42. Arulious Jora A, Earlina D, Harish D, Sakthi Priya P, Inba Remy A, Nancy Mary J S. (2021). Design of solar-powered electric vehicle. *ICAPSM*.
43. Commault, B., Duigou, T., Maneval, V., Gaume, J., Chabuel, F., & Voroshazi, E. (2021). Overview and Perspectives for Vehicle-Integrated Photovoltaics. *Applied Sciences*, 11(11598). <https://doi.org/10.3390/app112411598>
44. Kosai, S., Zakaria, S., Che, H.S., Hasanuzzaman, M., Rahim, N.A., Tan, C., Ahmad, R.D.R., Abbas, A.R., Nakano, K., Yamasue, E., et al. (2022). Estimation of Greenhouse Gas Emissions of Petrol, Biodiesel and Battery Electric Vehicles in Malaysia Based on Life Cycle Approach. *Sustainability*, 14, 5783. <https://doi.org/10.3390/su14105783>

أحمد الحمود العريفي

45. Georg Bieker, Cornelius Moll, Steffen Link, Patrick Plötz, Peter Mock. (2022). More bang for the buck: a comparison of the life-cycle greenhouse gas emission benefits and incentives of plug-in hybrid and battery electric vehicles in Germany. ICCT White Paper | GHG Benefits and Incentives of PHEVs and BEVs in Germany.
46. A STEPS+ Sustainable Freight Research Program Technical Paper. (2022). Estimating Maintenance and Repair Costs for Battery Electric and Fuel Cell Heavy-Duty Trucks.
47. Tahir Aja Zarma, Ahmadu Adamu Galadima, and Maruf A. Aminu. (2022). A Review of Motors for Electric Vehicles. University of Nigeria, Abuja.
48. Dr. James Edmondson. (2022). Electric Motors for Electric Vehicles: Technologies and Market Outlook. Senior Technology Analyst, IDTechEx.
49. Zeina Bitara, Samih Al Jabia, Imad Khamis. (2014). Modeling and Simulation of Series DC Motors in Electric Car. Energy Procedia, 50, 460-470.
50. Mustafa Yaz and Emrah Cetin. (2021). Brushless Direct Current Motor Design and Analysis. COJ Electrical and Communication Engineering, 2(2), COJEC.000534.2021. DOI: 10.31031/COJEC.2021.02.000534
51. Lee, H.-Y., Yoon, S.-Y., Kwon, S.-O., Shin, J.-Y., Park, S.-H., & Lim, M.-S. (2021). A Study on a Slotless Brushless DC Motor with Toroidal Winding Processes, 9(11), 1881. <https://doi.org/10.3390/pr9111881>
52. Štulrajter, M., Hrabovcová, V., & Franko, M. (2007). Permanent Magnets Synchronous Motor Control Theory. Journal of Electrical Engineering, 58(2), 79–84.
53. Hardi, S., et al. (2022). Simulation of Induction Motor Behavior Under Voltage Sags Using Alternative Transient Program. Journal of Physics: Conference Series, 2193, 012030.
54. Kaur, R., & Brar, G. S. (2016). Induction Motor Drives - A Literature Review. International Journal of Computer Technology and Applications, 9(16), 8071-8081.
55. Souto, O. C. N., Oliveira, J. C. de, & Neto, L. M. (2002). Induction Motors Thermal Behaviour and Life Expectancy Under Non-Ideal Supply Conditions. IEEE, 06 August 2002.
56. Wu, Y., Sun, S., An, Q., & Lie, X. (2022). Treatment Strategy Research on a Squirrel-Cage Induction Motor with Broken Rotor Bar Faults. Sensors, 22(12), 4345. <https://doi.org/10.3390/s22124345>

أحمد الحمود العريفي

57. Narain, A. (2020). Switched Reluctance Motor (SRM) Inverter Design With the DRV8343-Q1. Texas Instruments Incorporated, Application Report SLVAEN9–January 2020.
58. IronHorse. (2022). AC and DC Motors.
59. Turntide Technologies. (2022). Motor Comparison Study.
60. Villani, M. (2018). High Performance Electrical Motors for Automotive Applications-Status and Future of Motors with Low Cost Permanent Magnets.
61. De Santiago, J., Bernhoff, H., Ekergård, B., Eriksson, S., Ferhatovic, S., Waters, R., & Leijon, M. (2012). Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 61(2), 475–484. <https://doi.org/10.1109/TVT.2011.2177873>
62. Hadji-Minaglou, J. R., & Henneberger, G. (2015). Comparison of Different Motor Types for Electric Vehicle Application. European Transport Conference, 46-55. <https://doi.org/10.1080/09398368.1998.11463433>
63. Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. (2002). Analysis of Electric Machinery. IEEE Press.
64. Salem, F. A. (2013). Modeling and Control Solutions for Electric Vehicles. European Scientific Journal, May 2013 edition, 9(15).
65. Schaltz, E. (2011). Electrical Vehicle Design and Modeling. Aalborg University Denmark.
66. Rashid, M. H. (2016). Power Electronics Handbook. University of West Florida.
67. Giri, F. (2013). AC Electric Motors Control. A John Wiley & Sons, Ltd., Publication.
68. Han, J. (2009). From PID to Active Disturbance Rejection Control. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56(3), 900-906.
69. Guo, B. Z., & Zhao, Z. L. (2011). On Convergence of Tracking Differentiator. International Journal of Control, 84(4), 693-701.
70. Guo, B. Z., Zhao, Z. L., & Zheng, W. X. (2013). On Convergence of the Nonlinear Active Disturbance Rejection Control for MIMO Systems. SIAM Journal on Control and Optimization, 51(2), 1727-1757.
71. Serba, L. (2007). Current Control Strategies for Multilevel Grid Connected Inverters. PhD thesis, SWISS.
72. Merhej, M. (2012). Modeling of Three-Phase Induction Motor Drive System Using Oriented Field. Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series, 73(2).

أحمد الحمود العريفي

73. RamaKrishna, G. V. (2007). Torque Ripple Reduction in Direct Torque Controlled Induction Motor Drive by Using Fuzzy Controller. National Institute of Technology Rourkela.
74. Tashakori, A., & Ektesabi, M. (2012). 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.
75. Olszewski, M. (2017). Report on Toyota/Prius Motor Torque Capability, Torque Property, No-Load Back EMF, and Mechanical Losses. Washington, D.C.
76. Kamiya, M. (2017). Development of Traction Drive Motors for the Toyota Hybrid System. Japan.
77. Sato, Y., Ishikawa, S., Okubo, T., & Tamai, K. (2021). Development of High Response Motor and Inverter System for the Nissan LEAF Electric Vehicle. SAE Technical Paper, pp.1-8.
78. T. M. Corporation. (2013). Toyota Hybrid System THS II. Japan.
79. Jain, M., & Williamson, S. S. (2009). Suitability Analysis of In-Wheel Motor Direct Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles. IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC).
80. Jiabin, W., Zhen Ping, X., & Howe, D. (2015). Three-Phase Modular Permanent Magnet Brushless Machine for Torque Boosting on a Downsized ICE Vehicle. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 54, 809-816.
81. King-Jet, T., & Chen, G. H. (1997). Computer-Aided Design and Analysis of Direct-Driven Wheel Motor Drive. IEEE Transactions on Power Electronics, 12, 517-527.
82. Lovatt, C., Elton, D., Cahill, L., Duc Hau, H., Stumpf, A., Kulkarni, A., ... White, D. (2021). Design Procedure for Low Cost, Low Mass, Direct Drive, In-Wheel Motor Drivetrains for Electric and Hybrid Vehicles. IECON 2021 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society.
83. Lovatt, C., Ramsden, V. S., & Mecrow, B. C. (1998). Design of an In-Wheel Motor for a Solar-Powered Electric Vehicle. IEE Proceedings - Electric Power Applications, 145, 402-408.
84. Secure Technology Alliance Payments Council. (2021). Electric Vehicle Charging Open Payment Framework with ISO 15118. White Paper.
85. Depenbrock, M. (1984). DE3438504 (A1) - "Method and Device for Controlling of a Rotating Field Machine". Retrieved November 13, 2012.
86. Depenbrock, M. (2012). DE3438504 (A1) - "Method and Device for Controlling of a Rotating Field Machine". Retrieved November 13, 2012.

أحمد الحمود العريفي

87. Noguchi, T., & Takahashi, I. (1984). Quick Torque Response Control of an Induction Motor Based on a New Concept. IEEJ Technical Meetings on Rotating Machine RM84-76, 61-70.
88. Takahashi, I., & Noguchi, T. (1986). A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor. IEEE Transactions on Industry Applications, IA-22(5), 820-827.
89. Foo, G. (2010). Sensorless Direct Torque and Flux Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors at Very Low Speeds Including Standstill (Thesis). The University of New South Wales.
90. Gokhale, K. P., Karraker, D. W., & Heikkilä, S. J. (2002). US6448735 Controller for a Wound Rotor Slip Ring Induction Machine. Retrieved November 14, 2012.
91. "DSCM1 - High Performance Machinery Drives" (PDF). Archived from the original (PDF) on October 18, 2011. Retrieved 18 October 2011.
92. Lascu, C.; Boldea, I.; Blaabjerg, F. (1998). "A modified direct torque control (DTC) for induction motor sensorless drive". Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No.98CH36242). Vol. 1. pp. 415–422. doi:10.1109/ias.1998.732336. ISBN 0-7803-4943-1
93. CASADEI D.; SERRA G, 2000 – Implementation of a Direct Torque Control Algorithm for Induction Motors Based on Discrete Space Vector Modulation, IEEE Trans. on PE, 15(4), 769-777.
94. DEPENDBROCK M, 1988 – Direct Self-Control (DSC) of Inverter-Fed Induction Machine, IEEE Trans. on PE, 3(4), 420-429.
95. ZHANG Y.; ZHU J.; XU W.; GUO Y, 2011– A Simple Method to Reduce Torque Ripple in Direct Torque-Controlled Permanent-Magnet Synchronous Motor by Using Vectors With Variable Amplitude and Angle, IEEE Trans. on IE, 58(7), 2884–2859.
96. Austin Hughes and Bill Drury, Electric Motors and Drives Fundamentals, Types and Applications Book • Fourth Edition, B978-0-08-098332-5.00007-3. ISBN 978-0-08-098332-5. 2013.
97. M. Depenbrock, Direct self-control of the flux and rotary moment of a rotary-field machine, IEEE Transactions on Power Electronics, (Volume: 3, Issue: 4, October 2018).
98. Depenbrock, Manfred. "DE3438504 (A1) - Method and Device for Controlling of a Rotating Field Machine". Retrieved 13 November 2012.

أحمد الحمود العريفي

99. Jänecke, M.; Kremer, R.; Steuerwald, G. (9–12 Oct 1989). "Direct Self-Control (DSC), A Novel Method Of Controlling Asynchronous Machines In Traction Applications". EPE Proceedings. 1: 75–81.
100. "ACS800 - The New All-compatible Drives Portfolio". Retrieved 14 November 2012.
101. Lönnberg, M.; Lindgren, P. (2011). "Harmonizing drives - The driving force behind ABB's all-compatible drives architecture" (PDF). ABB Review (2): 63–65, 2020.
102. Austin Hughes, Bill Drury, Electric Motors and Drives Fundamentals: Types and Applications, Publisher: Elsevier, Year: 2019, ISBN: 978-0-08-102615-1.
103. Tiitinen, P.; Surandra, M. (1995). "The next generation motor control method, DTC direct torque control". Proceedings of International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth. Vol. 1. pp. 37–43. doi:10.1109/pedes.1996.537279. ISBN 978-0-7803-2795-5. S2CID 60918465.
104. Nash, J.N. (1997). "Direct torque control, induction motor vector control without an encoder". IEEE Transactions on Industry Applications. 33 (2): 333–341. doi:10.1109/28.567792.
105. Harmoinen, Martti; Manninen, Vesa; Pohjalainen, Pasi; Tiitinen, Pekka (17 Aug 1999). "US5940286 Method for Controlling the Power To Be Transferred Via a Mains Inverter". Retrieved 13 November 2012.
106. Manninen, V. (19–21 Sep 1995). "Application of Direct Torque Control Modulation to a Line Converter". Proceedings of EPE 95, Sevilla, Spain: 1292–1296.
107. Baader, Uwe (1988). Die Direkte-Selbstregelung (DSR), ein Verfahren zur hochdynamischen Regelung von Drehfeldmaschinen [Direct self-regulation (DSR), a process for the highly dynamic regulation of induction machines] (in German). VDI-Verlag. ISBN 978-3-18-143521-2.
108. ROBYNS B.; BERTHEREAU F.; COSSART G.; CHEVALIER L.; LABRIQUE F.;
109. VACLAVEK P.; BLAHA P, 2006 – Lyapunov-Function-Based Flux and Speed Observer for AC Induction Motor Sensorless Control and Parameters Estimation, IEEE Trans. on IE, 53(1), 138-145.
110. TSUJI M.; CHEN S.; IZUMI K.; YAMADA E, 2001 – A Sensorless Vector Control System for Induction Motors Using q-Axis Flux with Stator Resistance Identification, IEEE Trans. on M, 48(1), 185-194.

أحمد الحمود العريفي

111. SALMASI F.; NAJAFABADI T.; MARALANI P, 2010 – An Adaptive Flux Observer With Online Estimation of DC-Link Voltage and Rotor Resistance For VSI-Based Induction Motors, IEEE Trans. on IE, 25(5), 1310-1319.
112. JUNG H.; HWANG S.; KIM J.; KIM C.; CHOI C, 2006 – Diminution of Current-Measurement Error for Vector-Controlled AC Motor Drives, IEEE Trans. on IA, 42(5), 1249-1256.
113. RAE K.; SEOK J, 2008 – Correction on Current Measurement Errors for Accurate Flux Estimation of AC Drives at Low Stator Frequency, IEEE Trans. on IA, 44(2), 594-603.
114. Information about an artificial neural network on the website, d-nb.inf, GERMAN NATIONAL LIBRARY, 2019.
115. Hardesty, Larry (14 April 2017). "Explained: Neural networks". MIT News Office. Retrieved 2 June 2022.
116. Kleene, S.C. (1956). "Representation of Events in Nerve Nets and Finite Automata". Annals of Mathematics Studies. No. 34. Princeton University Press. pp. 3–41. Retrieved 17 June 2017.
117. K. Naji, (1998) "Using neural network in electric drive systems and automatic control" Colloquium of new technologies in industrial automation, Damascus University, Syria 22nd-23rd April.
118. Vogl, T.P., J.K. Mangis, A.K. Rigler, W.T. Zink, and D.L. Alkon. (1988). "Accelerating the convergence of the backpropagation method," Biological Cybernetics, 59(1988), 257–263.
119. Kafarnawi, M.T. (2021). Asymmetric encryption method proposed for Arabic letters using artificial neural networks. The Scientific Journal of King Faisal University: Basic and Applied Sciences, 22(2), 106–112. DOI: 10.37575/b/eng/210044.
120. Tremblay, O., Dessaint, L.-A. (2009). Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. World Electric Vehicle Journal, 3(2009), 13-16 - ISSN 2032-6653, AVERE, EVS24 Stavanger, Norway.
121. Manfred Depenbrock, Direct self-control of the flux and rotary moment of a rotary-field machine, USA. 2022.
122. Depenbrock, Manfred. "DE3438504 (A1) - Method and Device for Controlling of a Rotating Field Machine". Retrieved 13 November 2022.
123. Fullér R., HASSANEIN H., ALI A.N.,: Neural fuzzy systems: towards IMT-advanced networks. Åbo: Åbo akademi, 2016, xxvii, 275 p. ISBN 95-165-0624-0.

أحمد الحمود العريفي

124. Wang L-X., HASSANEIN H., ALI A.N.,: Adaptive fuzzy systems and control: design and stability analysis. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall, 2021, xxvii, 275 p. ISBN 978-013-1471-092.
125. Ross T.J., HASSANEIN H., ALI A.N.,: Fuzzy logic with engineering applications: design and stability analysis. 3rd ed. Chichester (Royaume Uni): Wiley, 2020, xxvii, 275 p. ISBN 978-047-0748-510.
126. Kaehler S.D.,: Fuzzy Logic Tutorial. Seattle Robotics Society [online]. 2018. ed. [cit. 2012-08-22]. Available at: <http://www.seattlerobotics.org/encoder/mar98/fuz/flindex.html>.
127. Jin Zhao, Bimal K. Bose, EVALUATION OF MEMBERSHIP FUNCTIONS FOR FUZZY LOGIC CONTROLLED INDUCTION MOTOR DRIVE, IEEE Department of Electrical Engineering, The University of Tennessee Knoxville, TN 37996-2100, USA, 2020.

Abstract

Direct Torque Control (DTC) is used in design electrical drive system to control induction motor that is providing electrical vehicle by motion. DTC is suffered negatives properties when electrical vehicle run in special conditions. Target of research is development of DTC using two methods: Artificial Neural Network (ANN) and Fuzzy Logic Estimator (FLE). DTC – FLE or DTC – ANN estimate flux more precise than classical DTC. Tolerances of stator resistance for induction motor appear from change of load according to track of vehicle and transit from direct to up and down way, is filtered by DTC – FLE or DTC – ANN that estimates correct value from currents taken for motor. This as conclusion gives electromagnetic torque with least dynamic and static error than classical DTC. DTC, DTC – ANN and DTC – FLE are explained purely. Modeled induction motor using MATLAB and driven using DTC, DTC – FLE or DTC – ANN are achieved, And then simulate these methods in an environment RT-LAB and then Response of speed and torque and errors signals for DTC, DTC – ANN and DTC – FLE are found. A comparative is achieved depends on Mean Square Error (MSE). Results improve that DTC – FLE is better than classical DTC and DTC – ANN. In addition DTC – ANN is better than classical DTC, Which leads to obtaining electromagnetic torque with less dynamic and static error, And then verify the validity of these results through the practical application of the traditional and developed methodology using the implemented research platform, and by comparing the results of the practical application with the results of simulation in real time, we note that the results of the practical application are very close to the simulation results, which supports the validity of these results.

Key words: Torque, neural, fuzzy, response, model, ripples, RT-LAB.

Syrian Arab Republic

Damascus University

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering

Electrical Power Engineering Department



Direct Torque Control (DTC) By Using Artificial Intelligence to Drive Induction Motor Application for Electric Vehicles

**A dissertation submitted in partial fulfillment of the
requirements for the degree of Ph.D. in electrical power
engineering**

By

Eng. Ahmad Yehea Alhamood Alarefe

Supervisors

Ass.Prof. Salam Ali Mahmoud

Ass.Prof. Raed Alshar'ea

2022–2023