الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة الطاقة الكهربائية

تأثير تغير الزاوية بين الثابت والدائر على عزم المحرك ذو المقاومة المغناطيسية المتغيرة وتعديل بنيته للوصول للعزم الأمثل

أطروحة مقدمة لنيل درجة الدكتوراه في هندسة الطاقة الكهربائية

إعداد

المهندس عمار حسين كنعان

المشرف المشارك
الأستاذ المساعد الدكتور المهندس
رائد الشرع

المشرف
الأستاذ الدكتور المهندس
عباس صندوق

2023-2022

شكر وتقدير

قال الله تعالى في كتابه الكريم: " ومن يشكر فإنما يشكر لنفسه"

في البداية لابد من التوجه بالشكر لله عز وجل الذي وفقني للوصول إلى هذه المرحلة العلمية العالية ومهد لي الطريق لإتمام أطروحة الدكتوراه.

كما أنني أتوجه بالشكر و التقدير لجامعة دمشق بجميع مستوياتها و لا سيما كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية على البيئة العلمية و البحثية التي توفرهاو التي كان لي الشرف أن أكون ضمن هيئتها التعليمية و أقدم أسمى آيات الشكر و العرفان بالجميل للأستاذ الدكتور عباس صندوق و الأستاذ المساعد الدكتور رائد الشرع الذين كان لي شرف العمل تحت اشرافهم و منحاني من وقتهم الثمين و من بحر معلوماتهم و خبرتهم الواسعة ما شكل إضافة كبيرة للعمل البحثي حيث كانت توجيهاتهم و نصائحهم المنارة التي استعنت فيها خلال كامل عملي البحثي.

ومع إنجاز هذا العمل أجد لزاماً عليّ أيضاً الإقرار بالدور المهم للظروف الأُسرية المناسبة التي توفرت لي ممثلة بمساندة والدي ووالدتي .... قدوتي في الحياة وأصحاب الفضل الأول والأخير في تحقيق هذا الإنجاز من خلال الدعم و التشجيع الدائم أطال الله بعمرهم وبارك لهم به.

وبزوجتي الغالية.... أقرب الناس إلى نفسي والتي ملأت حياتي بقوة الإرادة و التحدي و تخطّي الصعاب ولم تبخل بأي وقت أو جهد للوصول للنهاية.

أهدي عملي هذا إلى الرموز التي تملأ الأفق بالأمل و المستقبل المشرق؛ أولادي حسين وحسام وتالين وحيان الذين أرجو أن يواصلوا العمل بجد واجتهاد ليرتقوا بأعلى درجات سلم النجاح.

الباحث

فهرس المحتويات

1 الفصل الأول 18
1.1 الإطار العام للبحث 18
1.1.1 المقدمة Introduction 18
1.1.2 إشكاليات البحث 18
1.1.3 تساؤلات البحث 19
1.1.4 فرضيات البحث 19
1.1.5 مسلمات البحث 19
1.1.6 الهدف من البحث 19
1.1.7 أهمية البحث 20
1.1.8 مبررات البحث 20
1.1.9 حدود البحث 20
1.1.10 الدراسة المرجعية 20
1.1.11 مناهج البحث وأدواته 39
1.1.12 مكونات البحث 40
2 الفصل الثاني 42
2.1 استخدام طريقة العناصر المنتهية في تصميم الآلات الكهربائية [17] [16] 42
2.1.1 معادلات ماكسويل:[17] 46

2.1.2 منبع الحقل:[17] 48
2.1.3 خواص المواد:[17] 49
2.1.4 لفات الثابت:[17] 50
2.1.5 الحركة والعزم المغناطيسي:[17] 50
3 الفصل الثالث 53
نمذجة ومحاكاة المحرك ذي المقاومة المغناطيسية المتغيرة في بيئة Ansys. 53
3.1 بنية المحرك (The motor's structure):[19] 53
3.2 مبدأ عمل المحرك :(The principle of Operation)[19] 54
3.3 معادلات التوتر والدارة المكافئة للمحرك [19] 56
3.4 معادلات الاستطاعة والعزم:[25] [19] 60
3.5 استنتاج علاقة العزم في الحالة العامة:[19] 64
3.6 حساب العزم الوسطي:[25] [19] 65
3.7 تأثير تغير أبعاد أقطاب المحرك (الثابت والدائر) على العزم: 78
3.7.1 تأثير تغير أبعاد أسنان الدائر على العزم: 78
3.8 تأثير تغير أبعاد أقطاب الثابت: 87
3.9 التصميم الأمثل لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة رباعي الطور: 95
3.10 التصميم الأمثل لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة ثلاثي الطور: 99

3.11 تأثير التشبع المغناطيسي على العزم: 104

الفصل الرابع 107

4 تعديل بنية محرك كهربائي ذي مقاومة مغناطيسية متغيرة 107

4.1 بنية المحرك الكهربائي قبل التعديل 107

4.1.1 الجزء الدائر: 107

4.1.2 الجزء الثابت: 107

4.2 نمذجة المحرك الكهربائي قبل التعديل: 108

4.3 القياسات التجريبية للمحرك قبل التعديل: 111

4.4 تعديل المحرك: 111

الفصل الخامس 115

5 التطبيق العملي للمحرك الكهربائي ذي المقاومة المغناطيسية المتغيرة المعدل والحصول على النتائج التجريبية و مقارنتها مع نتائج النمذجة و المحاكاة 115

5.1 تنفيذ دارة القيادة والتحكم[19] : 115

5.1.1 المبردات المطلوب استخدامها[19] : 116

5.2 فك المحرك وتعديل الجزئين الثابت والدائر وفق نســـب البناء المثالية وإعادة التركيب. 124

5.3 القياسات والنتائج التجريبية: 126

5.3.1 التجربة الأولى عند وزن [g] 100: 126

5.3.2 التجربة الثانية عند وزن [g] 200: 127
5.3.3 التجربة الثالثة عند وزن [g] 300: 128
5.3.4 التجربة الرابعة عند وزن [g] 400: 129
5.3.5 التجربة الخامسة عند وزن [g] 500: 129
5.4 المقارنة بين النتائج النظرية والتجريبية: 130
6 النتائج و التوصيات 132
6.1 الخاتمة 132
6.2 النتائج: 132
6.3 التوصيات 137
7 Bibliography 138

قائمة الجداول

جدول 1-1 مواصفات محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة ذو 4/6 أقطاب قبل التعديل 23
جدول 1-2 قيم المعاملات للتصميم الأمثل و التقليدي و قيم العزم المقابلة 26
الجدول 3-1 مواصفات محرك رباعي الطور ذو 8/6 أقطاب 67
الجدول 3-2 قيم التدفق المغناطيسي للمحرك عند تغير التيار من 1 الى 15 أمبير 70
الجدول 3-3 قيم العزم المقدم من الطور A عند كل زاوية ازاحة للدائر 71
الجدول 3-4 تغيرات العزم مع التحميل الكهربائي للمحرك 72
الجدول 3-5 تغيرات العزم مع زاوية الأزاحة للنماذج الستة و المحرك الأساسي 77
الجدول 3-6 تغير العزم مع زاوية الأزاحة للمحركات من السابع حتى العاشر 81
الجدول 3-7 تغيرات قيم العزم مع زاوية الازاحة للمحركات من الحادي عشر و حتى الرابع عشر 84
الجدول 3-8 تغيرات العزم مع التحميل الكهربائي للمحرك الثاني عشر الأفضل عزماً 85
الجدول 3-9 تغير العزم مع زاوية الازاحة للمحرك الثاني عشر 86
الجدول 3-10 المحركات الناتجة من تغير نسبة بناء الجزء الثابت 88
جدول 3-11 تغير العزم مع موضـــع الدائر للمحركات من الخامس عشـــر حتى العشـــرين مع المحرك الأساسي 89
الجدول 3-12 تغيرات العزم مع زاوية الأزاحة للمحركات من الواحد و العشرين حتى الخامس و العشرين مع المحرك الأساسي 91
الجدول 3-13 تغيرات العزم مع زاوية الازاحة للمحرك الثاني و العشرين 93
الجدول 3-14 تغيرات العزم مع زاوية الإزاحة عند قيم التحميل الكهربائي المختلفة للمحرك الســـادس و العشرين الأمثل 95

الجدول 3-15 تغيرات العزم مع التحميل الكهربائي للمحرك السادس و العشرين 96
الجدول 3-16 تغيرات العزم مع زاوية الازاحة للمحرك السابع و العشرين 100
الجدول 3-17 نتائج النمذجة و تغيرات العزم مع زاوية الازاحة و التحميل الكهربائي للمحرك الثامن و العشرين 102
الجدول 3-18تغيرات نسبة التحميل الكهربائي للدارة الخطية و المشبعة بالنسبة إلى لعامل النفاذية المغناطيسية 104
الجدول 3-19 تغيرات العزم مع تغير الثغرة الهوائية عند التحميل الكهربائي نفسه للدارة المشبعة و الخطية 105
جدول 4-1 مواصفات الجزء الدائر للمحرك قبل التعديل 107
جدول 4-2 مواصفات الجزء الثابت للمحرك قبل التعديل 108
جدول 4-3 قيم العزم المقابل لزوايا الإزاحة المختلفة للمحرك قبل التعديل 108
الجدول 4-4 تغيرات قيم العزم مع زاوية الإزاحة للمحرك قبل التعديل 110
الجدول 4-5 القياسات التجريبية للمحرك قبل التعديل 111
الجدول 4-6 تغير قيم العزم بالنسبة لزاوية الإزاحة للمحرك بعد التعديل 112
الجدول 4-7 تغيرات العزم بالنسبة إلى التحميل الكهربائي للمحرك بعد التعديل 113
جدول 5-1 النتائج التجريبية عند وزن 100[g] 126
جدول 5-2 النتائج التجريبية عند وزن 200[g] 127
جدول 5-3 النتائج التجريبية عند وزن 300[g] 128
الجدول 5-4 النتائج التجريبية عند وزن 400[g] 129
جدول 5-5 النتائج التجريبية عند وزن 500[g] 130

جدول 5-6 مقارنة النتائج النظرية و التجريبية 131

قائمة الأشكال

الشكل 1-1 محددات بنية المحرك للجزء الثابت و الجزء الدائر 22
الشكل 1-2 مقارنة لكل من العزم و السيالة و المردود قبل وبعد تعديل المحرك.....22
الشكل 1-3 أبعاد المحرك ذو التصميم الأمثل و التحسن الحاصل على العزم 24
الشكل 1-4 شكل اقطاب الدائر بعد التعديل 25
الشكل 1-5 توضع المعاملات على قطبي الدائر و الثابت 25
الشكل 1-6 أشكال مختلفة للأقطاب و مقارنتها مع القطب التقليدي 25
الشكل 1-7 نموذج المحرك قبل و بعد التعديل 27
الشكل 1-8 مقارنة قيم عزم المحرك قبل و بعد التعديل و عند أعماق مختلفة للمجاري 27
الشكل 1-9 إضافة القطع المعدنية على أطراف الدائر 28
الشكل 1-10 إضافة ثقوب دائرية على أطراف الثابت و الدائر 28
الشكل 1-11 أسنان عريضة و مدببة مع الثقوب 29
الشكل 1-12 مقطع عرضي في المحرك 30
الشكل 1-13 تهييج ثنائي الطور 31
الشكل 1-14 بنية المحرك ذي الدائر الخارجي 32
الشكل 1-15 التعديل في سن الدائر 33
الشكل 1-16 خطوط السيالة المغناطيسية عند السن المعدل 33
الشكل 1-17 مخطط النمذجة و المحاكاة في matlab 34
الشكل 1-18 نتائج النمذجة و التحسن بالعزم 35

الشكل 1-19 نموذج محرك 48/72 36

الشكل 1-20 تغيرات العزم الكلي للمحرك مع مواضع الدائر 37

الشكل 1-21 مقارنة النتائج قبل و بعد زيادة عدد الأقطاب 37

الشكل 1-22 المحرك المقترح بعد تعديل سن الدائر 38

الشكل 1-23 مقارنة العزم قبل و بعد تعديل المحرك 38

الشكل 1-24 خوارزمية منهجية البحث 40

الشكل 2-1عناصر منتهية بأشكال مختلفة 44

الشكل 2-2 رباعي السطوح و ترتيب الحدود المرافق 46

الشكل 2-3خوارزمية العمل ضمن برمجيات العناصر المنتهية 51

الشكل 3-1 محركا مقاومة مغناطيسية متغيرة بنسبة أقطاب 6/4 و 4/3 عند وضعين رئيسين للتشغيل 56

الشكل 3-2 الدارة المكافئة للملف 58

الشكل 3-3 الدارة المكافئة 60

الشكل 3-4 مقطع لمحرك مقاومة مغناطيسية متغيرة 8/6 68

الشكل 3-5 كثافة السيالة المغناطيسية في حالة التطابق الكامل 69

الشكل 3-6 تغير التدفق مع التيار للمحرك الأساسي 70

الشكل 3-7 التمثيل البياني لقيم العزم في الجدول 3−3 72

الشكل 3-8 تغيرات العزم مع التحميل الكهربائي 73

الشكل 3-9خطوط السيالة المغناطيسية عند زاوية ازاحة 20 درجة للدائر 73

الشكل 3-10 نماذج مختلفة من محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة 75

الشكل 3-11 كثافة السيالة المغناطيسية للنماذج المختلفة عند زاوية ازاحة 20 درجة 76

الشكل 3-12 العزم المقدم للنماذج الستة مع المحرك الأساسي 77
الشكل 3-13 محددات نسب بناء الجزء الدائر و الجزء الثابت 79
الشكل 3-14 مقطع عرضي لأربعة تصاميم فيها نسبة البناء للجزء الدائر أكبر من المحرك الأساسي 80
الشكل 3-15 كثافة السيالة المغناطيسية للنماذج التي تزيد فيها نسبة بناء الدائر على نسبة المحرك الأساسي 81
الشكل 3-16 تغيرات العزم مع زاوية الإزاحة للمحركات من السابع حتى العاشر مع المحرك الأساسي 82
الشكل 3-17 مقطع عرضي لأربعة تصاميم فيها نسبة بناء الجزء الدائر أصغر من نسبة بناء المحرك الأساسي 83
الشكل 3-18 كثافة السيالة المغناطيسية للمحركات من الحادي عشر حتى الرابع عشر 83
الشكل 3-19مقارنة تغيرات العزم مع زاوية الازاحة للمحركات من الحادي عشر حتى الرابع عشر 85
الشكل 3-20 تغير العزم مع التحميل الكهربائي للمحرك الثاني عشر 86
الشكل 3-21 تغيرات العزم مع زاوية الازاحة للمحرك الثاني عشر 87
الشكل 3-22 مقطع عرضي للمحركات من الخامس عشر حتى العشرين 89
الشكل 3-23 تغيرات العزم مع زاوية الازاحة للمحركات من الخامس عشر حتى العشرين مع المحرك الأساسي 90
الشكل 3-24 مقطع عرضي لنماذج المحركات من الواحد و العشرين حتى الخامس و العشرين 91
الشكل 3-25 تغيرات العزم مع زاوية الازاحة للمحركات من الواحد و العشرين حتى الخامس و العشرين 92
الشكل 3-26 تغيرات العزم مع زاوية الازاحة للمحرك الثاني و العشرين مع المحرك الأساسي 92

الشـكل 3-27 منحنيات تغيرات العزم مع زاوية الازاحة و التحميل الكهربائي للمحرك الثاني و العشـرين 94
الشكل 3-28 تغيرات العزم مع زاوية الأزاحة للمحرك السادس و العشرين 96
الشكل 3-29 تغيرات العزم مع التحميل الكهربائي للمحرك السادس و العشرين 97
الشكل 3-30 مقارنة تغيرات العزم مع زاوية الإزاحة للمحرك الأساسي مع المحرك السادس و العشرين 98
الشكل 3-31 مقطع عرضي ثلاثي الأبعاد لتوزع السيالة المغناطيسية 98
الشكل 3-32 مقطع عرضي لنموذجين من محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة ذو 6/4 أقطاب 99
الشكل3-33 كثافة السيالة المغناطيسية للمحركين السابع و العشرين و الثامن و العشرين 100
الشـــكل 3-34 التمثيل البياني لتغير العزم مع زاوية الإزاحة و التحميل الكهربائي للمحرك الســـابع و العشرين 101
الشكل 3-35 التمثيل البياني لتغيرات العزم للمحرك الثامن و العشرين 103
الشكل 3-36 مقارنة قيم العزم بين المحركين السابع و العشرين و الثامن و العشرين 103
الشكل 3-37 علاقة السيالة المغناطيسية مع التيار لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة..... 104
الشكل 3-38 تغير نسبة التحميل الكهربائي للمحرك بين الاشباع و عدم الاشباع بالنسبة لمعامل النفاذية المغناطيسية عند عزم ثابت 105
الشكل 3-39 تغيرات العزم مع الثغرة الهوائية للمحرك في حالة الاشباع و بدون اشباع 106
الشكل 4-1 التمثيل البياني لتغيرات العزم مع زاوية الإزاحة للمحرك قبل التعديل 109
الشكل 4-2 تغيرات العزم مع التحميل الكهربائي للمحرك قبل التعديل 110
الشكل 4-3 التعديل الذي تم تنفيذه على المحرك 112
الشكل 4-4 التمثيل البياني لتغيرات العزم مع زاوية الإزاحة للمحرك بعد التعديل 113

الشكل 4-5 التمثيل البياني لتغيرات العزم بالنسبة إلى التحميل الكهربائي للمحرك بعد التعديل 114
الشكل 4-6 مقارنة الخط البياني لتغيرات العزم بالنسبة لزاوية الازاحة للمحرك قبل و التعديل وبعده عند التحميل الكهربائي 500ATs 114
الشكل 5-1 المخطط الصندوقي لدارة القيادة و التحكم 119
الشكل 5-2 تفاصيل دارة القيادة و التحكم 120
الشكل 5-3 التطبيق العملي لدارة القيادة والتحكم المبينة في الشكل السابق 121
الشكل 5-4 دارة توليد النبضات 122
الشكل 5-5 التنفيذ العملي لدارة توليد النبضات 122
الشكل 5-6 نبضات القدح الناتجة من دارة توليد النبضات 123
الشكل 5-7 دارة القيادة و التحكم المنفذة مع المحرك 123
الشكل 5-8 التوتر المستمر المقطع على أحد أطوار المحرك 124
الشكل 5-9 المحرك بعد فكه لأجزاء 125
الشكل 5-10 تركيب ملفات الجزء الثابت و الجزء الدائر بعد التعديل 125
الشكل 5-11 النموذج التجريبي و التيار المستجر عند وزن [g]100 126
الشكل 5-12 النموذج التجريبي و التيار المستجر عند وزن [g]200 127
الشكل 5-13 النموذج التجريبي و التيار المستجر عند وزن [g]300 128
الشكل 5-14 النموذج التجريبي و التيار المستجر عند وزن [g]400 129
الشكل 5-15 النموذج التجريبي و التيار المستجر عند وزن [g]500 130
الشكل 5-16 التمثيل البياني للنتائج النظرية و التجريبية 131

قائمة المعادلات

43..... 1-2
44..... 2-2
44..... 3-2
45..... 4-2
45..... 5-2
45..... 6-2
45..... 7-2
46..... 8-2
47..... 9-2
47..... 10-2
47..... 11-2
47..... 12-2
47..... 13-2
48..... 14-2
48..... 15-2
48..... 16-2
48..... 17-2
49..... 18-2
49..... 19-2
49..... 20-2
50..... 21-2
50..... 22-2
50..... 23-2
50..... 24-2
56..... 1-3

2-3 57
3-3 57
4-3 58
5-3 58
6-3 59
7-3 59
8-3 59
9-3 59
10-3 59
11-3 60
12-3 61
13-3 61
14-3 61
15-3 61
16-3 61
17-3 62
18-3 62
19-3 62
20-3 63
21-3 63
22-3 63
23-3 63
24-3 63
25-3 63
26-3 64
27-3 64
28-3 64

64..... 29-3
65..... 30-3
65..... 31-3
66..... 32-3
66..... 33-3
66..... 34-3
78..... 35-3
117 1-5
117 2-5
117 3-5
117 4-5

الملخص

انتشرت محركات المقاومة المغناطيسية المتغيرة انتشاراً واسعاً في التطبيقات الصناعية و أنظمة الجر الكهربائية ولا سيما متغيرة السرعة بالمقارنة مع المحركات الأخرى و ذلك للعديد من الميزات أهمها بساطة تركيبها و رخص ثمنها.

تبحث هذه الأطروحة في تأثير تغير الزاوية بين الثابت و الدائر في عزم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة باستخدام طريقة العناصر المنتهية في بيئة Ansys Maxwell ثلاثي الأبعاد .

تبين هذه الأطروحة الاختيار الأمثل لأسنان الدائر و أقطاب الثابت ومن ثمَّ الحصول على الزاوية الأمثل لهذا النوع من المحركات والتي يقدم عندها عزمه الأمثل.

تم دراسة معظم الحالات الممكنة لتصميم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة و إيجاد قيم العزم المقابل لكل حالة لتكون دليلَ عملٍ متكامل لتصميم هذا النوع من المحركات .

عُدّل محرك مخبري عملياً وفق النتائج التي توصلنا لها، و دُرست النتائج العملية جميعها و حللت و قورنت بنتائج الدراسة النظرية .

الكلمات المفتاحية: محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة – طريقة العناصر المنتهية – برنامج Ansys – العزم الأمثل .

1 الفصل الأول

1.1 الإطار العام للبحث

1.1.1 المقدمة Introduction

تصنف المحركات الكهربائية تصنيفاً أساسياً من حيث العزم المقدم منها إلى صنفين:

1- المحركات الكهرومغناطيسية

2- محركات المقاومة المغناطيسية المتغيرة

ينتج العزم في المحركات الكهرومغناطيسية نتيجة تأثير حقلين مغناطيسين الأول من الجزء الثابت والثاني من الجزء الدائر (سواء كان متحرض أو مستقل) وهو المبدأ الذي تعمل عليه أغلبية المحركات الكهربائية.

أما في محركات المقاومة المغناطيسية المتغيرة فينتج العزم من تأثير حقل مغناطيسي مفرد ناتج من الجزء الثابت يؤدي إلى تغير المقاومة المغناطيسية في الثغرة الهوائية بين الثابت والدائر وهذا يسبب في حركة الجزء الدائر عند محاولته الدائمة الانتقال نحو المواضع ذات المقاومة المغناطيسية الأصغر.

تعد محركات المقاومة المغناطيسية المتغيرة من أبسط أنواع الآلات الكهربائية من حيث البنية والأقل كلفة وهذا سبب لها انتشاراً واسعاً في التطبيقات المختلفة.

1.1.2 إشكاليات البحث

تعتمد المحركات ذات المقاومة المغناطيسية المتغيرة على مبدأ الجذب والدفع المغناطيسي بين الثابت والدائر في انتاج العزم وبالتالي فإن لأبعاد كل من أقطاب الثابت وأسنان الدائر تأثير كبير على العزم المنتج ونظراً لعدم وجود دليل مرجعي واضح يربط تصميم المحرك مع هذه الأبعاد لمختلف النماذج من المحركات كان لابد من القيام بدراسة مفصلة تكون قاعدة بيانات واضحة لتصميم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة بحسب العزم المطلوب منه وإيجاد الأبعاد الأفضل التي تعطي العزم الأمثل.

1.1.3 تساؤلات البحث

هل هذا البحث يجعل أداء وعزم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة أفضل؟ وهل سيقدم دليلاً واضحاً لتصـــميم هذا النوع من المحركات بكافة نماذجها؟ وهل هو قابل للتنفيذ على كل نماذج محركات المقاومة المغناطيسية المتغيرة؟

1.1.4 فرضيات البحث

هناك مجموعة من القضايا التي يجب تحديدها عند تطبيق الدراسة:

- نسبة عدد أقطاب الجزء الثابت إلى الجزء الدائر.
- نسبة بناء الجزء الثابت.
- نسبة بناء الجزء الدائر.
- أبعاد أقطاب الثابت و أسنان الدائر و عدد اللفات و التحميل الكهربائي للمحرك.

1.1.5 مسلمات البحث

يستند هذا البحث إلى الانتشار الواسع والكبير لمحركات المقاومة المغناطيسية المتغيرة في التطبيقات المختلفة نظراً لبساطة تركيبها ورخص ثمنها ومميزة عزمها الجيدة.

1.1.6 الهدف من البحث

يهدف هذا البحث إلى:

- نمذجة نماذج مختلفة و شاملة لأنواع محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة و محاكاته لدراسة تأثير تغير الزاوية بين الثابت و الدائر في العزم المقدم وفق طريقة العناصر المنتهية.
- وضع دليل متكامل يبين نسب بناء الجزء الدائر و الجزء الثابت الأفضل للعزم الأمثل.
- تعديل محرك مقاومة مغناطيسية متغيرة مخبري عملياً و مقارنته بالنتائج التجريبية مع نتائج النمذجة و المحاكاة.

1.1.7 أهمية البحث

تكمن أهمية البحث في اختصـار الوقت والجهد أثناء تصـميم محرك المقاومة المغناطيسـية المتغيرة وفق عزم مناسب وفي إيجاد الأبعاد المناسبة لتصميم محرك وفق عزمه الأمثل.

1.1.8 مبررات البحث

مع زيادة استخدام محركات المقاومة المغناطيسية المتغيرة في التطبيقات المختلفة وخاصة تطبيقات الجر التي تحتاج إلى عزم عال كان لابد من دراسـة تغيرات الأبعاد الخاصـة بالآلة مع العزم المقدم منها للوصـول إلى قاعدة بيانات متكاملة كما ذكرنا سابقاً تساعد في التصميم الأسرع والأدق والأقل تكلفة.

1.1.9 حدود البحث

يشـمل نطاق البحث فهم أداء محركات المقاومة المغناطيسـية المتغيرة بأنواعها جميعها ((4/3) أقطاب مع مضاعفاتها جميعها وكذلك (6/4) أقطاب مع مضاعفاتها جميعها) من حيث العزم المقدم منها.

1.1.10 الدراسة المرجعية

تم الاطلاع على العديد من الكتب والرسائل والأوراق البحثية لمعرفة ما توصل إليه العالم في مجال بحثنا ونعرض هنا بعض هذه الأبحاث:

1.1.10.1 التحسـينات الذكية لمحرك المقاومة المغناطيسـية المتغيرة باسـتخدام خوارزمية جينية متعددة الأهداف لتحسين الأداء [1]

Intelligent Optimization of Switched Reluctance Motor Using Genetic Aggregation Response Surface and Multi-Objective Genetic Algorithm for Improved Performance

يعتبر الاختيار الصحيح لنسبة بناء أقطاب الجزء الثابت والجزء الدائر خطوة أساسية أثناء تصميم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة لتأثيره المباشر على العزم.

لذلك وضع هذا البحث الإطار العام لتصميم أمثل متعدد الأهداف لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة المقترح بالاعتماد على الخوارزمية الجينية وتم الحصول على النتائج باستخدام طريقة العناصر المنتهية.

في هذا البحث تم العمل على محرك مقاومة مغناطيسية متغيرة أولي 6/8 أقطاب له المواصفات التالية:

- سماكة النواة المعدنية $Y_s=12[mm]$
- نسبة بناء الجزء الثابت(نسبة زاوية قطب الثابت إلى الزاوية بين قطبين متتاليين) $E_s=0.45$
- نسبة بناء الجزء الدائر(نسبة زاوية سن الدائر إلى الزاوية بين سنين متتاليين) $E_r=0.3$

تم الاعتماد على الذكاء الصـــنعي والخوارزميات الجينية لتعديل أبعاد المحرك والوصـــول للبنية الأمثل بالاعتماد على تحسين عزم ومردود المحرك فتم الوصول إلى ثلاثة نماذج مرشحة لتكون التصميم الأمثل.

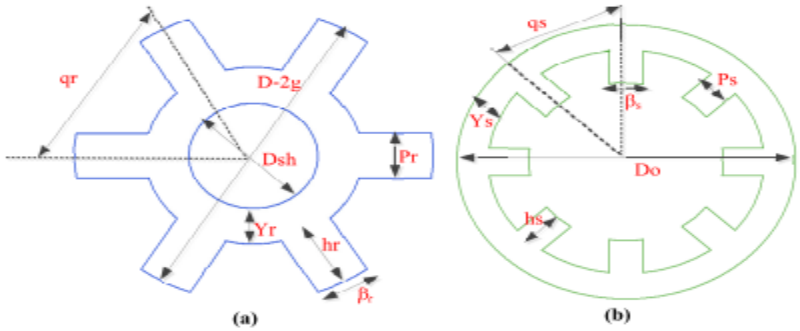
ومن خلال طريقة العناصر المنتهية تم الوصول إلى بنية المحرك المثلى من بين النماذج المرشحة وتبين أن البنية الأمثل لها المواصفات التالية:

- تم تخفيض سماكة النواة إلى $Y_s= 11.45[mm]$
- تم رفع نسبة بناء الجزء الثابت E_s من 0.45 إلى 0.49
- تم رفع نسبة بناء الجزء الدائر E_r من 0.3 إلى 0.33

وبالمقارنة بين المحرك الأمثل والمحرك الأولي نلاحظ انخفاض في قيمة العزم الوسـطي للمحرك الأمثل بسبب انخفاض السيالة المغناطيسية مع ارتفاع في مردود هذا المحرك نتيجة لانخفاض الضياعات فيه.

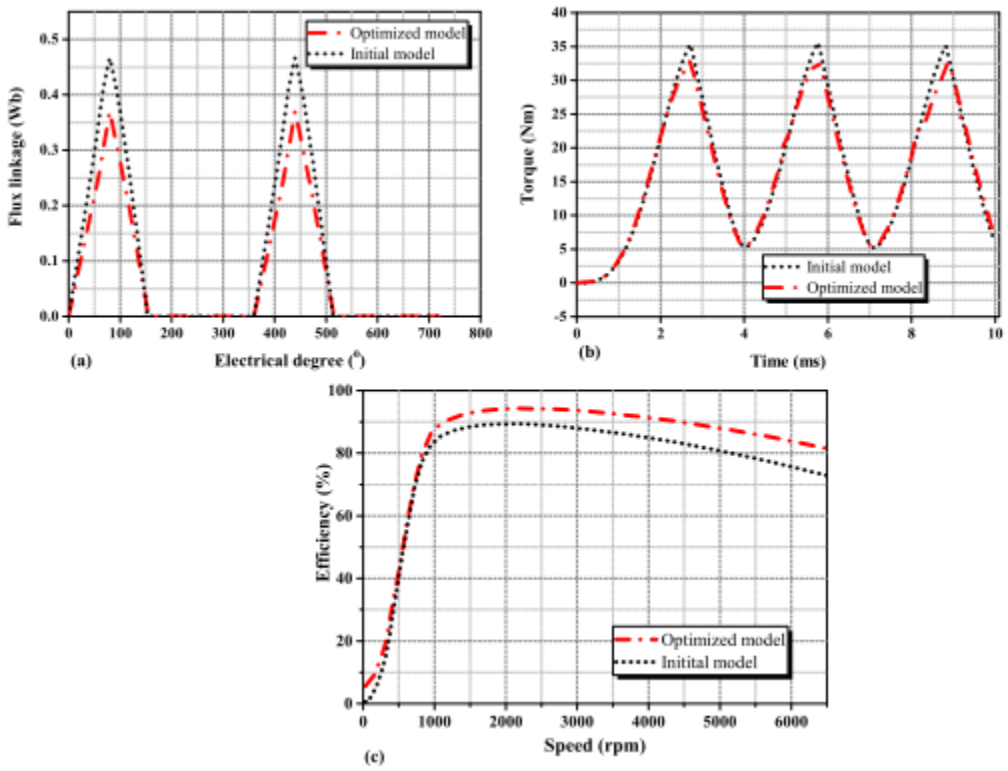
يبين الشكل 1-1 محددات بنية المحرك للجزء الثابت والجزء الدائر حيث:

D_o	قطر المحرك	D_{sh}	القطر الداخلي للدائر
βs	زاوية قطب الثابت	D−2g	القطر الخارجي للدائر
P_s	عرض القطب	P_r	عرض سن الدائر
Y_s	سماكة نواة الثابت	Y_r	سماكة نواة الدائر
hs	ارتفاع القطب	βr	زاوية سن الدائر
qs	زاوية ميلان قطب الثابت	qr	زاوية ميلان سن الدائر



الشكل 1-1 محددات بنية المحرك للجزء الثابت و الجزء الدائر

كما يبين الشكل 1-2 مقارنة لكل من العزم والسيالة المغناطيسية والمردود بين المحرك الأولي والمحرك الأمثل.



الشكل 1-2 مقارنة لكل من العزم و السيالة و المردود قبل وبعد تعديل المحرك

1.1.10.2 تحليل عدم الاستقرار لتحسين متعدد الأهداف لمحركات المقاومة المغناطيسية المتغيرة[2]

Sensitivity Analysis for Multi-Objective Optimization of Switched Reluctance Motors.

يعتمد البحث في تحسين محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة على تحسين العزم الناتج منه وتخفيف الاهتزازات والتوافقيات غير المرغوب فيها وذلك من خلال تعديل بنية المحرك.

يتطلب تعديل بنية المحرك مجموعة كبيرة من الحسابات المعقدة والتي سيتم تخفيضها في هذا البحث بالاعتماد على تغيير الفراغ بين الثابت والدائر.

طبقت الدراسة على محرك مقاومة مغناطيسية متغيرة ذو 4/6 أقطاب أولي له المواصفات المبينة في جدول 1-1:

جدول 1-1 مواصفات محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة ذو 4/6 أقطاب قبل التعديل

Specification/Geometry Characteristic	Symbol	Value
Phase resistance	R	5 Ω
Stack length	L	60 mm
Stator outer diameter	D_{SO}	103 mm
Stator inner diameter	D_{SI}	60 mm
Stator slot depth	S_D	14.8 mm
Rotor inner diameter	D_{RI}	22 mm
Stator/rotor pole angle	β_S/β_R	28.5/29.1°
Air-gap length	a	0.25 mm
Average three-phase torque	T_{av}	1.34 Nm
Torque ripple coefficient	K	2.03

تم اختيار ستة عوامل من x_1 حتى x_6 وكل عامل يعبر عن متغير في المحرك حيث يعبر x_1 عن زاوية قطب الثابت من جهة الثغرة الهوائية و x_2 عن زاوية قطب الثابت من جهة النواة و x_3 عن زاوية قطب الدائر من جهة الثغرة الهوائية و x_4 عن زاوية قطب الدائر من جهة النواة أما x_5 هي طول الثغرة الهوائية و x_6 هي زاوية إضافية إلى السن.

أُخذ خمسة مستويات من القيم لكل متحول وتم اجراء 25 تجربة تصميمية مختلفة ناتجة عن تبديل هذه القيم وحساب القيمة المتوسطة للعزم عند كل تجربة.

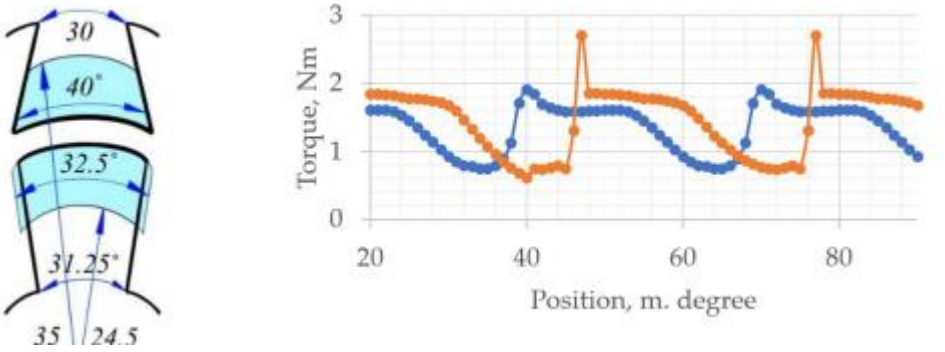
من خلال تحليل النتائج التي وصلنا لها نجد أن المتغيرات الخاصة بزاوية قطب الثابت و الثغرة الهوائية أي x_1 وx_5 لها التأثير الأكبر على قيمة العزم حيث يزداد العزم مع زيادة قطب الثابت و ينقص مع زيادة الثغرة

الهوائية كما أبدى تغير زاوية قطب الثابت من جهة النواة و زاوية قطب الدائر من جهة النواة تأثير طفيف على العزم.

أُجري مقارنة واسعة بين مختلف التصاميم حتى وصل البحث إلى التصميم الأمثل ذو العزم الأعلى بعد اجراء مجموعة من التعديلات على المحرك الأولي هي:

- ضبط زاوية قطب الثابت من جهة الثغرة إلى 40 درجة ومن جهة النواة إلى 30 درجة
- ضبط زاوية قطب الدائر من جهة الثغرة إلى 28.75 درجة ومن جهة النواة إلى 60 درجة

يبين الشكل 1-3 أبعاد المحرك ذو التصميم الأمثل والتحسن الحاصل بالعزم.



الشكل 1-3 أبعاد المحرك ذو التصميم الأمثل و التحسن الحاصل على العزم

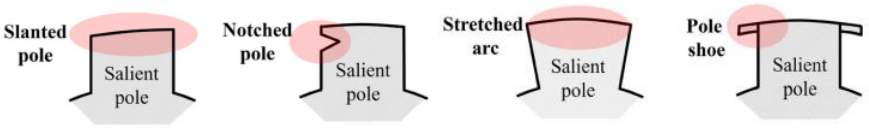
1.1.10.3 تحقيق تصميم بالبنية الأمثل لمحركات المقاومة المغناطيسية المتغيرة للوصول لعزم معين عند تيار محدد[3]

Shape Optimization-based design investigation of Switched Reluctance motors regarding the target torque and current limitation

تقدم هذه الدراسة الإطار العام للبنية الأمثل بالاعتماد على شكل قطبي الجزء الثابت والجزء الدائر للوصول لقيمة العزم الهدف عند تيار محدد.

يعتمد المفتاح الرئيسي للوصول للعزم الأمثل على تغير شكل أقطاب الثابت والدائر وشكل ملفات الثابت وقد تم اعتماد محرك مقاومة مغناطيسية متغيرة ذو 4/6 أقطاب واختيار ثلاثة مستويات من العزم لتحقيق الدراسة.

أجريت الدراسة عند تغيير شكل الأقطاب للدائر وفق الشكل 1-4

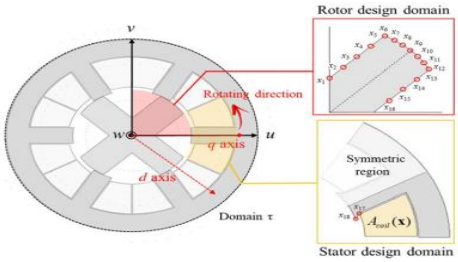


الشكل 1-4 شكل اقطاب الدائر بعد التعديل

ولتحقيق هذه الأشـــكال فقد تم الاعتماد على 18 معامل منهم 16 معامل للدائر ومعاملان للثابت وتم تغيير هذه المعاملات والوصول لتصاميم مختلفة ومقارنتها مع تصميم أولي للوصول للتصميم الأفضل.

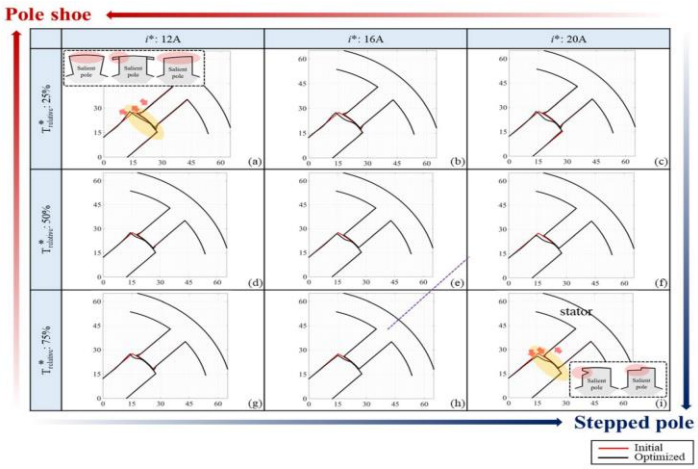
حيث تبين ظهور زيادة في العزم عند استخدام القطب الصاعد كما تبين أن القطب المسنن له نفس تأثير القطب المائل على العزم.

يبين الشكل 1-5 توضع المعاملات على قطبي الدائر والثابت



الشكل 1-5 توضع المعاملات على قطبي الدائر و الثابت

يبين الشـكل 1-6 تسـع أشـكال مختلفة للأقطاب بالمقارنة مع الشـكل التقليدي للقطب عند قيم مختلفة للتيار



الشكل 1-6 أشكال مختلفة للأقطاب و مقارنتها مع القطب التقليدي

كما يبين جدول 1-2 كافة قيم المعاملات للتصـــميم الأمثل والتقليدي للحصـــول على العزم المتوســـط الأعلى والأقل عند قيم التيار الأعلى والأخفض.

جدول 1-2 قيم المعاملات للتصميم الأمثل و التقليدي و قيم العزم المقابلة

Design variable	Lower bound	Initial design	Upper bound	Optimized design for	
				Lowest average torque with lowest allowable current (Fig. 15(a))	Highest average torque with highest allowable current (Fig. 15(b))
x_1 (mm)	10.0	12.3	20.0	12.3	12.3
x_2 (deg)	5.00	30.5	40.0	30.6	30.5
x_3 (deg)	5.00	23.4	40.0	23.2	23.4
x_4 (deg)	5.00	19.0	40.0	19.6	18.6
x_5 (deg)	5.00	16.0	40.0	18.1	14.8
x_6 (mm)	10.0	31.5	31.5	30.1	29.9
x_7 (mm)	10.0	31.5	31.5	29.9	29.8
x_8 (mm)	10.0	31.5	31.5	29.9	30.2
x_9 (mm)	10.0	31.5	31.5	30.7	31.3
x_{10} (mm)	10.0	31.5	31.5	31.4	31.5
x_{11} (mm)	10.0	31.5	31.5	31.4	31.5
x_{12} (mm)	10.0	31.5	31.5	31.5	31.5
x_{13} (deg)	5.00	16.0	40.0	15.2	15.5
x_{14} (deg)	5.00	19.0	40.0	19.1	18.8
x_{15} (deg)	5.00	23.4	40.0	23.2	23.2
x_{16} (deg)	5.00	30.5	40.0	30.5	30.7
x_{17} (deg)	3.00	9.66	25.0	9.58	9.79
x_{18} (deg)	3.00	9.03	25.0	10.5	8.21

وبالتالي تم وضع دليل ارشادي لتصميم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة بالاعتماد على تغيير شكل القطب.

1.1.10.4 تصميم وتهيئة مجاري في أسنان الجزء الثابت لمحرك مقاومة مغناطيسية متغيرة مستخدم في السيارة الكهربائية بهدف تحسين عزمه.[4]

Design and optimization of slotted stator tooth switched reluctance motor for torque enhancement for electric vehicle applications.

تقدم هذه الورقة البحثية بنية جديدة لمجاري وأسنان الثابت في محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة.

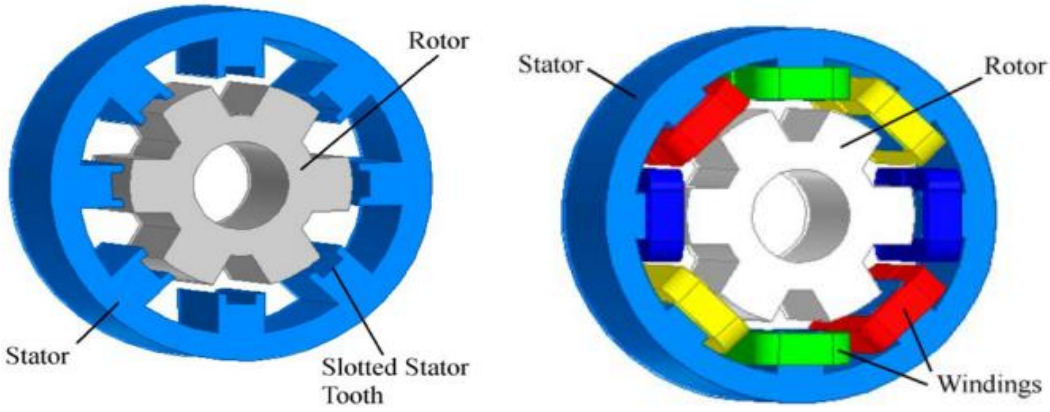
عُدل في البنية المقترحة الجزء الثابت في المحرك التقليدي بإنشـــاء مجاري على أســـنانه بهدف تحســـين أداء المحرك بحيث تتميز هذه المجاري الجديدة بأنها ذات أعماق مختلفة وبالتالي تم احداث تغيير في شكل الثغرة الهوائية للمحرك وزيادة في عدد أسنان الجزء الثابت.

تم التحقق من البنى المقترحة باستخدام طريقة العناصر المنتهية حتى الوصول إلى المحددات الأمثل للمحرك والتي تعطي عزم أعظمي.

طبقت هذه الدراسة على محرك مقاومة مغناطيسية متغيرة ذو 6/8 أقطاب وبعد حفر المجاري ضمن الأسنان أصبح ذو 6/16 أقطاب.

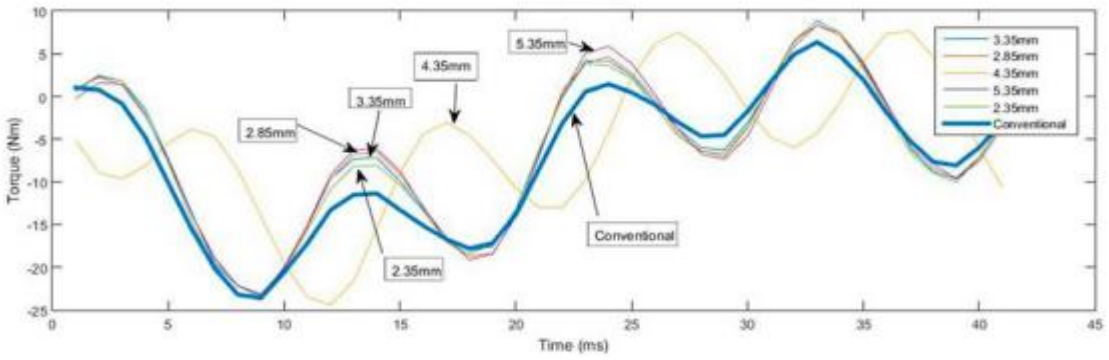
تم التحقق من البنية المقترحة عملياً ومقارنة الحسابات العملية مع نتائج العناصر المنتهية وتبين الوصول إلى تحسن العزم مع تخفيض في تكلفة ووزن المحرك.

يبين الشكل 1-7 نموذج المحرك قبل وبعد التعديل



الشكل 1-7 نموذج المحرك قبل و بعد التعديل

كما يبين الشكل 1-8 مقارنة لمميزات العزم بين النموذج التقليدي والنموذج المقترح عند قيم مختلفة لعمق المجاري المحدثة



الشكل 1-8 مقارنة قيم عزم المحرك قبل و بعد التعديل و عند أعماق مختلفة للمجاري

1.1.10.5 تحسين أوضاع العزم في محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة[5]

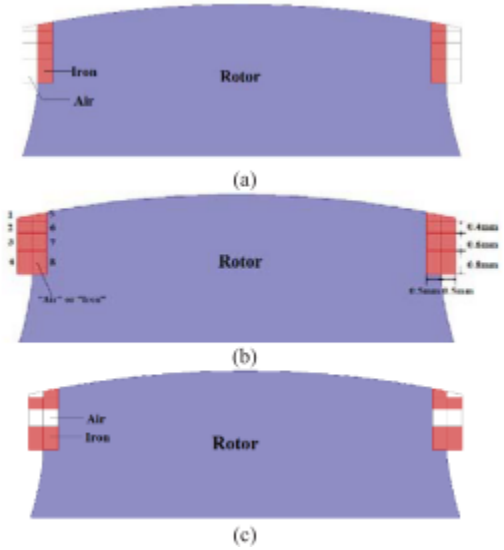
Torque Profile Optimization in Switched Reluctance Motor

يعرض هذا البحث العلاقة بين بنية الثابت والدائر مع عزم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة

أُجريت الدراسة على محرك ذو 6/8 أقطاب وتمت وفق ثلاث حالات:

الحالة الأولى: إضافة شبكة من القطع المعدنية ذات شكل شبه مستطيل:

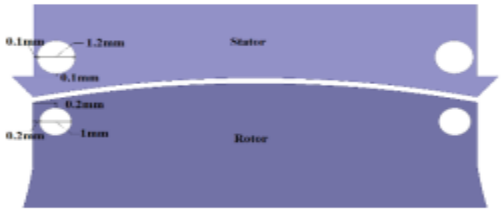
أُضيفت مجموعة من القطع المعدنية من معدن M−19 على شكل شبه مستطيل وعلى طبقتين وبسماكة 0.5[mm] على القطب الدائر وبأماكن مختلفة لإحداث تغيير في أبعاد الثغرة الهوائية كما يبين الشكل 1-9



الشكل 1-9 إضافة القطع المعدنية على أطراف الدائر

ومن خلال النمذجة لوحظ نقصان في عزم المحرك بمقدار 0.69%

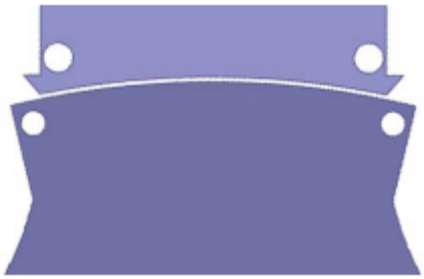
الحالة الثانية: إضافة ثقوب دائرية الشكل على زوايا أقطاب الثابت والدائر كما فيالشكل 1-10



الشكل 1-10 إضافة ثقوب دائرية على أطراف الثابت و الدائر

ومن خلال النمذجة لوحظ نقصان العزم بمقدار 3.79%

الحالة الثالثة: استخدام أسنان دائر عريضة ومدببة مع أو بدون وجود للثقوب على زوايا أقطاب الثابت وأسنان الدائر كما يبين الشكل 1-11



الشكل 1-11 أسنان عريضة و مدببة مع الثقوب

تمت هذه الحالة وفق المراحل التالية:

- زيادة عرض الدائر إلى 25 درجة مع وجود الثقوب وعندها لوحظ انخفاض في العزم بمقدار 3.45%
- زيادة عرض الدائر إلى 27 درجة بدون وجود الثقوب وعندها لوحظ انخفاض العزم بمقدار 6.39%
- زيادة عرض الدائر إلى 27 درجة مع وجود الثقوب وعندها لوحظ انخفاض العزم بمقدار 8.28%
- زيادة عرض الدائر إلى 25 درجة وبدون وجود الثقوب لوحظ ارتفاع وزيادة في العزم بمقدار 0.69%.

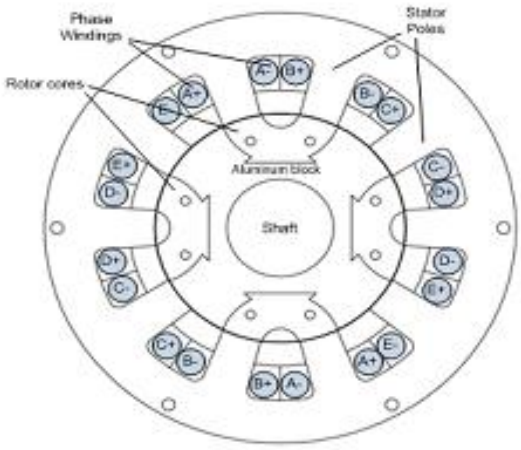
1.1.10.6التقليل من تموجات العزم لنموذج محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة المقطع باستخدام خوارزمية PSO [6]

The Minimization of Torque Ripples of Segmental Type Switched Reluctance Motor by Particle Swarm Optimization.

في هذه الدراسة صُمم متحكم يعمل على خفض تموجات العزم لمحرك مقاومة متغيرة (10/8) إذا استُخدم محرك خماسي الطور و الدائر على شكل حرف U و هو نفسه ما يسمى النموذج المقطع الذي نتج من اختيار دقيق لأبعاد الثابت و الدائر كما يظهر في الشكل 1-12.

غُذّي هذا المحرك من مبدل جسري مناسب يساعد على التحكم الدقيق بزوايا القدح

اعتمد الباحثون في تخفيض تموجات العزم على التخلص من تموجات التيار الناتجة عند الفصـــل والوصـــل ومن ثمّ رُكّز على تحديد أزمنة الفصـــل والوصـــل للأطوار باســتخدام خوارزمية تشــبه الخوارزمية الجينية.



الشكل 1-12 مقطع عرضي في المحرك

وتوصلت الدراسة بالنهاية إلى القدرة على تخفيض تموجات العزم بنسبة من 40%–35 بالمقارنة مع الدراسات السابقة لهذا النوع من المحركات.

1.1.10.7 تصميم وتطوير لمحرك الجر ذي المقاومة المتغيرة.[7]

Rapid Design and Development of a Switched Reluctance Traction Motor.

تركزت أولويات التصـميم في هذه الدراسـة على تغيير في بنية محرك المقاومة المتغيرة للتخلص من بعض المشـاكل التي اعترضـت عمل هذا المحرك إذ رُكّز على العزم الناتج والاهتزازات وتموجات العزم غير المرغوبة وحللت الإجهادات الحرارية ودراســة توزع الحقل المغناطيســي في المحرك باســتخدام بعض البرامج الحاسوبية.

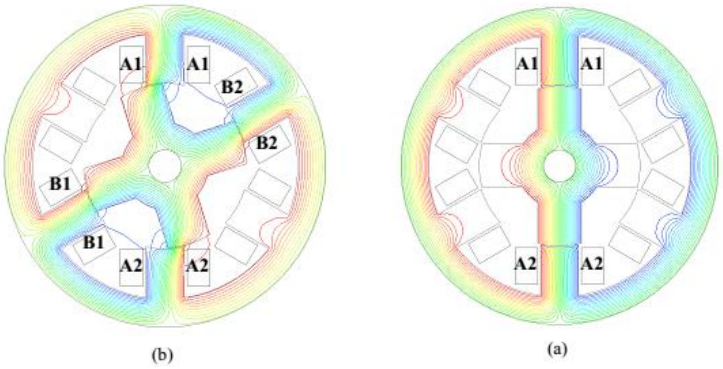
توصـلت الدراسـة في النتيجة إلى تعديل تصـميم المحرك بما يخدم احتياجاتها من الضـجيج الأقل والاهتزاز الأخف وبالسعر الأمثل.

1.1.10.8 الاعتبارات التصـــميمية لمحرك المقاومة المغناطيســـية المتغيرة ذات التهييج ثنائي الطور لخفض تموجات العزم. [8]

Design Considerations of Switched Reluctance Motors with Bipolar Excitation for Low Torque Ripple Applications

صـممت الآلة في هذا البحث مع الأخذ بالحسـبان التهييج ثنائي الطور لتحقيق الأداء الأمثل لتبادل الأطوار في أثناء قيادة المحرك والتقليل قدر الإمكان من تموجات العزم غير المرغوبة.

وضعت معادلات التصميم النظرية لمحرك ذي (6/10) أقطاب سداسي الطور ذي تهييج ثنائي كما يبين الشكل 1-13 و تم التطبيق العملي له إذ تضمن العمل تخفيض تموجات العزم مع المحافظة على العزم الوسطي الناتج من المحرك .



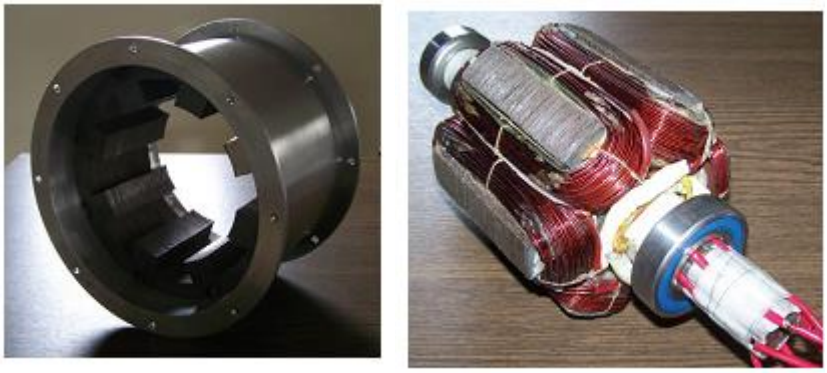
الشكل 1-13 تهييج ثنائي الطور

ومن ثمّ اســـتطاع الباحثون الجمع بين التصـــميم الجيد والتهييج الثنائي ووضـــعوا مجموعة من الاعتبارات التصــميمية تتضــمن عدد الأقطاب والزاوية بين الثابت والدائر وعدد اللفات وتيار الطور إذ حُلّت المشاكل التي اعترضت عملية التصميم جميعها.

1.1.10.9 تصـميم أوضـاع العزم لمحرك مقاومة متغيرة ذي دائر خارجي و تحليله مع أوضـاع مختلفة لترتيب الأقطاب [9]

Design and Torque Profile Analysis of an Outer-rotor SR Motor with Different Winding Configurations.

قدم هذا البحث محرك مقاومة متغيرة ذي دائر خارجي مركب ضـمن عجلة (دولاب) و صـمم لعربة كهربائية كما يبين الشكل 1-14.



الشكل 1-14 بنية المحرك ذي الدائر الخارجي

وضـعت اللفات بطريقة نحصـل منها على قوة الدفع المطلوبة للعربة وحُصـل على أوضـاع العزم في أثناء وجود حمولات مختلفة وكذلك استُخدمت خوارزمية تحكم مناسبة.

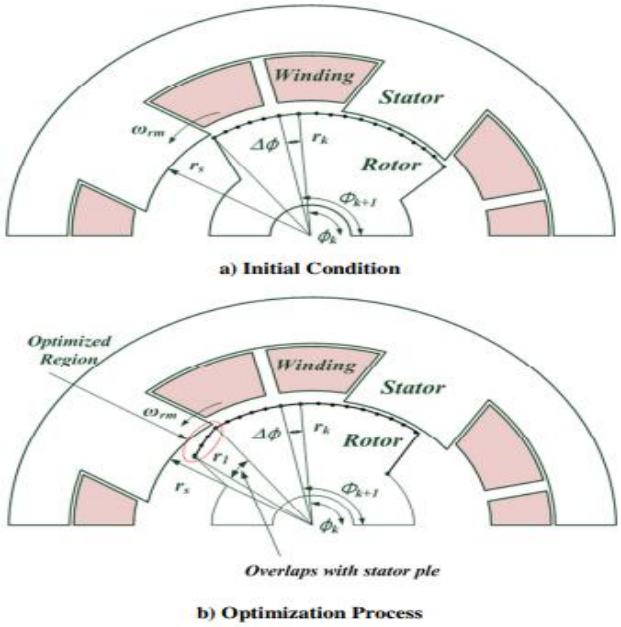
ووصل البحث إلى نتائج عدة تبين أن محرك المقاومة المتغيرة ذا الدائر الخارجي هو خيار قابل للتطبيق في محركات الدفع للعربات مثل عربة التسوق.

1.1.10.10 محرك مقاومة متغيرة ثنائي الطور ذو سرعة عالية لقيادة منفاخ هواء [10]

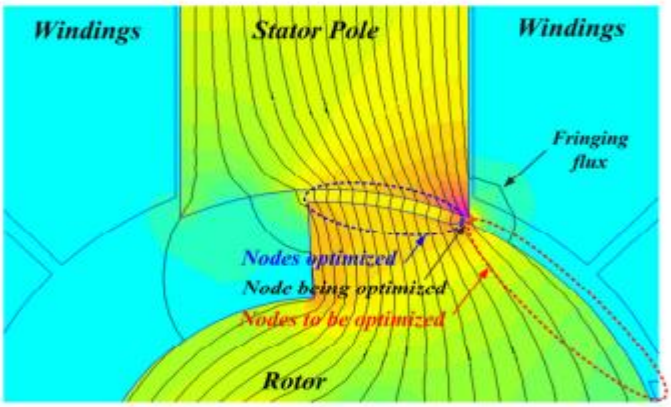
High-Speed Tow Phase SRM for an Air Blower Drive

صـمم الباحثون في هذه الدراسـة محرك مقاومة متغيرة ثنائي الطور ذا سـرعة عالية لمنفاخ كهربائي إذ صُـمم بسـرعة تصـل إلى 30000 r.p.m و هو محرك مكون من ثابت ذي أربعة أقطاب و دائر ذي قطبين إذ صُـمم و عُدّل الدائر بطريقة تعطي شـكلاً غير موحد للثغرة الهوائية كما يبين الشـكل 1-15 و هذا

يحسّن من سرعة المحرك و عزمه، وصمم هذا المحرك بأوضاع حثية غير متماثلة إذ تعدّ المنطقة الموجبة أعرض من السالبة و يبين الشكل 1-16 خطوط السيالة المغناطيسية في سن الدائر المعدل .



الشكل 1-15 التعديل في سن الدائر



الشكل 1-16 خطوط السيالة المغناطيسية عند السن المعدل

تم التأكد من صحة العمل ببناء نموذج طُبّق ضمن منفاخ هواء بوصفه نموذجاً تجريبياً

1.1.10.11 طريقة جديدة في تعويض تيار الطور لمحرك المقاومة المتغيرة بالاعتماد على العناصـــر المنتهية[11]

A Novel Method of Phase Current Compensation for Switched Reluctance Motor System Based on Finite Element

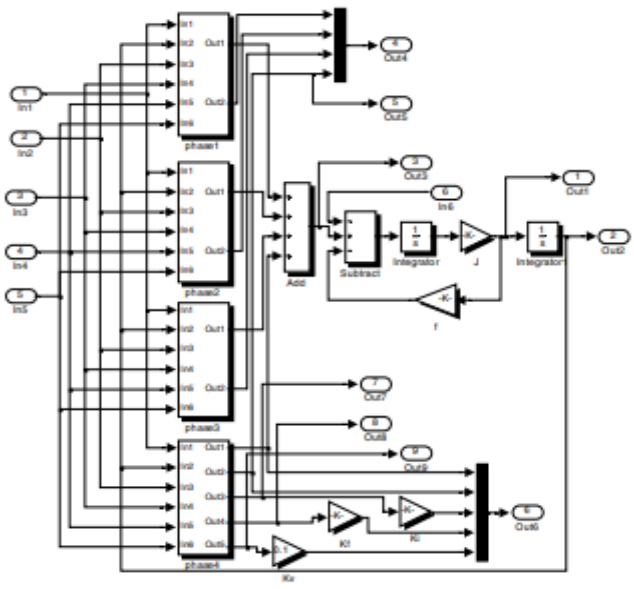
في هذا البحث طريقة جديدة في تحكم محرك المقاومة المتغيرة وقيادته باستخدام التعويض بالاعتماد على المنطق العائم وحلقات التحكم المغلقة والعناصر المنتهية

بالاعتماد على الشـــروط الناتجة من النمذجة ومن العناصـــر المنتهية يمكن عَدُّ تيار الطور على علاقة غير خطية مع العزم.

وفق مفهوم التحكم المقترح فإن إشارة التعويض ستضاف إلى تيار الطور.

استخدم محرك ذو 6/8 أقطاب في هذا البحث.

يبين الشكل 1-17 مخطط النمذجة و المحاكاة في Matlab كما يبين الشكل 1-18 نتائج النمذجة و التحسن بالعزم بعد تعويض تيار الطور .



الشكل 1-17 مخطط النمذجة و المحاكاة في matlab

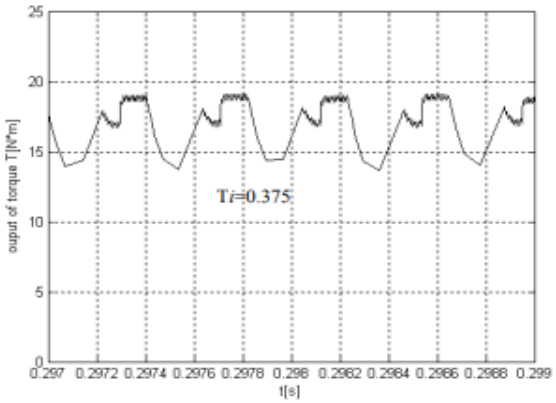


Figure 13. The co-torque produced by four phases 8/6 pole SRM without compensation

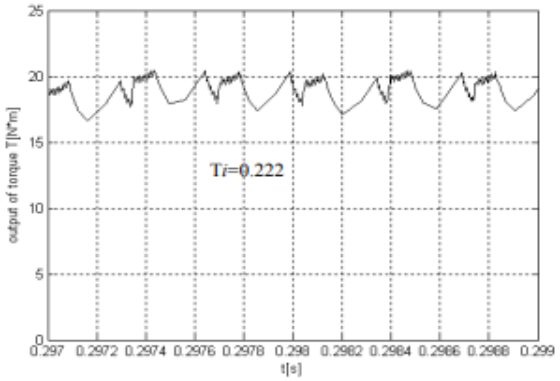


Figure 14. The co-torque produced by four phases 8/6 pole SRM with compensation

الشكل 1-18 نتائج النمذجة و التحسن بالعزم

وصـــل الباحثون بالنتيجة إلى تحســـن العزم الناتج مقابل تقليل تموجات العزم غير المرغوبة بنســـبة 50% .

1.1.10.12 محرك المقاومة المتغيرة في الســـرعة العالية: حســـاب الاهتزاز الطبيعي والتنبؤ بالضـــجيج الصوتي [12]

High-Speed Switched Reluctance Machine: Natural Frequency Calculation and acoustic noise prediction.

اســتُخدمت في هذه الدراســة طريقة العناصــر المنتهية لإنشــاء نموذج تحليلي لحســاب الاهتزاز والتنبؤ الصوتي لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة.

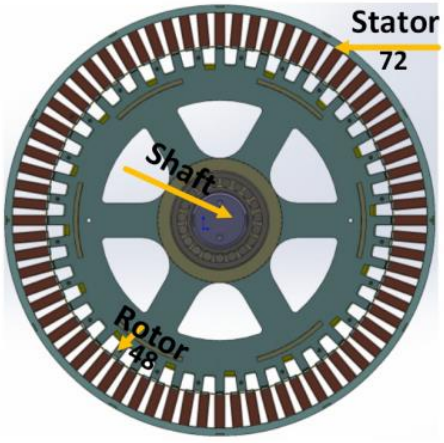
اختصر الباحثون مراحل حساب الاهتزاز من ثلاث مراحل إلى واحدة وهذا أدى إلى اختصار الوقت والجهد.

توصلوا بالنتيجة إلى تطابق بنسبة تصل إلى 90% بين الطريقة الجديدة والطريقة التقليدية ومن ثمَّ صحة العمل وفقها.

1.1.10.13 التصميم والتحقق التجريبي لمحرك مقاومة متغيرة ذو 72/48 قطب المستخدم في تطبيقات التنقيب ذات القيادة المباشرة والسرعة المنخفضة.[13]

Design and Experimental Verification of 72/48 Switched Reluctance Motor for Low- Speed Direct-Drive Mining Applications

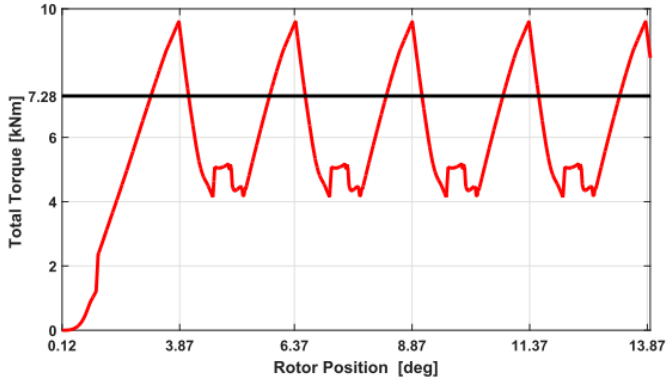
صمم الباحثون محرك مقاومة متغيرة جديد ذا 72/48 قطب كما يظهر الشكل 1-19 بهدف الحصول على عزم عالٍ وسرعة دوران منخفضة لاستخدامه في أدوات التنقيب وأُجريت دراسة تفصيلية له بطريقة العناصر المنتهية ثنائية البعد.



الشكل 1-19 نموذج محرك 48/72

تم التخلص من استخدام المحرك التحريضي في تطبيقات التنقيب الذي كان يعاني من ضغط كبير.

تمكن الباحثون بالنتيجة من رفع مردود النظام إلى 90.9% على حين كان 59.32% عند استخدام المحرك التحريضي ويبين الشكل 1-20 تغيرات العزم الكلي للمحرك مع مواضع الدائر المختلفة.



الشكل 1-20 تغيرات العزم الكلي للمحرك مع مواضع الدائر

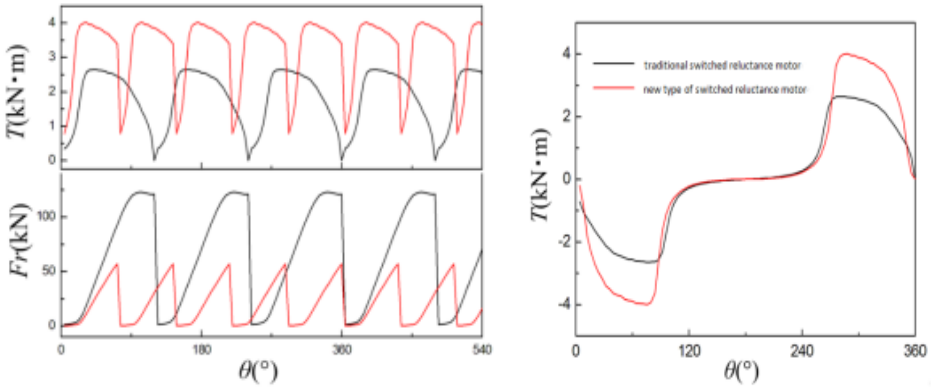
1.1.10.14 بحث عن توزع القوة الكهرومغناطيسية وأداء الاهتزاز لمحرك المقاومة المتغيرة 10/4 الجديد. [14]

Research on Electromagnetic Force Distribution and Vibration Performance of a Noval 10/4 Switched Reluctance Motor.

اعتمد الباحثون في دراستهم على زيادة التدفق المغناطيسي في الثغرة الهوائية وزِيدَ عدد الأقطاب في الجزء الثابت لمحرك 6/4 من ستة إلى عشرة

توصل الباحثون إلى زيادة العزم المغناطيسي و القوة الكهرطيسية بنسبة 51.7% كما يظهر الشكل 1-21 الذي يبين مقارنة للعزم و القوة للمحرك قبل زيادة عدد الأقطاب و بعده.

وانخفضت القوى المسببة للاهتزاز بنسبة 45.3% ومن ثُمّ انخفضت نسبة الاهتزاز بالقيمة نفسها.

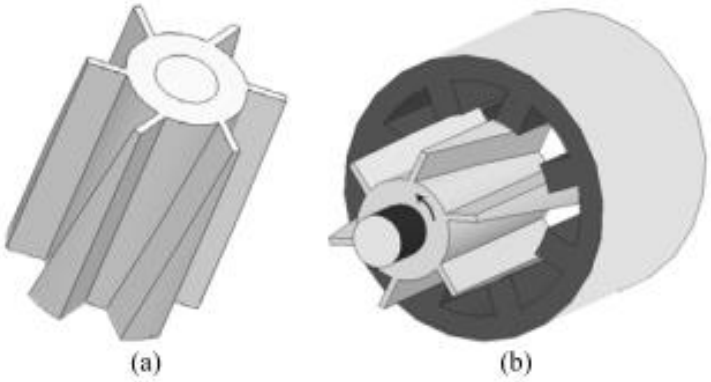


الشكل 1-21 مقارنة النتائج قبل و بعد زيادة عدد الأقطاب

1.1.10.15 التصميم الجديد لأقطاب الدائر المائلة في محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة[15] .

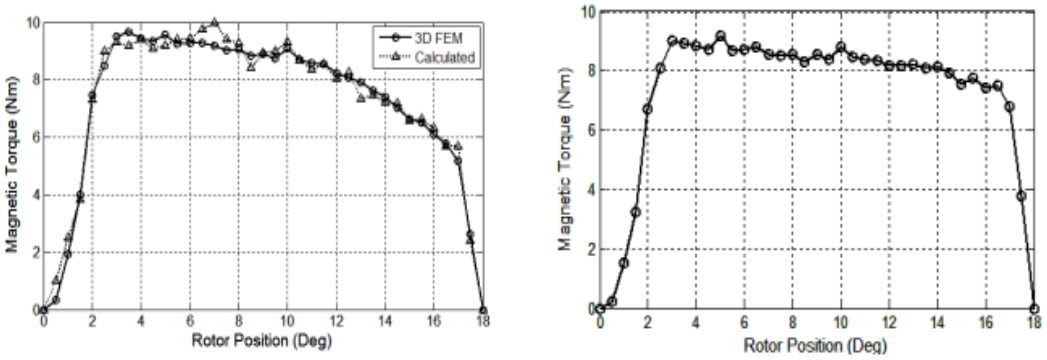
A New Skewed- Rotor-Pole Switched Reluctance Motor Design.

عُدل في هذا البحث شكل أسنان الجزء الدائر بهدف الحصول على عزم إقلاع عالٍ و حجم أصغر إذ يبين الشكل 1-22 الشكل الجديد لأسنان الدائر.



الشكل 1-22 المحرك المقترح بعد تعديل سن الدائر

أجريت الدراسة باستخدام طريقة العناصر المنتهية وأثبتت كفاءة الهيكل الجديد للمحرك إذ توصل الباحثون إلى إنقاص وزن المحرك بنسبة 0.17% وحجم المحرك بنسبة 6.7% دون التأثير في العزم و هذا ما يبينه الشكل 1-23 عند مقارنة العزم للمحرك قبل التعديل وبعده.



الشكل 1-23 مقارنة العزم قبل و بعد تعديل المحرك

.. خلصت الدراسة المرجعية إلى أن هناك حاجة ملحة لدراسة تأثير تغير الزاوية في عزم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة تفصيلياً ووضع دليل متكامل لاختيار الزاوية المناسبة عند تصميم المحرك.

1.1.11 مناهج البحث وأدواته

تعتمد منهجية البحث على اجراء دراســة متكاملة لتأثير تغير الزاوية بين الثابت والدائر على عزم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة وبالتالي إجراء نمذجة تتضمن:

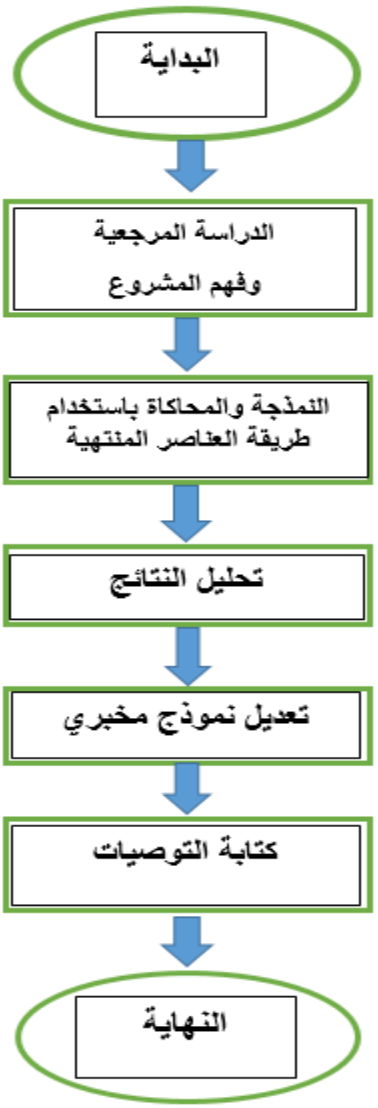
تأثير تغير أبعاد أقطاب الثابت فقط على العزم والوصول منه للأبعاد الأمثل

تأثير تغير أبعاد أسنان الدائر فقط على العزم والوصول منه للأبعاد الأمثل

ومن ثم الوصول للأبعاد الأمثل للمحرك ككل.

تم استخدام برنامج Ansys ثلاثي الأبعاد والمعتمد على نظرية العناصـر المنتهية في نمذجة المحركات وإيجاد عزمها مع كل تغير للأبعاد وعند قيم مختلفة للتحميل الكهربائي.

توضح الخوارزمية في الشكل 1-24 المنهجية المتبعة للوصول لأهداف البحث:



الشكل 1-24 خوارزمية منهجية البحث

1.1.12 مكونات البحث

تم إجراء البحث وفق المخطط التالي:

1- الدراسة المرجعية

2- استخدام طريقة العناصر المنتهية في تصميم الآلات

3- نمذجة و محاكاة محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة في بيئة Ansys.

4- تعديل بنية محرك ذو مقاومة مغناطيسية متغيرة.

5- التطبيق العملي للمحرك الكهربائي ذو المقاومة المغناطيسة المتغيرة المعدل و الحصول على النتائج التجريبية و مقارنتها مع نتائج النمذجة و المحاكاة.

6- النتائج و المقترحات.

تتكون هذه الدراسة من ستة فصول مقسمة على النحو الآتي:

يتضـمن الفصـل الأول الإطار النظري للبحث والدراسـة المرجعية التي تعرض آخر الأبحاث التي تمت عن محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة.

على حين يتناول الفصـل الثاني كيفية اسـتخدام طريقة العناصـر المنتهية في تصـميم الآلات الكهربائية والبيئة البرمجية المناسبة التي تُختار في هذا البحث فضلاً عن خوارزمية تصميم المحرك وفق هذه البيئة.

أما الفصـــل الثالث فقد اختص بنمذجة مجموعة من المحركات ذات المقاومة المغناطيســـية المتغيرة المختلفة عن بعضـها البعض بالأبعاد ومحاكاتها والوصـول إلى نسـب بناء المحرك الأنسـب للعزم وإلى نسـبة بناء المحرك الأفضل للعزم الأمثل.

والفصـل الرابع يتضـمن تعديل بنية محرك ذي مقاومة مغناطيسـية متغيرة موجود في المخبر وفق النتائج التي توصلنا لها في الفصل الثالث والحصول على العزم المحسن منه وفق برامج النمذجة والمحاكاة.

أما الفصـــل الخامس عُدّل المحرك المخبري عملياً وأُعيد تنفيذ دارة القيادة والتحكم الخاصـــة به مع الحصول على النتائج العملية بوساطة التجارب التطبيقية وكذلك المقارنة بين النتائج النظرية والتطبيقية العملية.

وأخيرًا الخاتمة والنتائج والتوصيات في الفصل السادس.

2 الفصل الثاني

2.1 استخدام طريقة العناصر المنتهية في تصميم الآلات الكهربائية [17] [16]

تعد دراسة الحالة الكهرومغناطيسية في الآلات الكهربائية أمرًا بالغ الأهمية ولا سيما في مجال التصميم والاستثمار والأداء الأمثل.

تتضمن عملية تصميم الآلة الكهربائية حل العديد من المسائل الهندسية المعقدة والمترابطة مع بعضها بعضاً إذ يمكن الحصول بوساطة ذلك على العديد من الحلول المقبولة لذلك يمكن القول: إن عملية تصميم الآلة الكهربائية تشكل مسألة متعددة الحلول وعند التصميم يجب معالجة مجموعة من المسائل الكهرومغناطيسية والحرارية والميكانيكية المترابطة مما يقتضي تكرار الحلول مرات عدة قبل الوصول إلى حل قابل للتطبيق يحقق غالبية المواصفات المطلوبة.

يعدُّ تحديد الحقول الكهرومغناطيسية ذا أهمية كبيرة في مجال تصميم الآلات الكهربائية إذ تُحوّل المعادلات التفاضلية الجزئية إلى جملة من المعادلات الجبرية وتوجد طريقتان أساسيتان في هذا المجال لحل معادلات الحقول الكهرومغناطيسية تدعى الأولى بطريقة الفروقات المحدودة والثانية طريقة العناصر المنتهية.

بدأ استخدام طريقة العناصر المنتهية منذ سنوات عديدة في تصميم الآلات الكهربائية وازدادت أهميتها في المدة الأخيرة ولا سيما بعد ظهور الحواسيب الحالية السريعة.

تتيح طريقة العناصر المنتهية تحديد الصورة الكهرومغناطيسية التفصيلية الشاملة لكل جزء مرغوب من الآلة المدروسة فضلاً عن تصور متكامل عن الحالة المدروسة وتساعد النتائج على اتخاذ الإجراءات الكفيلة بتشغيل الآلة ضمن الشروط المثلى.

ونستطيع بوساطة طريقة العناصر المنتهية وفي مرحلة تصميم الآلة الكهربائية مراقبة مواصفات الآلة المصممة وخصائصها في كل مرحلة من مراحل التصميم وإجراء التعديلات المناسبة على النموذج المصمم للوصول للمواصفات المرغوبة.

تعتمد طريقة العناصر المنتهية على الخطوات التالية:

1- تقسيم مجال الحل إلى عناصر ذات أشكال هندسية معينة
2- إنشاء معادلات الحقول و التوترات لكل عنصر.
3- تجميع العناصر مع بعضها.
4- حل المعادلات الناتجة .

إذ تعمل طريقة العناصر المنتهية بعد تقسيم مجال الحل إلى عناصر على تقريب التابع موضع الاهتمام عن طريق كثير الحدود كالتوتر في الكهرباء الساكنة وتمتاز هذه الطريقة أنها تتيح تقدير الجهد وتحديده ليس فقط في عقد شبكة الحل بل في العنصر أيضًا بوساطة تابع الشكل إذ يتغير تابع الشكل من الواحد في كل عقدة إلى الصفر في العقد المجاورة لها.

تكتب علاقة الجهد V لكل عنصر باستخدام قيم الجهود عند كل عقدة و تابع الشكل وفق المعادلة 1-2:

$$V_{element} = \sum_{i=1}^{3} f_i(x.y) V_{node\ i} \qquad 1\text{-}2$$

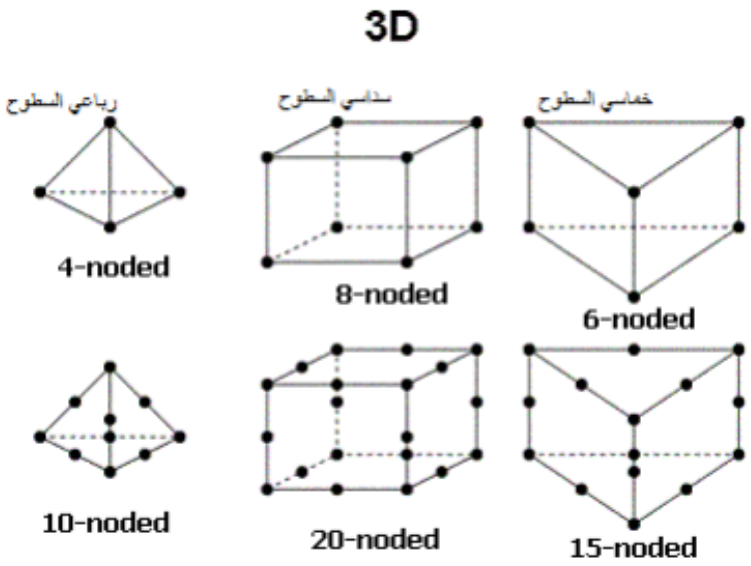
حيث $f_i(x.y)$ هو تابع الشكل و يطبق على كل عقدة

$V_{node\ i}$ قيمة الجهد في العقدة i

يتم وفق ذلك الحصول على سلسلة من معادلات الجهود لكل عنصر ومن ثم تشكيل مصفوفة المعاملات لترابط العقد فيما بينها لتُحلَّ بعد ذلك عن طريق مقلوب المصفوفة أو بطريقة التكرار لتحديد الجهد عن طريق مجال الحل.

تعد طريقة العناصـر المنتهية من أنسـب الطرائق لحل المواضـيع اللاخطية الكهرومغناطيسـية في البنى الهندسية المعقدة كالأجهزة والآلات الكهربائية المختلفة.

يمكن اسـتخدام عناصـر منتهية بأشـكال مختلفة إذ تُختار العناصـر المخروطية الرباعية السـطوح أو السداسية السطوح لحل المسائل ثلاثية الأبعاد كما في الشكل 2-1عناصر منتهية بأشكال مختلفة



الشكل 2-1عناصر منتهية بأشكال مختلفة

عند اعتماد العنصر الرباعي السطوح وبأربع عقد يمكن كتابة التابع A كما يأتي:

$$A_e = a + bx + cy + dz \qquad 2\text{-}2$$

بصـفة أن هذه المعادلة يجب أن تتحقق في العقد الأربعة للعناصـر الرباعية يمكن كتابة العلاقة السـابقة بالصورة التالية:

$$A_{ei} = a + bx_i + cy_i + dz_i \quad ; \quad i = 1 \dots \dots \dots 4 \qquad 3\text{-}2$$

يحصـل بهذه الطريقة على أربع معادلات متشـابهة من أجل المعاملات d,c,b,a وبذلك يحسـب محدد نظام المعادلات كما يأتي:

$$det = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} = 6v(5) \qquad \textbf{4-2}$$

إذ v حجم المخروط الرباعي السطوح وبإيجاد المعاملات d,c,b,a نستطيع أن نكتب:

$$A_e = \sum_{i=1}^{4} \alpha_i (x,y) A_{ei} \qquad \textbf{5-2}$$

إذ a_i توابع الشكل وتحسب من العلاقات:

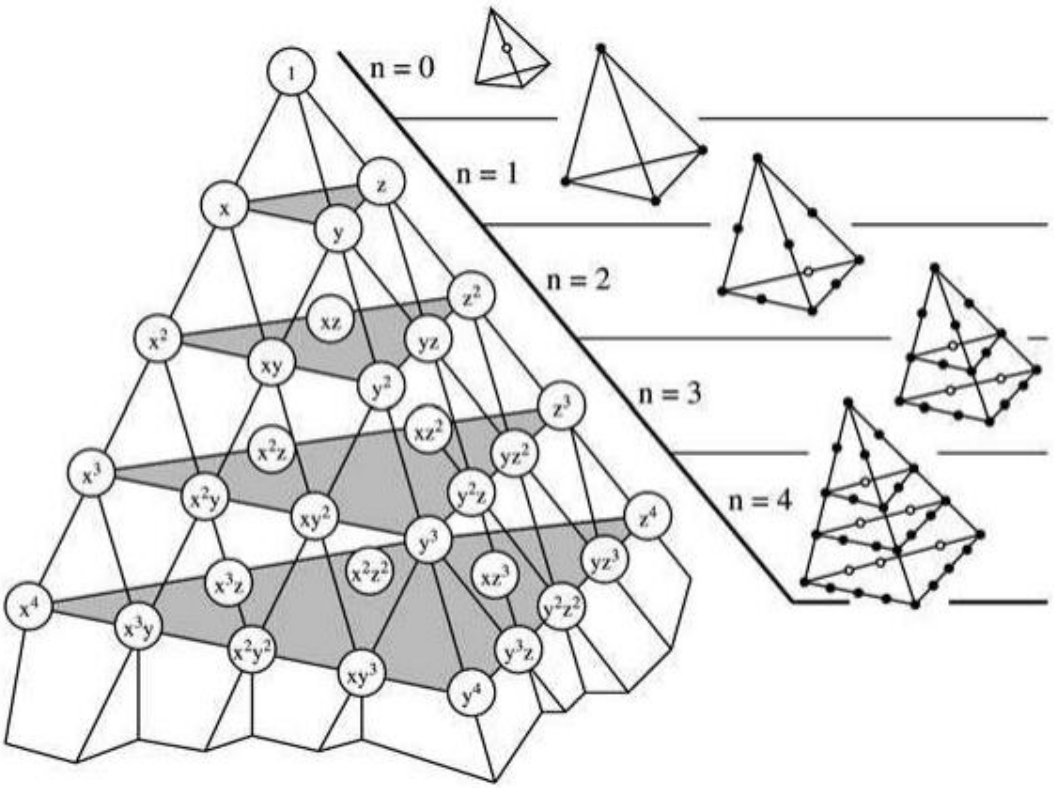
$$\alpha_1 = \frac{1}{6v}\begin{vmatrix} 1 & x & y & z \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}, \alpha_2 = \frac{1}{6v}\begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x & y & z \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \qquad \textbf{6-2}$$

وبطريقة مشابهة يُحصل على a_3 و a_4

وفي الإحداثيات المحلية يمكن تقريب التابع العشوائي A(x,y) ضمن العنصر إلى كثير حدود من المرتبة n^{th} كمايأتي:

$$A_e = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i (x,y) A_{ei} \qquad \textbf{7-2}$$

إذ $m = \frac{1}{6}(n+1)(n+2)(n+3)$ هو عدد العقد في رباعي الســطوح أو عدد الحدود في كثير الحدود و بذلك يمكن ترتيب الحدود في كثير الحدود ثلاثي البعد كما في الشكل 2-2



الشكل 2-2 رباعي السطوح و ترتيب الحدود المرافق

تعتمد معظم برمجيات التحليل العددي الحالية على طريقة العناصـــر المنتهية نظرًا إلى ما تتمتع به من قابلية التطبيق في المسـائل التي تملك حدودًا غير منتظمة إذ تأخذ هذه الطريقة بالحسـبان الشـكل الهندسـي للآلة والخواص المختلفة للمواد وظاهرة التشـبع المغناطيسـي والتيارات الإعصـارية وغيرها وتمكننا من الحصـول على صورة متكاملة لتوزع الحقل في أجزاء الآلة المدروسة.

2.1.1 معادلات ماكسويل:[17]

تعتمد الطرائق العددية على حل معادلات ماكســـويل عند الترددات المنخفضـــة لتحديد توزع الحقل المغناطيسي في الآلات الكهربائية ولدينا:

$$\nabla XH = J + \frac{\partial D}{\partial t} \qquad \textbf{8-2}$$

$$\nabla X E = -\frac{\partial B}{\partial t} \qquad \textbf{9-2}$$

إذ: H شدة الحقل المغناطيسي (A/m)

J كثافة تيار الناقلية

E شدة الحقل الكهربائي (V/m)

B كثافة التدفق المغناطيسي(T)

D كثافة التدفق الكهربائي(C/m^2)

تعمل الآلات الكهربائية عند الترددات المنخفضـــة و من ثمّ تُهمل معدلات تغير الحقل الكهربائي بالزمن $\frac{\partial D}{\partial t}$ فتصبح المعادلة كالآتي :

$$\nabla X H = J \qquad \textbf{-210}$$

باستخدام النفاذية المغناطيسية μ يكون لدينا:

$$H = \frac{1}{\mu} B \qquad \textbf{11-2}$$

يرتبط شـعاع كثافة التدفق المغناطيسـي (التحريض) B مع شـعاع كمون الحقل المغناطيسـي A بوسـاطة العلاقة:

$$B = \nabla X A \qquad \textbf{12-2}$$

بالتعويض والإصلاح بين العلاقات (2−10)، (2−11)، (2−12) *نحصل* على العلاقة الآتية:

$$\nabla X \left(\frac{1}{\mu} \nabla X A\right) = J \qquad \textbf{13-2}$$

تكون كثافة التيار في الحقول المستوية ثنائية البعد وشعاع الكمون المغناطيسي بمركبة واحدة منطبقة على المحور Z الذي سينطبق بدوره على محور الآلة فيكون شعاع الكمون وشعاع كثافة التيار ضمن هذه الشروط كمايأتي:

$$\boldsymbol{A = A(x.y)e_z} \qquad \textbf{14-2}$$

$$\boldsymbol{J = J(x.y)e_z} \qquad \textbf{15-2}$$

إذ e_z ترمز لشعاع الواحدة وفق المتجه Z أي إن :

$$\boldsymbol{J = (0.0.J)}$$

$$\boldsymbol{A = (0.0.A)}$$

ومن ثمّ تصبح المعادلة السابقة لها الشكل الآتي:

$$\boldsymbol{-\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu}\,\nabla A\right) = J} \qquad \textbf{16-2}$$

ويصبح الحقل المغناطيسي تابعاً لشعاع الكمون المغناطيسي بالشكل:

$$\boldsymbol{B = f\left(\frac{\partial A}{\partial x}.\frac{\partial A}{\partial y}.0\right)} \qquad \textbf{17-2}$$

ومن ثمّ تُحلّ المعادلة التفاضلية الجزئية (2−17) لإيجاد توزع الحقل المغناطيسي في المحرك الكهربائي.

2.1.2 منبع الحقل:[17]

في الحالة العامة فإن كثافة تيار الناقلية J الموجودة في المعادلة (2−13) يمكن أن تحسب من معادلة المادة كمايأتي:

$$J = \sigma \cdot E \qquad \textbf{18-2}$$

إذ σ الناقلية الكهربائية (s/m) .

بدمج المعادلتين (2−9) مع (2−12) نصل إلى:

$$\nabla XE = \frac{\partial}{\partial t}\nabla XA \qquad \textbf{19-2}$$

وهذا متطابق مع تعريف كثافة تيار الناقلية

$$J = -\sigma\frac{\partial A}{\partial t} - \sigma\nabla\emptyset \qquad \textbf{20-2}$$

2.1.3 خواص المواد:[17]

يعبر عن الخواص المغناطيسية للصفائح المعدنية المستخدمة في الآلات بالنفوذية المغناطيسية μ و هي قيمة تحدد الوظيفة اللاخطية لكثافة التدفق المغناطيسي B و من ثمّ تُحدد المغناطيسية بوساطة هذه القيمة في أثناء تحليل العناصر المنتهية .

بما أن التيارات العكسية عمومًا تنخفض عند صفائح الهيكل الخارجي فتضبط النفوذية فيها عند الصفر.

أما حذاء القطب وحوض الآلة فإنه يصنع من خلائط معدنية تُمثّل بوساطة معادن ناقلة ذات منحني مغنطة لا خطي.

نستنتج مما سبق أن الحقل المغناطيسي للمواد المختلفة ينحصر ضمن المجالات الآتية:

$$-\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu}\nabla A\right) = J = \begin{cases} 0 & \text{ضمن الهواء و صفائح الهيكل الخارجي} \\ \dfrac{N_w i_w}{s_w} & \text{في لفات الطور} \\ -\sigma \dfrac{\partial}{\partial t} A + \dfrac{\sigma U_b}{I_b} & \text{في الدائر} \\ -\sigma \dfrac{\partial}{\partial t} A & \text{في المواد الناقلة} \end{cases} \qquad 21\text{-}2$$

2.1.4 لفات الثابت:[17]

تشـــكل لفات الثابت دارة كهربائية لذلك فإن النموذج الحســـابي للمحرك الكهربائي يمثل بوســـاطة كتابة معادلات هذه الدارة.

في هذه المعادلات يتم الربط بين التيار والتوتر وحســـاب كثافة تيار الناقلية وتُمثّل نهاية الملفات خارج النواة بوساطة إضافة حثية إلى نموذج الدارة ومن ثم يكون لدينا:

$$U_b = I_b \int \frac{\partial A}{\partial t} ds + R_b i_b + L_{be} \frac{di_b}{dt} \qquad 22\text{-}2$$

إذ

تـعـبـر R_b

عن مقاومة الأسنان متضمنة منطقة النهايات .

2.1.5 الحركة والعزم المغناطيسي:[17]

يعبر عن حركة الجزء الدائر في أوقات زمنية بالمعادلة الآتية (مالم تُفرض سرعة ثابتة).

$$J \frac{d\omega_n}{dt} = T_e - T_L \qquad 23\text{-}2$$

إذ

J هو عزم العطالة.

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \qquad 24\text{-}2$$

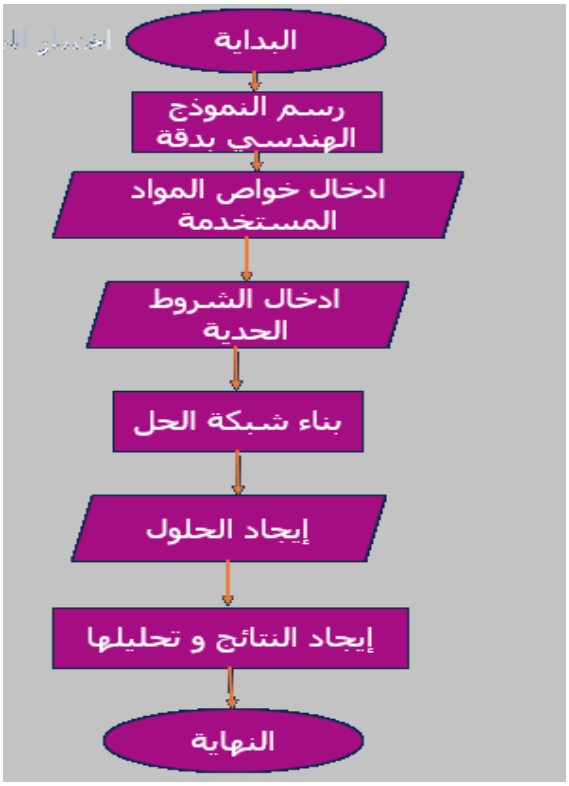
ω_n السرعة الزاوية θ_m الزاوية المعبرة عن موضع الدائر

T_e العزم الكهرومغناطيسي T_L عزم الحمولة

يحدد موضع جديد للدائر عند كل بداية مدة زمنية وتُشكل شبكة جديدة في الثغرة الهوائية.

في أثناء التنفيذ في طريقة العناصر المنتهية يُعبّر عن الحركة الافتراضية بوساطة تنسيق مصفوفات التحويل لقيم الكمون المغناطيسي في رؤوس مثلثات الشبكة دون أي تغيير في شبكة الثغرة الهوائية.

يبين الشكل 2-3 خوارزمية الإجراءات العامة المتبعة لحل الحالات الكهرومغناطيسية للآلات الكهربائية و دراستها ضمن البيئة البرمجية للعناصر المنتهية.



الشكل 2-3خوارزمية العمل ضمن برمجيات العناصر المنتهية

يوجد العديد من البرمجيات المساعدة على تنفيذ أي دراسة استنادا إلى طريقة العناصر المنتهية نذكر منها برنامج تسلا Tesla وبرنامج COMSOLMULTIPHISICS وبرنامج FEMM وبرنامج QUICK FIELD وبرنامج MATLAB/PDE وبرنامج ANSYS.

بعد الاطلاع على البرمجيات السابقة و على إمكانيات كل منها اختيرت البيئة البرمجية ANSYS في إنجاز تصـــاميم ثلاثية البعد مختلفة لمحركات المقاومة المغناطيســـية المتغيرة و ذلك لما يتميز فيه برنامج ANSYS من دقة عالية و الإمكانيات الكبيرة لتحليل العناصـــر المنتهية بدءًا من التحليل الخطي و الســـاكن و غير الخطي إلى التحليل الديناميكي العابر مع الإشارة إلى أن هذه البيئة لا توفر مكتبات عناصر و أدوات جاهزة و إنما يتطلب الأمر أن يُصـــمم الباحث ويتابع تغيرات المحددات[18] و هي مكلفة و صـــعبة الحصـــول على النسخة الأصلية و قد اعتمدنا في دراستنا ضمن برنامج Ansys على الشكل الهندسي رباعي السطوح الهرمي و بطول [mm]0.0001 أثناء بناء شبكة الحلMesh .

3 الفصل الثالث

نمذجة ومحاكاة المحرك ذي المقاومة المغناطيسية المتغيرة في بيئة Ansys.

3.1 بنية المحرك (The motor's structure):[19]

يتكون المحرك ذي المقاومة المغناطيسية المتغيرة – مثل باقي المحركات الكهربائية الأخرى الدوارة – من جزأين أحداهما ثابت والآخر دائر، يتكون الجزء الثابت (Stator) من إطار حديدي يحمل على سطحه الداخلي مجموعة من الكتل الحديدية التي تحمل ملفات (Winding). عند مرور التيار الكهربائي في هذه الملفات تصبح هذه الكتل بمنزلة أقطاب مغناطيسية ثابتة للمحرك ونرمز لعدد هذه الأقطاب عادة بـ m على حين يتكون الجزء الدائر(Rotor) من أسطوانة حديدية (نواة) تحمل على محيطها الخارجي مجموعة أخرى من الكتل الحديدية عددها n لا توضع عليها أي ملفات وتعدُّ هذه الكتل بمنزلة أقطاب(أسنان)الدائر. والشرط الأساسي لبناء هذا النوع من المحركات ألا يتساوى m مع n وتتميز المحركات عن بعضها بعضًا بنسبة هذين العدديين وهذان العددان إما أن يكونا زوجيين أو فرديين أو أحداهما فردي والآخر زوجي ولكل من هذه الخيارات العددية ميزاته وتتميز هذه المحركات عن بعضها بنسبة هذين العدديين والشكل رقم 3-1-a يبين رسمًا تخطيطيًا لمحرك 6/4 بينما الشكل 3-1-b يبين رسمًا للمحرك 4/3 (إذ يرمز العدد في الجهة اليسرى إلى عدد أقطاب الثابت على حين العدد الأيمن يرمز إلى عدد أسنان الدائر).يعكف الباحثون حاليًا على دراسة النموذج الأمثل لهذا النوع من المحركات،وكما ذكرنا فإن هذه النماذج تختلف عن بعضها بعضًا بعدد أقطاب الثابت وعدد أسنان الدائر، فبعضهم اتجه إلى أن يكون هذان العددان 8/6 [21] [20] على حين حدد آخرون هذين العددين 6/4 [22] [23]وآخر الأبحاث حددت فيه هذين العددين 16/12.[24] في معظم الدراسات يُدرس تصميم المحرك إما عن طريق محدداته أو بوساطة حساب السيالة المغناطيسية أو الحل العددي للمعادلة التفاضلية وغيرها من الطرائق

وبعضها يستخدم الحاسوب لإجراء الحسابات المطلوبة وكل هذه الأنواع يُغذى فيها كل ملفين متقابلين مع بعضهما البعض في آن واحد ويمكن تغذية أربعة ملفات في الوقت نفسه لأسباب واعتبارات تتعلق بالعزم والسرعة وغيرها

3.2 مبدأ عمل المحرك :(The principle of Operation)[19]

عند تغذية أحد ملفات الثابت وليكن الملف رقم 1 على الشـــكل 3-1 بتوتر مســـتمر تنشـــأ في الكتلة الحديدية الموجود عليها هذا الملف سيالة مغنطيسية (magnetic flux) ونرى على الشكل بحسب اتجاه التيار المار في الملف أن هذه الكتلة تصبح بمنزلة قطب شمالي تخرج السيالة المغنطيسية منه وتتجه نحو أسنان الجزء الدائر، وتمر في أقرب سن لهذا القطب وعند مرورها في هذا السن يصبح بمنزلة قطبٍ مغنطيسيّ أيضًا ولكنه قطب جنوبي، ويحدث التجاذب بين القطب الشمالي للثابت المغذى والقطب الجنوبي للدائر، الذي هو سن الدائر، و هذا يؤدي إلى تحرك هذا الســـن ومن ثمّ إلى دوران الجزء الدائر ويمكن أن نتخيل قوى الجذب هذه مماثلة للقوة F_s المبينة على الشكل 3-1، تسبب هذه القوة عزمًا حول محور الدوران تتغير قيمتها من قيمة عظمى ربما توافق الشكل المرسوم (1–3–a–b) إلى أن يبلغ قيمة الصفر عند وضع مماثل للشكل (1–3–c–d) أي عندما يصبح ســـن الدائر منطبقًا تمامًا على قطب الثابت أي إن محور ســـن الدائر X_r منطبق على محور قطب الثابت X_s وعندها تصـبح قوة الجذب F_s التي كانت قوة مماسـيه قوة جذب مركزية أي تمر من مركز الدوران ، وهكذا نتابع في تغذية الملفات واحدة تلو الأخرى بحيث يستمر المحرك في الدوران ويمكن أن نلاحظ بوساطة سرد مبدأ العمل هذا أن للمحرك ميزات ومساوئ تخص كلًا من النوعين المبينين في الشكل 3- 1إذ يمكن إدراج المحركات جميعها تحت هذين النوعين مهما كان العددان n و m . ونذكر بعض هذه الميزات والسلبيات:

النوع الأول 6/4 أو أي عدديين زوجيين:

1- يمكن أن نغذي ملفين متقابلين معًا ومن ثمّ ينتج عنهما عزمُ مضـــاعف بالمقارنة مع العزم الناتج عند تغذية ملف واحد.

2- تشـكل قوى الجذب المماسـية الناشـئة من هذين القطبين مزدوجة حول محور الدوران ذراعها هو قطر دائرة اسنان الدائر.

3- عندما يصبح محور سن الدائر منطبقًا مع محور سن الثابت فإن هذه القوى المماسية تصبح قوة مركزية متعاكسة محصلتها معدومة على الجزء الدائر ومن ثمّ لا تسبب قوة الجذب هذه أي انحراف للجزء الدائر.

4- عندما نغذي ملفين متقابلين فإن الدارة المغنطيسية لكل قطب يمكن عدّها دارة تحتوي على ثغرة هوائية واحدة وجسم قطب واحد ونصف الإطار الخارجي وسن واحد ونصف نواة الدائر وتكون دارتا القطبين متماثلة كما في باقي الآلات الكهربائية الأخرى.

في النوع الثاني 4/3 أو أي عدديين أحدهما زوجي والآخر فردي:

1- لا يمكن أن نغذي ملفين بآن واحد ومن ثمّ يكون العزم المؤثر في محور الدوران هو الناتج عن قوة مماسية واحدة Fs ذراعها نصف قطر دائرة أسنان الدائر ولكن ذلك متاح إن كانت العددية من مضاعفات (4/3).

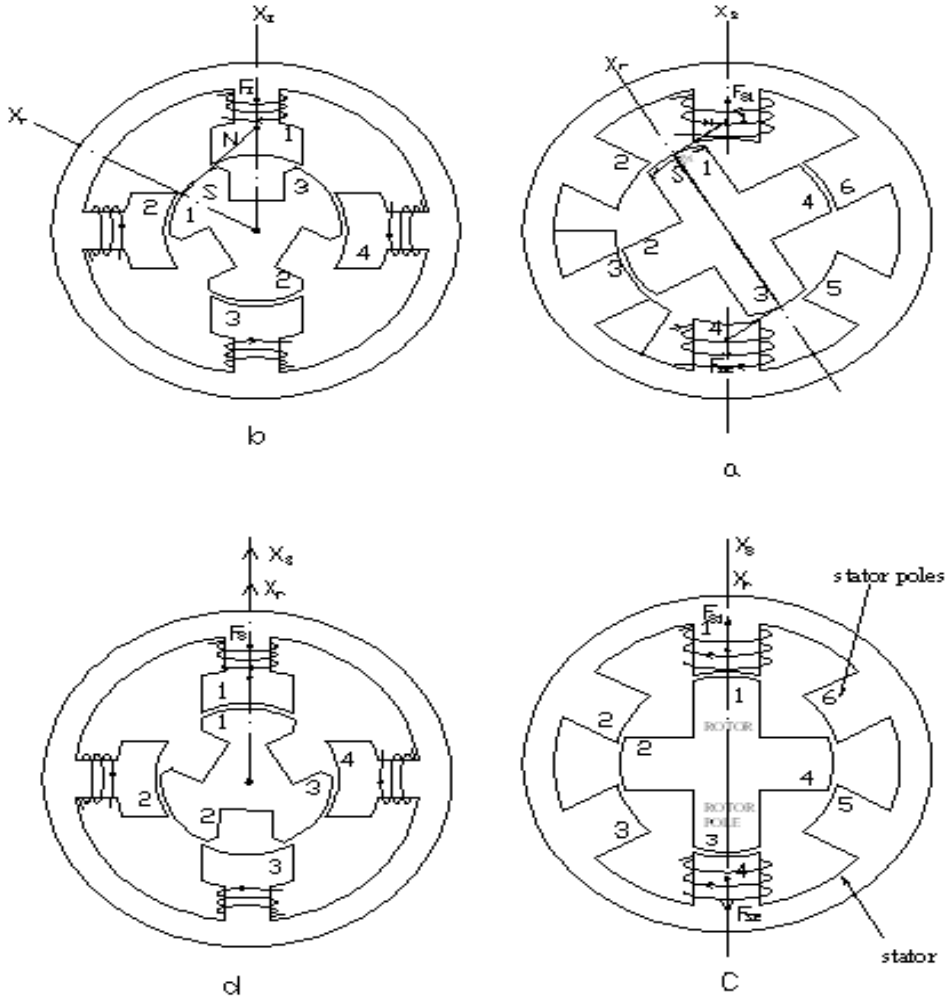
2- عندما يصبح محور سن الدائر منطبقًا على محور القطب الثابت Xs فإن هذه القوى Fs تصبح بمنزلة قوة جذب مركزية تؤدي إلى جذب الدائر نحو هذا القطب ولا نستطيع أن نجد أن هناك قوى أخرى تعاكسها. وربما تؤدي إلى انحراف الجزء الدائر وهذا يؤدي إلى إعاقة الدوران ولاسيما عندما تكون الثغرة الهوائية صغيرة.

3- عندما نرسم ممرات السيالة الناتجة من هذا القطب نجد أن هذه السيالة تخترق أكثر من ثغرة هوائية واحدة وربما هناك ثغرات على التفرع ومن ثمّ الدارة المغنطيسية للقطب ليست دارة بسيطة بل معقدة نسبيًا.

يعتمد تصميم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة تقليديًا على ناحيتين:

الناحية الأولى: الوصول إلى العزم الأعظم الناتج منه ويتم ذلك عن طريق التصميم الهندسي الأمثل وعلى طريقة التحكم به.

الناحية الثانية: هي الناحية التجارية فإن هدف التصميم لا يقتصر على الوصول إلى العزم الأمثل فقط بل تخفيض الكلفة الإجمالية للمحرك مع وحدة القيادة الخاصة به.



الشكل 3-1 محركا مقاومة مغناطيسية متغيرة بنسبة أقطاب 6/4 و 4/3 عند وضعين رئيسين للتشغيل

3.3 معادلات التوتر والدارة المكافئة للمحرك [19]

The volt equations and the equivalent circuit

عندما نطبق توترًا مســـتمرًا قيمته u على أحد ملفات أقطاب الثابت مقاومته R وعدد لفاته N فإن هذا التوتر يؤدي إلى مرور تيار كهربائي i ضـمن دارة الملف وينشـأ عن هذا التيار سـيالة مغنطيسـية تمر في جسـم القطب ويمكن أن نكتب العلاقة بين التوتر المطبق والتيار والسيالة بالشكل:

$$u = i.R + N\frac{d\phi}{dt} = i.R + \frac{d(N.\phi)}{dt} = i.R + \frac{d\psi}{dt} \qquad \textbf{1-3}$$

إذ ψ هو السيالة المغنطيسية المتشابكة مع N لفة (Magnetic flux linkage) .

ϕ السيالة المغنطيسية التي تمر في جسم القطب من لفة واحدة ويمكن أن نرمز لها أيضًا بـــ ϕ_p هذه السيالة عندما تخرج من جسم القطب تخرج على شكل سيالتين الأولى ϕ_L وهي السيالة التي تغلق دارتها حول القطب مارة في مسارات هوائية وتعرف بالسيالة المتشردة (Leakage flux) والثانية ϕ_g وهي السيالة التي تخترق الثغرة الهوائية لتمر في سن الدائر وباقي أجزاء الدارة المغنطيسية الحديدية وتعرف بالسيالة المفيدة أو الرئيسة (Main or useful magnetic flux) ويمكن أن نرمز لها أيضًا بـ ϕ_u ومن ثمّ :

$$\phi = \phi_p = \phi_L + \phi_u = \phi_u(1+\frac{\phi_L}{\phi_u}) = \phi_u.K_L \Rightarrow K_L = 1+\frac{\phi_L}{\phi_u} \qquad \textbf{2-3}$$

يسمى المقدار K_L عامل التشرد، هذا العامل في آلات التيار المستمر على سبيل المثال يتراوح بين (1.12−1.25) أما في الآلات ذات المقاومة المغنطيسية المتغيرة فنحصل على كلٍ من ϕ_p ، ϕ_L ، ϕ_u عن طريق تغذية ملفات الثابت بالتوتر المستمر فوجدت أن هذا العامل فضلًا عن تعلقه بالشكل الهندسي للأقطاب والملفات وبقيمة التيار وزاوية التطابق θ بين سطح قطب الثابت وسن الدائر فإن قيمته كبيرة جدًا بالمقارنة مع آلات التيار المستمر إذ وجدت أن K_L بوصفها قيمة وسطية من أجل زوايا تطابق مختلفة وعند تيار 4A هي تقريبًا K_L=2.375 وقد تصل إلى K_L=2.741 عند تيار 10A ، ولا يمكن في مثل هذه الحالات عدّ السيالة ϕ_p تساوي ϕ_u أي أن نهمل السيالة المتشردة.

ومن ثمّ تعاد كتابة علاقة التوتر كما يأتي:

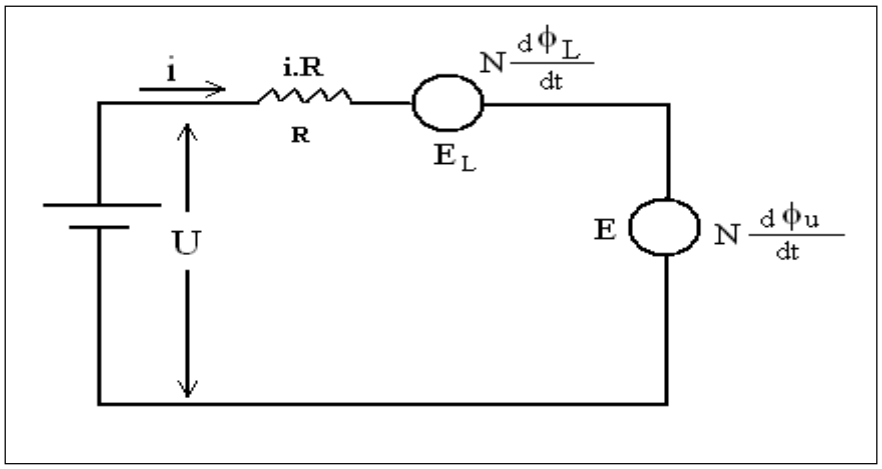
$$u = i.R + N.\frac{d(\phi_u+\phi_L)}{dt} = i.R + N.(\frac{d\phi_L}{dt}+\frac{d\phi_u}{dt}) \qquad \textbf{3-3}$$

ويمكن

أن يعرف المقدار i.R أنه هبوط التوتر على المقاومة الأومية لأسلاك هذا الملف.

المقدار $N\frac{d\phi_L}{dt}=E_L$ القوة المحركة العكسية الناتجة من السيالة المتشردة .

المقدار $N\frac{d\phi_u}{dt}=E$ القوة المحركة الناتجة من السيالة التي تخترق الدارة المغنطيسية ، وبذلك يمكن رسم الدارة المكافئة للملف (Equivalent Circuit) بعد تغذيته كما في الشكل 3-2



الشكل 3-2 الدارة المكافئة للملف

بإعادة كتابة معادلة التوتر 3-1 من جديد:

$$u=i.R+N\frac{d\phi_L}{dt}+N\frac{d\phi_u}{dt}=i.R+\frac{d\psi_L}{dt}+\frac{d\psi_u}{dt} \qquad \textbf{4-3}$$

يمكن كتابة المقدار ψ عندما تكون الخصائص المغنطيسية خطية بالشكل :

$$\psi=N.\phi=N\frac{N.i}{R_m}=i.\frac{N^2}{R_m}=i.L \qquad \textbf{5-3}$$

إذ : $\phi_u=\frac{N.i}{R_m}$.

و L عامل التحريض ويساوي: $L=\frac{N^2}{R_m}$.

و R_m المقاومة المغنطيسية لدارة هذه السيالة.

وبتعويض ψ بقيمتها في المعادلة 3-4 نحصل على معادلة التوتر الآتية :

$$u = i.R + \frac{d(i.L_L)}{dt} + \frac{d(i.L_u)}{dt} \qquad \textbf{6-3}$$

L_L عامل التحريض المقابل للسيالة المتشردة وهو تقريبًا ثابت من أجل تيار محدد.

L_u عامل التحريض المقابل للسيالة الرئيسة أو المفيدة (المارة في الثغرة الهوائية) هذا العامل متغير بسبب تغير المقاومة المغنطيسية للدارة R_m إذ عدّ هذه المقاومة مقاومة جزأين على التسلسل هما: الأول الجزء الحديدي من الدارة المغنطيسية ونرمز له بـ R_{miron} والثاني مرتبط بالثغرة الهوائية ونرمز له بـ R_{mg}.

$$R_m = R_{miron} + R_{mg} \qquad \textbf{7-3}$$

يمكن عدّ المقاومة R_{miron} ثابتة إذا كانت قيمة السيالة واقعة في المنطقة الخطية للخصائص المغنطيسية وأن تغيراتها صغيرة عندما تصبح قيمة السيالة واقعة في المنطقة المشبعة ولكن مختلفة عن قيمتها في المنطقة الخطية.

أما المقاومة R_{mg} فهي متغيرة بحسب توضع سن الدائر بالنسبة إلى قطب الثابت ومن ثمّ تغير هذه المقاومة سيؤدي إلى تغير عامل التحريض.

باشتقاق المعادلة رقم3-6 نحصل على المعادلة الآتية:

$$u = i.R + \frac{d(i.L_L)}{dt} + \frac{d(i.L_u)}{dt} = i.R + L_L\frac{di}{dt} + L_u\frac{di}{dt} + i\frac{dL_u}{dt} \qquad \textbf{8-3}$$

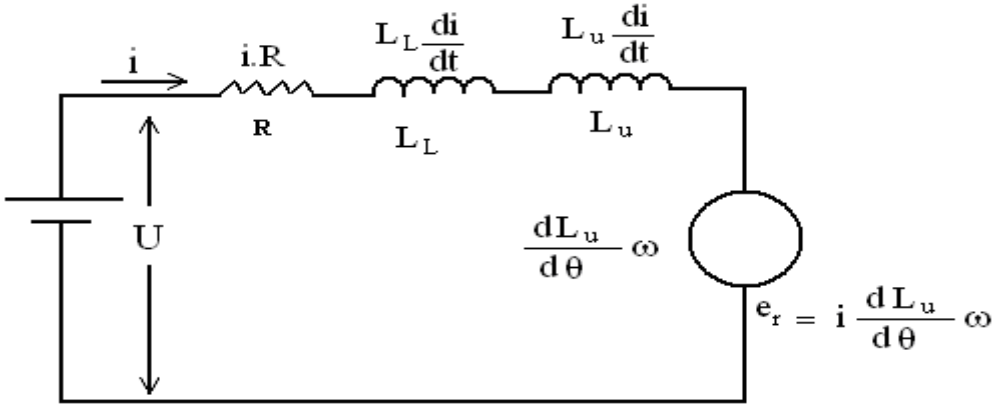
$$u = i.R + L_L\frac{di}{dt} + L_u\frac{di}{dt} + i\frac{dL_u}{dt}\frac{d\theta}{d\theta}$$

$$u = i.R + L_L\frac{di}{dt} + L_u\frac{di}{dt} + i\frac{dL_u}{d\theta}\frac{d\theta}{dt} \qquad \textbf{9-3}$$

$$u = i.R + L_L\frac{di}{dt} + L_u\frac{di}{dt} + i\frac{dL_u}{d\theta}\omega \qquad \textbf{10-3}$$

إذ ω هي السرعة الزاوية.

ويمكن رسم الدارة المكافئة من هذه العلاقة كما في الشكل 3-3



الشكل 3-3 الدارة المكافئة

يدعى الحد $i\frac{dL_u}{d\theta}.\omega$ بالقوة المحركة العكسية الدورانيه أي الناتجة عن دوران الجزء الدائر ونرمز له بـــ e_r وتعدُّ هذه القوة هي القوة المحركة العكسية الرئيسة في هذا النوع من المحركات التي تقف بوجه التوتر u وقيمتها مرتبطة بقيمة المقاومة المغنطيســـية للدارة، ومن ثمَّ بزاوية التطابق بين أســـنان الدائر و أقطاب الثابت للطور المغذى.

3.4 معادلات الاستطاعة والعزم:[25] [19]

Power and torque equations

بدءاً من معادلة التوتر والتي كتبت بإهمال السيالة المتشردة كما يأتي:

$$u = i.R + N\frac{d\phi}{dt} = i.R + \frac{d(N.\phi)}{dt} = i.R + \frac{d}{dt}(\frac{i.N^2}{R_m}) = i.R + \frac{d(iL)}{dt} \qquad \textbf{11-3}$$

بعد إجراء الاشتقاق الجزئي للمقدار di.L / dt أصبحت المعادلة:

$$u = i.R + L\frac{di}{dt} + i.\frac{dL}{dt} = i.R + L\frac{di}{dt} + i.\frac{dl}{dt}\frac{d\theta}{d\theta} \qquad \textbf{12-3}$$

$$u = i.R + L\frac{di}{dt} + i.\frac{dL}{dt}\frac{d\theta}{d\theta} = i.R + L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{d\theta}.\omega \qquad \textbf{13-3}$$

إذا ضُرِب طرفا المعادلة الأخيرة بالتيار i تصبح:

$$u.i = i^2.R + i.L\frac{di}{dt} + i^2\frac{dL}{d\theta}.\omega \qquad \textbf{14-3}$$

إذ:

u.i الاستطاعة المعطاة لدارة الملف أي القدرة المعطاة في وحدة الزمن.

$i^2.R$ الاستطاعة المصروفة في مقاومة أسلاك الملف.

$L.i\frac{di}{dt}$ الاستطاعة المختزنة في الدارة المغنطيسية في وحدة الزمن.

$i^2.\frac{dL}{d\theta}\omega$ الاستطاعة الكهربائية المتحولة إلى استطاعة ميكانيكية، وانطلاقًا من هذه الاستطاعة المتحولة اشـــتقت معادلة العزم المؤثر في الجزء الدائر من القطب الثابت الذي غُذي ملفه، فهذه الاســـتطاعة تترجم على الجانب الميكانيكي وهو محور الآلة تترجم عزمًا مضروبًا بالسرعة الزاوية:

$$P_{E\to m} = i^2\frac{dL}{d\theta}\omega = T.\omega \Rightarrow \qquad \textbf{15-3}$$

$$T = i^2\frac{dL}{d\theta} \qquad \textbf{16-3}$$

إذ $P_{E\to M}$ الاستطاعة المتحولة من كهربائية إلى ميكانيكية .

(العزم الناتج على محور الدوران مرتبط بموضع الجزء الدائر، فإذا كان الجزء الدائر ساكنًا عند وضع التقابل المغنطيسي أو مكبوحًا عند هذا الوضع فإن العزم سيساوي الصفر، لأن المقاومة المغنطيسية ستكون في أدنى قيمة لها، ومهما تغيرت قيمة التيار فلن يؤثر ذلك في عزم المحرك)

ظنًا أن هذا الاشتقاق هو الأقرب للصحة ولا سيما في حالة إيجاد العزم المؤثر في الدائر عندما يكون هذا الدائر ساكنًا أو مكبوحًا، لأنه في هذه الحالة يمكن عدّ التيار ثابتًا وعامل التحريض ثابتًا وأن القدرة المختزنة تنتج من تغيرات التيار بالنسبة إلى الزمن كما هي الحال في الدارات المغنطيسية الساكنة كالمحولات وغيرها وتكون قيم العزم المحسوبة من هذه العلاقة إذا استبدلنا L بقيمتها إذ:

$L = N^2 / R_m$ هي :

$$T = i^2 . N^2 \frac{d\frac{1}{R_m}}{dt} \qquad \textbf{17-3}$$

وإذا استبدلنا قيمة R_m بدلالة كل من مقاومة الثغرة الهوائية التي يتحرك أمامها سن الدائر تحت تأثير هذا العزم ومقاومة باقي الأجزاء الحديدية بالشكل:

$$R_m = R_{mg} + R_{miron} \qquad \textbf{18-3}$$

المقاومة R_{miron} ثابتة تقريبًا عند تيار معين ، والمقاومة R_{mg} هي المتغيرة بسبب تغير سطح هذه المقاومة والذي هو السطح المشترك بين الثابت والدائر أو سطح التطابق .

في المحركات ذات الأعداد الزوجية لـ n، m مثل 6/4 يمكن كتابة هذه المقاومة لثغرة هوائية واحدة:

$$R_{mg} = R_{mg\min} \frac{\theta_{\max}}{\theta} \qquad \textbf{19-3}$$

وإذا رمزنا β_s زاوية قوس قطب الثابت

β_r زاوية قوس سن الدائر

$\theta_{\max}$ زاوية التطابق الأعظمي

ونجد عندما تكون $\beta_r = \beta_s$ فإن $\theta_{\max}$ تساوي كلاً منهما :

$$\beta_r = \beta_s = \quad \theta_{\max} \qquad \textbf{20-3}$$

وعندما يكونان مختلفين يكون لدينا:

$$\theta_{\max} = \frac{\beta_r + \beta_s}{2} \qquad \textbf{21-3}$$

إذ $R_{mg\min}$ قيمة المقاومة عندما يكون هناك تطابق تام أي محور ســـن الدائر X_r منطبق على محور القطب الثابت X_s.

$$T = i^2 N^2 \frac{d}{d\theta}\left(\frac{1}{R_{miron} + R_{gm\min}\frac{\theta_{\max}}{\theta}}\right) \qquad \textbf{22-3}$$

وبفرض أن $\theta_r = \frac{\theta}{\theta_{\max}}$ القيمة النسبية للزاوية θ مقدرة من $\theta_{\max}$

وبعد الاشتقاق تصبح قيمة العزم كما يأتي:

$$T = \frac{i^2 N^2}{\theta_{\max}}\left[\frac{R_{mg\min}}{(\theta_r R_{miron} + R_{mg\min})^2}\right] \qquad \textbf{23-3}$$

وعندما تكون الزاوية $\theta = 0$ أي عند بداية دخول سن الدائر تحت قطب الثابت فإن العزم يساوي :

$$T = \frac{i^2 N^2}{R_{mg\min}\theta_{\max}} \qquad \textbf{24-3}$$

أطلقنا على هذه القيمة T_0 أي العزم عند $\theta = 0$:

$$T_0 = \frac{i^2 N^2}{\theta_{\max} R_{mg\min}} \qquad \textbf{25-3}$$

ونكتب علاقة العزم بدلالة T_0 بالشكل :

$$T = T_0 \frac{1}{(\theta_r \frac{R_{miron}}{R_{mg\min}} + 1)^2} \qquad \textbf{26-3}$$

3.5 استنتاج علاقة العزم في الحالة العامة:[19]

General Torque Equation

بالعودة إلى علاقة التوتر رقم **خطأ! لم يتم العثور على مصـــدر المرجع.** (وفي حالة إهمال تأثير الســـيالة ا لمتشردة أيضًا) نجد:

$$u = i.R + \frac{dil}{dt} = i.R + L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{dt} \qquad \textbf{27-3}$$

بضرب طرفي المعادلة بالتيار i نجد:

$$u.i = i.^2 R + \frac{di^2 l}{dt} = i^2.R + Li\frac{di}{dt} + i^2\frac{dL}{dt} = i^2.R + (L.i\frac{di}{dt} + \frac{1}{2}i^2\frac{dL}{dt}) + \frac{1}{2}i^2 i\frac{dL}{dt} \qquad \textbf{28-3}$$

المقدار u.i هي كما عرفنا القدرة المعطاة للملف في وحدة الزمن.

والمقدار $Li.\frac{di}{dt}$ يمثل القدرة المختزنة بسبب تغيير التيار .

والمقدار $\frac{1}{2}i.\frac{di}{dt}$ تمثيل القدرة المختزنة بسبب تغير عامل التحريض نتيجة تغير الزاوية θ ومن ثمّ

$(Li.\frac{di}{dt} + \frac{1}{2}i.^2\frac{dL}{dt}) = \frac{d}{dt}(\frac{1}{2}i^2 L)$ هذه هي القدرة المختزنة في وحدة الزمن عندما يكون كل من التيار وعامل التحريض متغيرين في الحالة العامة

وأما النصف الآخر للمقدار $(\frac{1}{2}i^2\frac{dL}{dt})$ فهو القدرة المتحولة في وحدة الزمن من كهربائية إلى ميكانيكية .

$$P_{E\to M} = \frac{1}{2}i^2\frac{dL}{dt} = \frac{1}{2}i^2\frac{dL}{dt}.\frac{d\theta}{d\theta} = \frac{1}{2}i^2\frac{dL}{d\theta}\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2}i^2\frac{dL}{d\theta}.\omega \qquad \textbf{29-3}$$

ومن ثمّ:

$$T = \frac{P_{E\to M}}{\omega} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}$$

وإنما هي من الشكل:

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}$$

وهذه العلاقة تعطي قيمة العزم سواءً كان الدائر ثابتًا أم متحركًا.

3.6 حساب العزم الوسطي:[25] [19]

Computing the average torque

يمكن حساب زاوية التغذية الطبيعية والمستمرة (دون تداخل بالتغذية) لكل ملف من ملفات الجزء الثابت ولكل دورة من دورات الجزء الدائر بدلالة المقدارين m و n حيث زاوية العمل النظامية (Step angle) لكل ملف θ_N تعطى بالعلاقة :

$$\theta_N = \frac{2\pi}{m.n} rad or \theta_N = \frac{360}{m.n} \deg \qquad \textbf{30-3}$$

أما زاوية التغذية الطبيعية المتقطعة لكل دورة فهي تساوي $n.\theta_N$.

فمثلًا لمحركات المقاومة المغناطيسية المتغيرة من النوع 4/3 فإن هذه الزاوية هي θ_N :

$$\theta_N = \frac{2\pi}{4\times 3} = \frac{\pi}{6} rad or \theta_N = \frac{360}{4\times 3} = 30^\circ \qquad \textbf{31-3}$$

على حين أن زاوية التطابق الأعظمية فيها هي : $\theta_{\max} = 60^\circ$ أي نصف الخطوة القطبية للجزء الدائر (نصف زاوية التطابق الأعظمية).

ومن الجدير بالذكر أنه وفي أثناء زاوية التطابق التي تبدأ من $\theta = 0$ وتنتهي عند $\theta = \theta_{\max}$ يكون العزم الناتج موجبًا ويؤدي إلى دوران الجزء الدائر وهو حالة عمل الآلة بوصفها محركًا ، أما بعد الزاوية $\theta_{\max}$ فينقلب العزم عندها ليصبح سالبًا وعلينا بذل عزم خارجي لتدوير الجزء الدائر وينقلب المحرك عندها إلى مولد ذي مقاومة مغنطيسية متغيرة.

إن قيمة العزم الوسطي في أثناء العمل الطبيعي يمكن حسابها بالعلاقة:

$$T_{ave} = \frac{1}{\theta_N}\int_0^{\theta_N} T d\theta \qquad \textbf{32-3}$$

باستبدال قيمة العزم نجد عمومًا:

$$T_{ave} = \frac{1}{\theta_N}\int_0^{\theta_N}\frac{1}{2}i^2\frac{dL}{d\theta}d\theta = \frac{1}{\theta_n}\int_0^{\theta_N}\frac{1}{2}i^2 N\frac{d\frac{1}{R_m}}{d\theta}d\theta = \frac{1}{\theta_N}i^2(L_o - L_N) = \frac{1}{\theta_N}i^2 N[\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_N}] \qquad \textbf{33-3}$$

إذ L_0 و R_{m0} هما مقاومة الدارة المغنطيسية وعامل التحريض عند الزاوية $\theta = 0$

و L_N و R_{m0} هما مقاومة الدارة المغنطيسية وعامل التحريض عند الزاوية $\theta = \theta_N$

ويساوي هذا العزم بالنسبة إلى النماذج البحثية:

$$T_{ave} = \frac{1}{\frac{\pi}{6}}\int_0^{\theta_N}\frac{1}{2}i^2.N^2\ \frac{d}{d\theta}[\frac{1}{R_{miron} + R_{mg\min}\frac{2\beta^2}{\theta(2\beta-\theta)}}] = T_0[\frac{1}{\frac{\theta_N}{\beta}\frac{R_{miron}}{R_{mg1}} + \frac{2\beta.\theta_N}{\theta_N(2\beta-\theta_N)}}]$$

$$T_{ave} = T_0[\frac{1}{\frac{\theta_N}{\theta_{\max}}\frac{R_{miron}}{R_{mg1}} + \frac{2\theta_{\max}.\theta_N}{\theta_N(2\theta_{\max}-\theta_N)}}] \qquad \textbf{34-3}$$

من هذه العلاقة يمكن كتابة مايأتي: $T_{ave} = C.T_0$

وبحساب هذا الثابت عندما $\theta_N = \frac{1}{2}\theta_{\max}$ نجد أن : $C = \frac{1}{\frac{1}{2}\frac{R_{miron}}{R_{mg1}} + \frac{3}{4}}$ وعندما نهمل مقاومة الجزء الحديدي نجد أن : $C = 0.75$ ونرمز لهذه القيمة C_0 أي $C_0 = 0.75$ ، ونجد أن قيمة هذا الثابت C تقل عن C_0 كلما كبرت نسبة مقاومة الجزء الحديدي بالنسبة إلى مقاومة الجزء الهوائي أي النسبة $R_{mg\min} / R_{mg1}$

ومن ثم نستنتج أن تغيرات العزم مرتبطة ارتباطًا كبيرًا مع تغير الزاوية بين الثابت والدائر وهذه الزاوية تتعلق بالشكل الهندسي للمحرك ولا سيما أقطاب الثابت وأسنان الدائر لذا سندرس أشكالًا وقياسات مختلفة لكل من الثابت والدائر ونحلل كل حالة باستخدام طريقة العناصر المنتهية والمقارنة فيما بينها عند قيم التحميل الكهربائي نفسها.

لتحقيق ما ذكر أعلاه سندرس في البداية النموذج الأول من هذه المحركات التي يحوي ضمنه على أنواع كثيرة وهو النموذج الذي يكون فيه العددان N,M زوجيين.

سننمذج محركًا رباعي الطور ذو 8/6 أقطاب وندرسه وفق طريقة العناصر المنتهية باستخدام بيئة Ansys ومن ثم سنعيد رسم ونمذجة كل حالة بعد التعديل حتى نستطيع المقارنة بين بعضها بعضًا والوصول إلى نتائج مرجعية لتصميم كل أنواع محركات المقاومة المغناطيسية المتغيرة والوصول بها إلى العزم الأعظم.

نُمذج محرك رباعي الطور ذو 8/6 أقطاب وله الأبعاد المبينة في الجدول 3-1:

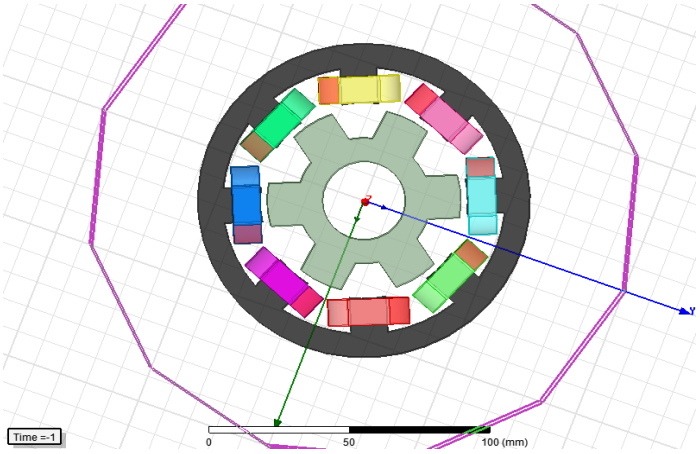
الجدول 3-1 مواصفات محرك رباعي الطور ذو 8/6 أقطاب

الجزء الدائر		الجزء الثابت	
القطر الداخلي	30mm	القطر الداخلي	75mm
القطر الخارجي	70mm	القطر الخارجي	120mm
سماكة النواة	10mm	سماكة النواة	10mm
عدد الأقطاب	6	عدد الأقطاب	8

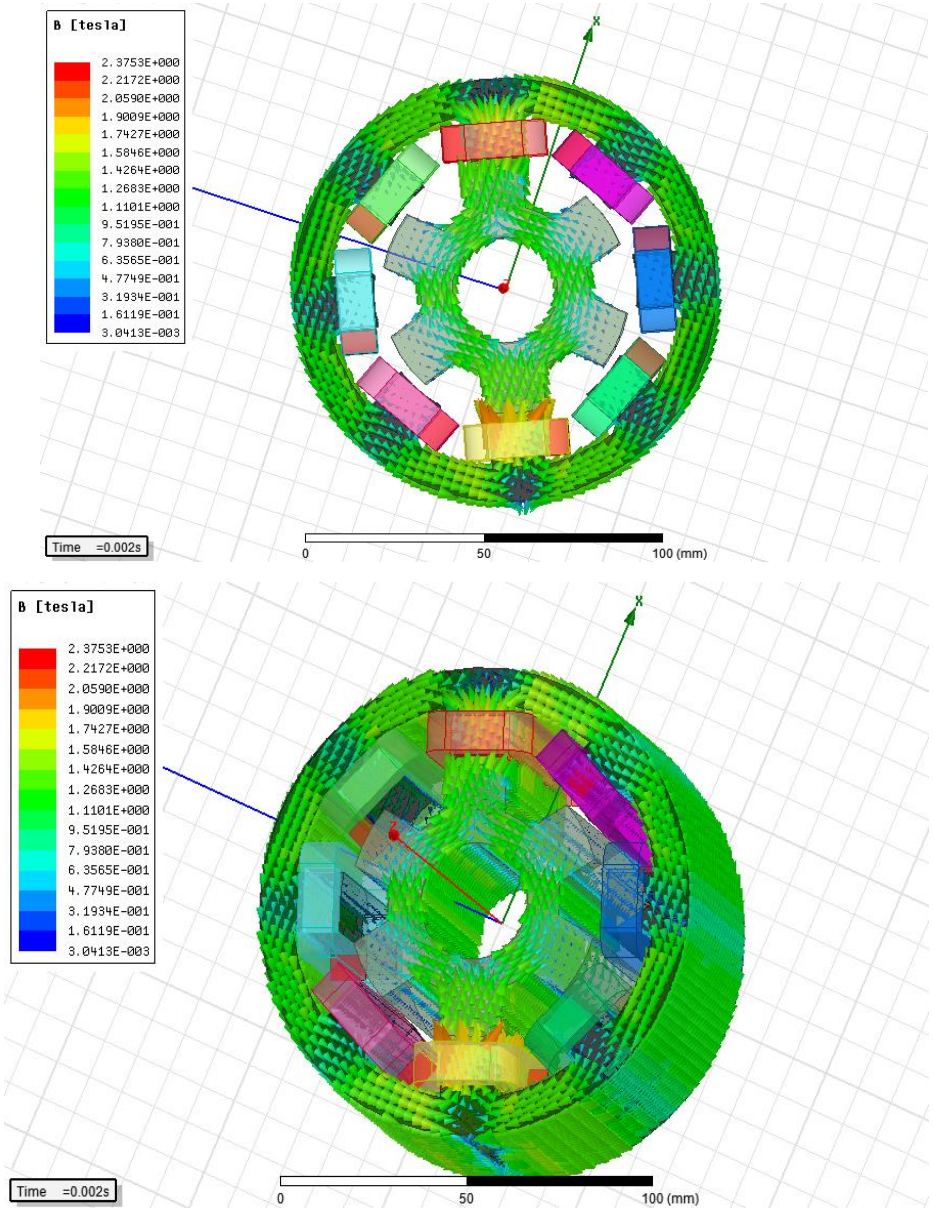
نسبة البناء	0.45	نسبة البناء	0.45

سنرمز لهذا المحرك بالمحرك الرئيس وبعدها سنعدّل عليه مع تغيير شكل الثابت وأبعاده والدائر وإعادة النمذجة من جديد لكل حالة والمقارنة بالنتائج.

يبين الشكل 3-4 المحرك رباعي الطور ذا 8/6 أقطاب ثلاثي الأبعاد حيث تُدرس السيالة المغناطيسية المتولدة فيه عند تغذية الطور A و يُحسب التدفق المغناطيسي الناتج عند تغير قيم التيار من (1 إلى 15) أمبير و عند كل وضع من أوضاع الدائر إذ يُغير موضع الدائر من التطابق التام إلى عدم التطابق و بمعدل 5 درجات في كل خطوة مع العلم أن عدد اللفات لكل طور هي 500 Ts إذ يبين الشكل 3-5 كثافة السيالة المغناطيسية في حالة التطابق الكامل.



الشكل 3-4 مقطع لمحرك مقاومة مغناطيسية متغيرة 8/6

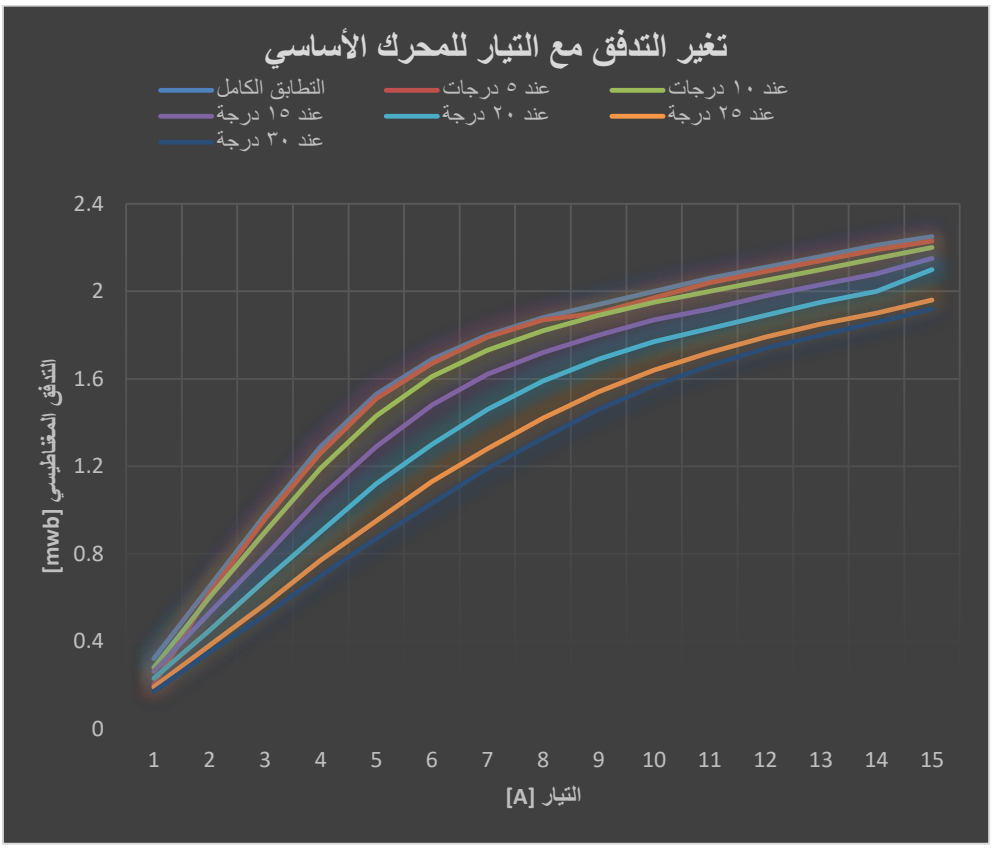


الشكل 3-5 كثافة السيالة المغناطيسية في حالة التطابق الكامل

يبين الجدول 3-2 قيم التدفق المغناطيسي للمحرك الأساسي عند تغير قيم التيار من 1 إلى 15 A و عند تحرك الجزء الدائر بين منطقتي التطابق التام و عدم التطابق.

الجدول 3-2 قيم التدفق المغناطيسي للمحرك عند تغير التيار من 1 الى 15 أمبير

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
التيار (A)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	زاوية الإزاحة بالدرجات
التدفق المغناطيسي (mwb)	0.32	0.65	0.98	1.29	1.53	1.69	1.8	1.88	1.94	2	2.06	2.11	2.16	2.21	2.25	0
	0.2	0.62	0.96	1.26	1.51	1.67	1.79	1.87	1.9	1.97	2.04	2.09	2.14	2.19	2.23	5
	0.28	0.6	0.9	1.19	1.43	1.61	1.73	1.82	1.89	1.95	2	2.05	2.1	2.15	2.2	10
	0.26	0.53	0.79	1.06	1.29	1.48	1.62	1.72	1.8	1.87	1.92	1.98	2.03	2.08	2.15	15
	0.23	0.45	0.68	0.9	1.12	1.3	1.46	1.59	1.69	1.77	1.83	1.89	1.95	2	2.1	20
	0.19	0.38	0.57	0.77	0.95	1.13	1.28	1.42	1.54	1.64	1.72	1.79	1.85	1.9	1.96	25
	0.17	0.35	0.52	0.7	0.87	1.03	1.19	1.33	1.46	1.57	1.66	1.74	1.8	1.86	1.92	30



الشكل 3-6 تغير التدفق مع التيار للمحرك الأساسي

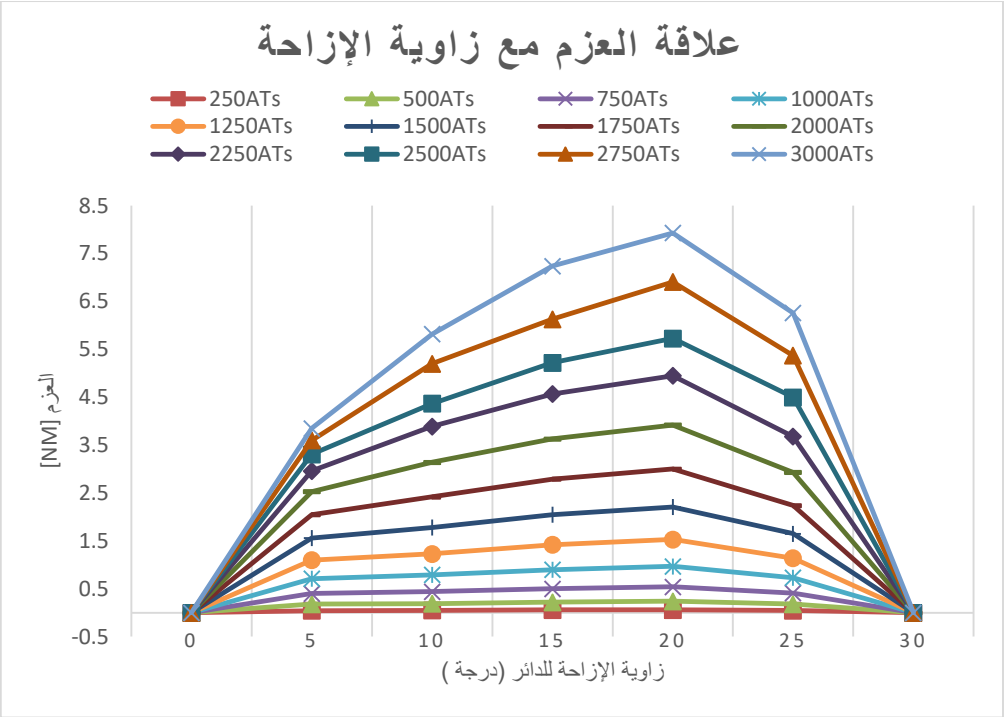
كما يبين الشكل 3-6 منحنيات التدفق المغناطيسي عند قيم التيارات السابقة لمواضع الدائر المختلفة في المحرك إذ يلحظ من المنحنيات والجدول أن قيم تدفق السيالة المغناطيسية تزداد مع زيادة قيم التيار وتزداد كلما اقترب المحرك من موضع التطابق الكامل.

يبين الجدول 3-3 قيم العزم المقدم من الطور A على محور الدوران عند كل زاوية إزاحة للدائر وذلك عند كل حالة من حالات التحميل الكهربائي الذي غُيّر ضمن المجال من 250 ATs وحتى 3000ATs بمعدل 250 ATsلكل خطوة وعند كل زاوية إزاحة مع مراعاة اختيار استطاعة المحرك المناسبة عند زيادة التحميل الكهربائي لقيم كبيرة.

الجدول 3-3 قيم العزم المقدم من الطور A عند كل زاوية ازاحة للدائر

I	H	G	F	E	D	C	B	A
التحميل الكهربائي [Ats]	30	25	20	15	10	5	0	زاوية إزاحة الدائر [درجة]
250	0	0.045	0.06	0.06	0.048	0.043	0	العزم [Nm]
500	0	0.18	0.24	0.22	0.19	0.18	0	
750	0	0.41	0.54	0.5	0.44	0.4	0	
1000	0	0.73	0.97	0.9	0.79	0.71	0	
1250	0	1.14	1.53	1.42	1.23	1.1	0	
1500	0	1.65	2.21	2.05	1.78	1.56	0	
1750	0	2.24	3	2.79	2.42	2.05	0	
2000	0	2.93	3.92	3.63	3.14	2.53	0	
2250	0	3.68	4.95	4.57	3.89	2.96	0	
2500	0	4.5	5.73	5.22	4.37	3.31	0	
2750	0	5.37	6.91	6.13	5.2	3.6	0	
3000	0	6.26	7.93	7.24	5.82	3.85	0	

نلحظ من الشكل 3-7 الناتج من التمثيل البياني لقيم العزم المذكورة في الجدول 3-3 أن قيم العزم تزداد مع ازدياد التحميل الكهربائي أي مع زيادة القوة المحركة المغناطيسية و ذلك عندما يكون الطور A في حالة عمل أي عندما تتغير فيه زاوية الإزاحة للدائر من 0 و حتى 30 درجة و نلحظ أيضا أن أعلى قيمة للعزم ضمن مجال عمل الطور A تكون عند الزاوية 20 درجة بسبب كثافة السيالة المغناطيسية عند هذا الموضع .

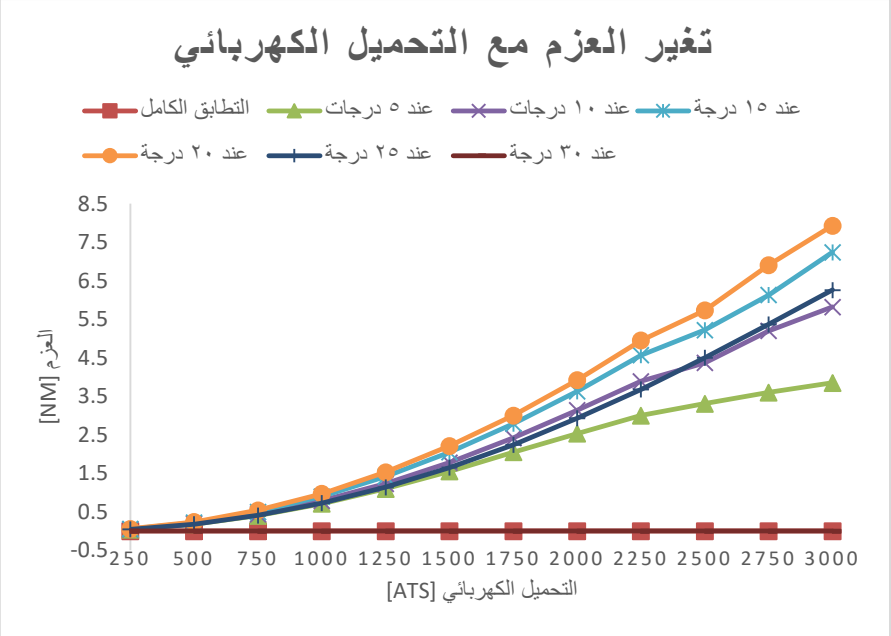


الشكل 3-7 التمثيل البياني لقيم العزم في الجدول 3-3

الجدول 3-4 تغيرات العزم مع التحميل الكهربائي للمحرك

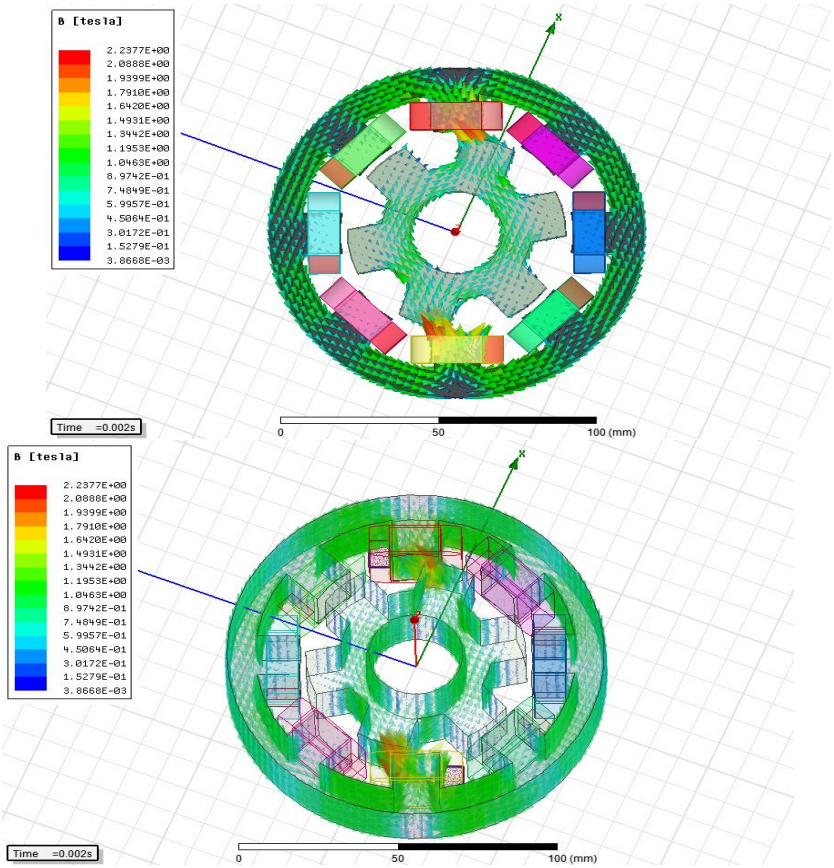
N	M	L	K	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A
زاوية الازاحة (درجة)	3000	2750	2500	2250	2000	1750	1500	1250	1000	750	500	250	التحميل الكهربائي [Ats]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	3.85	3.6	3.31	3	2.53	2.05	1.55	1.1	0.71	0.4	0.18	0.043	
10	5.82	5.2	4.37	3.89	3.14	2.42	1.78	1.23	0.79	0.44	0.19	0.048	
15	7.24	6.13	5.22	4.57	3.63	2.79	2.05	1.42	0.9	0.5	0.22	0.055	العزم [Nm]
20	7.93	6.91	5.73	4.95	3.92	3	2.21	1.53	0.97	0.54	0.24	0.06	
25	6.26	5.37	4.5	3.68	2.93	2.24	1.65	1.14	0.73	0.41	0.18	0.045	
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

يبين الشـــكل 3-8 الخطوط البيانية الناتجة من تغيرات العزم مع التحميل الكهربائي المبينة في الجدول 3-4 إذ نلحظ أن العزم الأعلى هو المقابل للزاوية 20 درجة



الشكل 3-8 تغيرات العزم مع التحميل الكهربائي

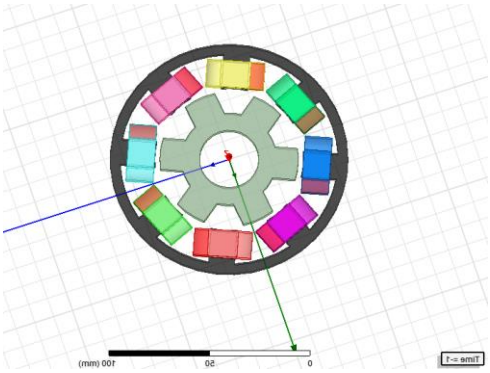
يبين الشكل 3-9خطوط السيالة المغناطيسية عند زاوية الازاحة للدائر بمقدار 20 درجة



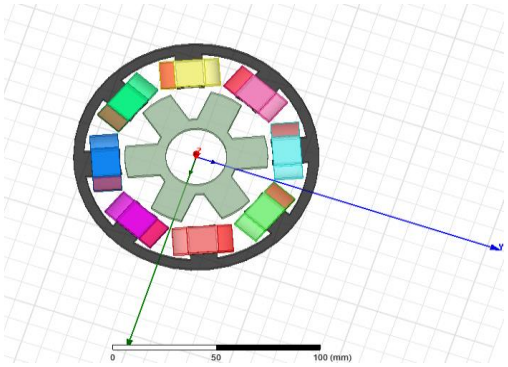
الشكل 3-9خطوط السيالة المغناطيسية عند زاوية ازاحة 20 درجة للدائر

نلحظ في الشكل 3-10 ستة نماذج مختلفة لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة مختلفة عن بعضها بعضًا بشكل كل من الثابت و الدائر دون إجراء أي تعديل في عرض أقطاب الثابت و أسنان الدائر و انما غُيرّت كمية المعدن في الثابت و الدائر كمايأتي :

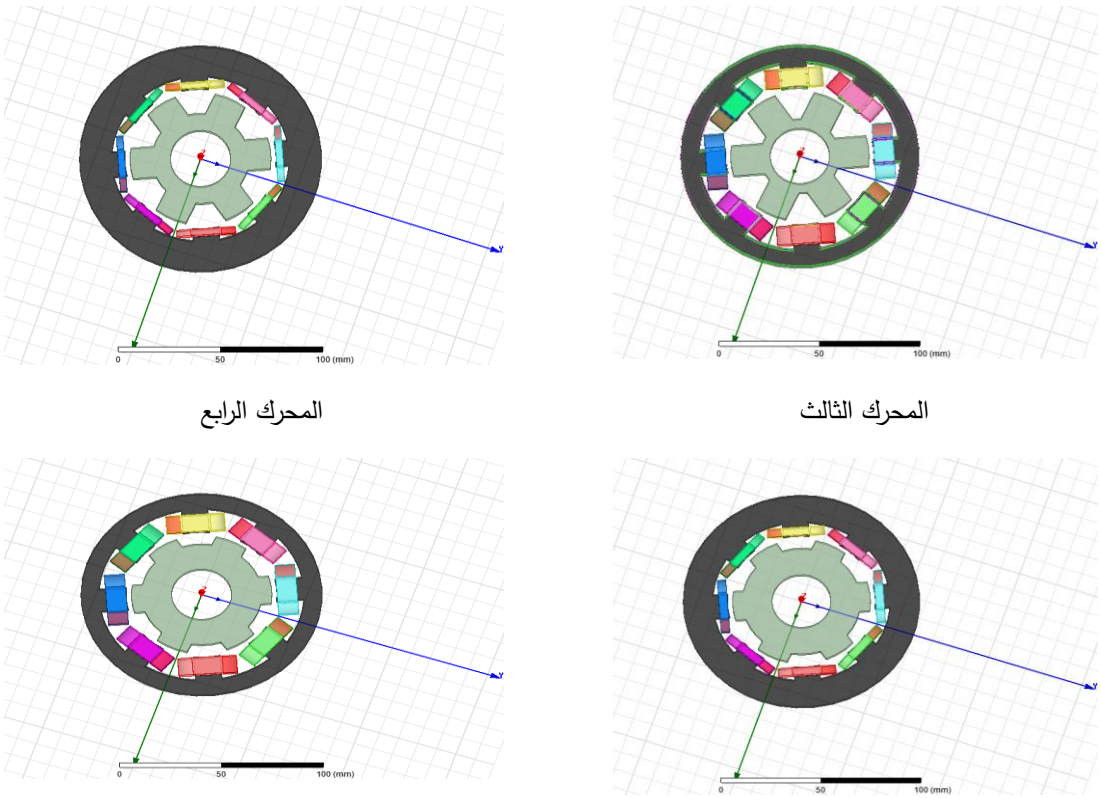
- النموذج الأول سيرمز له بالمحرك الأول أُنقص معدن الثابت فقط بنسبة 45% دون أي تغيير في نواة الدائر الذي بقي مطابقا للمحرك الأساسي
- النموذج الثاني سيرمز له بالمحرك الثاني الذي أُنقص معدن كل من الثابت و الدائر بنسبة 45%
- النموذج الثالث و سيرمز له بالمحرك الثالث الذي أُنقص معدن نواة الدائر بنسبة 45% دون أي تغيير في نواة الثابت الذي بقي مطابقًا للمحرك الأساسي.
- النموذج الرابع سيرمز له بالمحرك الرابع الذي زيد معدن الثابت بنسبة 60 % و المحافظة على نواة الدائر مطابقة للمحرك الأساسي
- النموذج الخامس و يرمز له بالمحرك الخامس الذي يحوي على زيادة معدن نواة كل من الثابت و الدائر بنسبة 60 %
- النموذج السادس و يرمز له بالمحرك السادس الذي يحوي على زيادة معدن نواة الدائر فقط بنسبة 60 % مع بقاء الثابت بشكل مطابق للنموذج الأساسي .



المحرك الأول



المحرك الثاني

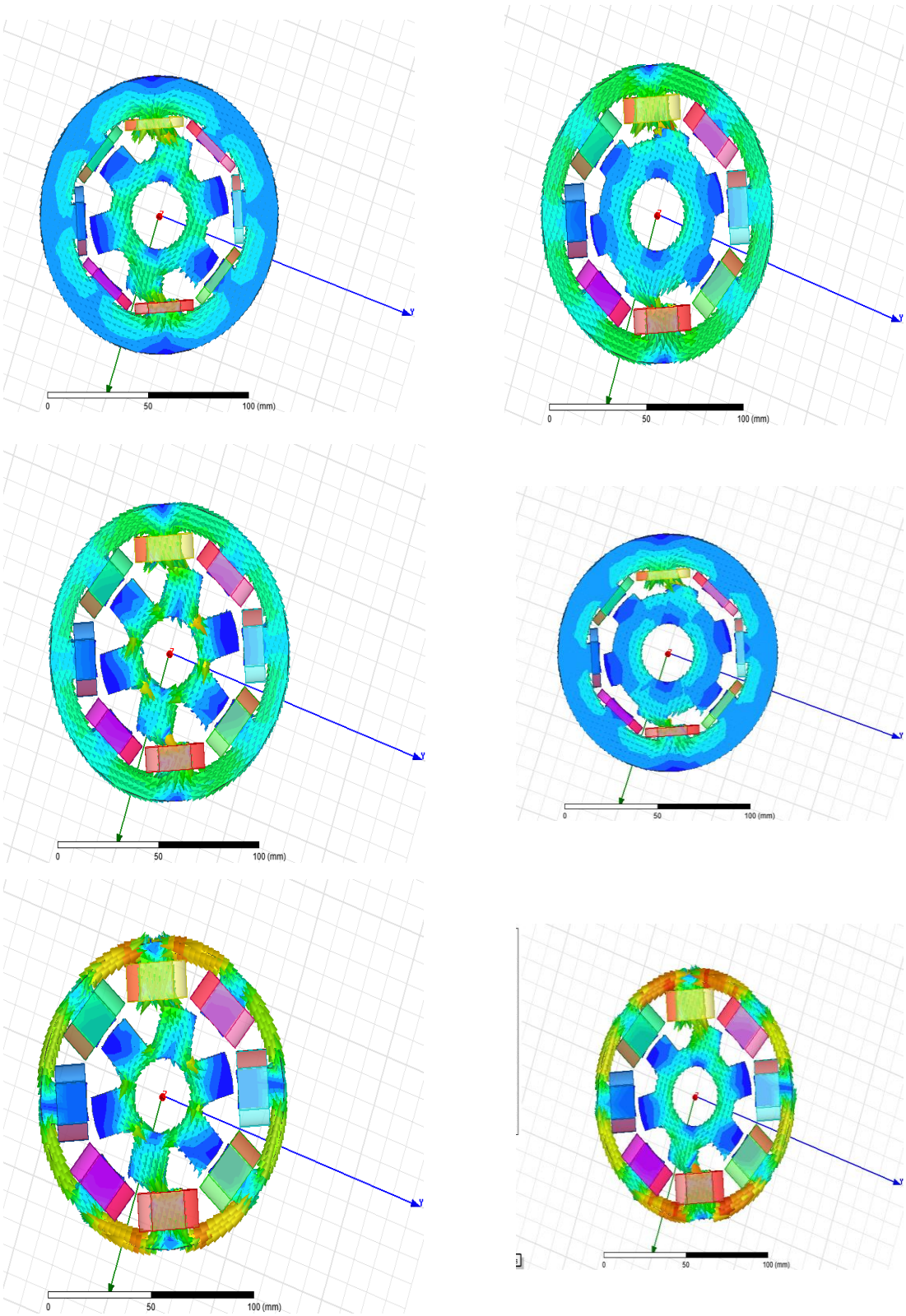


المحرك الثالث المحرك الرابع

المحرك الخامس المحرك السادس

الشكل 3-10 نماذج مختلفة من محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة

قمنا بنمذجة ومحاكاة هذه المحركات الستة باستخدام طريقة العناصر المنتهية وضمن برنامج Ansys و لدراســة العزم المقدم من هذه المحركات طبقنا التحميل الكهربائي نفســه عليها و هو 2500 ATs و أوجد العزم المقدم منها عند كل وضـــع للدائر بتحريكه بمقدار 2 درجة من منطقة التقابل التام إلى منطقة عدم التقابل و ذلك ضمن عمل الطور A و أوجدت كثافة السيالة المغناطيسية عند كل وضع من الأوضاع السابقة إذ يبين الشكل 3-11 كثافة السيالة المغناطيسية لهذه النماذج عند زاوية الإزاحة 20 درجة



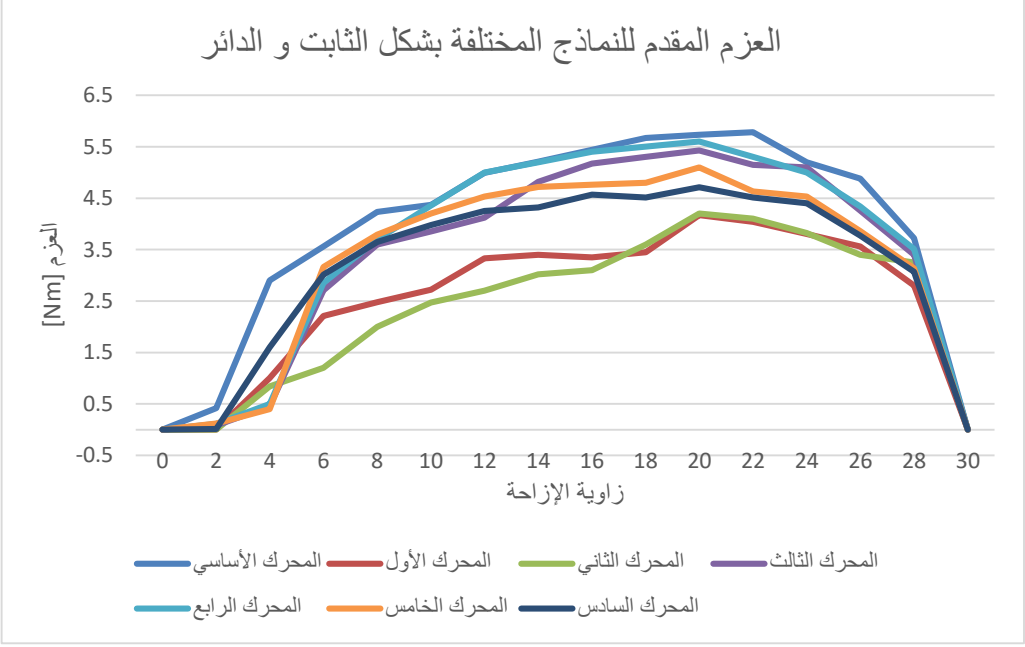
الشكل 3-11 كثافة السيالة المغناطيسية للنماذج المختلفة عند زاوية ازاحة 20 درجة

يبين الجدول 3-5 نتائج النمذجة و المحاكاة للمحركات الستة السابقة مع المحرك الأساسي إذ يوضح قيمة العزم المقدم عند كل زاوية إزاحة

الجدول 3-5 تغيرات العزم مع زاوية الأزاحة للنماذج الستة و المحرك الأساسي

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
	زاوية الإزاحة بالدرجات	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
العزم[Nm]	المحرك الأساسي	0	0.42	2.9	3.56	4.23	4.37	4.99	5.21	5.44	5.67	5.73	5.78	5.2	4.88	3.72	0
	المحرك الأول	0	0.003	1	2.21	2.48	2.72	3.33	3.4	3.35	3.45	4.17	4.04	3.8	3.56	2.8	0
	المحرك الثاني	0	0	0.84	1.2	2	2.47	2.7	3.02	3.1	3.6	4.2	4.1	3.82	3.4	3.25	0
	المحرك الثالث	0	0.08	0.456	2.71	3.6	3.85	4.12	4.82	5.17	5.3	5.43	5.15	5.1	4.26	3.4	0
	المحرك الرابع	0	0.11	0.5	2.85	3.7	4.36	5	5.2	5.4	5.5	5.6	5.3	5	4.34	3.51	0
	المحرك الخامس	0	0.12	0.4	3.16	3.79	4.2	4.53	4.72	4.76	4.8	5.1	4.63	4.53	3.86	3.14	0
	المحرك السادس	0	0.015	1.6	3.01	3.65	3.98	4.25	4.32	4.57	4.51	4.71	4.51	4.4	3.77	3.07	0

الشكل 3-12 يبين المنحنيات البيانية للعزم المقدم من النماذج السابقة فضلًا عن المحرك الأساسي مقابل زاوية الازاحة



الشكل 3-12 العزم المقدم للنماذج الستة مع المحرك الأساسي

إذ نلحظ من الشكل 3-12 أن كل محرك يصل إلى عزمه الأعلى عند الزاوية 20 درجة و يبقى المحرك الأساسي هو المحرك الأعلى عزما بين كل المحركات السابقة مع وجود زيادة في معدن نواة الثابت و الدائر في بعض المحركات و بمراجعة عامة لنتائج النمذجة السابقة جميعها نستنتج أن :

العزم في محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة تابع لكل من كثافة الفيض وزاوية الدائر

و نلحظ أن كثافة الفيض في النماذج السابقة من المحرك الأول إلى المحرك السادس كانت منخفضة بسبب الشكل الهندسي لكل من الثابت والدائر ولابد لنا أن نشير إلى أن العزم يتناسب طردا مع مربع قيمة تيار الطور وذلك بحسب العلاقة 3-35:

$$T_e = \sum_{k=a,b,c,d} \frac{1}{2} \frac{\partial L_k}{\partial_\theta} i_k^2 \qquad \textbf{35-3}$$

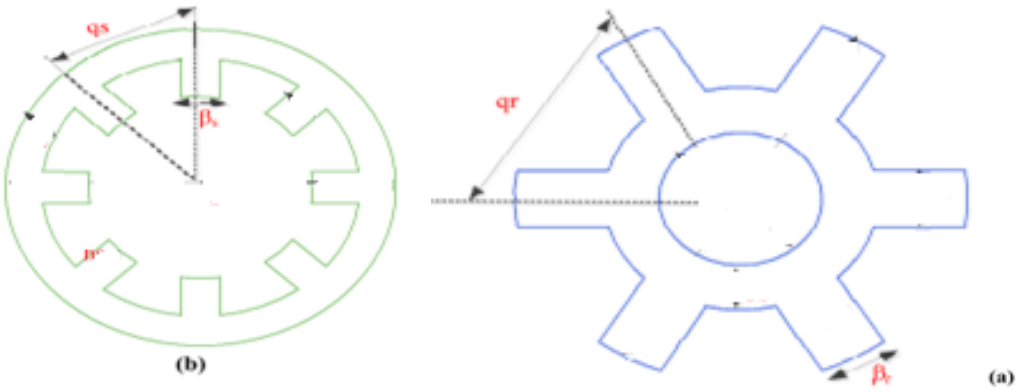
ومن ثمّ لا علاقة لجهة التيار بجهة الدوران أي إذا أردنا أن نحرك الدائر عكس عقارب الساعة فإننا نقوم بتغذية الأطوار a ثم b ثم c ثم d أما إذا أردنا أن ندور مع عقارب الساعة فإننا نغذي الأطوار d ثم c ثم b ثم a مع العلم بأن العزم الكلي الناتج من المحرك هو مجموع عزوم الأطوار الأربعة.

3.7 تأثير تغير أبعاد أقطاب المحرك (الثابت والدائر) على العزم:

درسنا في الفقرات السابقة تأثير تغير شكل النواة لكل من الثابت والدائر في عزم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة وسندرس فيمايأتي تأثير تغير أبعاد أقطاب الثابت وأسنان الدائر في عزم المحرك ذي المقاومة المغناطيسية المتغيرة.

3.7.1 تأثير تغير أبعاد أسنان الدائر على العزم:

سنعتمد في تغيير أبعاد أسنان الدائر على نسبة مميزة لبناء الجزء الدائر من الناحية الهندسية و هي نسبة زاوية سن الدائر إلى زاوية ميلان هذا السن أي $\frac{\beta_r}{q_r}$ سنرمز لهذه النسبة بالرمز α إذ يبين الشكل 3-13محددات نسب بناء الجزء الدائر و الجزء الثابت.



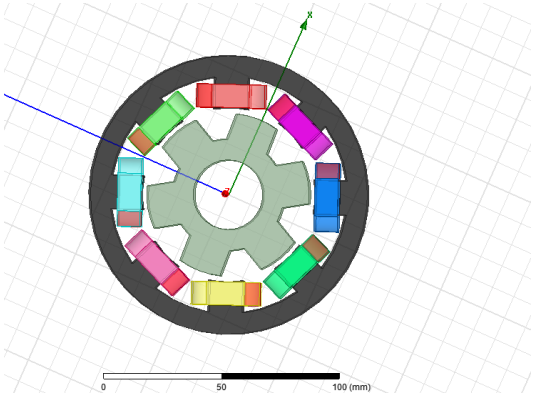
زاوية سن الدائر βr و زاوية ميلان سن الدائرqr زاوية قطب الثابت βs و زاوية ميلان قطب الثابت qs

الشكل 3-13 محددات نسب بناء الجزء الدائر و الجزء الثابت

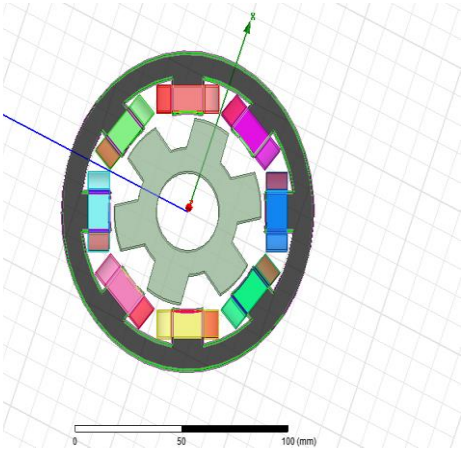
لدراسة التأثير المباشر لتغير أبعاد أسنان الدائر في العزم في محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة سنعمل على نمذجة ومحاكاة مجموعة من المحركات المختلفة عن بعضها بعضًا بالنسبة α وإيجاد العزم المقدم منها في كل حالة باستخدام طريقة العناصر المنتهية ثلاثية البعد ضمن بيئة Ansys ومقارنة نتيجة كل حالة مع المحرك الأساسي الذي تم دراسته في البداية مع القيام بتثبيت كافة أبعاد الأخرى والتي تشمل أقطاب الثابت والنواة والثغرة الهوائية للمحرك وتم المقارنة بين النماذج عند نفس قيم التحميل الكهربائي

كما علمنا في بداية الفصل بأن النسبة α للمحرك الأساسي الذي درسناه هي 0.45 وسنعدُّ أن هذه القيمة هي القيمة الوسطى وسنعمل على نمذجة محركات بقيم أعلى منها ومحركات بقيم أقل منها ونوجد العزم الناتج في كل حالة وذلك عند قيم تحميل كهربائي هي 2500ATs.

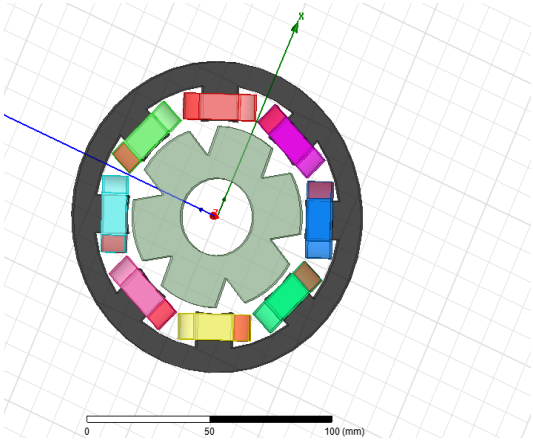
يبين الشكل 3-14 مقطعًا عرضيًا لأربعة تصاميم لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة عند أربعة قيم مختلفة للنسبة α أكبر من النسبة α الخاصة بالمحرك الأساسي أي أكبر من 0.45 إذ نلاحظ زيادة في عرض أسنان الدائر كلما زادت النسبة α



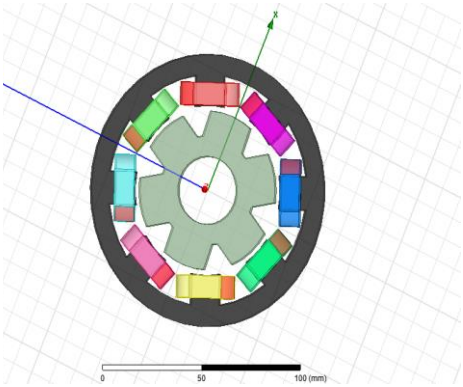
α =0.51



α =0.47



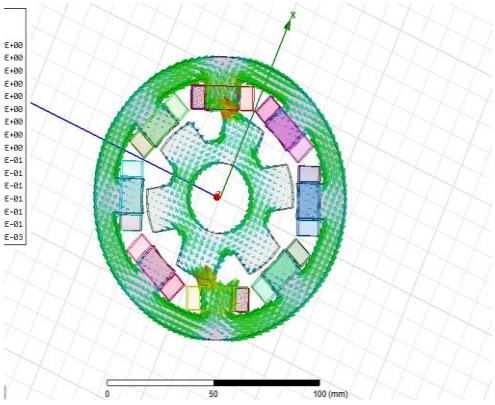
α=0.66

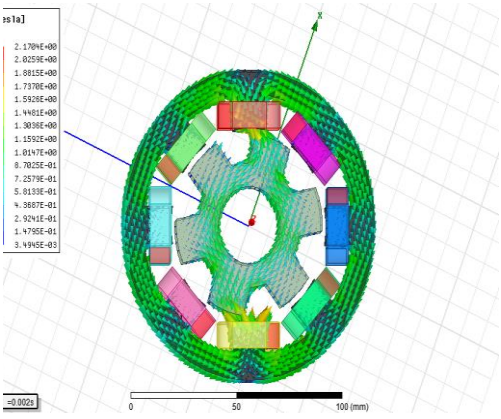


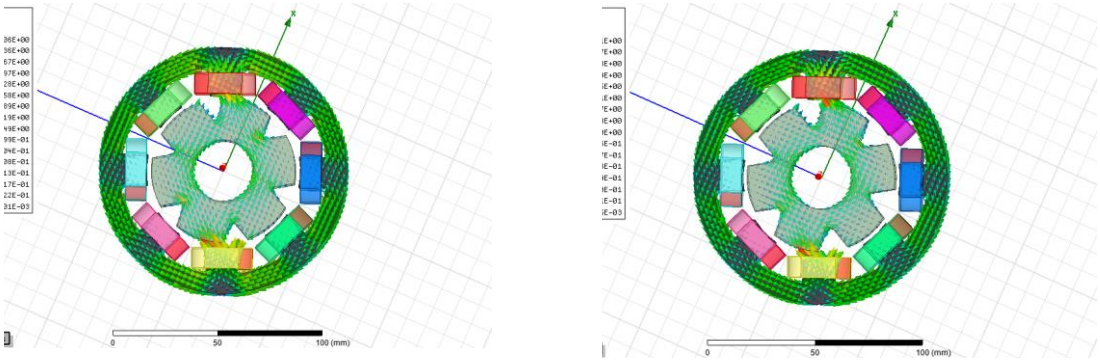
α = 0.6

الشكل 3-14 مقطع عرضي لأربعة تصاميم فيها نسبة البناء للجزء الدائر أكبر من المحرك الأساسي

يبين الشكل 3-15 كثافة السيالة المغناطيسية للنماذج الأربعة السابقة التي تزيد فيها النسبة α عن المحرك الأساسي.







الشكل 3-15 كثافة السيالة المغناطيسية للنماذج التي تزيد فيها نسبة بناء الدائر على نسبة المحرك الأساسي

يرمز للمحرك الناتج من النسبة α=0.47 بالمحرك السابع وبالمحرك الثامن عند النسبة α=0.5 وبالمحرك التاسع عند النسبة α=0.6 وبالمحرك العاشر عند النسبة α=0.66

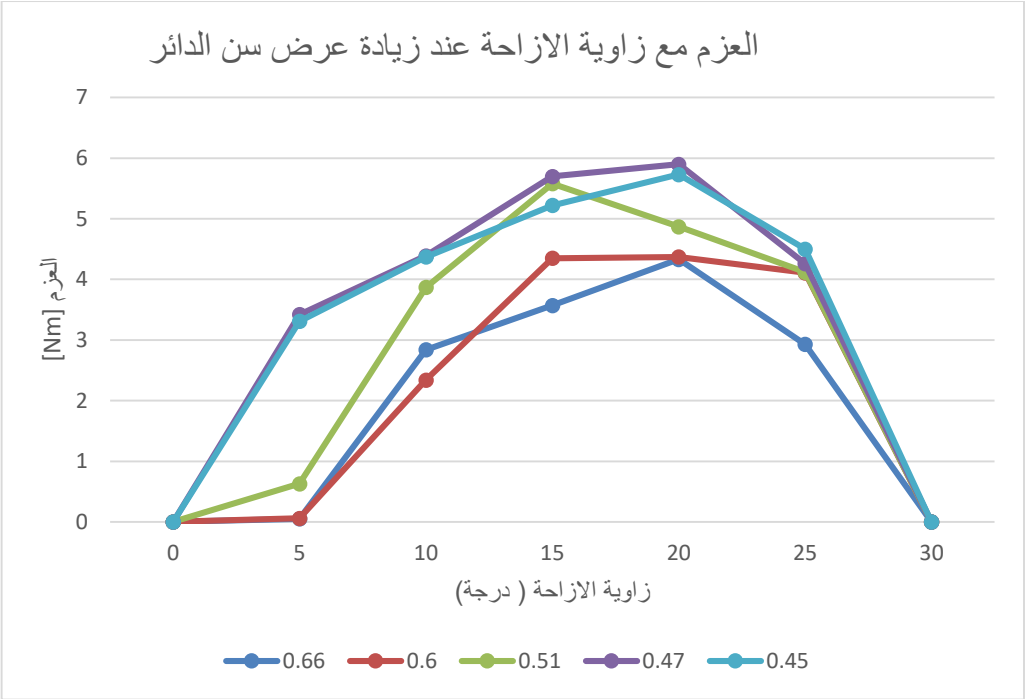
يبين الجدول 3-6 نتائج دراسة تغيير العزم لكل نموذج من نماذج المحركات من السابع حتى العاشر بالنسبة إلى تغيير زاوية الازاحة ضمن مجال عمل الطور A من التطابق الكامل عند الزاوية 0 درجة إلى عدم التطابق عند الزاوية 30 درجة وذلك باستخدام نظرية العناصر المنتهية وبرنامج Ansys .

الجدول 3-6 تغير العزم مع زاوية الأزاحة للمحركات من السابع حتى العاشر

زاوية الازاحة							
0	5	10	15	20	25	30	
0	0.05	2.84	3.57	4.33	2.93	0	0.66
0	0.06	2.34	4.35	4.37	4.11	0	0.6
0	0.63	3.87	5.58	4.87	4.12	0	0.51
0	3.42	4.39	5.7	5.9	4.26	0	0.47
0	3.31	4.37	5.22	5.73	4.5	0	0.45

العزم [Nm]

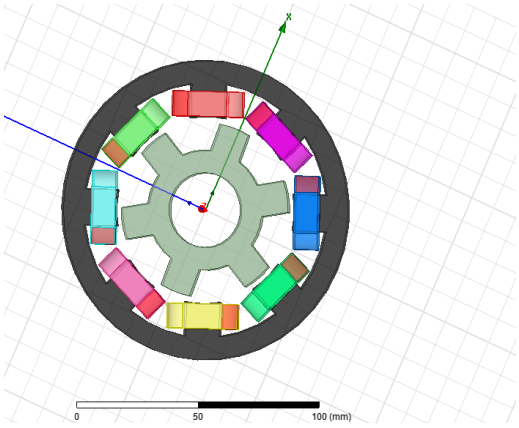
يبين الشكل الشكل 3-16 المنحنيات البيانية لتغيرات العزم مع تغيير زاوية الإزاحة للمحركات من السابع حتى العاشر فضلًا عن المحرك الأساسي ونلحظ أنه مع زيادة قيمة α تنقص قيمة العزم و نلاظ بقاء المحرك الأساسي هو الأعلى عزمًا أي إن النسبة α=0.45 هي الأنسب حتى الآن بين كل المحركات المدروسة من السابع حتى العاشر.



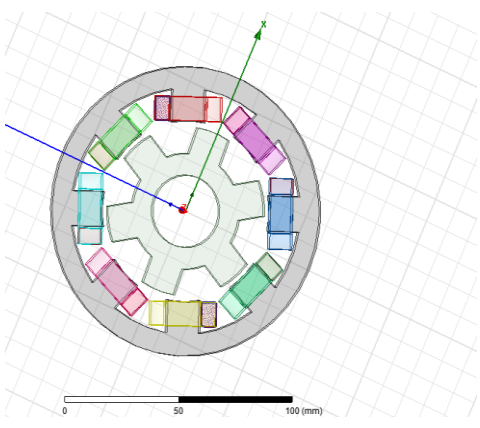
الشكل 3-16 تغيرات العزم مع زاوية الإزاحة للمحركات من السابع حتى العاشر مع المحرك الأساسي

يبين الشكل 3-17 مقطعًا عرضيًا لأربعة تصاميم لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة عند أربعة قيم مختلفة جديدة للنسبة α و لكن في هذه المرة القيم أصغر من α=0.45 إذ نلاحظ من المقاطع أن عرض أسنان الدائر لهذه النماذج الجديدة أقل من عرض سن الدائر للمحرك الأساسي.

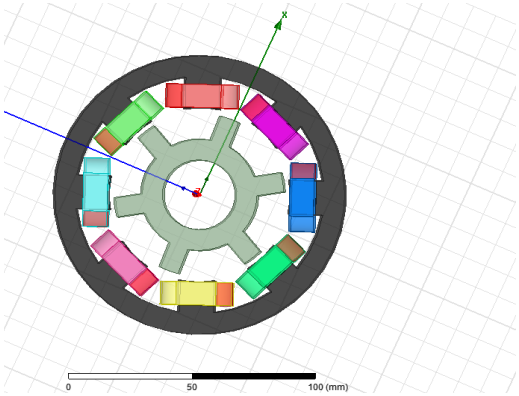
يرمز للمحرك الناتج من النسبة α=0.41 بالمحرك الحادي عشر وبالمحرك الثاني عشر عند النسبة α=0.38 وبالمحرك الثالث عشر عند النسبة α=0.32 وبالمحرك الرابع عشر عند النسبة α= 0.23



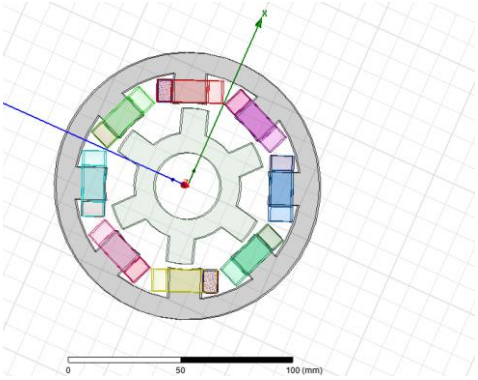
α=0.38



α=0.41



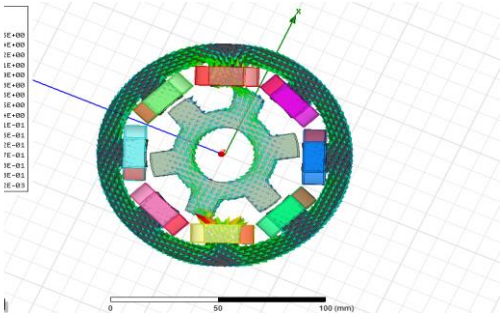
α=0.23



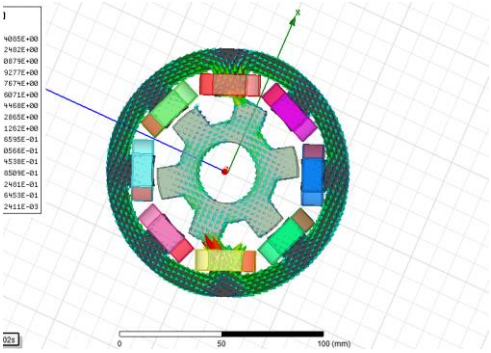
α=0.32

الشكل 3-17 مقطع عرضي لأربعة تصاميم فيها نسبة بناء الجزء الدائر أصغر من نسبة بناء المحرك الأساسي

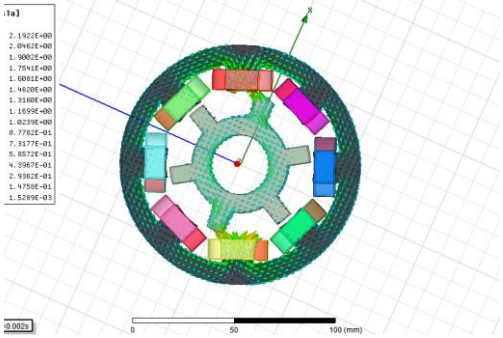
يبين الشكل 3-18 كثافة السيالة المغناطيسية للمحركات من الحادي عشر حتى الرابع عشر باستخدام النمذجة بطريقة العناصر المنتهية ثلاثية الأبعاد إذ نلحظ أن قيم العزم قد ازدادت عند كل من المحرك الحادي عشر (α=0.41) والمحرك الثاني عشر (α=0.38) ثم عادت إلى الانخفاض مع نقصان α عن المحرك الأساسي



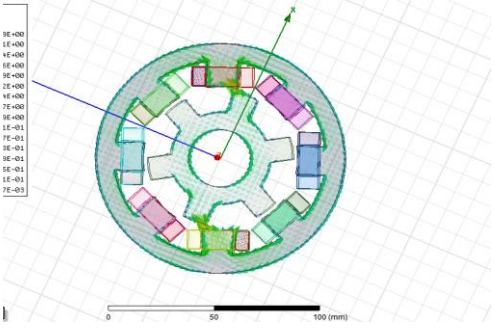
α=0.38



α=0.41



α=0.23



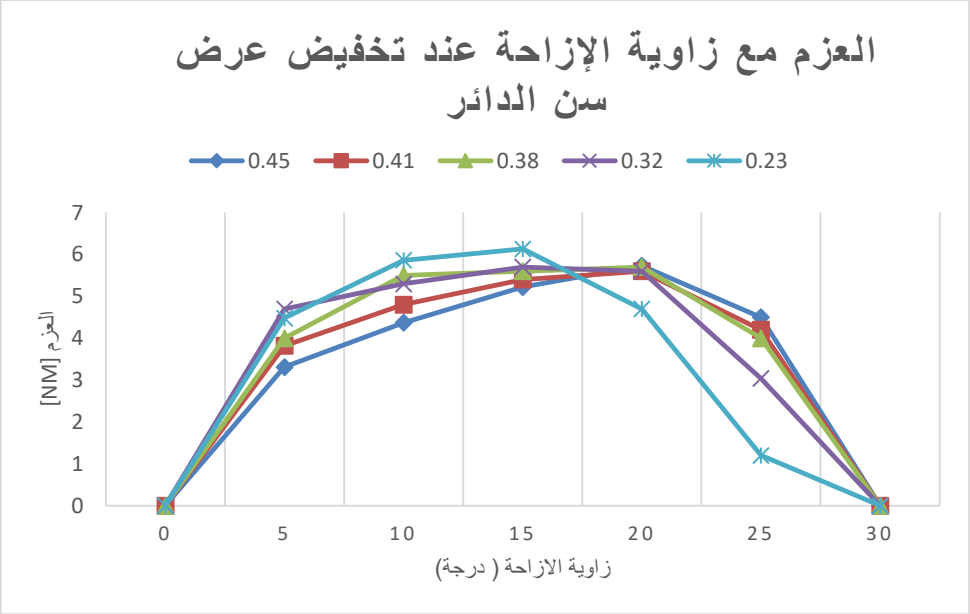
α=0.32

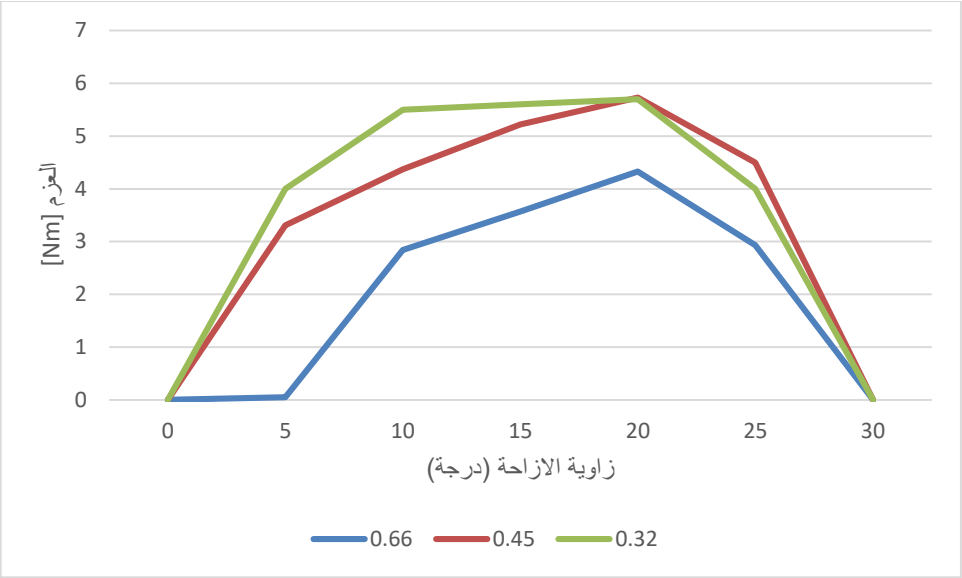
الشكل 3-18 كثافة السيالة المغناطيسية للمحركات من الحادي عشر حتى الرابع عشر

وبإجراء دراسة تفصيلية أكثر باستخدام Ansys لتغيرات العزم بالنسبة إلى زاوية الإزاحة لكل محرك من المحركات من الحادي عشر وحتى الرابع عشر نصل إلى القيم المبينة في الجدول 3-7 وعند رسم منحنيات تغيير العزم بالنسبة إلى زاوية الإزاحة للمحركات من الحادي عشر حتى الرابع عشر الشكل 3-19

الجدول 3-7 تغيرات قيم العزم مع زاوية الازاحة للمحركات من الحادي عشر و حتى الرابع عشر

30	25	20	15	10	5	0	زاوية الازاحة	
0	4.5	5.73	5.22	4.37	3.31	0	0.45	العزم [Nm]
0	4.2	5.6	5.4	4.8	3.82	0	0.41	
0	4	5.7	5.6	5.5	4	0	0.38	
0	3.04	5.6	5.7	5.3	4.7	0	0.32	
0	1.2	4.7	6.13	5.86	4.48	0	0.23	





الشكل 3-19مقارنة تغيرات العزم مع زاوية الازاحة للمحركات من الحادي عشر حتى الرابع عشر

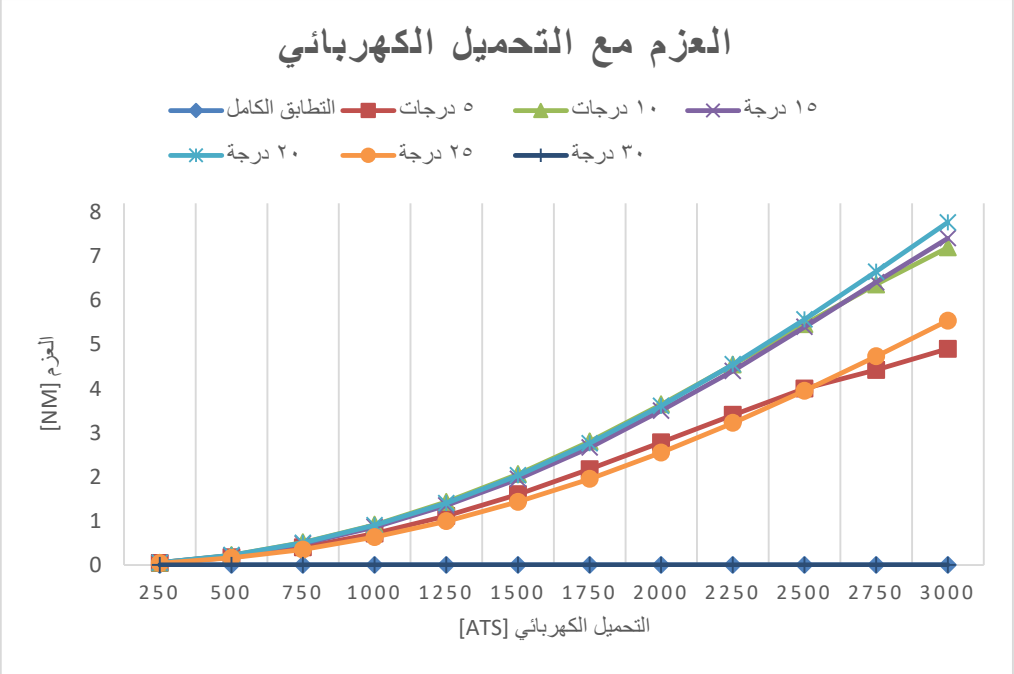
نلحظ من الشـــكل 3-19 وبمقارنة منحنيات عزم المحركات من الحادي عشـــر حتى الرابع عشـــر مع المحرك الأســاســي أن المحرك الأعلى عزما هو المحرك الثاني عشر عند النسبة (α=0.38) وهو منحني العزم الذي يحصر تحته أكبر مساحة وهو ذو شكل شبه منتظم ومشابه لشكل منحني العزم المثالي ومن ثمّ هو المحرك الأنسب تصميميا للجزء الدائر الذي يعطي العزم الأعلى.

يبين الجدول 3-8 تغيرات العزم الناتج من المحرك الثاني عشـــر ذي النســـبة (α=0.38) مع تغيرات التحميل الكهربائي عند عمل المحرك في حالة التطابق التام وفي حالة عدم التطابق.

الجدول 3-8 تغيرات العزم مع التحميل الكهربائي للمحرك الثاني عشر الأفضل عزماً

N	M	L	K	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A
زاوية الازاحة (درجة)	3000	2750	2500	2250	2000	1750	1500	1250	1000	750	500	250	التحميل الكهربائي [Ats]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	4.9	4.42	4	3.4	2.78	2.17	1.6	1.11	0.71	0.4	0.17	0.043	
10	7.2	6.36	5.46	4.54	3.64	2.8	2.06	1.43	0.91	0.51	0.22	0.05	
15	7.41	6.41	5.4	4.4	3.5	2.66	1.95	1.35	0.86	0.48	0.21	0.05	العزم [Nm]
20	7.77	6.65	5.57	4.55	3.61	2.76	2.03	1.4	0.9	0.5	0.22	0.05	
25	5.54	4.73	3.95	3.22	2.55	1.95	1.43	0.99	0.63	0.35	0.16	0.04	
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

يبين الشـــكل 3-20 المنحنيات البيانية الناتجة من تغير العزم للمحرك الثاني عشـــر مع تغير التحميل الكهربائي من القيمة 250ATs حتى 3000 ATs عند عمل المحرك بين حالة التطابق وعدم التطابق وكما هو متوقع فإن قيم العزم تزداد مع ازدياد الأمبير لفة (التحميل الكهربائي).

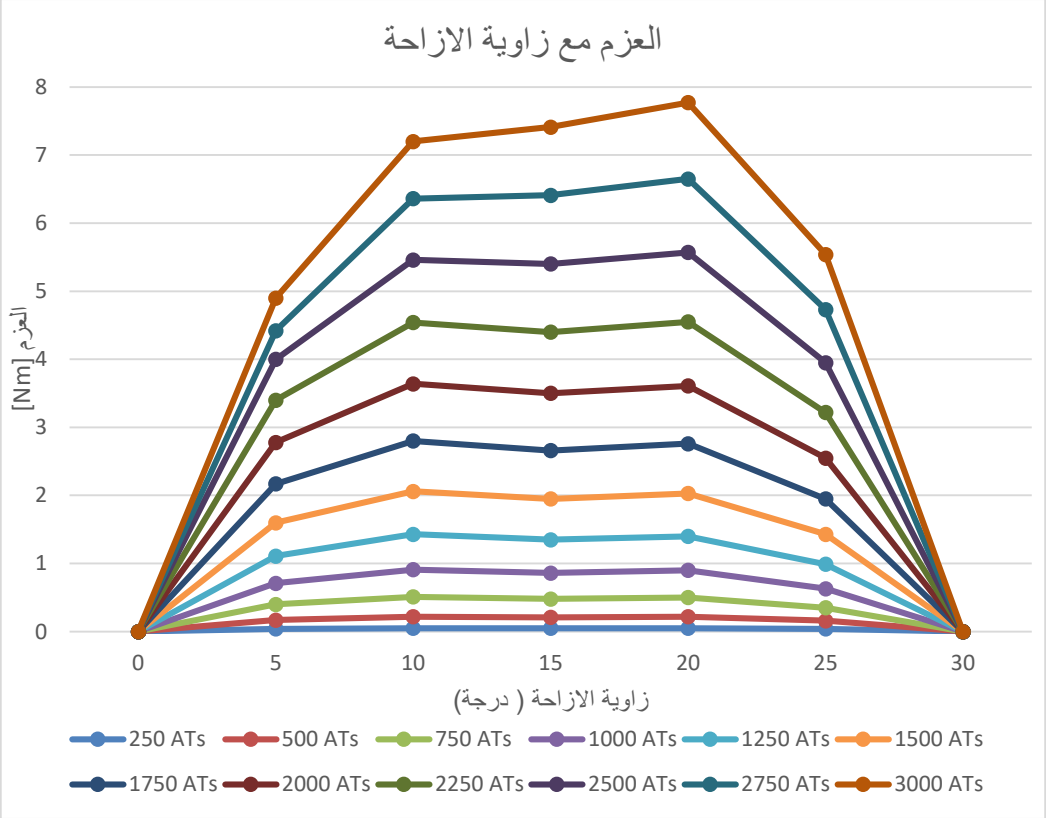


الشكل 3-20 تغير العزم مع التحميل الكهربائي للمحرك الثاني عشر

الجدول 3-9 تغير العزم مع زاوية الازاحة للمحرك الثاني عشر

التحميل الكهربائي [Ats]	30	25	20	15	10	5	0	زاوية إزاحة الدائر [درجة]
250	0	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0	العزم[Nm]
500	0	0.16	0.22	0.21	0.22	0.17	0	
750	0	0.35	0.5	0.48	0.51	0.4	0	
1000	0	0.63	0.9	0.86	0.91	0.71	0	
1250	0	0.99	1.4	1.35	1.43	1.11	0	
1500	0	1.43	2.03	1.95	2.06	1.6	0	
1750	0	1.95	2.76	2.66	2.8	2.17	0	
2000	0	2.55	3.61	3.5	3.64	2.78	0	
2250	0	3.22	4.55	4.4	4.54	3.4	0	
2500	0	3.95	5.57	5.4	5.46	4	0	
2750	0	4.73	6.65	6.41	6.36	4.42	0	
3000	0	5.54	7.77	7.41	7.2	4.9	0	

منطقة المخطط



الشكل 3-21 تغيرات العزم مع زاوية الازاحة للمحرك الثاني عشر

و بإجراء دراسة و مراجعة كاملة للمنحنيات في الشكل 3-16والشكل 3-19 مع الجدول 3-6 و الجدول 3-7 نلحظ أن قيم العزم تزداد بين القيم (0.38 – 0.45) و تصـــل إلى أعلى قيمة لها عندما (α=0.38) على حين تنقص كلما كانت النسبة أعلى من α=0.45 او أقل من α=0.38 و بمراعاة عدم حدوث ظاهرة التشبع المغناطيسي عند نقصان عرض ســن الدائر إلى قيم كبيرة أو حدوث تداخل بين أســنان الدائر مع قطبين من أقطاب الثابت في اللحظة نفســها عند زيادة عرض سن الدائر لقيم كبيرة فإننا نستطيع حصر قيم النسبة α عند تصميم دائر المحرك ذي المقاومة المغناطيسية المتغيرة بين القيمتين (α=0.45 , α=0.25) أي أن 0.25<α<0.45 و نحصل على العزم الأعلى عند α=0.38 .

3.8 تأثير تغير أبعاد أقطاب الثابت:

سنعتمد في تغيير أبعاد أقطاب الثابت على الأسلوب المعتمد نفسه في تغيير أبعاد الدائر وهي نسبة زاوية قطب الثابت إلى زاوية ميلان هذا القطب أي $\frac{\beta_S}{q_s}$ كما هو مبين في الشكل 3-13وسنرمز لهذه النسبة بالرمز γ.

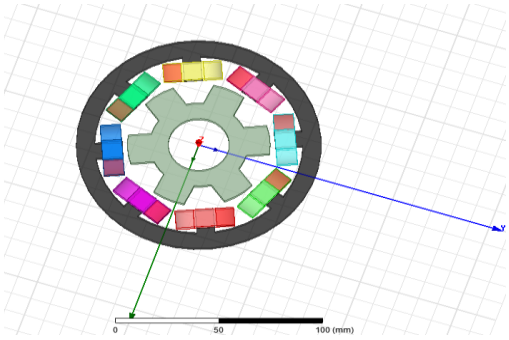
سندرس تأثير تغير النسبة γ في العزم المقدم من المحرك بوساطة النمذجة والمحاكاة لكل محرك ناتج من تغير النسبة ومقارنة العزم الناتج عنه بأوضاع مختلفة للجزء الدائر مع المحرك الأساسي الموجود لدينا الذي فيه النسبة γ=0.45 مع المحافظة على قيمة α للجزء الدائر والثغرة الهوائية وشكل النواة مطابق للمحرك الأساسي.

يبين الجدول 3-10 المحركات الناتجة من تغير النسبة γ فكل قيمة جديدة لـــ γ ينتج عنها محرك جديد يطلب نمذجته.

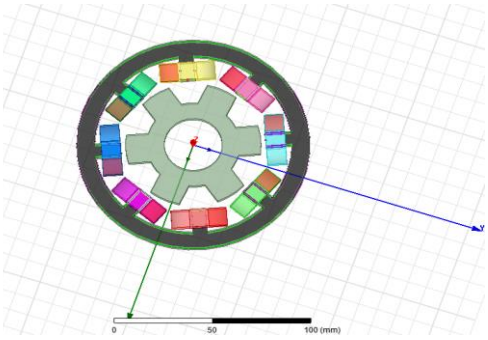
الجدول 3-10 المحركات الناتجة من تغير نسبة بناء الجزء الثابت

المحرك	الخامس عشر	السادس عشر	السابع عشر	الثامن عشر	التاسع عشر	العشرون
γ	0.25	0.3	0.35	0.37	0.4	0.42

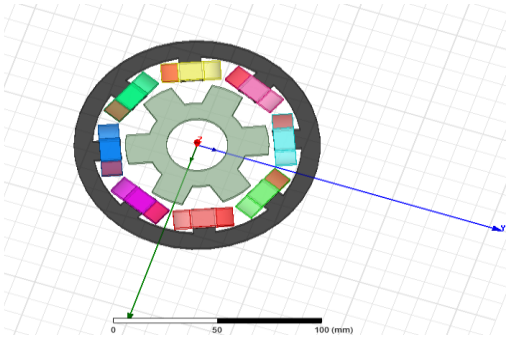
يبين الشكل 3-22 مقطع عرضي لأشكال المحركات بعد نمذجتها وتمثيلها باستخدام طريقة العناصر المنتهية باستخدام برنامج Ansys إذ نلحظ منه تناقص عرض قطب الثابت مع تناقص قيمة γ.



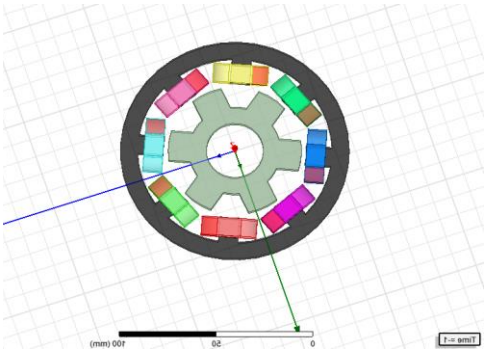
γ=0.3



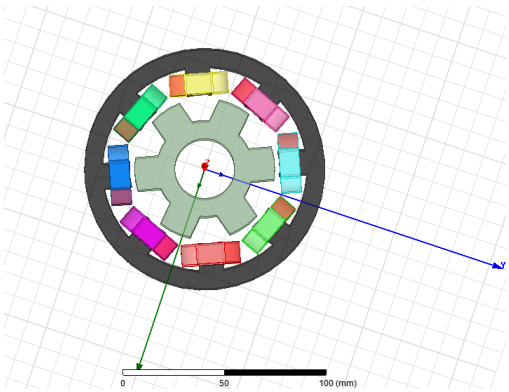
γ=0.25



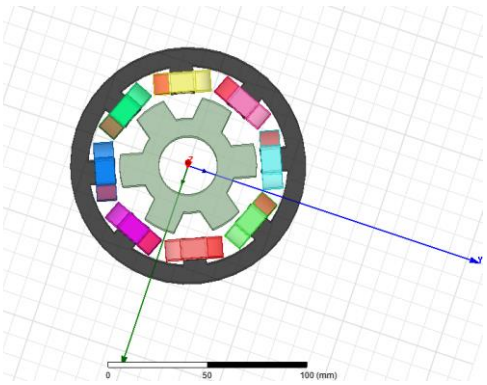
γ=0.37



γ=0.35



γ=0.42



γ=0.4

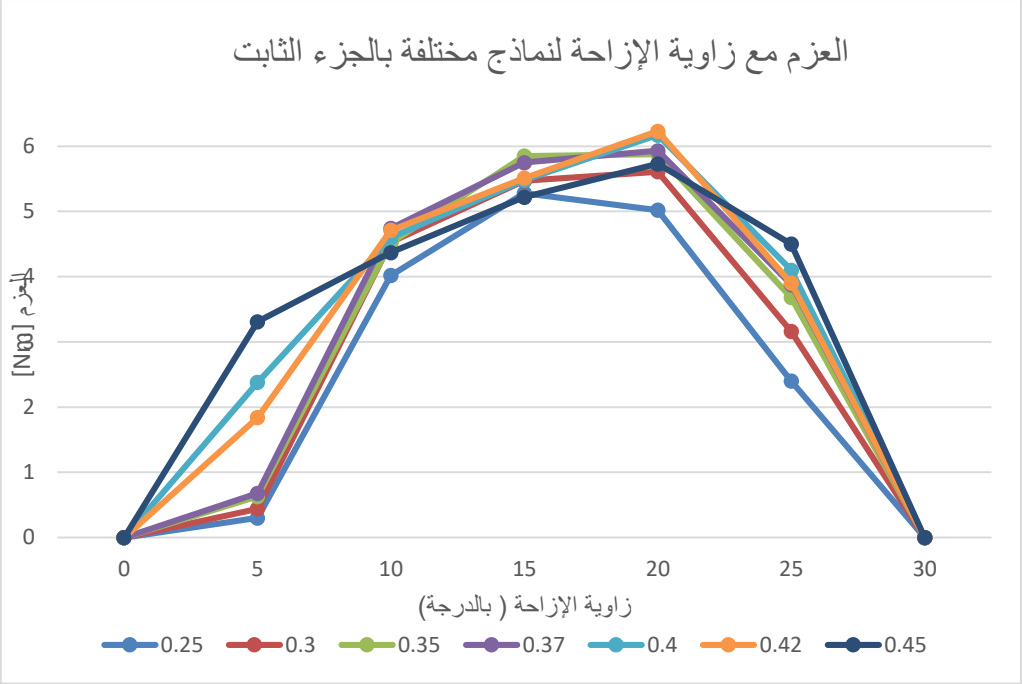
الشكل 3-22 مقطع عرضي للمحركات من الخامس عشر حتى العشرين

يبين جدول 3-11 نتائج تغير العزم مع تغير موضع الدائر للمحركات من الخامس عشر حتى العشرين مع المحرك الأساسي.

جدول 3-11 تغير العزم مع موضع الدائر للمحركات من الخامس عشر حتى العشرين مع المحرك الأساسي

30	25	20	15	10	5	0	زاوية الازاحة	
0	2.4	5.02	5.28	4.02	0.3	0	0.25	العزم [[Nm
0	3.16	5.61	5.47	4.53	0.44	0	0.3	
0	3.68	5.88	5.85	4.52	0.63	0	0.35	
0	3.88	5.93	5.75	4.74	0.68	0	0.37	
0	4.1	6.17	5.48	4.6	2.38	0	0.4	
0	3.9	6.23	5.51	4.71	1.84	0	0.42	
0	4.5	5.73	5.22	4.37	3.31	0	0.45	

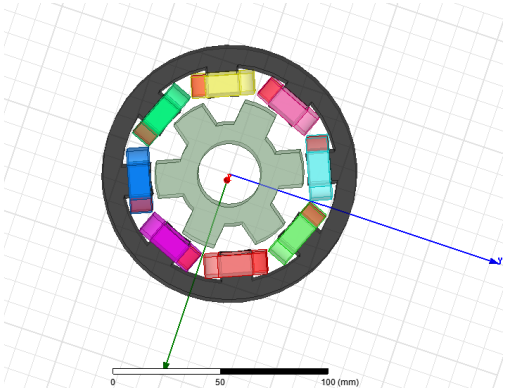
يبين الشكل 3-23 النتائج البيانية لتغيرات العزم مع تغيرات الزاوية للمحركات من الخامس عشر حتى العشرين (إذ عرض قطب الثابت في كل منها أقل من المحرك الأساسي).



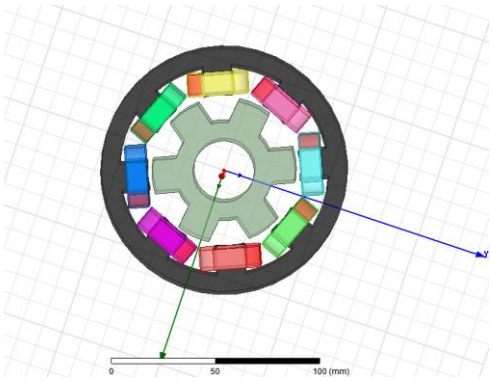
الشكل 3-23 تغيرات العزم مع زاوية الازاحة للمحركات من الخامس عشر حتى العشرين مع المحرك الأساسي

وبدراسة جدول 3-11 الشكل 3-23 نلحظ أن منحني العزم الناتج من المحرك الأساسي هو الأعلى الذي يحجز تحته مساحة أكبر من منحنيات بقية المحركات ومن ثمّ يبقى عزم المحرك الأساسي هو الأعلى من المحركات من الخامس العشر حتى العشرين ونلحظ تناقص قيمة العزم المقدم مع تناقص قيمة γ.

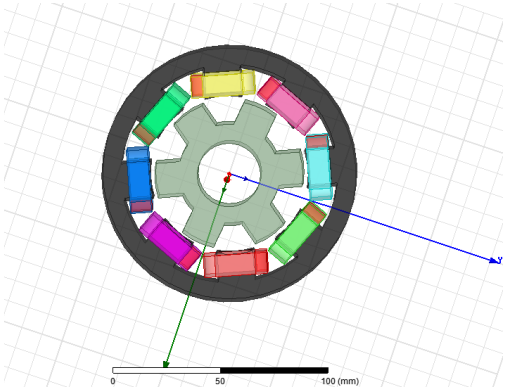
يبين الشكل 3-24 مقطعا عرضيا لنماذج المحركات عند زيادة قيمة γ إذ نلحظ زيادة عرض قطب الثابت عن المحرك الأساسي و نرمز لها من المحرك الحادي و العشرين حتى الخامس و العشرين.



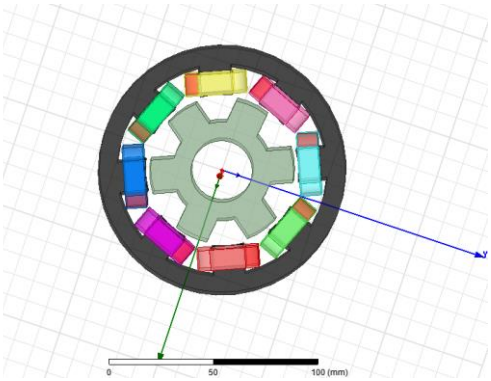
γ=0.5



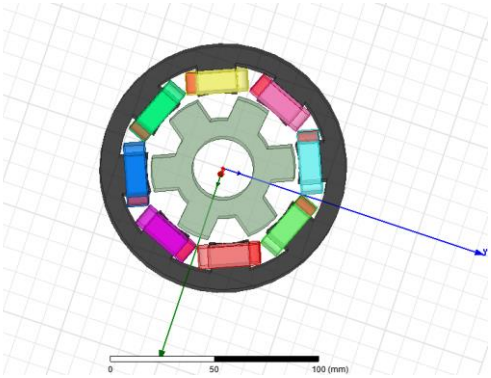
γ=0.48



γ=0.6



γ=0.53



γ= 0.65

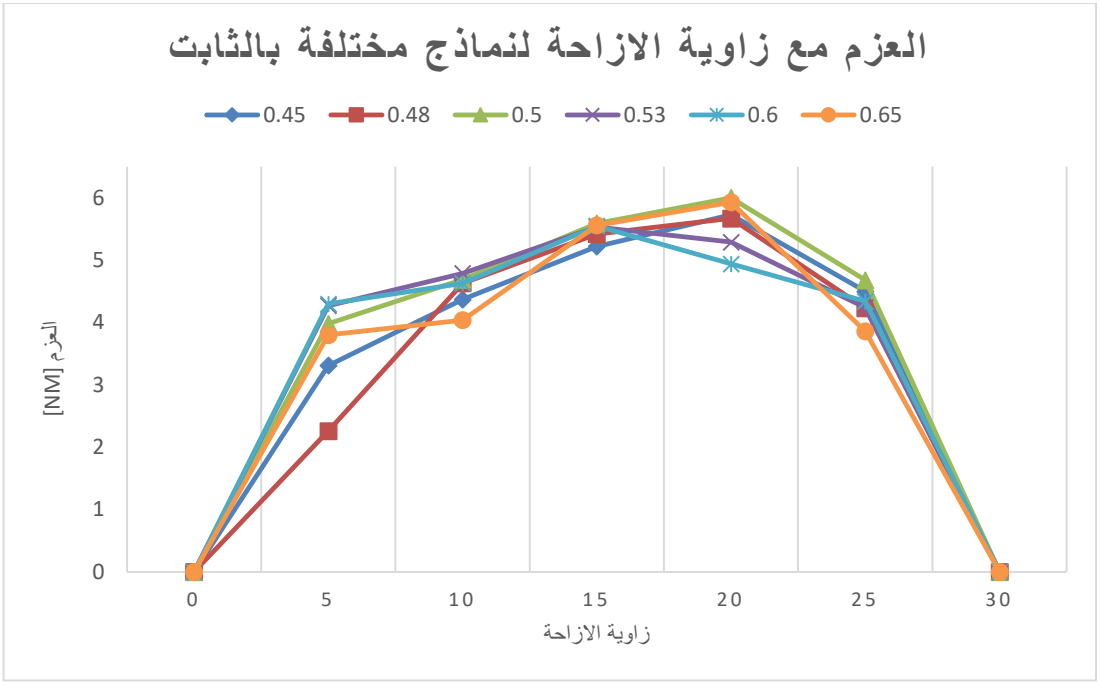
الشكل 3-24 مقطع عرضي لنماذج المحركات من الواحد و العشرين حتى الخامس و العشرين

يبين الجدول 3-12 نتائج عملية النمذجة والمحاكاة للمحركات من الواحد والعشـــرين حتى الخامس والعشـــرين ، يظهر فيه تغير قيمة العزم المقدم من كل محرك مع تغير موضـــع الدائر (من 0 حتى 30 درجة) ضمن مجال عمل الطور A.

الجدول 3-12 تغيرات العزم مع زاوية الأزاحة للمحركات من الواحد و العشرين حتى الخامس و العشرين مع المحرك الأساسي

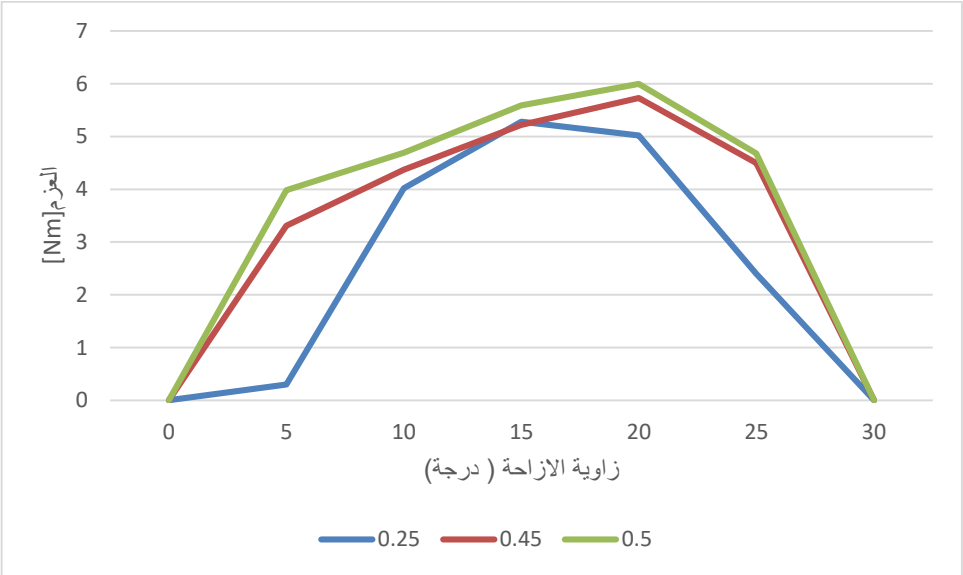
زاوية الازاحة	0	5	10	15	20	25	30
0.45	0	3.31	4.37	5.22	5.73	4.5	0
0.48	0	2.26	4.63	5.42	5.67	4.23	0
0.5	0	3.98	4.69	5.59	6	4.68	0
0.53	0	4.27	4.79	5.53	5.29	4.24	0
0.6	0	4.3	4.63	5.55	4.94	4.34	0
0.65	0	3.8	4.04	5.56	5.93	3.86	0

العزم [Nm]



الشكل 3-25 تغيرات العزم مع زاوية الازاحة للمحركات من الواحد و العشرين حتى الخامس و العشرين

عند دراسة المنحنيات البيانية في الشكل 3-25 مع الجدول 3-12 نلاحظ أن قيم العزم تزداد عند ازدياد النسبة γ من 0.45 حتى 0.5 ثم تبدأ بالتناقص كلما ازدادت القيمة γ أكبر من 0.5



الشكل 3-26 تغيرات العزم مع زاوية الازاحة للمحرك الثاني و العشرين مع المحرك الأساسي

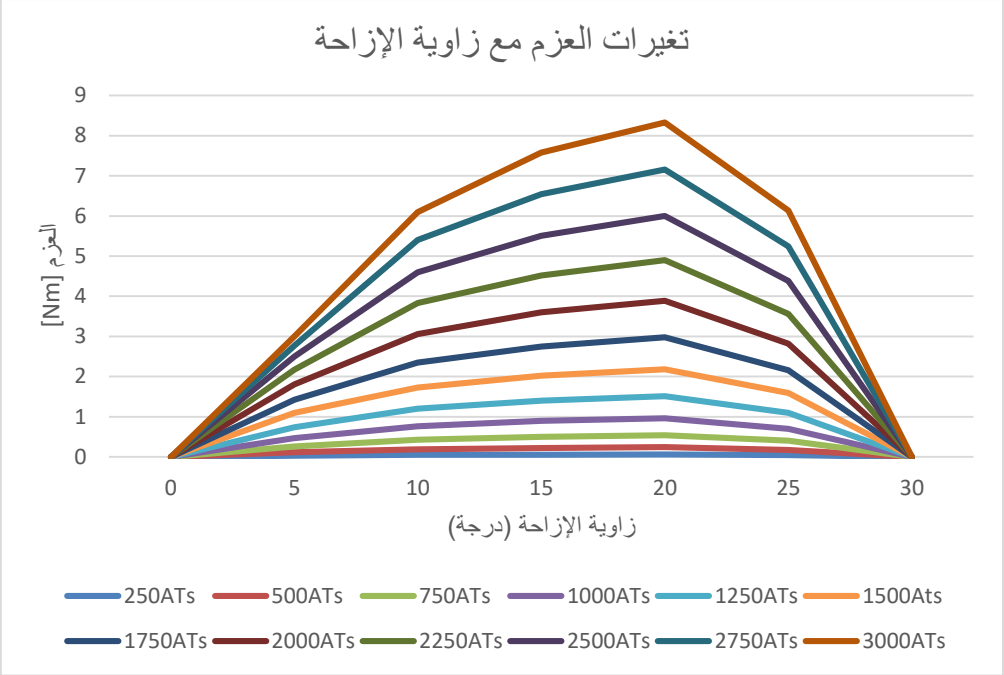
من الشكل 3-26 نجد أن المحرك الثاني والعشرين المقابل للنسبة $\gamma=0.5$ هو المحرك الأعلى عزمًا من المحرك الأساسي لأنه يحجز مساحة أكبر ضمن المنحنيات البيانية ومن ثمّ تكون النسبة $\gamma=0.5$ هي النسبة الأفضل للجزء الثابت للوصول به للعزم الأمثل والأعلى.

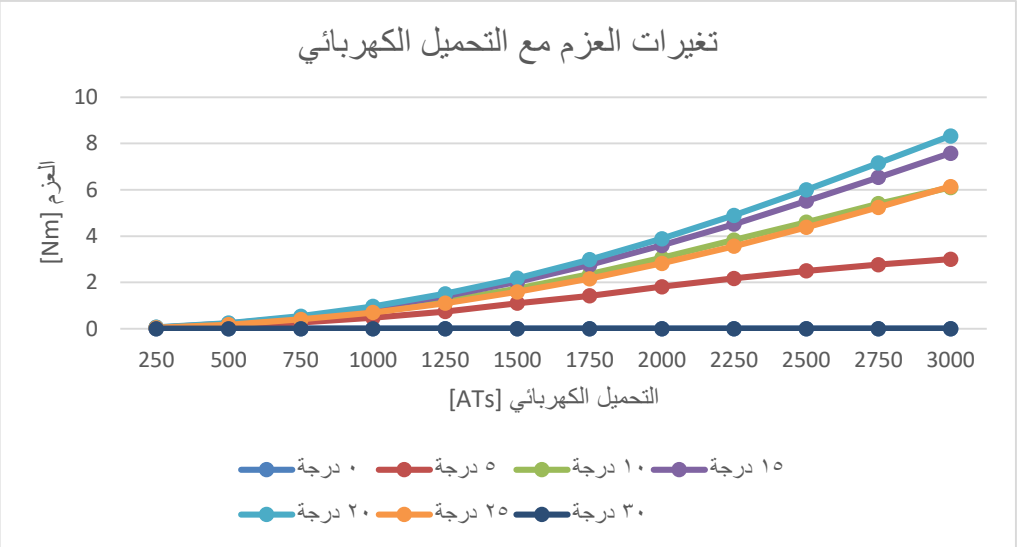
يبين الجدول 3-13 نتائج النمذجة وتغيرات العزم المقدم مقابل زاوية الإزاحة للمحرك الثاني والعشرين عند $\gamma=0.5$ مع تغير التحميل الكهربائي من 250 ATs حتى 3000 ATs.

الجدول 3-13 تغيرات العزم مع زاوية الازاحة للمحرك الثاني و العشرين

التحميل الكهربائي Ats]	30	25	20	15	10	5	0	زاوية إزاحة الدائر [درجة]
250	0	0.043	0.06	0.05	0.05	0.028	0	العزم [[Nm
500	0	0.17	0.24	0.22	0.19	0.12	0	
750	0	0.4	0.54	0.5	0.43	0.26	0	
1000	0	0.7	0.96	0.9	0.76	0.47	0	
1250	0	1.1	1.51	1.4	1.2	0.74	0	
1500	0	1.59	2.18	2.02	1.73	1.1	0	
1750	0	2.16	2.98	2.75	2.35	1.42	0	
2000	0	2.82	3.89	3.6	3.06	1.81	0	
2250	0	3.56	4.9	4.52	3.83	2.17	0	
2500	0	4.38	6	5.51	4.6	2.5	0	
2750	0	5.24	7.16	6.54	5.4	2.77	0	
3000	0	6.14	8.33	7.58	6.1	3	0	

نلاحظ من المنحنيات البيانية المبينة في الشكل 3-27 ازدياد العزم مع ازدياد التحميل الكهربائي مع المحافظة على العزم الأعلى عند 20 درجة.





الشكل 3-27 منحنيات تغيرات العزم مع زاوية الازاحة و التحميل الكهربائي للمحرك الثاني و العشرين

عند دراســة النتائج التي حصــلنا عليها في جدول 3-11 والجدول 3-12 جميعها و مقارنة المنحنيات جميعها في الشــكل 3-23 و الشــكل 3-25 الناتجة من تغير العزم المقابل لتغير زاوية الإزاحة لكل نموذج ناتج من تغير النسبة γ .

وبمراعاة عدم حدوث ظاهرة التشبع المغناطيسي وعدم وجود سن الدائر تحت قطبين من أقطاب الثابت في اللحظة نفسها فإننا نستطيع تحديد مجال النسبة γ التي يمكن الاعتماد عليه في تصميم الجزء الثابت لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة ضمن المجال $0.35 < \gamma < 0.53$ ونحصل على العزم الأعلى عند $\gamma=0.5$.

3.9 التصميم الأمثل لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة رباعي الطور:

نلحظ من دراستنا السابقة لتغيرات العزم عند تغير النسبة α للدائر أننا حصلنا على العزم الأعلى عندما $\alpha=0.38$

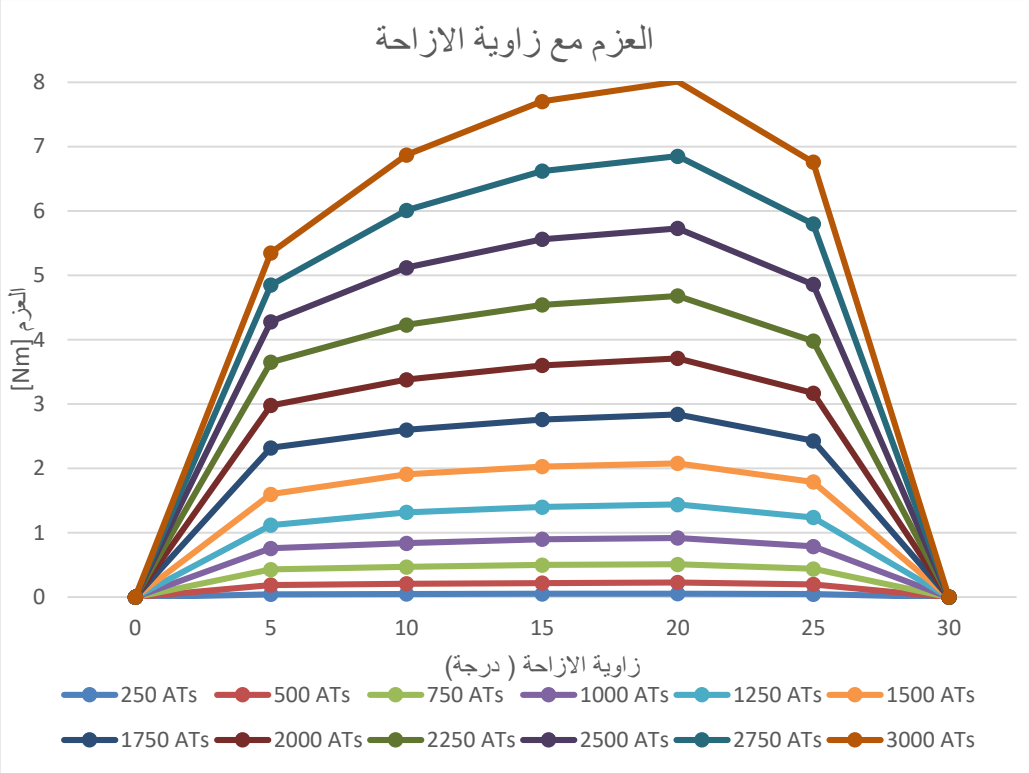
كما نلاحظ أننا حصلنا على العزم الأعلى عند نسبة γ للثابت $\gamma=0.5$ وذلك من دراستنا لتغيرات العزم عند تغير النسبة γ للثابت.

عند جمع النسبة $\alpha=0.38$ مع $\gamma=0.5$ نحصل على محرك جديد نرمز له بالمحرك السادس والعشرون الذي يعدّ هو التصميم الأمثل لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة رباعي الطور

يبين الجدول 3-14 نتائج تغيرات العزم مع تغيرات زاوية الإزاحة عند قيم التحميل الكهربائي المختلفة للمحرك السادس والعشرين الأمثل

الجدول 3-14 تغيرات العزم مع زاوية الإزاحة عند قيم التحميل الكهربائي المختلفة للمحرك السادس و العشرين الأمثل

التحميل الكهربائي [Ats]	30	25	20	15	10	5	0	زاوية إزاحة الدائر [درجة]
250	0	0.049	0.057	0.054	0.051	0.046	0	العزم [Nm]
500	0	0.2	0.23	0.22	0.21	0.19	0	
750	0	0.44	0.51	0.5	0.47	0.43	0	
1000	0	0.79	0.92	0.9	0.84	0.76	0	
1250	0	1.24	1.44	1.4	1.32	1.12	0	
1500	0	1.79	2.08	2.03	1.91	1.6	0	
1750	0	2.43	2.84	2.76	2.6	2.32	0	
2000	0	3.17	3.71	3.6	3.38	2.98	0	
2250	0	3.98	4.68	4.54	4.23	3.65	0	
2500	0	4.86	5.73	5.56	5.12	4.28	0	
2750	0	5.8	6.85	6.62	6.01	4.85	0	
3000	0	6.76	8.01	7.7	6.87	5.35	0	



الشكل 3-28 تغيرات العزم مع زاوية الأزاحة للمحرك السادس و العشرين

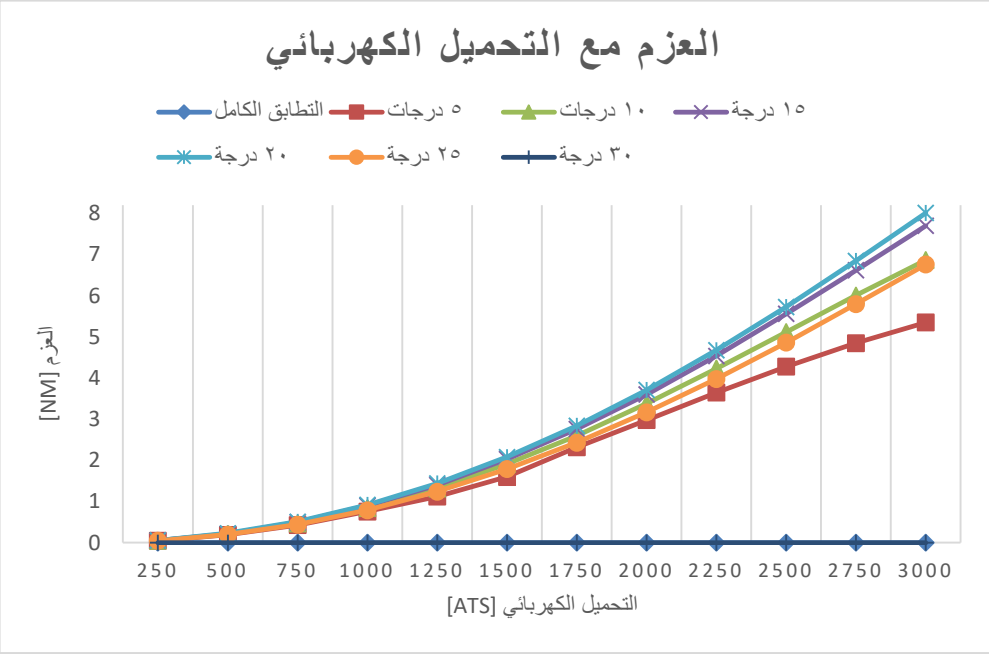
يبين الشكل 3-28 النتائج البيانية لتغيرات العزم مع زاوية الإزاحة للمحرك السادس والعشرين الأمثل إذ نجد بقاء العزم عند قيمة أعظمية عند الزاوية 20 درجة.

ودُرست تغيرات العزم المقدم من المحرك الأمثل عند تغير قيم التحميل الكهربائي من 250 ATs وحتى 3000ATs ونُظمت النتائج في الجدول 3-15

الجدول 3-15 تغيرات العزم مع التحميل الكهربائي للمحرك السادس و العشرين

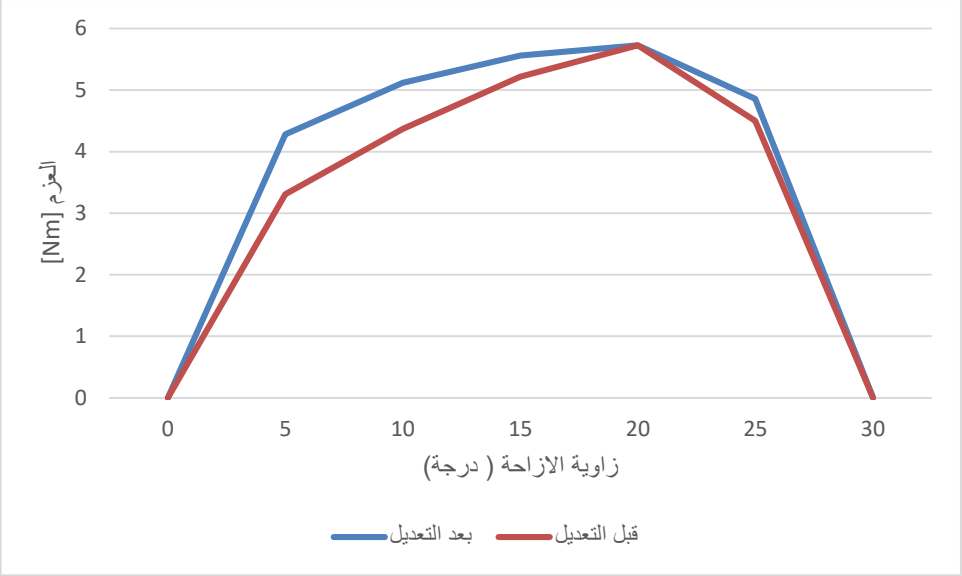
N	M	L	K	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A
زاوية الازاحة (درجة)	3000	2750	2500	2250	2000	1750	1500	1250	1000	750	500	250	التحميل الكهربائي [Ats]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	5.35	4.85	4.28	3.65	2.98	2.32	1.6	1.12	0.76	0.43	0.19	0.046	
10	6.87	6.01	5.12	4.23	3.38	2.6	1.91	1.32	0.84	0.47	0.21	0.051	
15	7.7	6.62	5.56	4.54	3.6	2.76	2.03	1.4	0.9	0.5	0.22	0.054	العزم [Nm]
20	8.01	6.85	5.73	4.68	3.71	2.84	2.08	1.44	0.92	0.51	0.23	0.057	
25	6.76	5.8	4.86	3.98	3.17	2.43	1.79	1.24	0.79	0.44	0.2	0.049	
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

وعند رسم المنحنيات البيانية الجدول 3-15 نجد زيادة العزم مع زيادة التحميل الكهربائي للمحرك ويظهر ذلك واضحًا في الشكل 3-29 .



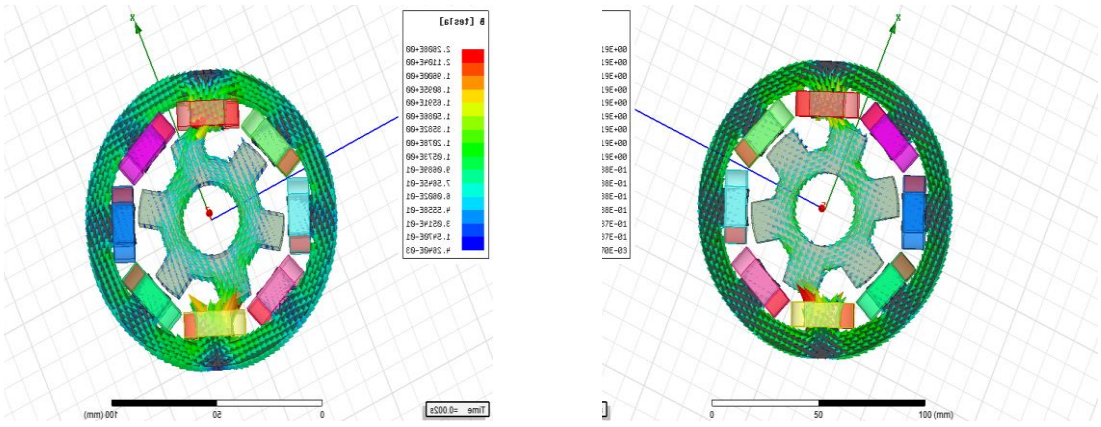
الشكل 3-29 تغيرات العزم مع التحميل الكهربائي للمحرك السادس و العشرين

يبين الشكل 3-30 النتائج البيانية لتغيرات العزم لكل من المحرك الأساسي والمحرك السادس والعشرين الأمثل عند زوايا الإزاحة المختلفة وعند اجراء مقارنة بين المنحنيين نلحظ أن المحرك السادس والعشرين والذي عُدّلت فيه البنية عن طريق تغير أبعاد الثابت والدائر هو المحرك ذو العزم الأمثل والأعلى من المحرك الأساسي.



الشكل 3-30 مقارنة تغيرات العزم مع زاوية الإزاحة للمحرك الأساسي مع المحرك السادس و العشرين

يبين الشكل 3-31 a – مقطعًا عرضيًا ثلاثي الأبعاد لتوزع السيالة المغناطيسية في أجزاء المحرك الأساسي جميعها و يظهر من الشكل 3-31b– مقطع عرضي ثلاثي الأبعاد لتوزع السيالة المغناطيسية في أجزاء المحرك السادس و العشرين جميعها الأمثل و الفرق في أبعاد الأقطاب و الأسنان بين المحركين .



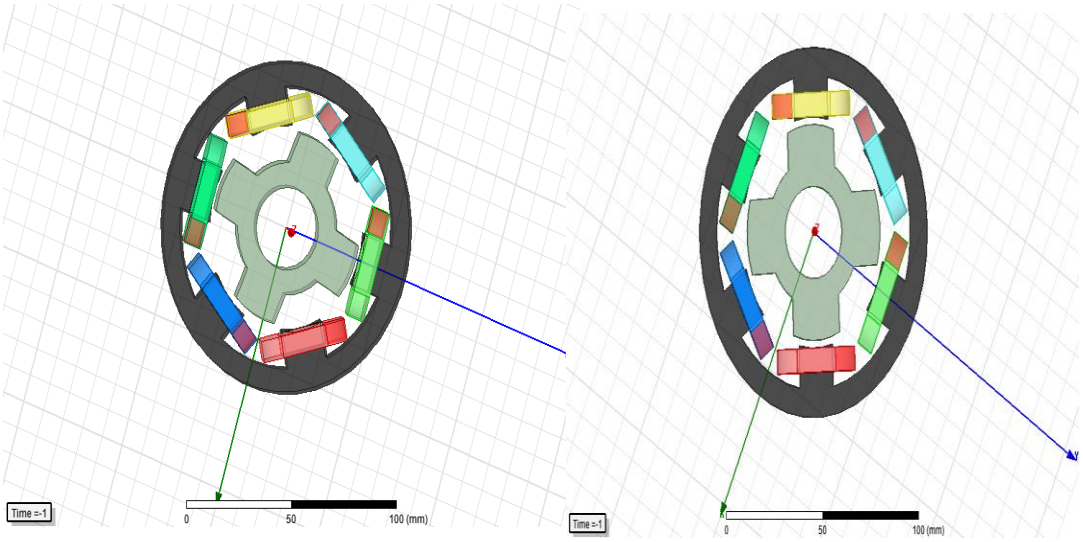
–b– –a–

الشكل 3-31 مقطع عرضي ثلاثي الأبعاد لتوزع السيالة المغناطيسية

3.10التصميم الأمثل لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة ثلاثي الطور:

سنستفيد من الخطوات السابقة جميعها في الحصول على العزم الأمثل لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة ثلاثي الطور ذو 6/4 أقطاب وذلك بهدف تعميم النتائج التي توصلنا إليها سابقًا في الحصول على العزم الأمثل لأشكال محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة المختلفة.

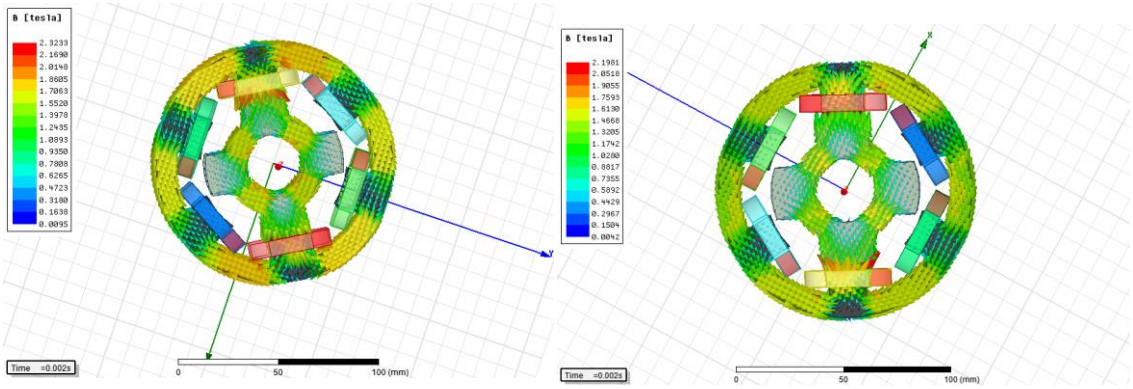
يبين الشكل 3-32 مقطعًا عرضيًا لنموذجين من محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة ثلاثي الطور ، سنرمز للنموذج الأول بالمحرك السابع والعشرين ، ستكون فيه النسبة $\alpha=0.45$ والنسبة $\gamma=0.45$ والنموذج الآخر سيرمز له بالمحرك الثامن والعشرين وهو محرك ثلاثي الطور ذو مقاومة مغناطيسية متغيرة طبق عليه النسب التي وصلنا إليها في دراستنا للحصول على العزم الأمثل وهي $\alpha=0.38$ و$\gamma=0.5$



المحرك السابع و العشرون المحرك الثامن و العشرون

الشكل 3-32 مقطع عرضي لنموذجين من محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة ذو 6/4 أقطاب

يبين الشكل3-33 توزع خطوط السيالة المغناطيسية في أجزاء المحرك جميعها لكل من النموذجين بالمحركين السابع والعشرين والثامن والعشرين إذ نلاحظ زيادة في كثافة السيالة المغناطيسية للمحرك الثامن و العشرين.



المحرك السابع و العشرون المحرك الثامن و العشرون

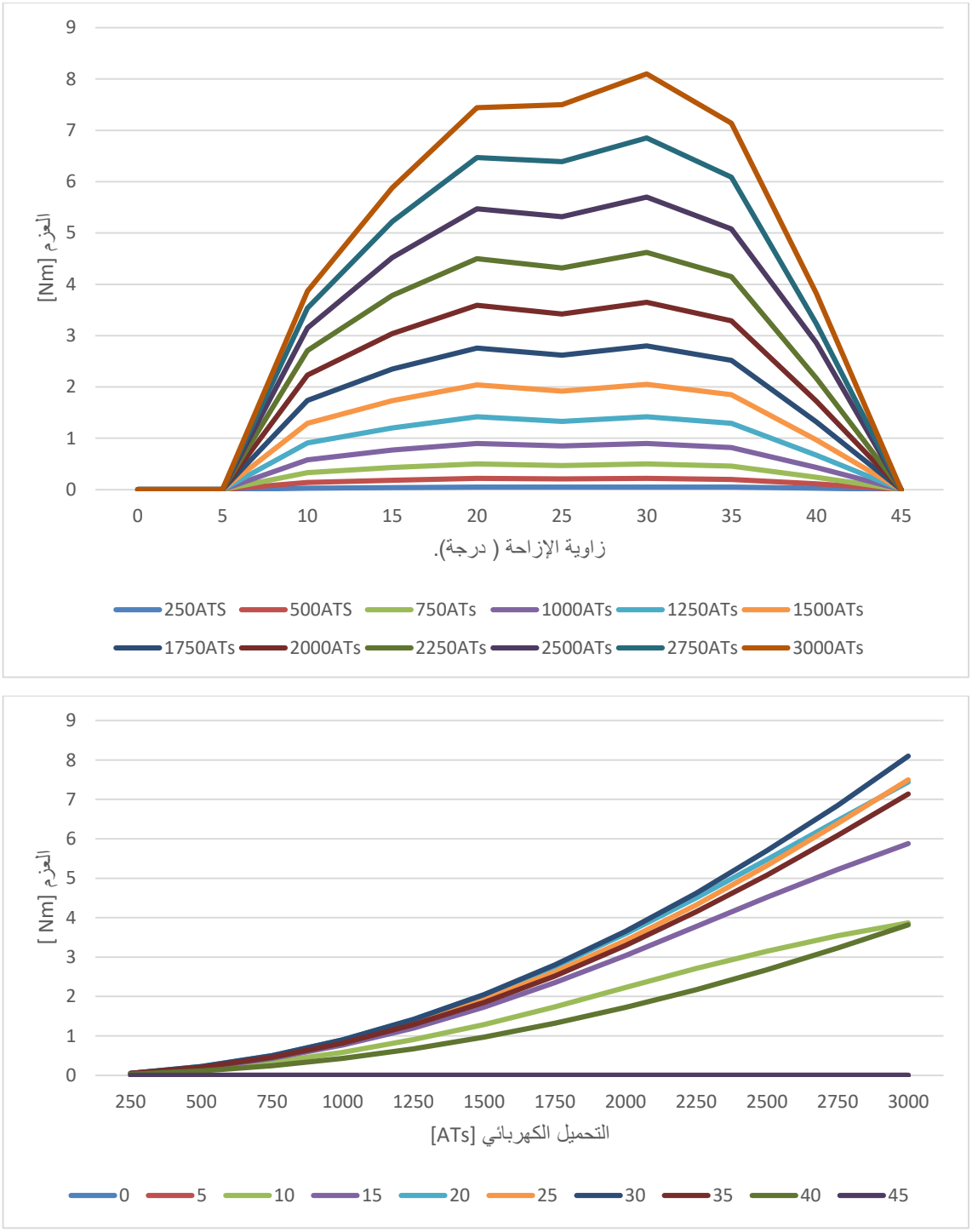
الشكل3-33 كثافة السيالة المغناطيسية للمحركين السابع و العشرين و الثامن و العشرين

نُمذج المحرك السابع والعشرون بطريقة العناصر المنتهية باستخدام برنامج Ansys وقد تبين أن العزم يصـــل إلى قيمة عظمى عند الزاوية 30 درجة إذ يتراوح مجال عمل كل طور بين 0 درجة و45 درجة ينخفض فيها العزم عند الأطراف حتى ينعدم ويزداد عند القيم الأخرى كما يظهر في الجدول 3-16

الجدول 3-16 تغيرات العزم مع زاوية الازاحة للمحرك السابع و العشرين

التحميل الكهربائي [Ats]	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0	زاوية إزاحة الدائر [درجة]
250	0	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0	0	العزم [Nm]
500	0	0.11	0.2	0.22	0.21	0.22	0.18	0.14	0	0	
750	0	0.24	0.46	0.5	0.47	0.5	0.43	0.33	0	0	
1000	0	0.43	0.82	0.9	0.85	0.9	0.77	0.58	0	0	
1250	0	0.67	1.29	1.42	1.33	1.42	1.2	0.91	0	0	
1500	0	0.97	1.85	2.05	1.92	2.04	1.73	1.29	0	0	
1750	0	1.32	2.52	2.8	2.62	2.76	2.35	1.74	0	0	
2000	0	1.72	3.29	3.65	3.42	3.59	3.04	2.23	0	0	
2250	0	2.17	4.15	4.62	4.32	4.5	3.78	2.71	0	0	
2500	0	2.86	5.08	5.7	5.32	5.47	4.52	3.15	0	0	
2750	0	3.23	6.09	6.85	6.39	6.47	5.22	3.54	0	0	
3000	0	3.82	7.14	8.1	7.5	7.44	5.88	3.87	0	0	

يبين الشـــكل 3-34 التمثيل البياني لتغير العزم مع تغير الزاوية و مع تغير التحميل الكهربائي للمحرك السابع والعشرين



الشكل 3-34 التمثيل البياني لتغير العزم مع زاوية الإزاحة و التحميل الكهربائي للمحرك السابع و العشرين

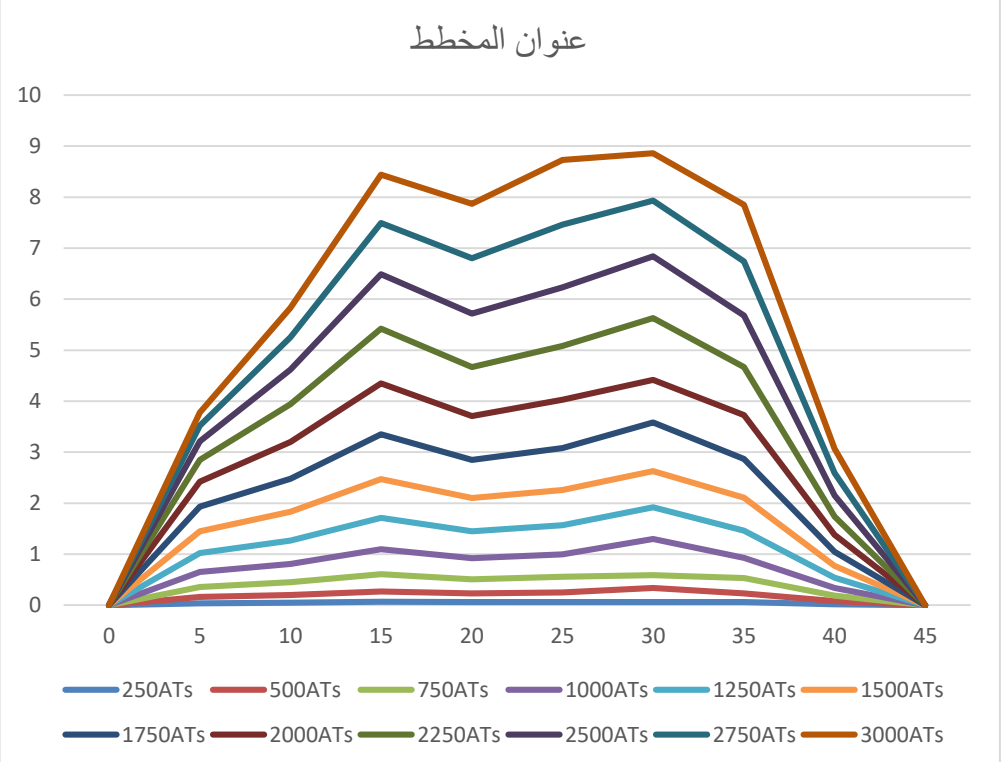
نُمذج المحرك الثامن والعشـرون ذو نسـبة البناء الأمثل للجزئين الثابت والدائر وأوجدت تغيرات العزم له مع تغير زاوية الإزاحة ومع تغير التحميل الكهربائي ونظمت في الجدول 3-17

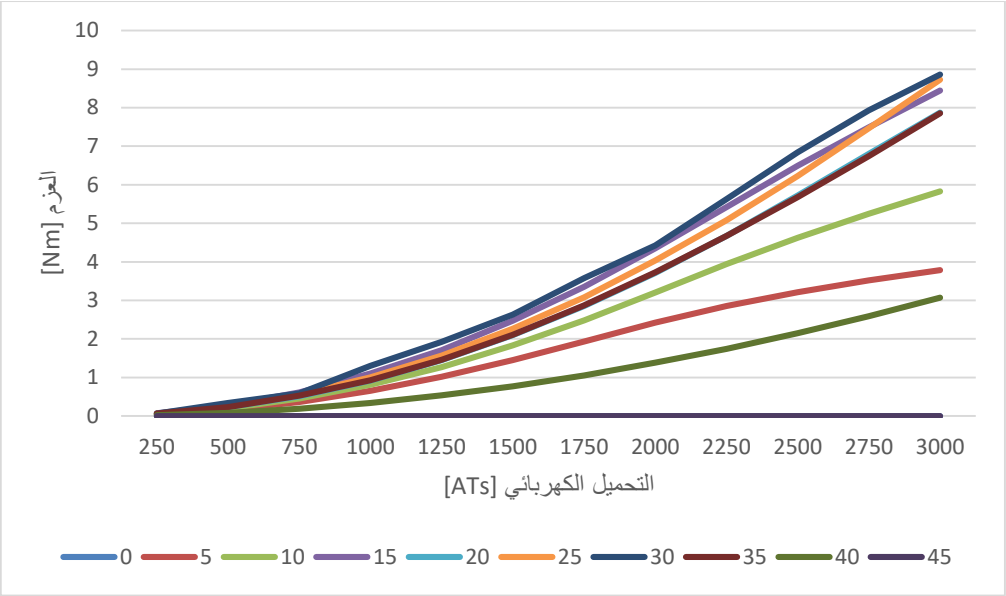
كما يبين الشكل 3-35 التمثيل البياني لتغيرات العزم المذكورة في الجدول

الجدول 3-17 نتائج النمذجة و تغيرات العزم مع زاوية الازاحة و التحميل الكهربائي للمحرك الثامن و العشرين

N	M	L	K	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A
زاوية الازاحة (درجة)	3000	2750	2500	2250	2000	1750	1500	1250	1000	750	500	250	التحميل الكهربائي [Ats]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	3.78	3.52	3.21	2.85	2.42	1.93	1.45	1.02	0.65	0.36	0.16	0.04	
10	5.83	5.25	4.62	3.94	3.2	2.48	1.83	1.27	0.81	0.45	0.2	0.05	
15	8.44	7.49	6.49	5.42	4.35	3.35	2.47	1.71	1.1	0.61	0.27	0.07	
20	7.87	6.8	5.72	4.67	3.71	2.85	2.1	1.45	0.92	0.51	0.23	0.06	
25	8.73	7.46	6.23	5.08	4.03	3.08	2.26	1.57	1	0.56	0.25	0.06	العزم [Nm]
30	8.86	7.93	6.84	5.63	4.42	3.58	2.63	1.92	1.3	0.59	0.34	0.06	
35	7.85	6.74	5.68	4.67	3.73	2.87	2.11	1.46	0.93	0.53	0.23	0.06	
40	3.07	2.59	2.15	1.74	1.38	1.05	0.77	0.54	0.34	0.19	0.08	0.02	
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

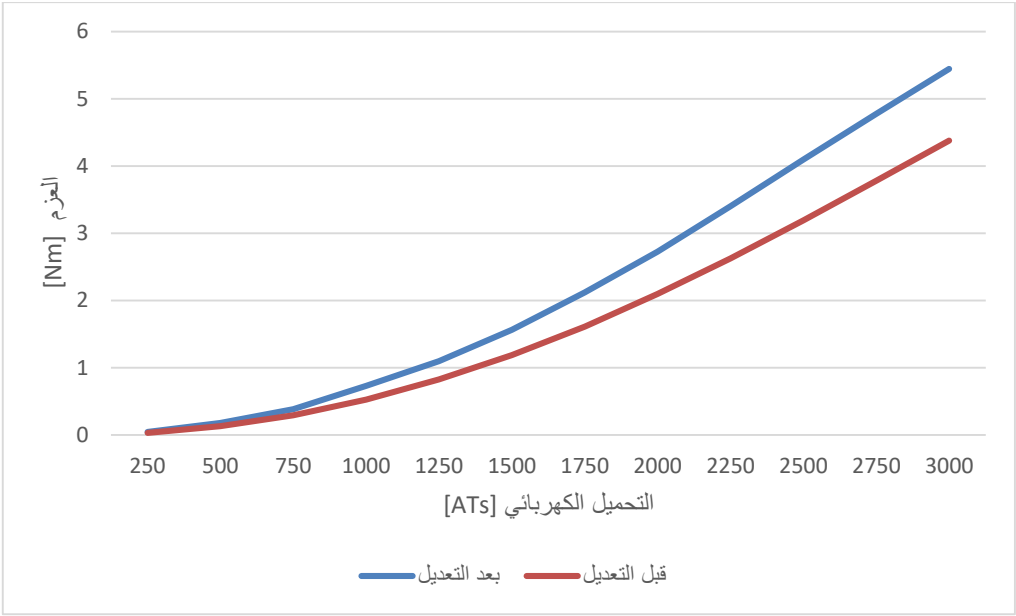
التحميل الكهربائى [Ats]	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0	زاوية إزاحة الدائر [درجة]
250	0	0.02	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.05	0.04	0	
500	0	0.08	0.23	0.34	0.25	0.23	0.27	0.2	0.16	0	
750	0	0.19	0.53	0.59	0.56	0.51	0.61	0.45	0.36	0	
1000	0	0.34	0.93	1.3	1	0.92	1.1	0.81	0.65	0	
1250	0	0.54	1.46	1.92	1.57	1.45	1.71	1.27	1.02	0	
1500	0	0.77	2.11	2.63	2.26	2.1	2.47	1.83	1.45	0	
1750	0	1.05	2.87	3.58	3.08	2.85	3.35	2.48	1.93	0	العزم [Nm]
2000	0	1.38	3.73	4.42	4.03	3.71	4.35	3.2	2.42	0	
2250	0	1.74	4.67	5.63	5.08	4.67	5.42	3.94	2.85	0	
2500	0	2.15	5.68	6.84	6.23	5.72	6.49	4.62	3.21	0	
2750	0	2.59	6.74	7.93	7.46	6.8	7.49	5.25	3.52	0	
3000	0	3.07	7.85	8.86	8.73	7.87	8.44	5.83	3.78	0	





الشكل 3-35 التمثيل البياني لتغيرات العزم للمحرك الثامن و العشرين

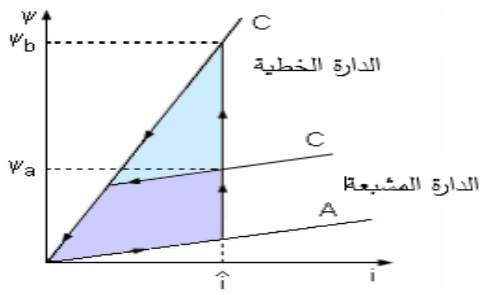
عند مقارنة قيم العزم مع تغير التحميل الكهربائي لكلا المحركين السابع والعشرين والثامن والعشرين نجد أن قيم العزم الناتجة للمحرك الثامن والعشـرين أعلى من قيم العزم الناتج من للمحرك السـابع والعشـرين وهذا ما يظهر لدينا واضحًا في الشكل 3-36 ومن ثمّ فإن نسب بناء الجزء الدائر والثابت المثلى أدت إلى الوصول للعزم الأمثل لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة 6/4



الشكل 3-36 مقارنة قيم العزم بين المحركين السابع و العشرين و الثامن و العشرين

3.11تأثير التشبع المغناطيسي على العزم:

في هذه الحالة تكون نقطة العمل ضمن المنطقة المشبعة من الخصائص المغناطيسية ومن ثم فإن الدارة المغناطيسية للمحرك هي دارة غير خطية وعندها تتوقف كثافة السيالة المغناطيسية عند حد أعلى لاتزداد بعدها إلا ضمن حدود بسيطة مع زيادة التيار كما يبين الشكل 3-37.



الشكل 3-37 علاقة السيالة المغناطيسية مع التيار لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة

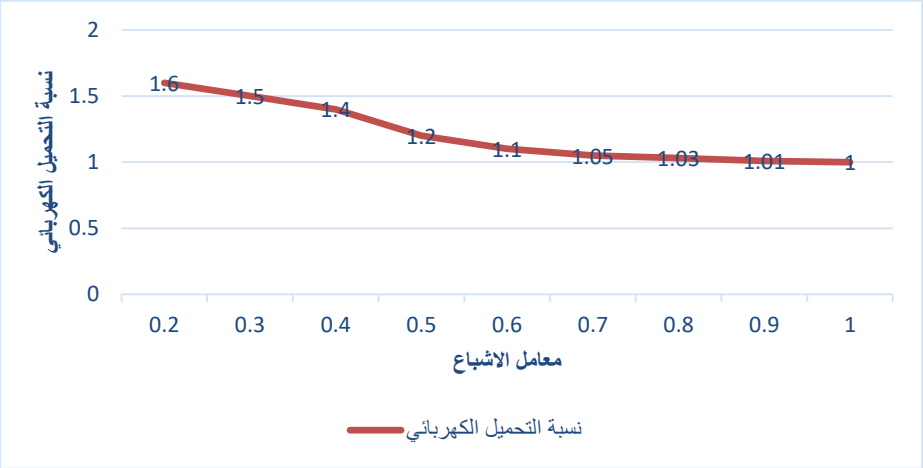
للدارة الخطية والدارة المشبعة

لدراسة تأثير التشبع المغناطيسي في العزم المقدم نُمذجت مجموعة من المحركات المختلفة عن بعضها فقط بمعامل النفوذية المغناطيسية μ و إيجاد قيم التحميل الكهربائي اللازم لتقديم العزم نفسه([1[Nm) في حالة الدارة الخطية و في حال الدارة المشبعة عند قيم مختلفة لعامل النفوذية المغناطيسية تبدأ من $\mu = 0.2$ و حتى $\mu = 1$ و هو العامل المقابل للمحرك المثالي دون اشباع وقد رُتبت هذه القيم في الجدول 3-18.

الجدول 3-18تغيرات نسبة التحميل الكهربائي للدارة الخطية و المشبعة بالنسبة إلى لعامل النفاذية المغناطيسية

μ	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
التحميل الكهربائي في حالة الاشباع [ATs1]	2000	1875	1750	1500	1375	1313	1288	1263	1250
التحميل الكهربائي في الدارة الخطية[ATs2]	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250	1250
$\frac{ATs1}{ATs2}$	1.6	1.5	1.4	1.2	1.1	1.05	1.03	1.01	1
العزم T[Nm]	1	1	1	1	1	1	1	1	1

يبين الشكل 3-38 الخط البياني لتغيرات نسبة التحميل الكهربائي للمحرك في حال الدارة الخطية وفي حال الاشباع إلى معامل النفاذية المغناطيسية.



الشكل 3-38 تغير نسبة التحميل الكهربائي للمحرك بين الاشباع و عدم الاشباع بالنسبة لمعامل النفاذية المغناطيسية عند عزم ثابت

نجد من الشكل 3-38 أن التحميل الكهربائي اللازم لمحرك ذي معامل نفاذية $\mu = 0.4$ مثلًا أكبر بنسبة 1.4 مرة من التحميل الكهربائي للمحرك ذي الدارة المغناطيسية الخطية و لتقديم العزم نفسه و ذلك بسبب أن المقاومة المغناطيسية للمحرك المشبع أكبر منها للمحرك في منطقة العمل الخطية.

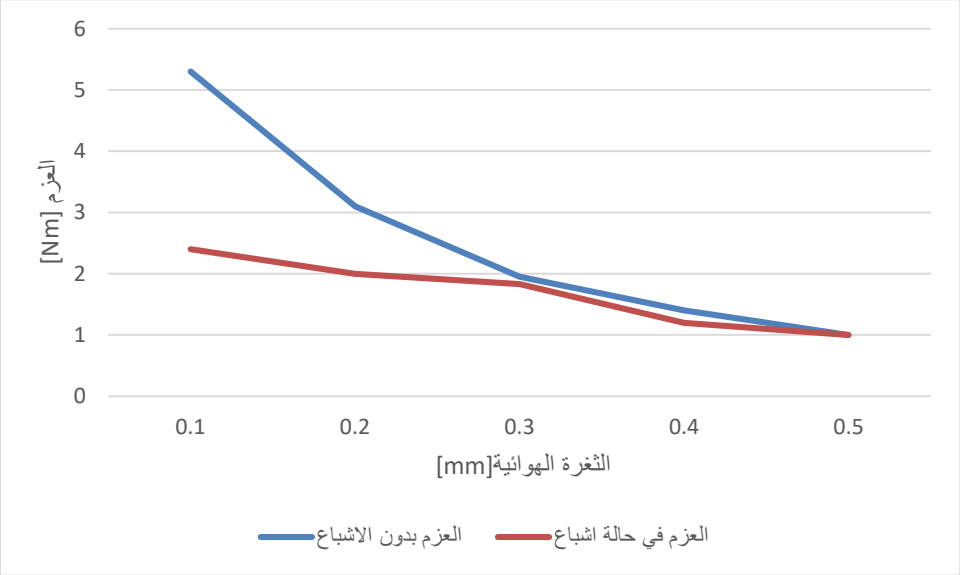
أُجريت نمذجة ومحاكاة لمجموعة من المحركات ذات المقاومة المغناطيسية المتغيرة والتي تعمل ضمن الدارة المغناطيسية الخطية والدارة المغناطيسية المشبعة بوساطة إيجاد تغير العزم المقدم منها بوصفه تابعًا لطول الثغرة الهوائية عند قيمة التحميل الكهربائي نفسها المطبق على كل منها وهي 1250[ATs] و نُظمت النتائج ضمن الجدول 3-19.

الجدول 3-19 تغيرات العزم مع تغير الثغرة الهوائية عند التحميل الكهربائي نفسه للدارة المشبعة و الخطية

طول الثغرة الهوائية [mm]	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
العزم في الدارة الخطية T[Nm]	5.3	3.1	1.95	1.4	1

العزم في الحالة المشبعة T[Nm]	2.4	2	1.83	1.2	1

يبين الشكل 3-39الشكل الخط البياني لتغيرات العزم للدارة المغناطيسية الخطية و الدارة المشبعة مع تغير الثغرة الهوائية عند قيمة التحميل الكهربائي نفسها.



الشكل 3-39 تغيرات العزم مع الثغرة الهوائية للمحرك في حالة الاشباع و بدون اشباع

نجد من الشـــكل 3-39 و الجدول 3-19أن قيمة العزم في محرك المقاومة المغناطيســـية المتغيرة عندما تكون الدارة المغناطيســـية خطية أي في حالة العمل دون اشـــباع أكبر بشـــكل كبير من قيمة العزم للمحرك في حالة الإشـــباع عند قيمة التحميل الكهربائي نفســـها و ذلك عند ثغرة هوائية صـــغيرة و بقيمة 0.1[mm] ثم تبدأ قيمة العزم للمحرك دون إشباع بالانخفاض و الاقتراب من عزم هذا المحرك في حالة الإشباع كلما زادت الثغرة الهوائية للمحرك حتى نصـــل إلى تطابق بقيمة العزم المقدم من المحرك دون و مع إشـــباع عندما نصـــل إلى ثغرة هوائية بطول 0.5[mm] مع اختيار أبعاد مناســـبة للأطار الخارجي مناســـبة و هذا يخفف من مقاومة الجزء الحديدي للمحرك و في هذه الحالة نســـتطيع إهمال الأجزاء الحديدية و من ثمّ إهمال تأثير الاشـــباع في العزم و على هذا الأساس تمت دراستنا في هذا البحث عند ثغرة هوائية 0.5[mm] و أبعاد مناسبة للجزء الحديدي.

الفصل الرابع

4 تعديل بنية محرك كهربائي ذي مقاومة مغناطيسية متغيرة

4.1 بنية المحرك الكهربائي قبل التعديل

المحرك المقصـود هو محرك مقاومة مغناطيسـية متغيرة 6/4 أقطاب موجود في مخبر البحث في قسـم هندسة الطاقة الكهربائية وهذا المحرك باستطاعة [Kw]2.5 و له المواصفات الآتية:

4.1.1 الجزء الدائر:

يبين جدول 4-1 مواصفات وأبعاد الجزء الدائر للمحرك قبل التعديل:

جدول 4-1 مواصفات الجزء الدائر للمحرك قبل التعديل

قطر النواة	6 [cm]
ارتفاع السن	2 [cm]
طول النواة	9 [cm]
عدد الأقطاب	4
سماكة النواة	3 [cm]
نسبة البناء	0.43

4.1.2 الجزء الثابت:

يبين الجدول 4-2 مواصفات الجزء الثابت للمحرك و أبعاده قبل التعديل:

جدول 4-2 مواصفات الجزء الثابت للمحرك قبل التعديل

قطر النواة	12 [cm]
ارتفاع القطب	2 [cm]
طول النواة	9 [cm]
عدد الأقطاب	6
سماكة النواة	2 [cm]
نسبة البناء	0.4
عدد لفات كل قطب	250 لفة

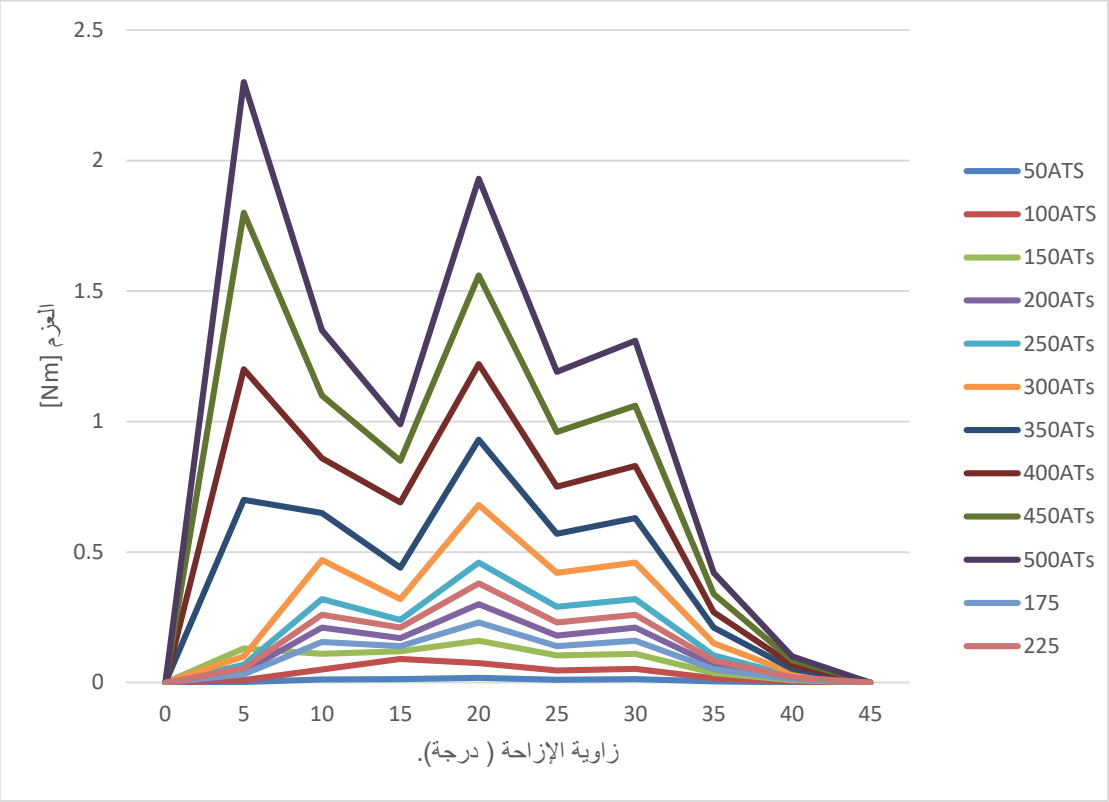
4.2 نمذجة المحرك الكهربائي قبل التعديل:

تهدف نمذجة المحرك الكهربائي باستخدام برنامج Ansys إلى الحصول على قيم العزم المقابلة لزوايا الإزاحة المختلفة عند حالات التحميل الكهربائي المختلفة وقد رُتبت نتائج العزم في جدول 4-3.

جدول 4-3 قيم العزم المقابل لزوايا الإزاحة المختلفة للمحرك قبل التعديل

التحميل الكهربائي [Ats]	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0	زاوية إزاحة الدائر [درجة]
50	0	0.001	0.004	0.013	0.011	0.018	0.013	0.012	0.002	0	العزم [Nm]
100	0	0.004	0.017	0.052	0.046	0.074	0.09	0.05	0.01	0	
150	0	0.009	0.037	0.11	0.104	0.16	0.12	0.11	0.024	0	
175	0	0.013	0.051	0.16	0.14	0.23	0.14	0.156	0.032	0	
200	0	0.017	0.067	0.21	0.18	0.3	0.17	0.21	0.043	0	
225	0	0.021	0.084	0.26	0.23	0.38	0.21	0.26	0.055	0	
250	0	0.026	0.104	0.32	0.29	0.46	0.24	0.32	0.068	0	
300	0	0.038	0.15	0.46	0.42	0.68	0.32	0.47	0.1	0	
350	0	0.052	0.21	0.63	0.57	0.93	0.44	0.65	0.7	0	
400	0	0.068	0.27	0.83	0.75	1.22	0.69	0.86	1.2	0	
450	0	0.086	0.34	1.06	0.96	1.56	0.85	1.1	1.8	0	
500	0	0.1	0.42	1.31	1.19	1.93	0.99	1.35	2.3	0	

عند إجراء التمثيل البياني لتغيرات العزم المبينة جدول 4-3 ينتج لدينا المنحني البياني الظاهر في الشكل 4-1.



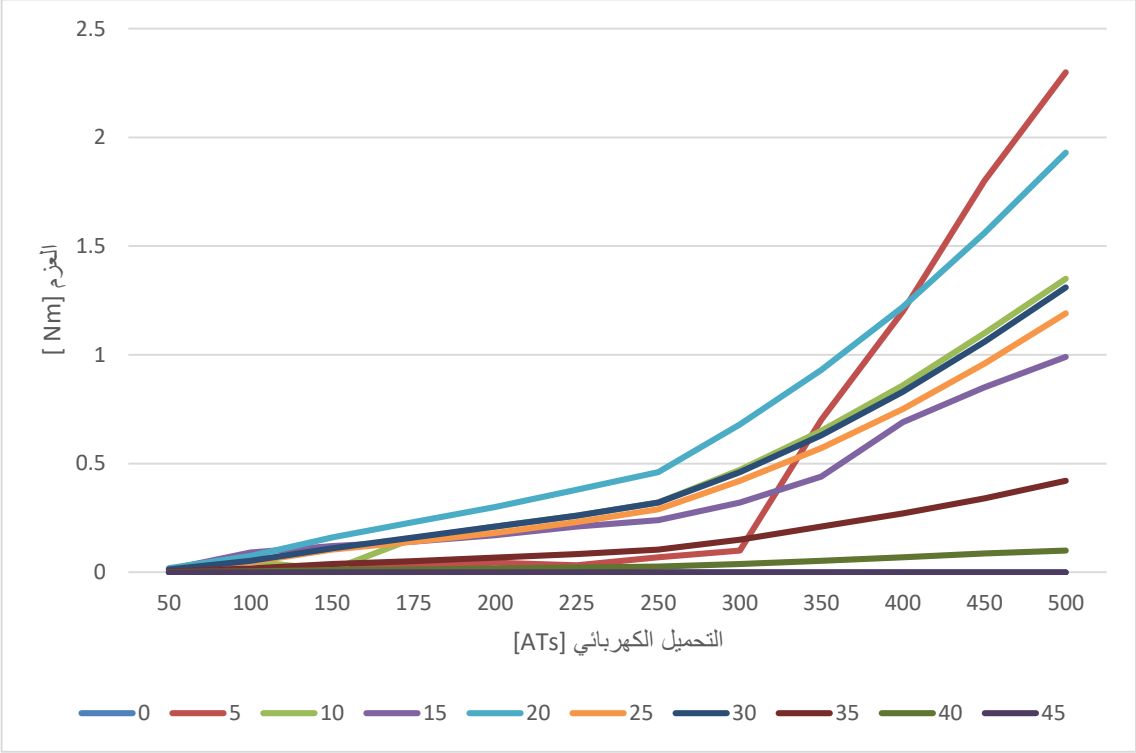
الشكل 4-1 التمثيل البياني لتغيرات العزم مع زاوية الإزاحة للمحرك قبل التعديل

يبين الجدول 4-4 نتائج النمذجة وتغيرات قيم العزم بالنســـبة إلى التحميل الكهربائي عند زوايا الازاحة المختلفة للمحرك قبل التعديل.

الجدول 4-4 تغيرات قيم العزم مع زاوية الإزاحة للمحرك قبل التعديل

زاوية الازاحة (درجة)	500	450	400	350	300	250	225	200	175	150	100	50	التحميل الكهربائي [Ats]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	العزم [[Nm
5	2.3	1.8	1.2	0.7	0.1	0.068	0.031	0.043	0.032	0.024	0.01	0.002	
10	1.35	1.1	0.86	0.65	0.47	0.32	0.26	0.21	0.156	0.011	0.05	0.012	
15	0.99	0.85	0.69	0.44	0.32	0.24	0.21	0.17	0.14	0.12	0.09	0.013	
20	1.93	1.56	1.22	0.93	0.68	0.46	0.38	0.3	0.23	0.16	0.074	0.018	
25	1.19	0.96	0.75	0.57	0.42	0.29	0.23	0.18	0.14	0.104	0.046	0.011	
30	1.31	1.06	0.83	0.63	0.46	0.32	0.26	0.21	0.16	0.11	0.052	0.013	
35	0.42	0.34	0.27	0.21	0.15	0.104	0.084	0.067	0.051	0.037	0.017	0.004	
40	0.1	0.086	0.068	0.052	0.038	0.026	0.021	0.017	0.013	0.009	0.004	0.001	
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

يظهر من الشكل 4-2 التمثيل البياني لتغيرات العزم مع التحميل الكهربائي للمحرك قبل التعديل



الشكل 4-2 تغيرات العزم مع التحميل الكهربائي للمحرك قبل التعديل

4.3 القياسات التجريبية للمحرك قبل التعديل:

يتم قياس عزم المحرك بشكل عملي بتركيب بكره على محور الجزء الدائر والتي سيمثل نصف قطرها ذراع القوة وهو بطول [cm]7 في تجربتنا ومن ثم ربط حبل مهمل الكتلة على البكرة وتعليق أوزان مختلفة في الطرف الآخر من الحبل وتشغيل المحرك حتى يصبح قادراً على رفع الثقل عندها نستطيع قياس قيمة العزم المقدم من المحرك والتيار المستجر عند كل ثقل بشكل تجريبي.

يبين الجدول 4-5 القياسات التجريبية للمحرك قبل التعديل:

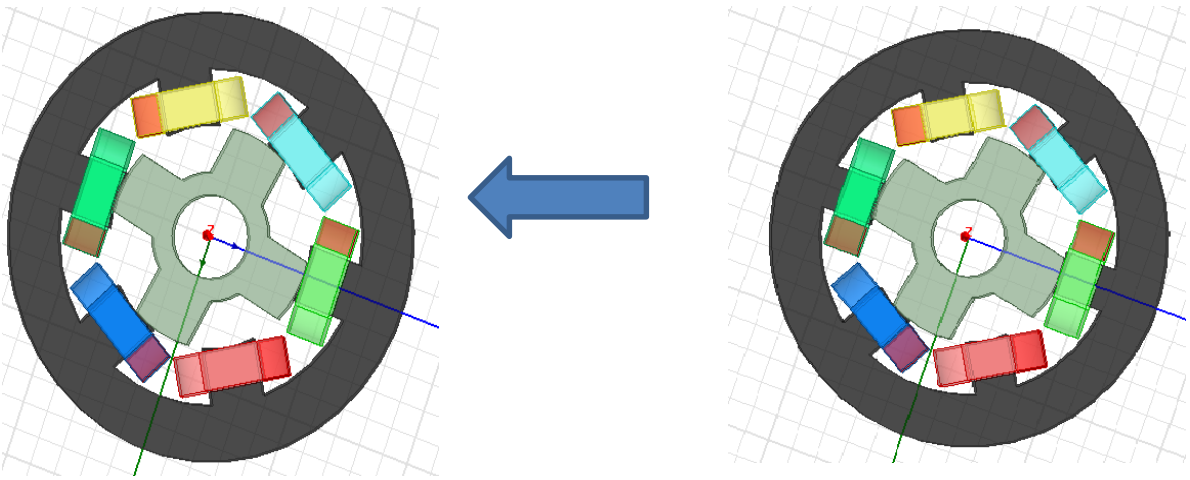
الجدول 4-5 القياسات التجريبية للمحرك قبل التعديل

الوزن [g]	القوة [N]	العزم المقابل[Nm]	التيار المستجر[A]	التحميل الكهربائي[ATs]
100	0.98	0.068	0.33	165
200	1.96	0.137	0.43	215
300	2.94	0.205	0.53	265
400	3.92	0.27	0.62	310

4.4 تعديل المحرك:

بالاعتماد على النتائج التي توصلنا لها في الفصل السابق فإنه ينبغي تعديل نسبة بناء الجزء الدائر من α= 0.43 إلى α= 0.38، وتعديل نسبة بناء الجزء الثابت من γ = 0.4 إلى γ = 0.5 مع بقاء الأبعاد الأخرى دون أي تعديل.

يبين الشكل 4-3 التعديل الذي جرى على المحرك.



الشكل 4-3 التعديل الذي تم تنفيذه على المحرك

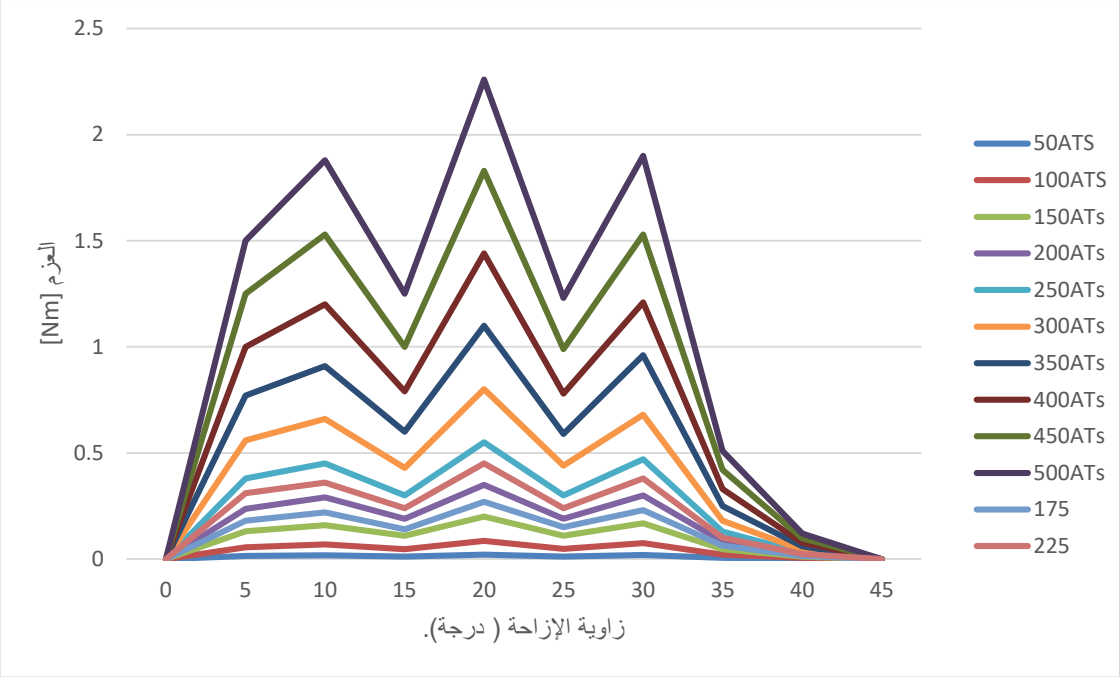
نجد من الشـكل 4-3 زيادة في أبعاد أقطاب الجزء الثابت ونقصـانًا في أبعاد أسـنان الدائر للمحرك بعد التعديل.

يبين الجدول 4-6 نتائج النمذجة والمحاكاة لتغير قيم العزم بالنســـبة إلى زاوية الإزاحة عند قيم التحميل الكهربائي المختلفة للمحرك بعد التعديل.

الجدول 4-6 تغير قيم العزم بالنسبة لزاوية الإزاحة للمحرك بعد التعديل

التحميل الكهربائي [Ats]	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0	زاوية إزاحة الدائر [درجة]
50	0	0.001	0.005	0.019	0.012	0.021	0.011	0.017	0.014	0	العزم [Nm]
100	0	0.005	0.02	0.075	0.048	0.086	0.046	0.069	0.056	0	
150	0	0.011	0.046	0.169	0.11	0.2	0.11	0.16	0.131	0	
175	0	0.015	0.063	0.23	0.15	0.27	0.14	0.22	0.18	0	
200	0	0.019	0.082	0.3	0.19	0.35	0.19	0.29	0.237	0	
225	0	0.024	0.1	0.38	0.24	0.45	0.24	0.36	0.31	0	
250	0	0.03	0.13	0.47	0.3	0.55	0.3	0.45	0.38	0	
300	0	0.043	0.18	0.68	0.44	0.8	0.43	0.66	0.56	0	
350	0	0.06	0.25	0.96	0.59	1.1	0.6	0.91	0.77	0	
400	0	0.077	0.33	1.21	0.78	1.44	0.79	1.2	1	0	
450	0	0.097	0.42	1.53	0.99	1.83	1	1.53	1.25	0	
500	0	0.12	0.51	1.9	1.23	2.26	1.25	1.88	1.5	0	

إذ تمثل تغيرات العزم بيانياً بالنسبة إلى زاوية الأزاحة للمحرك بعد التعديل في الشكل 4-4



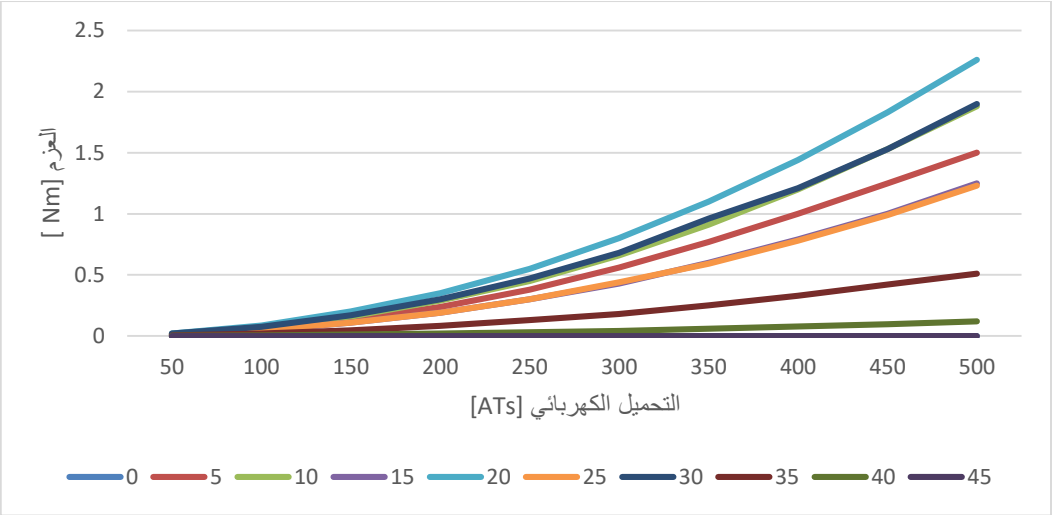
الشكل 4-4 التمثيل البياني لتغيرات العزم مع زاوية الإزاحة للمحرك بعد التعديل

ويبين الجدول 4-7 نتائج تغيرات العزم بالنسبة إلى التحميل الكهربائي عند كل زاوية من زوايا الإزاحة

الجدول 4-7 تغيرات العزم بالنسبة إلى التحميل الكهربائي للمحرك بعد التعديل

زاوية الازاحة (درجة)	500	450	400	350	300	250	200	150	100	50	التحميل الكهربائي [Ats]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	العزم [[Nm
5	1.5	1.25	1	0.77	0.56	0.38	0.237	0.131	0.056	0.014	
10	1.88	1.53	1.2	0.91	0.66	0.45	0.29	0.16	0.069	0.017	
15	1.25	1	0.79	0.6	0.43	0.3	0.19	0.11	0.046	0.011	
20	2.26	1.83	1.44	1.1	0.8	0.55	0.35	0.2	0.086	0.021	
25	1.23	0.99	0.78	0.59	0.44	0.3	0.19	0.11	0.048	0.012	
30	1.9	1.53	1.21	0.96	0.68	0.47	0.3	0.169	0.075	0.019	
35	0.51	0.42	0.33	0.25	0.18	0.13	0.082	0.046	0.02	0.005	
40	0.12	0.097	0.077	0.06	0.04	0.03	0.019	0.011	0.005	0.001	
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

مُثّل الجدول 4-7 بيانيًا في الشكل 4-5:



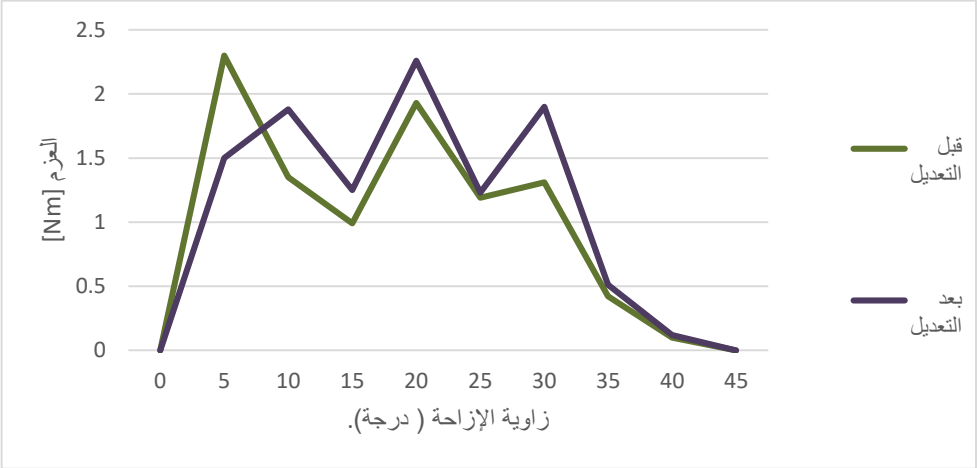
الشكل 4-5 التمثيل البياني لتغيرات العزم بالنسبة إلى التحميل الكهربائي للمحرك بعد التعديل

بالمقارنة بين قيم العزم للمحرك قبل التعديل وبعد التعديل نلحظ مايأتي:

1- تحســـن منحني العزم بيانيًا و اقترابه من الشـــكل المثالي لمنحني تغير العزم لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة مع زوايا الإزاحة

2- زيادة قيمة العزم الوسطي للمحرك بنسبة 18% بعد التعديل.

ويبين الشــكل 4-6 مقارنة للخط البياني لتغير العزم مع زاوية الإزاحة قبل وبعد تعديل المحرك عند قيمة التحميل الكهربائي نفسها وهي [ATs] 500.



الشكل 4-6 مقارنة الخط البياني لتغيرات العزم بالنسبة لزاوية الازاحة للمحرك قبل و التعديل وبعده عند التحميل الكهربائي 500ATs

الفصل الخامس

5 التطبيق العملي للمحرك الكهربائي ذي المقاومة المغناطيسية المتغيرة المعدل والحصول على النتائج التجريبية و مقارنتها مع نتائج النمذجة و المحاكاة

يتضمن التطبيق العملي تنفيذ النتائج النظرية التي توصلنا إليها ضمن الفصول السابقة على المحرك المخبري الموجود في قسم هندسة الطاقة الكهربائية وفق المراحل الآتية:

1- تنفيذ دارة القيادة و التحكم
2- فك المحرك و تعديل الجزأين الثابت و الدائر وفق نسب البناء المثالية و إعادة التركيب
3- إجراء القياسات و النتائج التجريبية

5.1 تنفيذ دارة القيادة والتحكم[19] :

تؤمن هذه الدارة تغذية ملفات أقطاب الثابت بتتابع مناسب لعمل المحرك ودورانه باستمرار.

تؤمن هذه الدارة تقطيع التوتر المستمر وتحويله إلى نبضات وفق مستلزمات تغذية ملفات المحرك ومن أجل ذلك يمكن استخدام الترانزستور والثايرستور، وهناك أنواع عدة من الترانزستورات التي يمكن استخدامها لهذا الغرض.

ولأن دارتنا تحتاج إلى توترات مستمرة عالية وكذلك تيارات كبيرة كان لا بد من استخدام ترانزستورات MOSFET ذات المزايا والمواصفات المناسبة لدارتنا ونذكر من هذه المزايا:

– التوصـــيل فيها يتم من خلال قناة يتحكم بها بوســـاطة حقل كهربائي ناجم عن جهد مطبق على القطب المســمى بالبوابة ولا توجد هنا وصـــلات مشـــحونة أماميًا كما في الترانزســـتورات العادية وهذا يعني أن البوابة لا تستجر أي تيار.

– هناك قطبيتان لهذا النوع من الترانزســـتورات ذي القناة n الذي يســـتخدم الإلكترونات للتوصـــيل وكذلك ذو القناة (P) الذي يستخدم الثقوب للتوصيل.

– إن تيار الإشباع في المصرف (Drain) يتزايد ببساطة مع تغير جهد البوابة وهناك تيار مستمر صفري في البوابة.

– يمتاز كذلك أن مقاومته صغيرة جدًا عند حالات العمل في دارات التقطيع.

وقد ظهرت في الآونة الأخيرة ترانزستورات (IGBT) وهي (MOSFET) المعدلة فهي تحوي شريحة سيلكونية هجينة مع وصلة (P–n) مشكلة تحديدًا في الخلف، وهذه الوصلة تسبب تخفيض جهد الحالة الناقلة بسبب حقن الشـحن الحاملة عند حالة العمل للترانزسـتور وهو يحتاج إلى تيار صـغير لبوابته لتأمين عمل الترانزسـتور ويمكن أن يمرر تيارات وتوترات عالية بين المنبع والمصـــرف وهذا ما يجعل هذا النوع من الترانزســـتورات مناســـبة جدًا لاستخدامها في دارات القيادة لمحركات التيار المستمر ولاسيما محركنا محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة.

في هذه الدراسة ستنفذ هذه الدارة بحيث تؤمن تقطيع التغذية المستمرة وتتابع التغذية لملفات الثابت حتى يعمل المحرك ضـــمن منظومته عملًا متزامنًا باســـتخدام مجموعة ترانزســـتورات (IGBT) وهذا النوع من الترانزســـتورات يمتاز بحاجته إلى تيار قدح صغير ويؤمن تيار عبور كبير.

5.1.1 المبردات المطلوب استخدامها[19] :

إن مردود الترانزستور ينخفض انخفاضًا كبيرًا كلما ارتفعت درجة حرارة الوصلات الداخلية، وهذه الحرارة تنشأ عند مرور التيار في أثناء الاستخدام الدائم لذلك يعدُّ التبريد من الأمور الأساسية في عمل الترانزستور لتخفيف الحرارة في أنصاف النواقل.

تستخدم المبردات ضمن الدارات لنقل الحرارة من الترانزستور إلى المشع ومنها للهواء وتحسب الاستطاعة الحرارية المنقولة من العلاقة:

$$P = \frac{T_1 - T_2}{R} \qquad \textbf{1-5}$$

إذ T_1، T_2 درجة حرارة كل جزء وتعطى بالدرجات

P الاستطاعة الحرارية

R المقاومة الحرارية وتعطى بـ (C°/W)

ترتبط المقاومة الحرارية بنوع التبريد وكيفية الربط لذلك تُجزأ إلى أقسام عدة:

$$R_{ja} = R_{jb} + R_{hN} + R_{h\theta} \qquad \textbf{2-5}$$

إذ إن هذه المقاومات بالتسلسل هي بين الوصلة والغلاف، والغلاف والمبرد، والمبرد والهواء ومن ثمّ تكون حرارة الوصلة:

$$T_{rj} = T_a + PR_{ja} \qquad \textbf{3-5}$$

حيث T_a تمثل درجة حرارة المحيط

تحسب الاستطاعة المشعة بالواط من العلاقة:

$$P_{rad} = 5.5\times10^{-8} E.A(T_s^{\,4} - T_a^{\,4}) \qquad \textbf{4-5}$$

إذ P_{rad} استطاعة المشع بالوات.

E استطاعة السطح وهي 0.9 لألمنيوم مدهون بالأسود.

T_s حرارة سطح المبرد بالكالفن K.

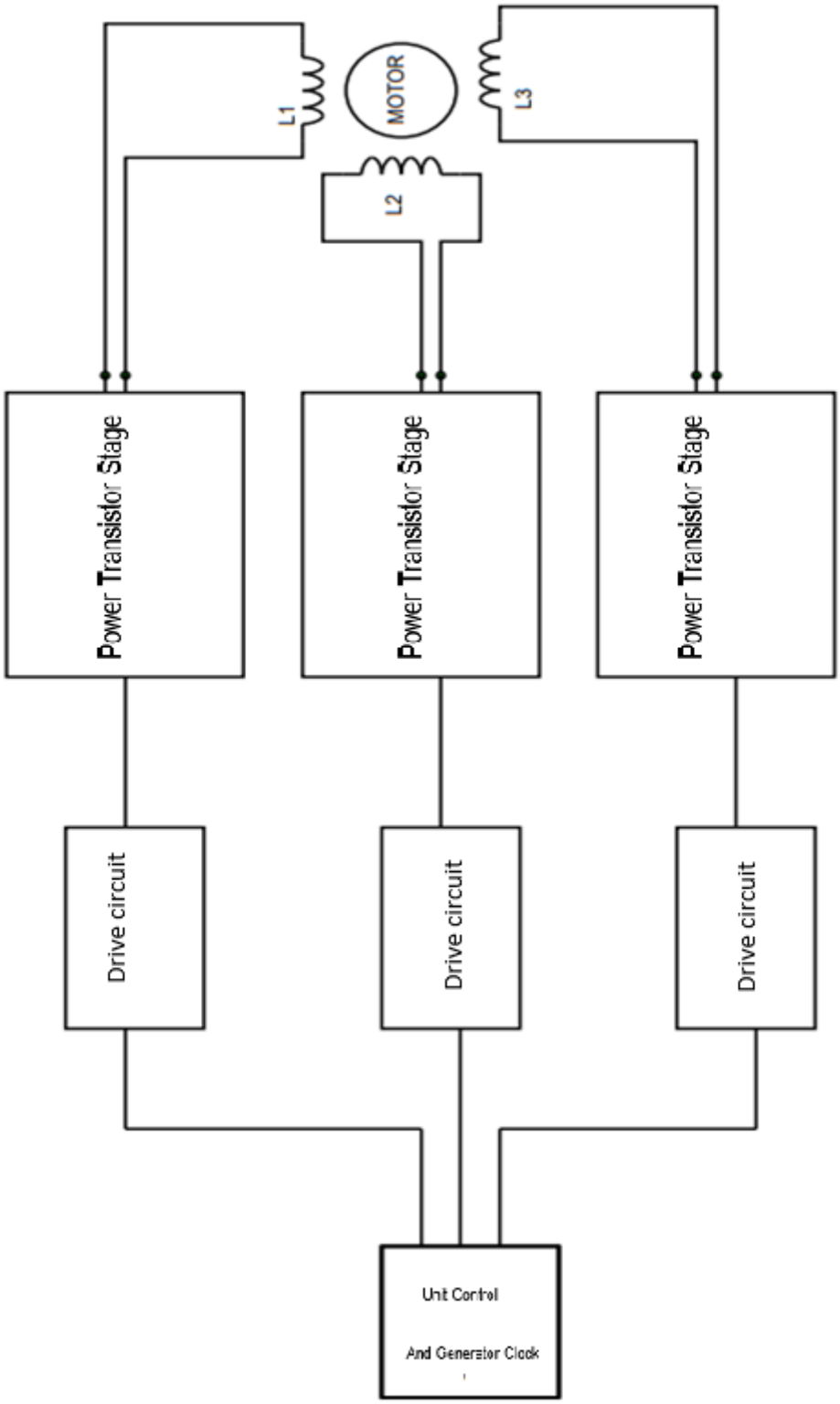
T_a حرارة المحيط الخارجي.

A السطح الخارجي للمبرد بالمتر المربع.

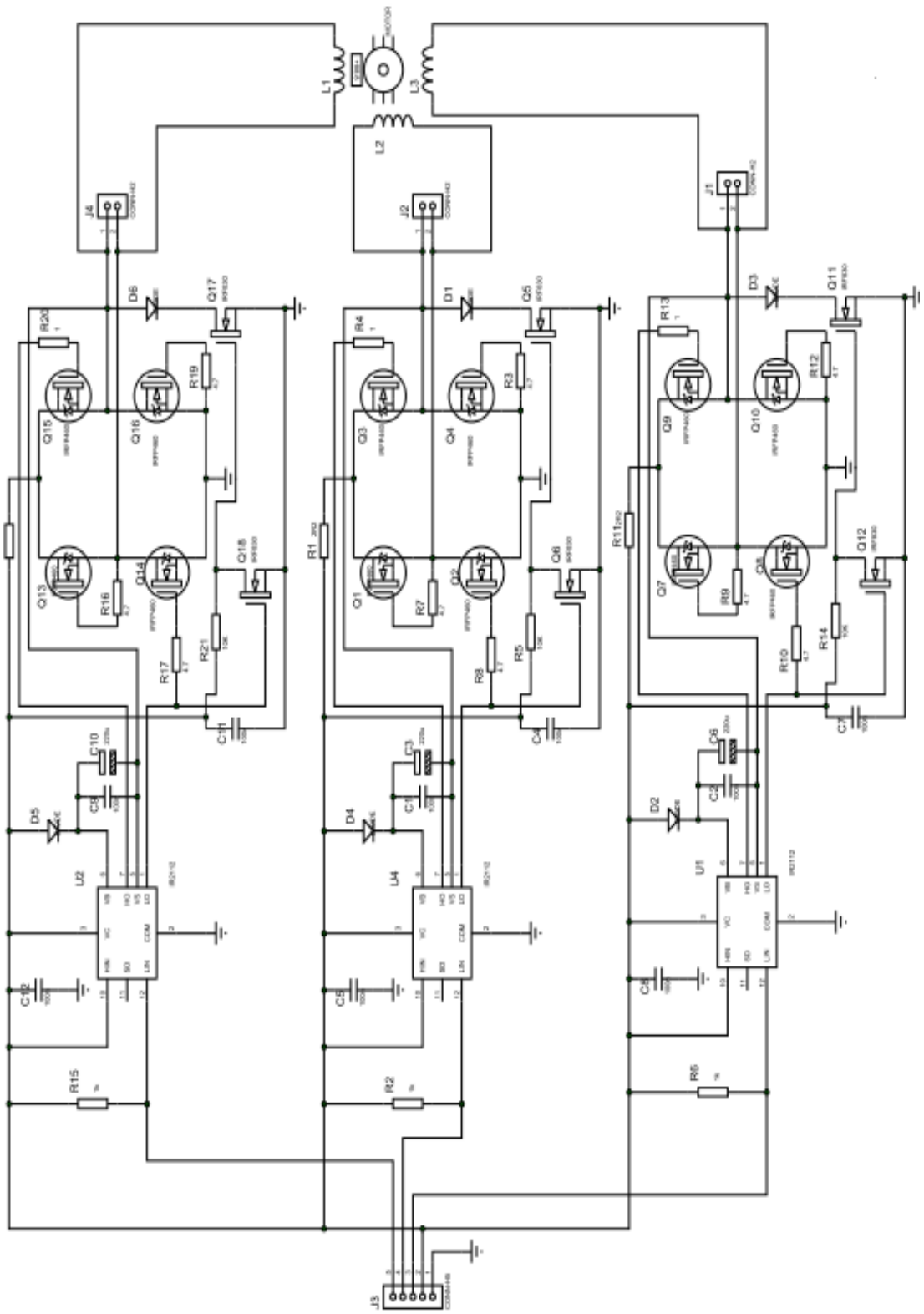
يتألف المخطط الصندوقي لدارة القيادة والتحكم من ثلاثة أجزاء رئيسية هي:

- دارة القيادة و توليد نبضات القدح
- دارة التحكم ببوابات الترانزستورات
- دارة الترانزستورات المسؤولة عن تمرير التيار لملفات المحرك

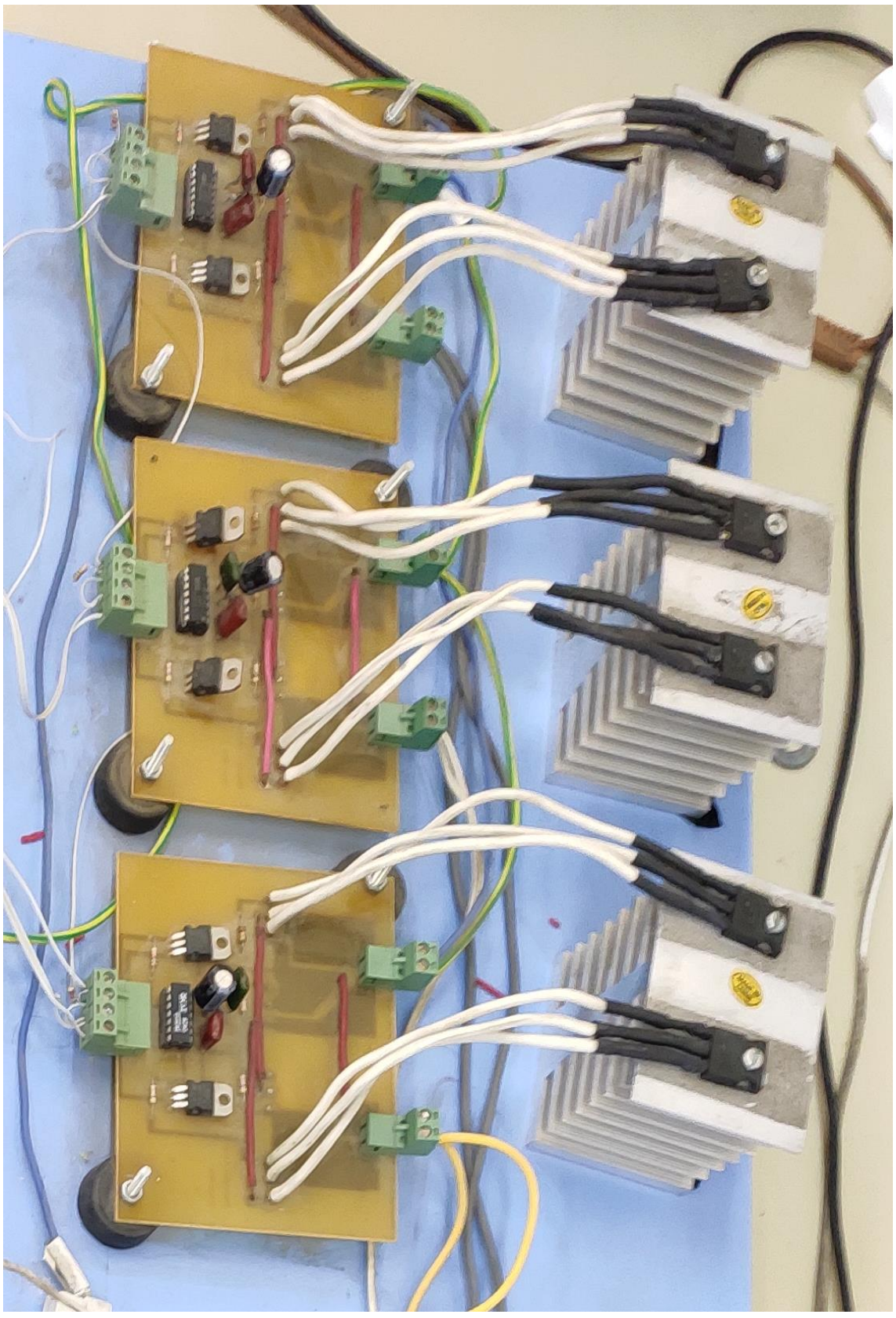
يبين الشكل 5-1 المخطط الصندوقي لدارة القيادة والتحكم ويظهر من الشكل 5-2 تفاصيل دارة القيادة والتحكم أما الشكل 5-3 فهو التطبيق العملي لدارة القيادة و التحكم.



الشكل 5-1 المخطط الصندوقي لدارة القيادة و التحكم

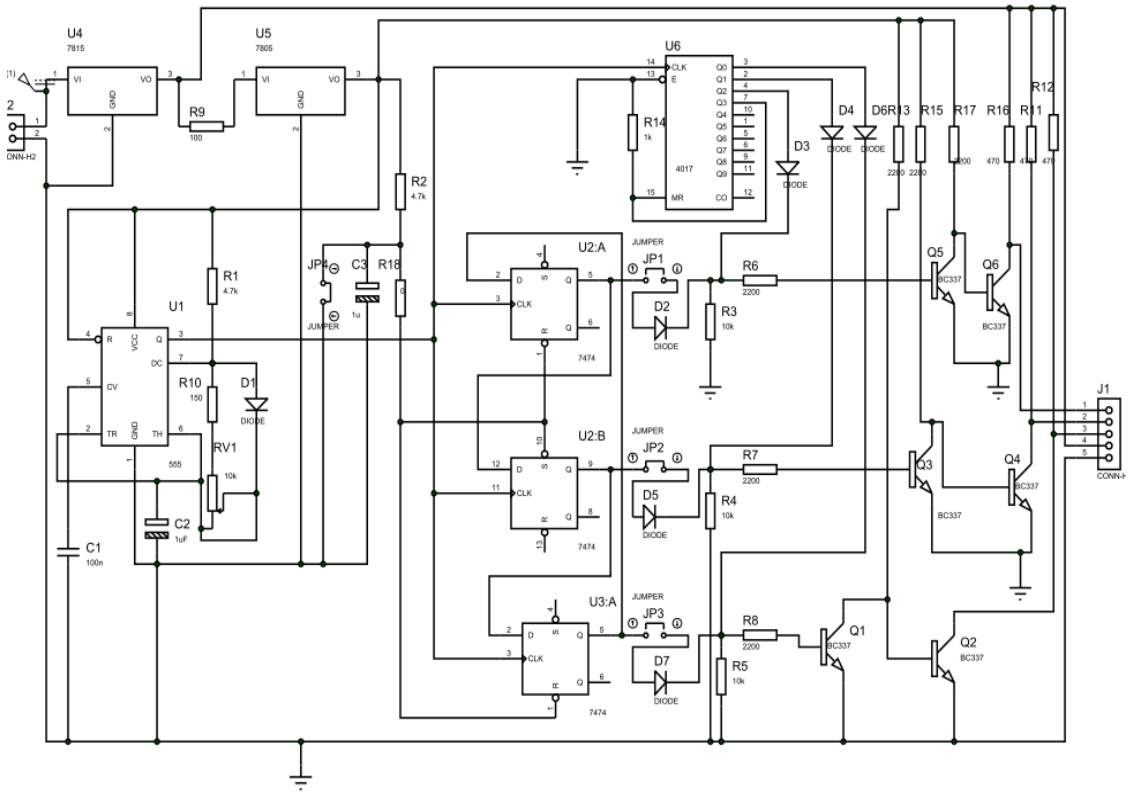


الشكل 5-2 تفاصيل دارة القيادة و التحكم

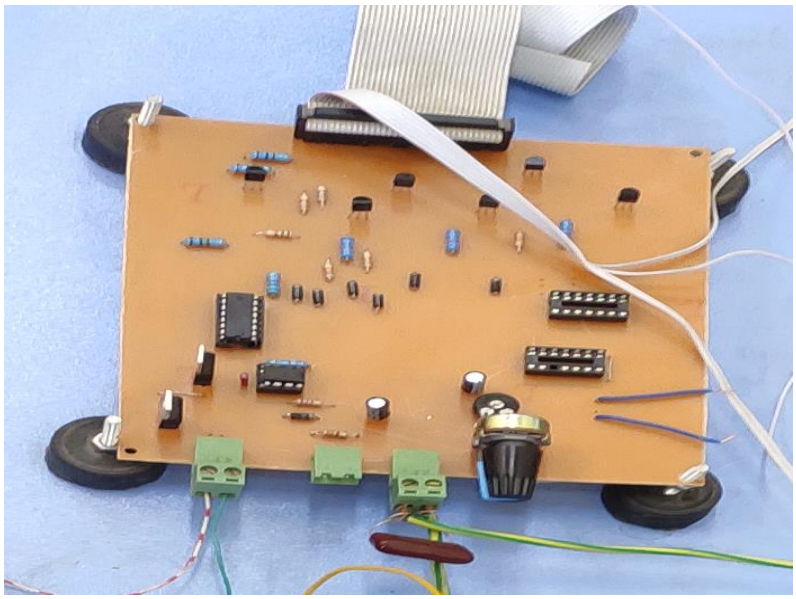


الشكل 5-3 التطبيق العملي لدارة القيادة والتحكم المبينة في الشكل السابق

يبين الشكل 5-4 دارة توليد النبضات على بوابات الترانزستورات التي نستطيع بوساطتها تعديل عرض النبضة والتحكم بسرعة دوران المحرك أما الشكل 5-5 يبين التنفيذ العملي لهذه الدارة.

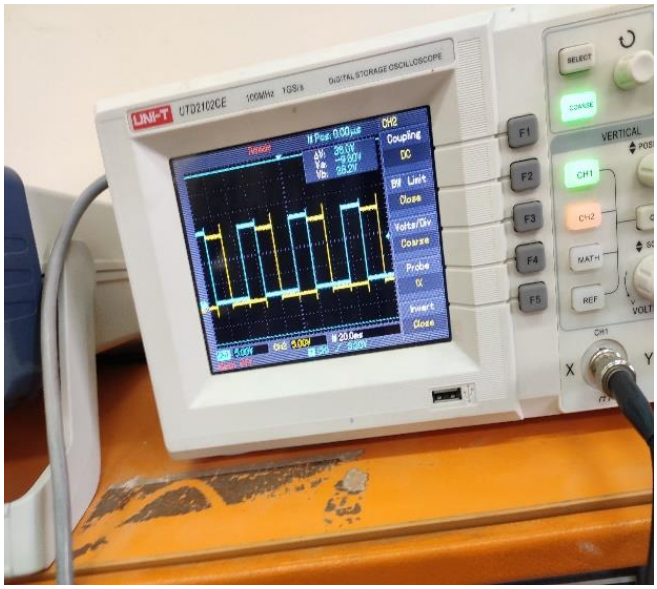


الشكل 5-4 دارة توليد النبضات



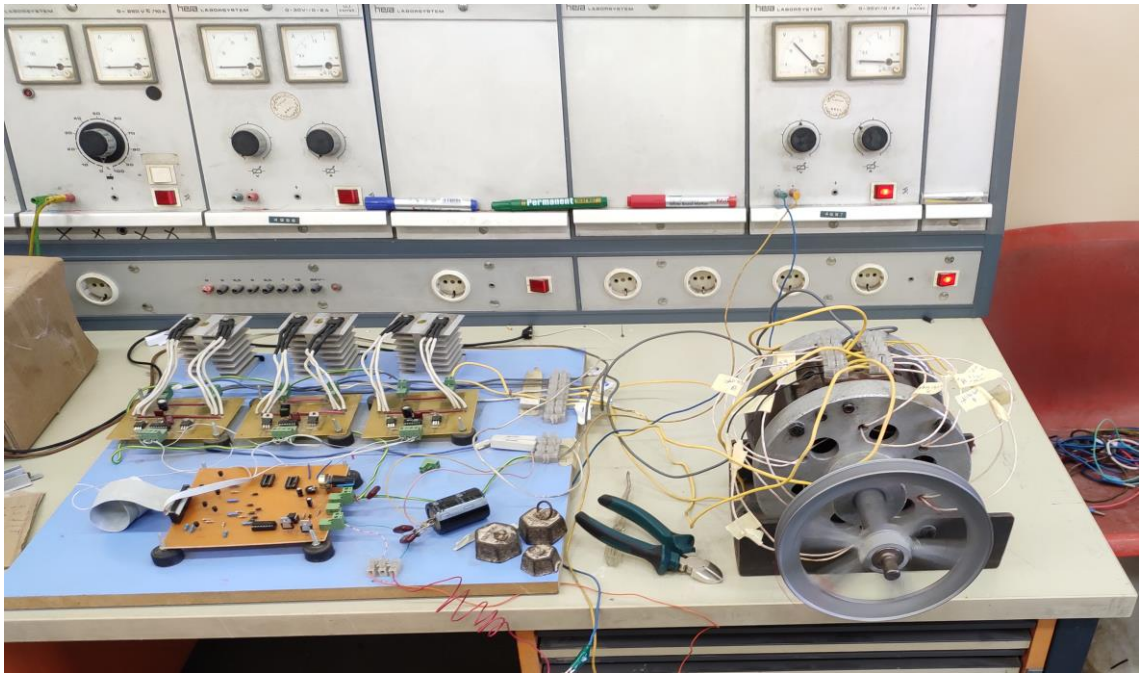
الشكل 5-5 التنفيذ العملي لدارة توليد النبضات

يبين الشكل 5-6 نبضات القدح الناتجة من دارة توليد النبضات للطورين الأول والثاني



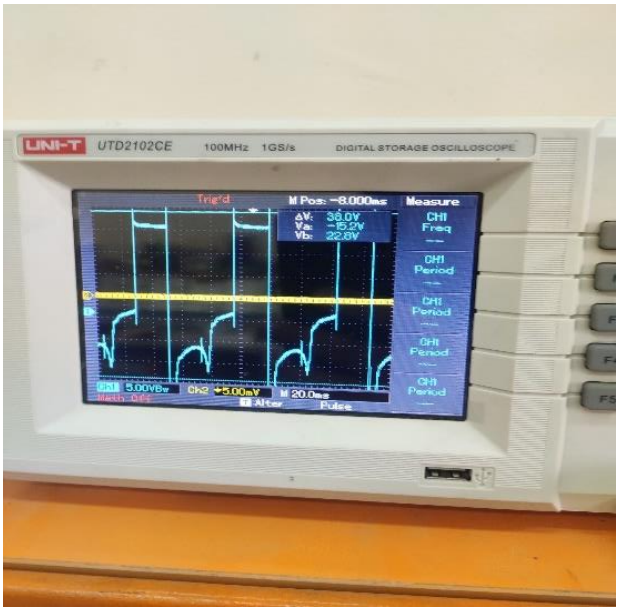
الشكل 5-6 نبضات القدح الناتجة من دارة توليد النبضات

يبين الشكل 5-7 دارة القيادة والتحكم المنفذة كاملة والموصولة مع محرك المقاومة المغناطيسية المخبري.



الشكل 5-7 دارة القيادة و التحكم المنفذة مع المحرك

يبين الشكل 5-8 التوتر المستمر المقطع الناتج من دارة القيادة والتحكم على أحد أطوار المحرك.



الشكل 5-8 التوتر المستمر المقطع على أحد أطوار المحرك

5.2 فك المحرك وتعديل الجزئين الثابت والدائر وفق نسب البناء المثالية وإعادة التركيب.

حتى نصل بعزم المحرك المخبري إلى العزم الأمثل بحسب دراستنا ينبغي تعديل نسبة بناء الجزء الدائر من $\alpha = 0.43$ إلى النسبة المثالية $\alpha = 0.38$.

ولإتمام ذلك يجب فك المحرك إلى أجزائه وتعديل زاوية سن الدائر نحو النقصان لأن الزاوية بين سنيّن متتاليين ثابتة ولاتمام ذلك فقد نُنقص عرض سن الدائر بمقدار 2 [mm].

أما الجزء الثابت فينبغي تعديل نسبة بناءه من $\gamma=0.4$ إلى نسبة البناء المثالية $\gamma=0.5$ ولذا يجب زيادة زاوية قطب الثابت لأن الزاوية بين قطبين متتاليين ثابتة لذلك فقد زيد عرض قطب الثابت بمقدار 4[mm] بإضافة صفائح له.

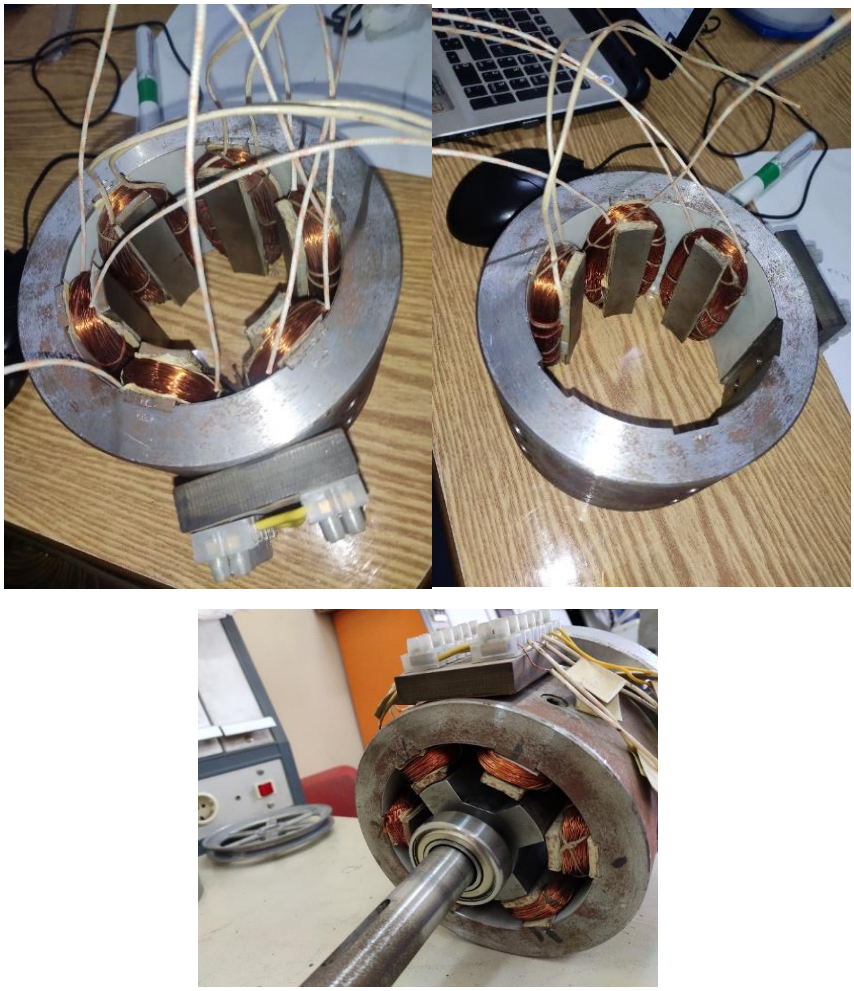
يبين الشكل 5-9 المحرك بعد فكه إلى أجزائه





الشكل 5-9 المحرك بعد فكه لأجزاء

ويبين الشكل 5-10 إعادة تركيب ملفات الثابت والجزء الثابت بعد التعديل.



الشكل 5-10 تركيب ملفات الجزء الثابت و الجزء الدائر بعد التعديل

5.3 القياسات والنتائج التجريبية:

يُقاس عزم المحرك عمليًا بتركيب بكرة على محور الجزء الدائر التي سيمثل نصف قطرها ذراع القوة وهو بطول [cm]7 في تجربتنا ومن ثم ربط حبل مهمل الكتلة على البكرة وتعليق أوزان مختلفة في الطرف الآخر من الحبل وتشـغيل المحرك حتى يصـبح قادرًا على رفع الثقل عندها نسـتطيع حسـاب قيمة العزم المقدم من المحرك والتيار المستجر عند كل ثقل بشكل تجريبي.

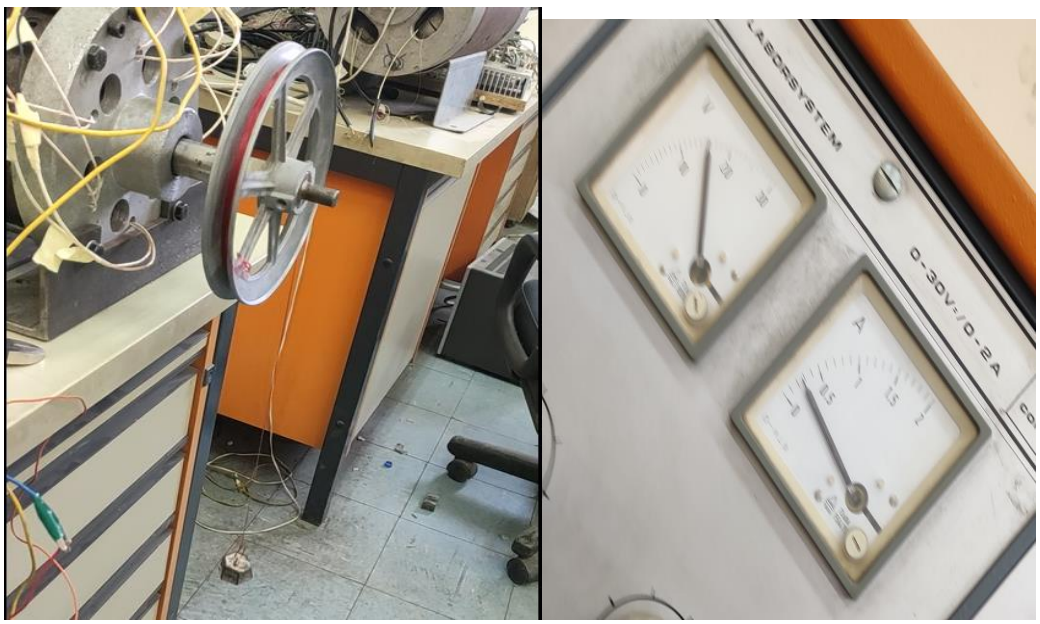
5.3.1 التجربة الأولى عند وزن [g] 100:

يبين جدول 5-1 النتائج التجريبية عند وزن [g] 100 و قيمة التيار المســـتجر و التحميل الكهربائي المقابل:

جدول 5-1 النتائج التجريبية عند وزن [g]100

الوزن	القوة المقابلة	العزم	التيار المستجر	التحميل الكهربائي
100 [g]	0.98 [N]	0.068 [Nm]	0.3 [A]	150 [ATs]

ويبين الشكل 5-11 النموذج التجريبي والتيار المستجر عند وزن [g]100.



الشكل 5-11 النموذج التجريبي و التيار المستجر عند وزن [g]100

قيمة العزم الوسطي النظرية الناتجة من النمذجة والمحاكاة في الفصل السابق وفق برنامج Ansys عند التحميل الكهربائي [ATs] 150 هي [Nm] 0.09.

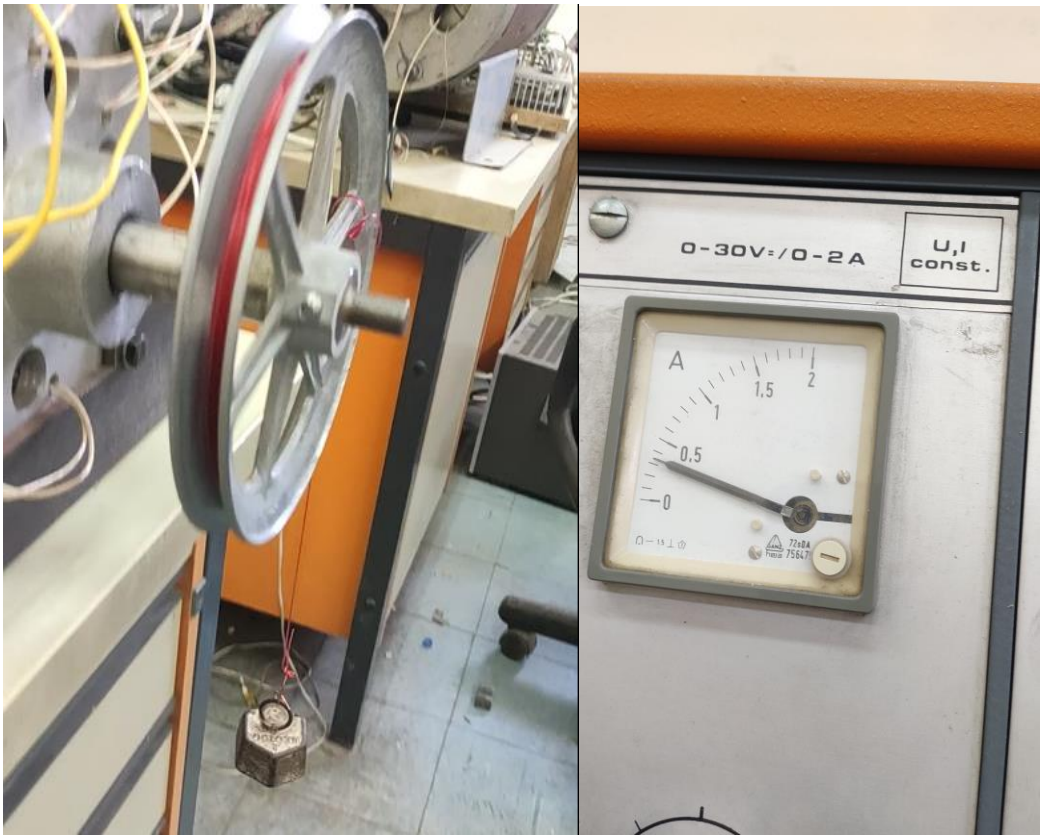
5.3.2 التجربة الثانية عند وزن [g] 200:

يبين جدول 5-1 النتائج التجريبية عند وزن [g] 200 و قيمة التيار المســـتجر و التحميل الكهربائي المقابل:

جدول 5-2 النتائج التجريبية عند وزن [g]200

الوزن	القوة المقابلة	العزم	التيار المستجر	التحميل الكهربائي
200 [g]	1.96 [N]	0.137 [Nm]	0.35 [A]	175 [ATs]

ويبين الشكل 5-12 النموذج التجريبي والتيار المستجر عند وزن [g]200.



الشكل 5-12 النموذج التجريبي و التيار المستجر عند وزن [g]200

قيمة العزم الوسطي النظرية الناتجة من النمذجة والمحاكاة في الفصل السابق وفق برنامج Ansys عند التحميل الكهربائي [ATs] 175 هي [Nm] 0.127.

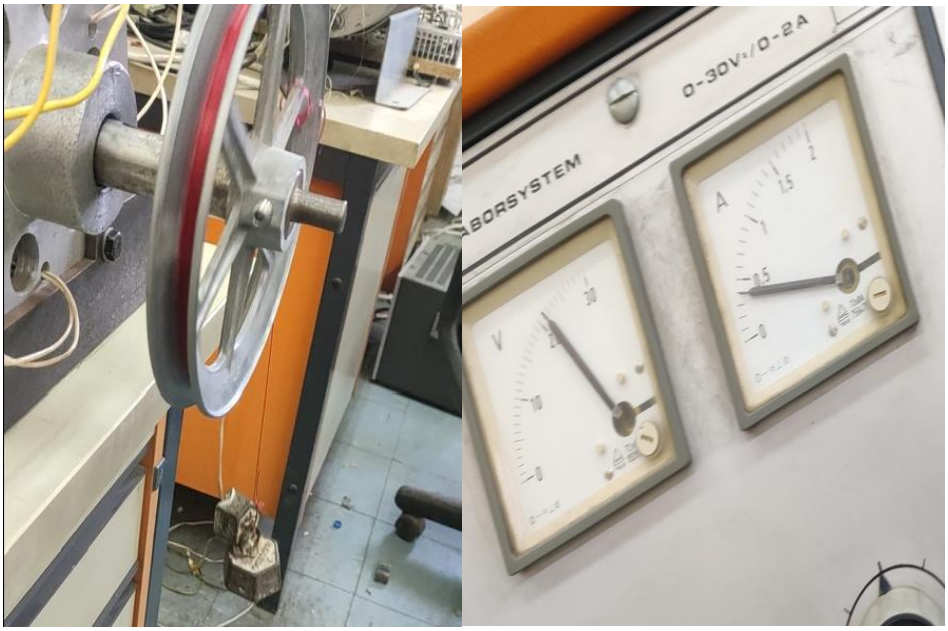
5.3.3 التجربة الثالثة عند وزن [g] 300:

يبين جدول 5-1 النتائج التجريبية عند وزن [g] 300 و قيمة التيار المســـتجر و التحميل الكهربائي المقابل:

جدول 5-3 النتائج التجريبية عند وزن [g]300

الوزن	القوة المقابلة	العزم	التيار المستجر	التحميل الكهربائي
300 [g]	2.94 [N]	0.205[Nm]	0.45 [A]	225 [ATs]

ويبين الشكل 5-13 النموذج التجريبي والتيار المستجر عند وزن [g]300.



الشكل 5-13 النموذج التجريبي و التيار المستجر عند وزن [g]300

قيمة العزم الوسطي النظرية الناتجة من النمذجة والمحاكاة في الفصل السابق وفق برنامج Ansys عند التحميل الكهربائي [ATs] 225 هي [Nm] 0.21.

5.3.4 التجربة الرابعة عند وزن [g] 400:

يبين الجدول 5-4 النتائج التجريبية عند وزن [g] 400 و قيمة التيار المســـتجر و التحميل الكهربائي المقابل:

الجدول 5-4 النتائج التجريبية عند وزن [g]400

الوزن	القوة المقابلة	العزم	التيار المستجر	التحميل الكهربائي
400 [g]	3.92[N]	0.27[Nm]	0.5 [A]	250 [ATs]

ويبين الشكل 5-13 النموذج التجريبي والتيار المستجر عند وزن [g]400.



الشكل 5-14 النموذج التجريبي و التيار المستجر عند وزن [g]400

قيمة العزم الوسطي النظرية الناتجة من النمذجة والمحاكاة في الفصل السابق وفق برنامج Ansys عند التحميل الكهربائي [ATs] 250 هي [Nm] 0.26.

5.3.5 التجربة الخامسة عند وزن [g] 500:

يبين الجدول 5-4 النتائج التجريبية عند وزن [g] 500 و قيمة التيار المســـتجر و التحميل الكهربائي المقابل:

جدول 5-5 النتائج التجريبية عند وزن [g]500

الوزن	القوة المقابلة	العزم	التيار المستجر	التحميل الكهربائي
500 [g]	4.9[N]	0.34[Nm]	0.6 [A]	300 [ATs]

ويبين الشكل 5-13 النموذج التجريبي والتيار المستجر عند وزن [g]500.



الشكل 5-15 النموذج التجريبي و التيار المستجر عند وزن [g]500

قيمة العزم الوسطي النظرية الناتجة من النمذجة والمحاكاة في الفصل السابق وفق برنامج Ansys عند التحميل الكهربائي [ATs] 300 هي [Nm] 0.37.

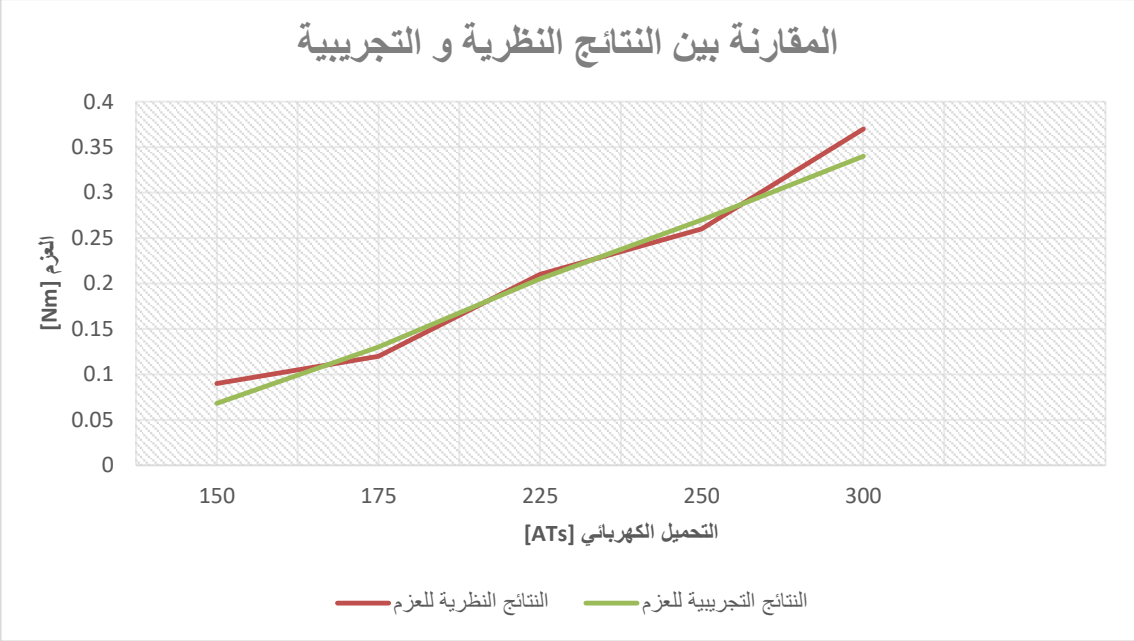
5.4 المقارنة بين النتائج النظرية والتجريبية:

يبين الجدول 5-6 مقارنة بين النتائج النظرية والتجريبية للعزم الوســـطي عند كل قيمة من قيم التحميل الكهربائي:

جدول 5-6 مقارنة النتائج النظرية و التجريبية

التحميل الكهربائي	150	175	225	250	300
النتائج النظرية للعزم	0.09	0.127	0.21	0.26	0.37
النتائج التجريبية للعزم	0.068	0.137	0.205	0.27	0.34

ولتوضيح المقارنة أكثر يبين الشكل 5-16 التمثيل البياني للنتائج المبينة في الجدول 5-6



الشكل 5-16 التمثيل البياني للنتائج النظرية و التجريبية

نلحظ من الشكل 5-16 شبه تطابق بين النتائج النظرية والتجريبية وهذا يدل على صحة نسب بناء الجزء الثابت و الدائر المثالية التي وصلنا لها في دراستنا أما الختلافات البسيطة الظاهرة فهي ناتجة عن اختلاف خصائص المعدن الفعلية عن النظرية الموجودة في برنامج Ansys.

6 النتائج و التوصيات

6.1 الخاتمة

تم دراســة ونمذجة ومحاكاة مجموعة كبيرة من المحركات الكهربائية ذات المقاومة المغناطيســية المتغيرة المختلفة عن بعضـها البعض بالأبعاد وتم الوصـول للأبعاد المناسبة للعزم الجيد والمناسبة للعزم الأمثل من خلال برنامج Ansys ثلاثي الأبعاد حيث تبين لنا تحسن كبير بأداء المحرك عند الوصول للعزم الأمثل.

كما تم انجاز قاعدة بيانات لتصــميم محركات المقاومة المغناطيســية المتغيرة بمختلف نماذجها وتبين لنا أن العمل قابل للتنفيذ من خلال التطبيق العملي للمحرك الكهربائي المعدل وفق النتائج التي توصـلنا لها في بحثنا وتحسن أداءه وعزمه بشكل ملحوظ.

سنعرض أهم النتائج والتوصيات في بحثنا:

6.2 النتائج:

- يختلف مجال عمل كل طور من أطوار المحرك بالنسـبة لزاوية الإزاحة حسـب عدد أقطاب كل من الجزء الثابت والجزء الدائر ففي محرك المقاومة المغناطيســية المتغيرة ذو 6/8 أقطاب يبدأ مجال عمل الطور من حالة التطابق التام عند الزاوية 0 درجة إلى حالة عدم التطابق عند الزاوية 30 درجة أما في المحرك ذو 4/6 أقطاب يبدأ مجال عمل الطور من حالة التطابق التام عند الزاوية 0 درجة وحتى عدم التطابق عند الزاوية 45 درجة، و من خلال جداول نتائج تغير قيم العزم مع تغير زوايا الإزاحة و التي عرضــت في الفصــل الثالث نلاحظ وجود ارتباط وثيق بين عزم المحرك و زاوية الازاحة للدائر أي عندما يكون الدائر سـاكن في موضــع التقابل أو عدم التقابل عند نهاية منطقة عمل الطور فإن العزم يساوي الصفر مهما تغيرت قيم التحميل الكهربائي لأن المقاومة المغناطيسية تكون في أدنى قيمة لها.

- يعتمد مبدأ عمل محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة على الجذب والدفع المغناطيسي بين أقطاب الثابت وأسنان الدائر لذلك تختار خطوط السيالة المغناطيسية أفضل مسار لها لتقديم عزم قوي لجذب الدائر ونظراً للارتباط الوثيق بين زاوية الإزاحة وعزم المحرك كما ذكر أعلاه فإن الأسلوب الأساسي الذي تم فيه دراسة تأثير تغير زاوية الإزاحة هو التعديل في أبعاد أقطاب الثابت وأسنان الدائر.

لوحظ عند تصغير أبعاد أسنان الدائر إلى حد معين حدوث ظاهرة التشبع المغناطيسي مما ينعكس سلباً على مجال تغير أبعاد الجزء الدائر ويجعله محدوداً لذلك وللتغلب على هذه النقطة السلبية دُرس تأثير التشبع المغناطيسي على عزم المحرك وكيفية عمله ضمن الدارة الخطية والمشبعة وتأثير عامل النفاذية المغناطيسية عليه.

وجدنا أن قيم العزم المقدم من المحرك تصبح نفسها سواء كانت الدارة في حالة إشباع أو عدم اشباع عند نفس قيم التحميل الكهربائي وذلك عند اختيار أبعاد مناسبة للإطار الخارجي للمحرك (النواة) وعند طول ثغرة هوائية $0.5[mm]$ كحد أدنى وعندها يتم اهمال مقاومة الجزء الحديدي للمحرك لذلك أُعتمد في دراستنا على ثغرة هوائية بطول $0.5[mm]$ واستطعنا بذلك تغطية كافة قيم تغير الزاوية بين الثابت والدائر ودراسة تأثيرها على العزم المقدم من المحرك.

- عُدل أبعاد أقطاب الجزء الثابت بالاعتماد على تعديل نسبة بناء هذا الجزء و التي هي عبارة عن نسبة زاوية قطب الثابت إلى الزاوية بين قطبين متتاليين و كذلك عُدل أبعاد أسنان الجزء الدائر بالاعتماد على نسبة بناء هذا الجزء و تم دراسة تأثير تغير كل نسبة على العزم حتى نستطيع تحديد تأثير كافة قيم زوايا الإزاحة بين الثابت و الدائر على عزم المحرك و وجد بنهاية النمذجة باستخدام طريقة العناصر المنتهية في بيئة Ansys ثلاثي الأبعاد و بعد المقارنة بين عدد كبير من المحركات الناتجة من النمذجة بعد تعديل نسب البناء لها أننا نصل لمميزة عزم

جيدة و فعالة لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة عندما تكون نسبة بناء الجزء الثابت محصورة بين 0.35 و حتى 0.52 و نسبة بناء الجزء الدائر محصورة بين 0.25 و حتى 0.4.

وبناء عليه أُجريت اختبارات لهذه النسب على كافة نماذج محركات المقاومة المغناطيسية المتغيرة ذات 3/4 أقطاب ومضاعفاتها وكذلك ذات 4/6 ومضاعفاتها وتبين صحة استخدام هذا النسب لكافة نماذج المحركات مما أدى إلى وضع دليل ارشادي واضح وعملي لاختيار أبعاد كل من أقطاب الثابت وأسنان الدائر للوصول إلى عزم فعال أثناء تصميم هذا النوع من المحركات.

- يستخدم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة في التطبيقات التي تحتاج إلى عزم ثابت وفي الغالب في تطبيقات الجر الكهربائي نظراً لما تتمتع به من عزم فعال لذلك تم اعتماد العزم الأمثل هو العزم الأعلى قيمة والأقرب للشكل الأمثل من حيث المميزة ومن خلال نتائج النمذجة باستخدام Ansys والمقارنة تبين أن محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة سواء كان 3/4 أقطاب أو 4/6 أقطاب أو مضاعفاتهما يصل إلى عزمه الأعظم والأمثل عند نسبة بناء 0.5 للجزء الثابت و0.38 للجزء الدائر.

و بالمقارنة مع الدراسة المرجعية[1] نلاحظ أن الباحث فيها قد وصل إلى بنية المحرك الأمثل عند نسبة بناء للجزء الثابت هي 0.49 و نسبة بناء للجزء الدائر عند 0.33 مع تعديل في سماكة النواة المعدنية من 12[mm] إلى 11.45[mm] و لكن قيمة العزم في هذه الدراسة و ضمن هذه البنية قد انخفضت مقابل زيادة في مردود المحرك بعد التعديل نظراً لانخفاض الضياعات فيه علماً أن الدراسة تمت على محرك 6/8 أقطاب دون تعميم على باقي نماذج محركات المقاومة المغناطيسية المتغيرة.

أما في هذه الأطروحة فقد وصلنا إلى النسب التي تعطي العزم الأعلى والأمثل مع المحافظة على مردود ثابت للمحرك دون أي تعديل في أي قيمة من محددات المحرك عدا عن أبعاد الأقطاب.

قام الباحث في الدراسة المرجعية [2] باستخدام أبعاد أقطاب غير منتظمة أي تختلف فيها قيمة زاوية القطب من ناحية الثغرة الهوائية عن قيمة زاوية القطب من ناحية النواة و توصلت هذه الدراسة إلى تحسن بقيمة العزم عندما تكون زاوية قطب الدائر من ناحية الثغرة عند 28.75 درجة و 60 درجة من ناحية النواة، و زاوية قطب الثابت من ناحية الثغرة هي 40 درجة و من ناحية النواة هي 30 درجة، حيث طبقت هذه الدراسة على محرك 4/6 أقطاب فقط و لا يمكن تعميمها عند تغير عدد الأقطاب بنفس القيم السابقة لذا تعتبر النسب التي وصلنا لها بنتائج هذه الأطروحة إضافة علمية جديدة و عامة نظراً لقدرتنا على تطبيقها على نطاق واسع في مختلف نماذج المحركات.

تم في الدراسة المرجعية[3] تعديل شكل قطب الجزء الدائر لإحداث ثغرة هوائية غير منتظمة ووجد بنتيجة هذه الدراسة تحسن في عزم المحرك عند استخدام أسنان دائر ذات شكل مائل ضمن قيم محددة أو أسنان ذات شكل مسنن لكن هذه الدراسة لم تتطرق إلى تغيير شكل القطب الثابت مما يحدد من مجال تغير زاوية الإزاحة بين الثابت والدائر.

- تختلف نسبة تحسن عزم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة قبل وبعد التعديل حسب مواصفات المحرك الأساسي الذي تم تعديله ومقارنته ومدى اقتراب وابتعاد محدداته عن المواصفات المثالية حيث نلاحظ في هذه الأطروحة تحسن عزم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة ذو 4/6 أقطاب بعد تطبيق المواصفات المثالية بنسبة 13% وبنسبة 18% لتحسن عزم المحرك ذو 6/8 أقطاب عما كان عليه المحرك الأساسي المماثل من حيث عدد الأقطاب.

من خلال الدراسة المرجعية[5] تبين تحسن عزم المحرك بمقدار 0.69% عند زيادة عرض قطب الدائر من 23 درجة إلى 25 درجة أي تم رفع نسبة بناء الجزء الدائر من 0.39 إلى 0.41 مع وجود ثقوب على أطراف كل من اقطاب الثابت والدائر مع تثبيت نسبة بناء الجزء الثابت ولوحظ من هذه الدراسة المرجعية انخفاض العزم بعد زيادة عرض قطب الدائر إلى 27 درجة أي رفع نسبة بناء الجزء الدائر إلى 0.45 سواء بوجود ثقوب على أطراف أقطاب الثابت والدائر أو عدم وجودها.

بالمقارنة مع النتائج التي توصلنا لها في هذه الأطروحة نلاحظ أن انخفاض العزم في الدراسة المرجعية [5] ناتج من اختيار نسب بناء للجزء الدائر خارج حدود العزم الفعال التي وصلنا لها في اطروحتنا والابتعاد عن القيم التي تعطي العزم الأعظم وعدم التطرق لنسبة بناء الجزء الثابت وبالتالي اهمال تأثير تغير الزاوية على العزم مما يثبت صحة ودقة النسب والنتائج التي وصلنا لها.

- لوحظ في التنفيذ العملي تحسن عزم المحرك المخبري الذي تمت التجارب عليه وذلك بعد تعديل نسبة بناء الجزء الثابت فيه من 0.4 إلى 0.5 وتعديل نسبة بناء الجزء الدائر فيه من 0.43 إلى 0.38 حسب النتائج التي وصلنا لها وبلغت نسبة التحسن بالعزم للمحرك المخبري 18% مما يدل على صحة النتائج النظرية الواردة في الأطروحة.

6.3 التوصيات

- ضــرورة تأمين نســخة أصــلية من برنامج Ansys نظرًا إلى المميزات الكبيرة و المفيدة لهذا البرنامج و الدقة في النتائج كما لاحظنا بعد التنفيذ العملي.
- إجراء دراســة معمقة لتأثير تغير نوع المعدن في عزم محركات المقاومة المغناطيســية المتغيرة و لاســيما مع الأصناف الحديثة من المعادن.
- إجراء دراسة معمقة لتأثير الثغرة الهوائية غير المنتظمة في عزم محركات المقاومة المغناطيسية المتغيرة.

Bibliography 7

[1] O. I. O. S. S. Chiweta Emmanuel Abunike, 22 8 2022. **"Intelligent Optimization of Switched Reluctance Motor Using Genetic Aggregation Response Surface and Multi-Objective Genetic Algorithm for Improved Performance,"** *energies*, pp. 1-23,

[2] A. K. H. M. A. a. H. H. Ekaterina Andriushchenko , 11 7 2022, **"Sensitivity Analysis for Multi-Objective Optimization of Switched Reluctance Motors,"** *machines*, pp. 1-16.

[3] J. L. G. J. Changwoo Lee, 21 5 2021, **"Shape Optimization-based design investigation of the switched reluctance motors regarding the target torque and current limitation,"** *springer-verlag Gmbh Germany*, pp. 1-12.

[4] K. A. P. T. P. P. S. a. M. I. Mahesh A.Patel , 31 1 2021, **"Design and optimisation of slotted stator tooth switched reluctance motor for torque enhancement for electric vehicle applications,"** *International journal of Ambient Energy*, pp. 1-6.

[5] A. P. M. F. Jingchen Liang, 2019, **"Torque Profile Optimization in Switched Reluctance Motor,"** *IEEE*, pp. 414-419.

[6] S. H.Terzioglu, , 2018, **"The Minimization of Torque Ripples of Segmental Type Switched Reluctance Motor by PSO,"** *International Journal of Intelligent Systems Applications in Engineering*, no. 4, p. 5.

[7] L. Rover, 2016 **"Rapid Design and Development of a Switched Reluctance Traction Motor,**".

[8] L. Q. Cong Ma, 2013, **"Design Considerations of Switched Reluctance Motors with Bipolar Excitation for Low Torque Ripple Applications,"** University of Nebraska, Lincoln.

[9] F. E. K. Mehmet Aytac Cinar, 2012, **"Design and Torque Profile Analysis of an Outer-rotor SR Motor,"** *University of Kocaeli,* vol. 88, p. 4.

[10] H. K. M. K. a. J.-w. A. Dong-HeeLee, 2012, **"High-Speed Tow Phase SRM for an Air Blower Drive,"** *International Jorurnal of Modern Engineering*, no. 12, p. 8.

[11] J. Z. ,. R. G. Haijnn Zhang, 2009, **"A Novel Method of Phase Current Compensation for Switched Reluctance Motor System Based on Finite Element,"** *journal of Computers,* vol. 4, no. 10, p. 8.

[12] Y. S. ,. M. G. Yusuf YASA, 2018, **"High-Speed Switched Reluctance Machine: Natural Frequency Calculation and acoustic noise prediction,"** *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences,* no. 26, pp. 1010-999.

[13] G. L. ,. J. L. ,. S. a. B. ,. a. W. –. P. C. Esmail Elhomdy, , 2018 **"Design and Experimental Verification of 72/48 Switched Reluctance Motor for Low- Speed Direct-Drive Mining Applications,"** *Energies*, vol. 11, no. 198, pp. 21-1.

[14] X. W. ,. C. C. ,. M. L. ,. a. K. W. Ziyu Fu , 2017, **"Research on Electromagnetic Force Distribution and Vibration**

Performance of A Noval 10/4 Switched Reluctance Motor," in *Materials Science and Engineering*, Yichang.

[15] S.-A. a. M. Feyzi, , 2014 **"A New Skewed- Rotor-Pole Switched Reluctance Motor Design,"** *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, vol. 3, no. 10, pp. 243-238.

[16] O. d. Weck and I. Y. Kim, , 2004 **"Finite Element Method,"** Massachusetts institute of Technology, Austria.

[17] م. م. ح. ص. صفاء الأحمد، 2014 **"التحليل الفراغي و الزمني للحقول الكهرطيسية في الآلة التحريضية,"** *جامعة تشرين للبحوث و الدراسات العلمية*, pp. 387-371, 15 أيلول.

[18] A. CORPORATION, , 2006 user's guide – **Maxwell 3D**, Pittsburgh, PA 15219.

[19] ع. صـــندوق2005، **تحقيق نموذج محرك كهربائي ذي مقاومة مغنطيســـية متغيرة و التحكم به لاستخدامه في السيارة الكهربائية**، دمشق،.

[20] T. J. Miller, October 1985, **"Converter Volt-Ampere Requirements of the Switched Reluctance Motor Drive,"** *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 1136-1144.

[21] H. Moghbelli, Gayle.E.Adams and R. G. Hoft, 1991, **"Performance of a 10-Hp switched reluctance motor and comparison with induction motor,"** *IEEE,T-O-I-A*, vol. 3, no. 27, pp. 531-538.

[22] A.Arkadan and B.W.Kielgas, 1994, **"Switched reluctance motor drive system dynamic performance prediction and experimental verification,"** *IEEE.T-O-E-C*, vol. 1, no. 9, pp. 36-44.

[23] P. Y.P.Wung and H. B. Puttgen, , 1992, **"Synchronous reluctance motor operating point dependent parameter determination,"** *IEEE,T-O-I-A*, vol. 2, no. 28, pp. 358-363.

[24] J.Wolff.H.Spath, , 1997, **"Switched reluctance motor with 16 stator poles 12 roter teeth,"** *EPE*, vol. 3, pp. 558-563.

[25] ع. صـندوق، 2003، **تصـميم محرك ذي مقاومة مغنطيسـية متغيرة لاسـتخدامه في وسائل النقل و بخاصة السيارة الكهربائية**، دمشق.

Abstract

The swiched reluctance motor (SRM) is widely used other motors for variable speed drive application and several industrial applications because of low cost and simple structure.

This study presents effect of variation for stator/rotor angle on switched reluctance motor torqe using finit element analysis and ansys Maxwell 3D.

This study describes a procedure for optimizing the stator and roter pole of a double saliency switched reluctance motor to optimized torque.

This research is very essential to study all cases of design switched reluctance motor and its torque value.

A prototype of swiched reluctance motor type 4/6 was modified. The coparision between the practical and therotical results was done.

Key words: Switched Reluctance Motor, Finite element analysis, Anysis, Optimizing Torque.

Syrian Arab Republic
DamascusUniversity
Faculty of Mechanical and Electrical Engineering
Electrical Power Engineering Department

Effect of Variation for Stator/Rotor angle on Switched Reluctance Motor Torque and Construction Modifications it for Optimized Torque

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

by
Eng. Ammar Hussin Kanaan

Supervisors
Prof. Abbas Sandouk **Ass.Prof. Raed Alshar'ea**

2022-2023