

تصميم محرك مقاومة مغناطيسية متغيرة رباعي الطور ذو 8/6 أقطاب بالعزم الأمثل

أ.د.م. عباس صندوق***

د.م. رائد الشرع**

م. عمار حسين كنعان*

الملخص:

انتشرت محركات المقاومة المغناطيسية المتغيرة بشكل واسع في التطبيقات الصناعية، وأنظمة الجر الكهربائية، وخاصة متغيرة السرعة أكثر من المحركات الأخرى، وذلك للعديد من الميزات أهمها بساطة تركيبها و رخص ثمنها. تناول هذا البحث دراسة تأثير تغير الزاوية بين الثابت والدائر على عزم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة رباعي الطور ذو 8/6 أقطاب، باستخدام طريقة العناصر المنتهية في بيئة Ansys Maxwell ثلاثي الأبعاد. تبين هذه الدراسة الاختيار الأمثل لأسنان الدائر، وأقطاب الثابت، وبالتالي الحصول على الزاوية الأمثل لهذا النوع من المحركات التي يقدم عندها المحرك عزمه الأعظمي. يقدم هذا البحث لدراسة كافة الحالات الممكنة لتصميم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة رباعي الطور، وإيجاد قيم العزم المقدم المقابل لكل حالة لتكون دليل عمل متكامل لتصميم هذا النوع من المحركات.

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

* طالب دكتوراه في قسم هندسة الطاقة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.
** عضو هيئة تدريسية في قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.
*** عضو هيئة تدريسية في قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

Design of Four Phase Switched Reluctance Motor Type 8/6 for Optimized Torque

Eng. A. H. Kanaan

Dr.A.Sandouk

Dr.R. Alcharea

Abstract

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

This paper presents effect of variation for stator/ rotor angle on four phase switched reluctance motor type 8/6 torque using finite element analysis and ansys Maxwell 3D.

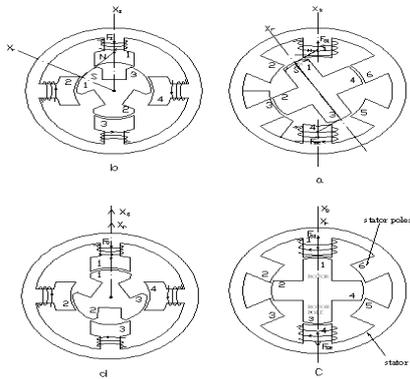
This study describes a procedure for optimizing the stator and rotor pole of a double saliency four phase switched reluctance motor type 8/6 to maximize the electromagnetic torque.

This research is very essential to study all cases of design four phase switched reluctance motor type 8/6 and its torque value.

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

المقدمة:

ونرمز لعدد هذه الأقطاب عادة بـ m ، بينما يتكون الجزء الدائر (Rotor) من أسطوانة حديدية (نواة) تحمل على محيطها الخارجي مجموعة أخرى من الكتل الحديدية عددها n لا توضع عليها أي ملفات وتعتبر هذه الكتل بمثابة أقطاب (أسنان) الدائر. والشروط الأساسي لبناء هذا النوع من المحركات ألا يتساوى m مع n ، وتتميز المحركات عن بعضها البعض بنسبة هذين العددين وهذان العددان إما أن يكونا زوجيين أو فرديين أو أحدهما فردي والآخر زوجي، ولكل من هذه الخيارات العديدة ميزاته والشكل رقم 1-a يبين رسماً تخطيطياً لمحرك 6/4، بينما الشكل 1-b يبين رسماً للمحرك 4/3 (حيث يرمز العدد في الجهة اليسرى إلى عدد أقطاب الثابت بينما العدد الأيمن يرمز إلى عدد أسنان الدائر). في معظم الدراسات يتم دراسة تصميم المحرك إما عن طريق محدداته، أو من خلال حساب السيلية المغناطيسية، أو الحل العددي للمعادلة التفاضلية وغيرها من الطرق، وبعضها يستخدم الحاسوب لإجراء الحسابات المطلوبة وكل هذه الأنواع يتم فيها تغذية كل ملفين متقابلين مع بعضهما البعض في آن واحد ويمكن تغذية أربعة ملفات في نفس الوقت لأسباب واعتبارات تتعلق بالعزم والسرعة وغيرها [2].



الشكل (1) رسم تخطيطي لنماذج مختلفة من محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة

يعتبر محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة من أبسط أنواع المحركات الكهربائية من حيث البنية، لأن الملفات فيه تتمركز في الجزء الثابت فقط وبالتالي يعد الأقل تكلفة بين المحركات الكهربائية، كما يتميز هذا المحرك بسرعه العاليه وعدم حاجته إلى وسائل التهوية التقليدية وإقلاع آمن وبسيط دون أي متطلبات إضافية، لذا ساهمت هذه المزايا في الانتشار الواسع لهذه المحركات ويات من الضروري الوصول لأفضل عزم مقدم منه من خلال تعديل بنيته المتضمنة كل من أقطاب الثابت وأسنان الدائر.

1- أهمية البحث:

تبرز أهمية البحث في مجال تطبيقات واستخدامات محركات المقاومة المغناطيسية المتغيرة، ولا سيما التي تتطلب وجود عزم كبير في عملها، وفي إيجاد منهجية واضحة لتصميم هذا النوع من المحركات للحصول على العزم الأعظم منه.

يهدف البحث إلى دراسة تأثير تغير الزاوية بين الثابت والدائر على عزم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة ذو 8/6 أقطاب رباعي الطور، وذلك باستخدام طريقة العناصر المنتهية في بيئة Ansys Maxwell لدراسة كافة الحالات التصميمية الممكنة والوصول للتصميم الأنسب الذي يقدم العزم الأعلى.

2- بنية المحرك ذو المقاومة المغناطيسية المتغيرة:

يتكون المحرك الدوار ذي المقاومة المغناطيسية المتغيرة - مثل باقي المحركات الكهربائية الأخرى الدوارة - من جزأين أحدهما ثابت والآخر دائر، يتكون الجزء الثابت 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 بمثابة أقطاب مغناطيسية ثابتة للمحرك

3- مبدأ عمل المحرك:

عند تغذية أحد ملفات الثابت وليكن الملف رقم 1 على الشكل (1) تنشأ في الكتلة الحديدية الموجود عليها هذا الملف سيالة مغناطيسية (flux magnetic)، ونرى على الشكل وحسب اتجاه التيار المار في الملف أن هذه الكتلة تصبح بمثابة قطباً شمالياً تخرج السيالة المغناطيسية منه وتتجه نحو أسنان الجزء الدائر وتمر في أقرب سن لهذا القطب وعند مرورها في هذا السن يصبح بمثابة قطب مغناطيسي أيضاً ولكنه قطب جنوبي، ويحدث التجاذب بين القطب الشمالي للثابت المغذي والقطب الجنوبي للدائر، والذي هو سن الدائر، مما يؤدي إلى تحرك هذا السن وبالتالي إلى دوران الجزء الدائر ويمكن أن نتخيل قوى الجذب هذه مماثلة للقوة Fs المبينة على الشكل، تسبب هذه القوة عزمًا حول محور الدوران تتغير قيمتها من قيمة عظمى ربما توافق الشكل المرسوم (1-a-b) إلى أن يبلغ قيمة الصفر عند وضع مماثل للشكل (1-c-d) أي عندما يصبح سن الدائر منطبقاً تماماً على قطب الثابت أي أن محور سن الدائر Xr منطبق على محور قطب الثابت Xs وعندها تصبح قوة الجذب Fs التي كانت قوة مماسية قوة جذب مركزية أي تمر من مركز الدوران، وهكذا نتابع في تغذية الملفات واحدة تلو الأخرى بحيث يستمر المحرك في الدوران [1].

4- نمذجة محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة رباعي الطور ذو 8/6 أقطاب باستخدام برنامج Ansys: يعتمد تصميم محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة بشكل تقليدي على مبدئين:

- المبدأ الأول: الوصول للعزم الأعظم الناتج منه ويتم ذلك عن طريق التصميم الهندسي الأمثل وعلى طريقة التحكم به.

- المبدأ الثاني: هو التكلفة فإن هدف التصميم لا يقتصر على الوصول إلى العزم الأمثل فقط بل تخفيض الكلفة الاجمالية للمحرك مع وحدة القيادة الخاصة به.

سنقوم بالوصول للعزم الأمثل لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة 8/6 باستخدام النمذجة والمحاكاة باستخدام طريقة العناصر المنتهية.

تم نمذجة محرك رباعي الطور ذو 8/6 أقطاب وله الأبعاد المبينة في الجدول (1) (وهي لأكثر المحركات استخداماً من هذا النوع) ودراسته وفق طريقة العناصر المنتهية باستخدام بيئة Ansys وهو من البرامج المتطورة والتي تسمح لنا بنمذجة هذا المحرك بشكل ثلاثي الأبعاد حتى نحصل على نتائج دقيقة [6],[3].

الجدول (1): أبعاد المحرك رباعي الطور ذو المقاومة

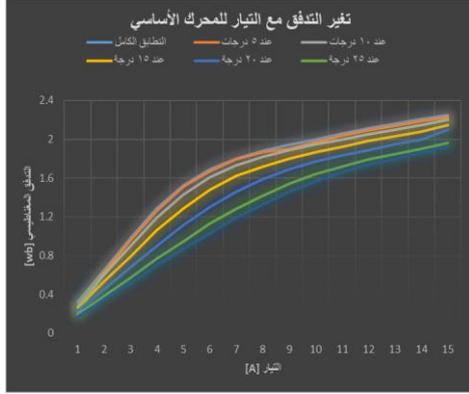
المغناطيسية المتغيرة 8/6

الجزء الثابت		الجزء الدائر	
75mm	القطر الداخلي	30mm	القطر الداخلي
120mm	القطر الخارجي	70mm	القطر الخارجي
10mm	سماكة النواة	10mm	سماكة النواة
8	عدد الأقطاب	6	عدد الأقطاب
0.45	نسبة عرض قطب الثابت	0.45	نسبة عرض سن الدائر

سنرمز لهذا المحرك بالمحرك المرجعي، وبعدها سنقوم بالتعديل عليه مع تغيير شكل وأبعاد الثابت والدائر وإعادة النمذجة من جديد لكل حالة والمقارنة بالنتائج.

يبين الشكل (2) المحرك رباعي الطور ذو 8/6 أقطاب بشكل ثلاثي الأبعاد، حيث تم دراسة السيالة المغناطيسية المتولدة فيه عند تغذية الطور A وحساب الفيض المغناطيسي الناتج عند تغير قيم التيار من (1 إلى 15) أمبير وعند كل وضع من أوضاع الدائر حيث تم تغيير موضع الدائر من التطابق التام إلى عدم التطابق وبمعدل 5 درجات في كل خطوة مع العلم أن عدد اللفات لكل طور هي 500 [turn]

كما يبين الشكل (4) منحنيات الفيض المغناطيسي عند قيم التيارات السابقة لمختلف مواضع الدوائر في المحرك حيث يلاحظ من المنحنيات والجدول أن قيم تدفق السيالة المغناطيسية تزداد مع زيادة قيم التيار وتزداد كلما اقترب المحرك من موضع التطابق الكامل.

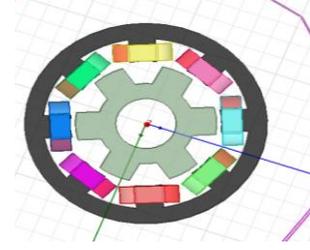


الشكل (4): منحنيات تغير الفيض مع التيار للمحرك الأساسي

يبين الجدول (3) قيم العزم المقدم من الطور A على محور الدوران عند كل زاوية إزاحة للدوائر وذلك عند كل حالة من حالات التحميل الكهربائي الذي تم تغييره ضمن المجال من 250 ATs وحتى 3000 ATs بمعدل 250 ATs لكل خطوة وعند كل زاوية إزاحة.

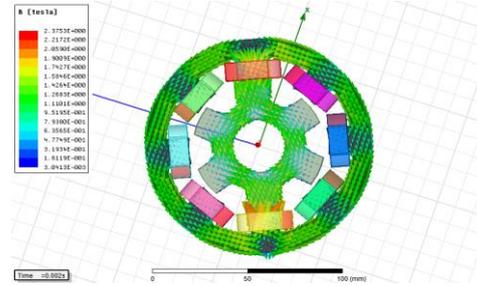
الجدول (3): نتائج تغير العزم المقدم عند الطور A للمحرك المرجعي مع تغير التحميل الكهربائي عند مختلف زوايا الإزاحة

I	H	G	F	E	D	C	B	A
التحميل الكهربائي [ATs]	30	25	20	15	10	5	0	زاوية إزاحة الدوائر [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	



الشكل (2) نموذج محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة رباعي الطور ذو 8/6 أقطاب ثلاثي الأبعاد

حيث يبين الشكل (3) كثافة السيالة المغناطيسية في حالة التطابق الكامل.

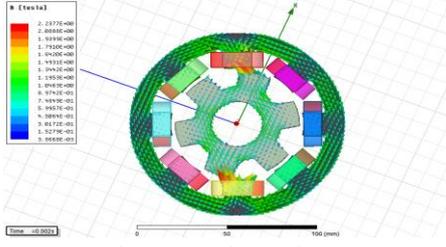


الشكل (3): كثافة السيالة المغناطيسية للمحرك في حال التطابق الكامل باستخدام Ansys

يبين الجدول (2) قيم الفيض المغناطيسي للمحرك الأساسي عند تغير قيم التيار من 1 إلى 15 A وعند تحرك الجزء الدائر بين منطقتي التطابق التام وعدم التطابق.

الجدول (2): نتائج الفيض المغناطيسي للمحرك الأساسي عند تغير التيار الكهربائي وعند مختلف زوايا الإزاحة

زاوية الإزاحة بالدرجات	15	13	11	9	7	5	3	1	التيار (A)
0	2.25	2.16	2.06	1.94	1.8	1.53	0.98	0.32	التدفق المغناطيسي (Wb)
5	2.23	2.14	2.04	1.9	1.79	1.51	0.96	0.2	
10	2.2	2.1	2	1.89	1.73	1.43	0.9	0.28	
15	2.15	2.03	1.92	1.8	1.62	1.29	0.79	0.26	
20	2.1	1.95	1.83	1.69	1.46	1.12	0.68	0.23	
25	1.96	1.85	1.72	1.54	1.28	0.95	0.57	0.19	
30	1.92	1.8	1.66	1.46	1.19	0.87	0.52	0.17	



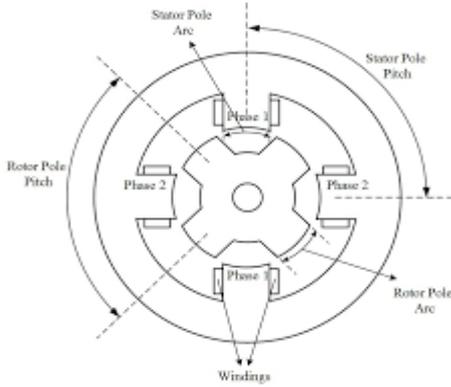
الشكل (7): كثافة السيالة المغناطيسية للمحرك عند زاوية إزاحة 20 درجة

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

6-1- تأثير تغير أبعاد أسنان الدائر على العزم:

$$\beta_r$$

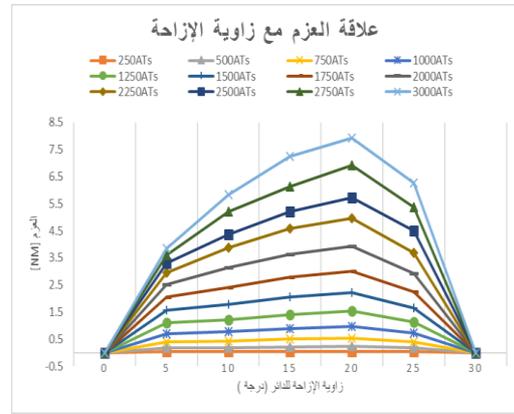
تسمى النسبة τ بنسبة عرض سن الدائر (زاوية سن الدائر إلى زاوية ميلان هذا السن) وهي نسبة مميزة لبناء الجزء الدائر من الناحية الهندسية ويرمز لهذه النسبة بالرمز α حيث يبين الشكل (8) كل من زاوية عرض سن الدائر وزاوية ميلان هذا الدائر وكذلك زاوية عرض قطب الثابت وزاوية ميلان هذا القطب.



الشكل (8): زاوية عرض سن الدائر وزاوية ميلان الدائر وزاوية عرض قطب الثابت وزاوية ميلان الثابت

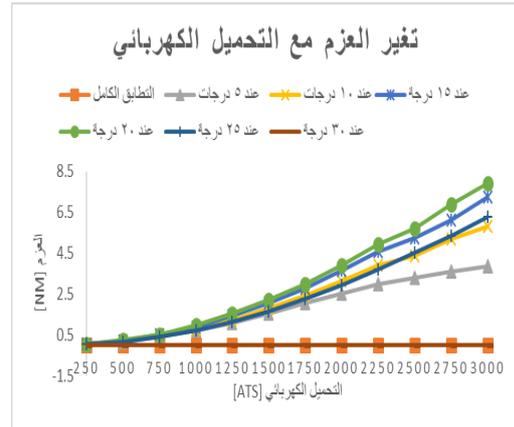
نستطيع دراسة التأثير المباشر لتغير أبعاد أسنان الدائر على العزم في محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة بالاعتماد على نمذجة ومحاكاة مجموعة من المحركات المختلفة عن بعضها البعض بالنسبة α وإيجاد العزم المقدم

نلاحظ من الشكل (5) الناتج من التمثيل البياني لقيم العزم المذكورة في الجدول (3) أن قيم العزم تزداد مع ازدياد التحميل الكهربائي أي مع زيادة القوة المحركة المغناطيسية وذلك عندما يكون الطور A في حالة عمل أي عندما تتغير فيه زاوية الازاحة للدائر من 0 وحتى 30 درجة ونلاحظ أيضا أن أعلى قيمة للعزم ضمن مجال عمل الطور A تكون عند الزاوية 20 درجة بسبب كثافة السيالة المغناطيسية عند هذا الموضع.



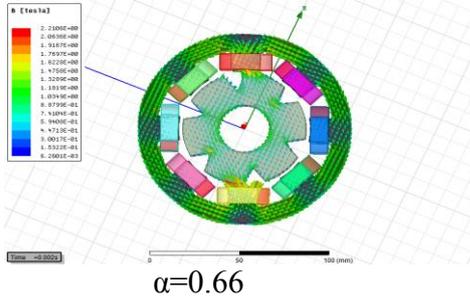
الشكل (5) علاقة العزم مع زاوية الإزاحة للمحرك المرجعي

يبين الشكل (6) الخطوط البيانية الناتجة من تغيرات العزم مع التحميل الكهربائي حيث نلاحظ أن العزم الأعلى هو المقابل للزاوية 20 درجة.



الشكل (6): تغير العزم مع التحميل الكهربائي للمحرك المرجعي

يبين الشكل (7) خطوط السيالة المغناطيسية عند زاوية الازاحة للدائر بمقدار 20 درجة.



الشكل (9) مقطع عرضي لتصاميم مختلفة من المحرك مع كثافة السيالة في كل منها عندما $\alpha > 0.45$

يسمى المحرك الناتج من النسبة $\alpha=0.47$ بالمحرك الأول وبالمحرك الثاني عند النسبة $\alpha=0.5$ وبالمحرك الثالث عند النسبة $\alpha=0.6$ وبالمحرك الرابع عند النسبة $\alpha=0.66$

يبين الجدول (4) نتائج دراسة تغيير العزم لكل نموذج من نماذج المحركات من الأول حتى الرابع بالنسبة لتغيير 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.

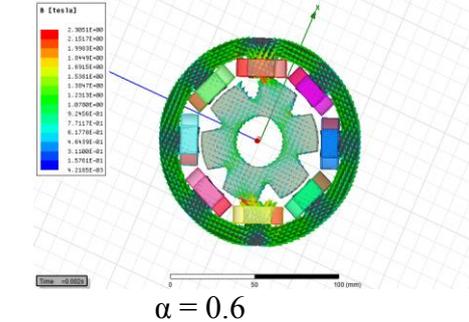
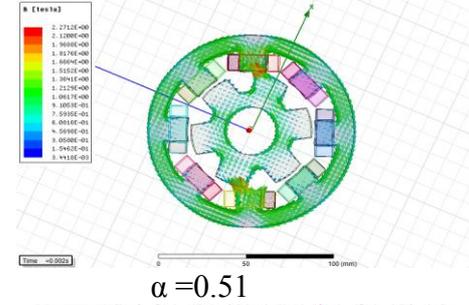
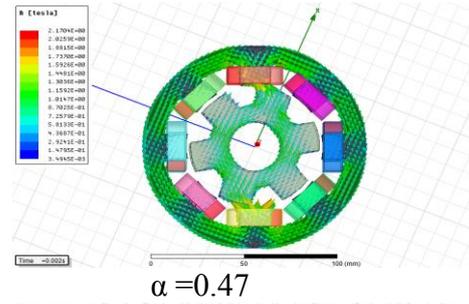
الجدول (4): نتائج تغير العزم المقدم مع زاوية الازاحة لنماذج المحركات من الأول حتى الرابع

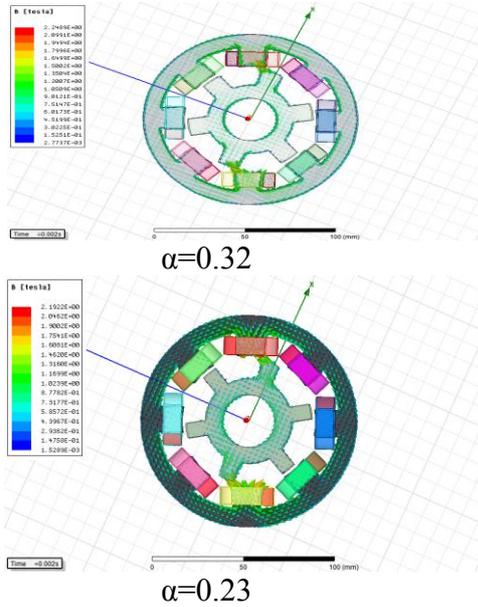
زاوية الازاحة	0	5	10	15	20	25	30	
العزم [Nm]	0.66	0.05	2.84	3.57	4.33	2.93	0	0
	0.6	0.06	2.34	4.35	4.37	4.11	0	0
	0.51	0.63	3.87	5.58	4.87	4.12	0	0
	0.47	3.42	4.39	5.7	5.9	4.26	0	0
	0.45	3.31	4.37	5.22	5.73	4.5	0	0

يبين الشكل (10) المنحنيات البيانية لتغيرات العزم مع تغيير زاوية الازاحة للمحركات من الأول حتى الرابع بالإضافة للمحرك المرجعي ونلاحظ أنه مع زيادة قيمة α تنقص قيمة العزم كما نلاحظ بقاء المحرك المرجعي هو الأعلى عزمياً أي أن النسبة $\alpha=0.45$ هي الأنسب حتى الآن بين كل المحركات المدروسة من الأول حتى الرابع.

منها في كل حالة باستخدام طريقة العناصر المنتهية ثلاثية البعد في بيئة Ansys ومقارنة نتيجة كل حالة مع المحرك المرجعي الذي تم دراسته في البداية مع القيام بتثبيت كافة أبعاد الأخرى والتي تشمل أقطاب الثابت والنواة والثغرة الهوائية للمحرك وذلك عند نفس قيم التحميل الكهربائي باعتبار النسبة α للمحرك المرجعي هي 0.45 والتحميل الكهربائي المعتمد هو 2500ATs.

يبين الشكل (9) مقطع عرضي لأربعة تصاميم لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة عند أربع قيم مختلفة للنسبة α أكبر من 0.45 مع كثافة السيالة المغناطيسية في كل منها علماً أن عرض أسنان الدائر تزداد مع زيادة النسبة α وتنقص بنقصانها.





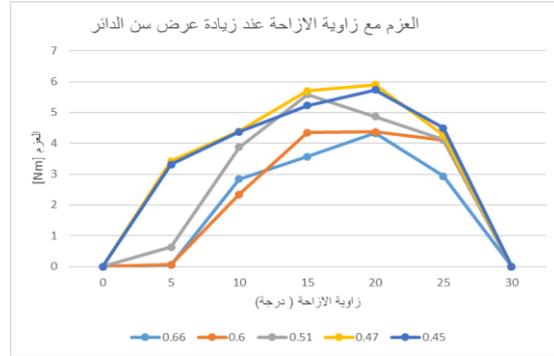
الشكل (11): مقطع عرضي و كثافة السيادة المغناطيسية لنماذج المحرك عندما $\alpha < 0.45$

وبإجراء دراسة تفصيلية أكثر باستخدام Ansys لتغيرات العزم بالنسبة لزاوية الازاحة لكل محرك من المحركات من الخامس وحتى الثامن نصل للقيم المبينة في الجدول (5) وعند رسم منحنيات تغيير العزم بالنسبة لزاوية الازاحة للمحركات من الخامس حتى الثامن نصل للشكل (12).

الجدول (5): نتائج تغير العزم المقدم مع زاوية الازاحة لنماذج

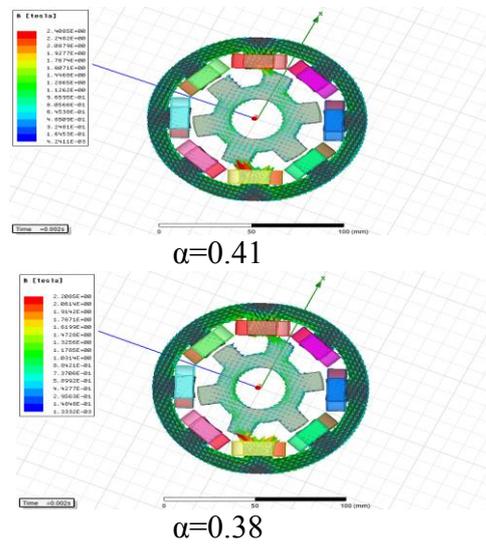
المحركات من الخامس حتى الثامن

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

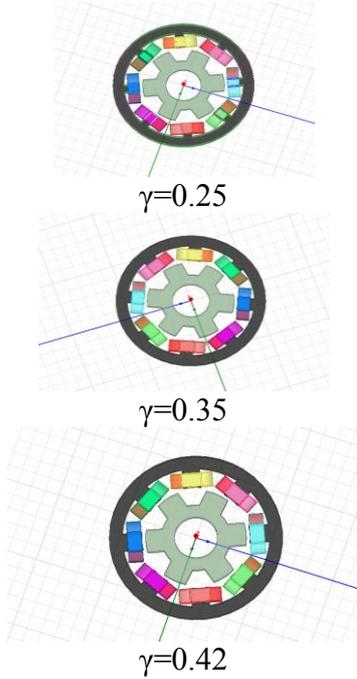


الشكل (10): منحنيات تغيرات العزم مع زاوية الازاحة عند زيادة عرض سن الدائر

يبين الشكل (11) مقطع عرضي لأربعة تصاميم لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة عند أربعة قيم مختلفة جديدة للنسبة α ولكن في هذه المرة القيم أصغر من حيث $\alpha = 0.45$ يسمى المحرك الناتج من النسبة $\alpha = 0.41$ بالمحرك الخامس وبالمحرك السادس عند النسبة $\alpha = 0.38$ وبالمحرك السابع عند النسبة $\alpha = 0.32$ وبالمحرك الثامن عند النسبة $\alpha = 0.23$.



α للجزء الدائر والثغرة الهوائية وشكل النواة والتحميل الكهربائي ثابت للمقارنة مع المحرك المرجعي. يبين الشكل (13) مقطع عرضي لأشكال المحركات بعد نمذجتها وتمثيلها باستخدام طريقة العناصر المنتهية ضمن برنامج Ansys مع كثافة السائلة المغناطيسية في كل منها.

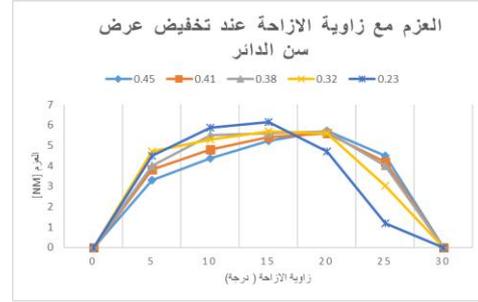


الشكل (13): مقطع عرضي لنماذج المحركات عندما $\gamma < 0.45$

يبين الجدول (6) نتائج تغير العزم مع تغير موضع الدائر للمحركات من التاسع حتى الرابع عشر حيث رمزنا لكل محرك ناتج من تغير γ برقم جديد.

الجدول (6): نتائج تغير العزم المقدم مع زاوية الازاحة لنماذج المحركات من التاسع حتى الرابع عشر

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

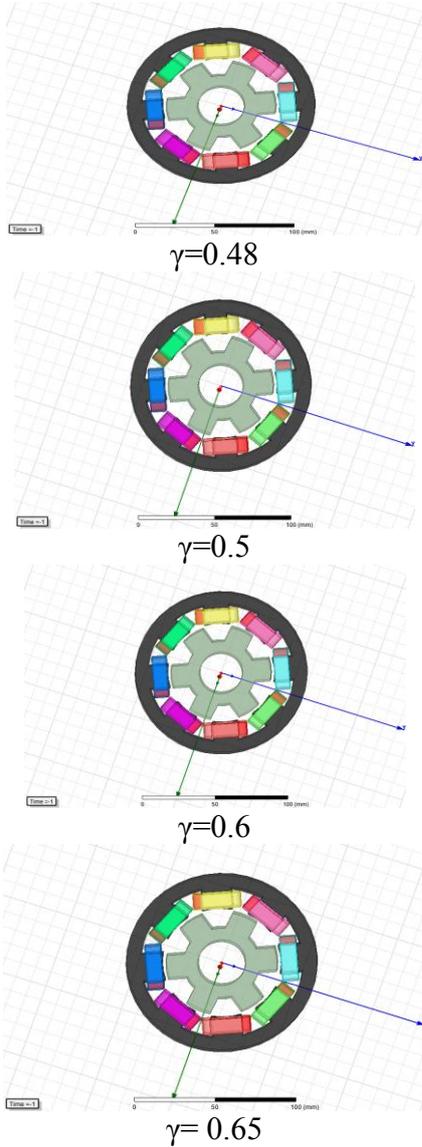


الشكل (12) منحنيات تغيرات العزم مع زاوية الازاحة عند تخفيض عرض سن الدائر

نلاحظ من الشكل (12) وبمقارنة منحنيات عزم المحركات من الخامس حتى الثامن مع المحرك المرجعي أن المحرك الأعلى عزمًا هو المحرك السادس عند النسبة $(\alpha=0.38)$ وهو منحنى العزم الذي يحصر تحته أكبر مساحة وهو شكل شبه منتظم ومماثل لشكل منحنى العزم المثالي وبالتالي هو المحرك الأنسب تصميمياً للجزء الدائر الذي يعطي العزم الأعلى وإجراء دراسة ومراجعة كاملة للمنحنيات في الشكل (10) و(12) مع الجدول (4) و(5) نلاحظ أن قيم العزم تزداد بين القيم $(0.38-0.45)$ وتصل لأعلى قيمة لها عندما $(\alpha=0.38)$ بينما تنقص كلما كانت النسبة أعلى من $\alpha=0.45$ أو أقل من $\alpha=0.38$ وبمراعاة عدم حدوث ظاهرة التشبع المغناطيسي عند نقصان عرض سن الدائر إلى قيم كبيرة أو حدوث تداخل بين أسنان الدائر مع قطبين من أقطاب الثابت في نفس اللحظة عند زيادة عرض سن الدائر لقيم كبيرة فإننا نستطيع حصر قيم النسبة α عند عملية تصميم دائر المحرك ذو المقاومة المغناطيسية المتغيرة بين القيمتين $(\alpha=0.25, \alpha=0.45)$ أي أن $0.25 < \alpha < 0.45$ ونحصل على العزم الأعلى عند $\alpha=0.38$.

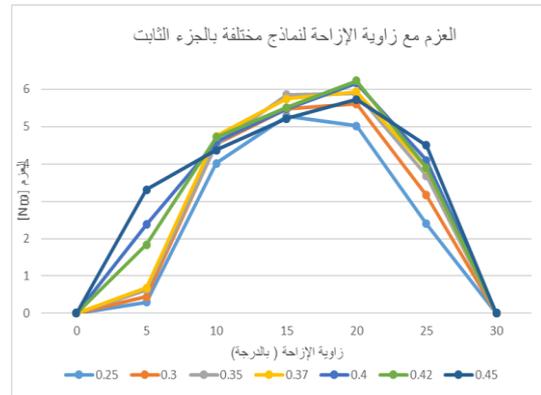
6-2- تأثير تغير أبعاد أقطاب الثابت:

تم تغيير أبعاد أقطاب الثابت بنفس الأسلوب المعتمد في تغيير أبعاد الدائر، وهي نسبة قوس قطب الثابت إلى نسبة ميلان هذا القطب ويرمز لهذه النسبة بالرمز γ . تختلف قيم العزم المقدم من المحرك مع اختلاف النسبة γ سواء بالزيادة أو بالنقصان وذلك مع المحافظة على قيمة



الشكل (15): مقطع عرضي لنماذج المحركات عندما $\gamma > 0.45$

يبين الشكل (14) النتائج البيانية لتغيرات العزم مع تغيرات الزاوية للمحركات من التاسع حتى الرابع عشر (حيث عرض قطب الثابت في كل منها أقل من المحرك المرجعي).



الشكل (14) منحنيات تغيرات العزم مع زاوية الإزاحة للمحركات من التاسع حتى الرابع عشر بين وضعي التطابق الكامل وعدم التطابق

وبدراسة الجدول (6) والشكل (14) نلاحظ أن منحنى العزم الناتج من المحرك المرجعي هو الأعلى والذي يحجز تحته مساحة أكبر من منحنيات بقية المحركات وبالتالي يبقى عزم المحرك المرجعي هو الأعلى من المحركات من التاسع حتى الرابع عشر ونلاحظ تناقص قيمة العزم المقدم مع تناقص قيمة γ .

يبين الشكل (15) مقطعا عرضيا لنماذج المحركات عند زيادة قيمة γ مع كثافة السيالة في كل منها حيث نلاحظ زيادة عرض قطب الثابت عن المحرك الأساسي.

يبين الجدول (7) نتائج عملية النمذجة و المحاكاة للمحركات من الخامس عشر حتى التاسع عشر حيث يظهر فيه تغير قيمة العزم المقدم من كل محرك مع تغير موضع الدائر (من 0 حتى 30 درجة) ضمن مجال عمل الطور A.

عند دراسة كافة النتائج التي حصلنا عليها في الجدولين (6) و(7) ومقارنة كافة المنحنيات في الأشكال (14) و(16) الناتجة من تغير العزم المقابل لتغير زاوية الإزاحة لكل نموذج ناتج من تغير النسبة γ .

وبمراعاة عدم حدوث ظاهرة التشبع المغناطيسي وعدم تواجد سن الدائر تحت قطبين من أقطاب الثابت في نفس اللحظة 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 $\gamma=0.5$.

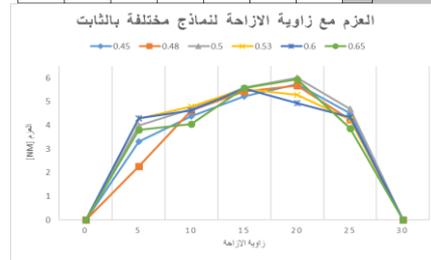
7- التصميم الأمثل لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة رباعي الطور.

نلاحظ من خلال 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 خلال دراستنا لتغيرات العزم عند تغير النسبة γ للثابت.

عند القيام بجمع النسبة $\alpha=0.38$ مع $\gamma=0.5$ نحصل على محرك جديد نرسم له بالمحرك العشريون والذي يعتبر هو التصميم الأمثل لمحرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة رباعي الطور يبين الجدول (8) نتائج تغيرات العزم مع تغيرات زاوية الإزاحة عند مختلف قيم التحميل الكهربائي للمحرك العشرين الأمثل.

الجدول (7) نتائج تغير العزم المقدم مع زاوية الإزاحة لنماذج المحركات من الخامس عشر حتى التاسع عشر

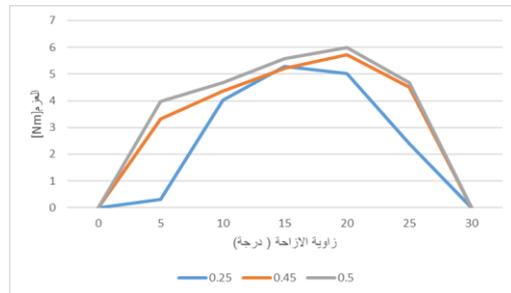
زاوية الإزاحة	0	5	10	15	20	25	30
0.45	0	3.31	4.37	5.22	5.73	4.5	0
0.48	0	2.26	4.63	5.42	5.67	4.23	0
0.5	0	3.98	4.69	5.59	6	4.68	0
0.53	0	4.27	4.79	5.53	5.29	4.24	0
0.6	0	4.3	4.63	5.55	4.94	4.34	0
0.65	0	3.8	4.04	5.56	5.93	3.86	0



الشكل (16) منحنيات تغيرات العزم مع زاوية الإزاحة للمحركات من الخامس عشر حتى التاسع عشر بين وضعي التطابق الكامل وعدم التطابق

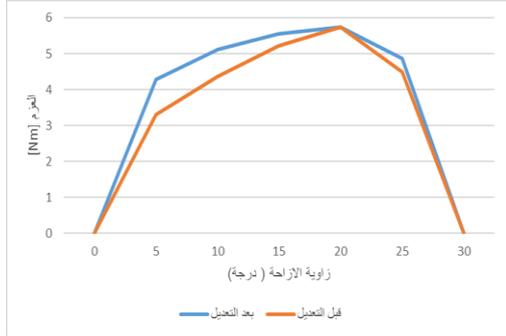
دراسة المنحنيات البيانية في الشكل (16) مع الجدول (7) نلاحظ أن قيم العزم تزداد عند ازدياد النسبة γ من 0.45 حتى 0.5 ثم تبدأ بالتناقص كلما ازدادت القيمة γ أكبر من 0.5

كما نجد ان المحرك السادس عشر المقابل للنسبة $\gamma=0.5$ هو المحرك الأعلى عزمًا من المحرك المرجعي كونه يحجز مساحة أكبر ضمن المنحنيات البيانية وبالتالي تكون النسبة $\gamma=0.5$ هي النسبة الأفضل للجزء الثابت للوصول به للعزم الأمثل و الأعلى كما هو مبين في الشكل (17).



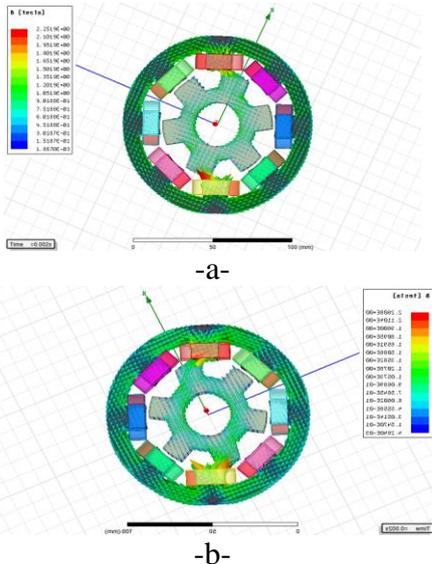
الشكل (17) مقارنة منحنيات تغيرات العزم مع زاوية الإزاحة للمحرك الأساسي والمحرك السادس عشر

المحرك العشرين الأمثل والذي تم فيه تعديل البنية عن طريق تغيير أبعاد الثابت والدائر هو المحرك ذو العزم الأمثل والأعلى من المحرك المرجعي.



الشكل (20) تغيرات العزم لكل من المحرك الأساسي والمحرك العشرين الأمثل

يبين الشكل (21-a) مقطع عرضي ثلاثي الأبعاد لتوزيع السيادة المغناطيسية في كافة أجزاء المحرك المرجعي ويظهر من الشكل (21-b) مقطع عرضي ثلاثي الأبعاد لتوزيع السيادة المغناطيسية في كافة أجزاء المحرك العشرين الأمثل والفرق في أبعاد الأقطاب والأسنان بين المحركين حيث نلاحظ زيادة في كثافة السيادة المغناطيسية في المحرك العشرين الأمثل عن المحرك المرجعي.

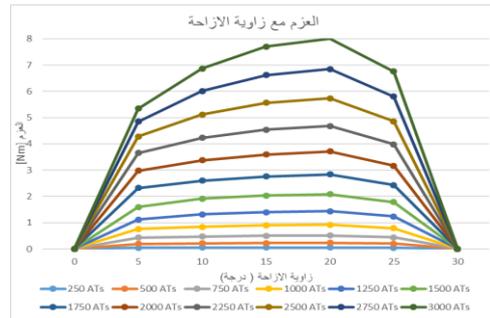


الشكل (21) مقطع عرضي لكثافة السيادة المغناطيسية للمحركات الأساسي والأمثل

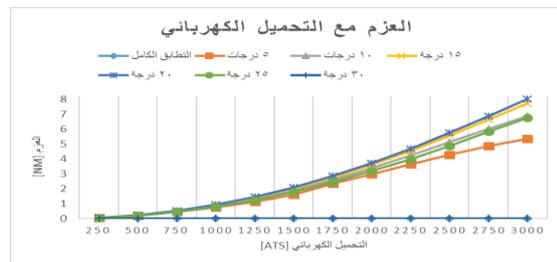
الجدول (8): نتائج تغير العزم المقدم مع زاوية الإزاحة عند مختلف قيم التحميل الكهربائي للمحرك العشرين الأمثل

التحميل الكهربائي [A _t s]	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	

يبين الشكل (18) النتائج البيانية لتغيرات العزم مع زاوية الإزاحة للمحرك العشرين الأمثل حيث نلاحظ بقاء العزم عند قيمة أعظمية عند الزاوية 20 درجة.



الشكل (18) منحنيات تغيرات العزم مع زاوية الإزاحة للمحرك العشرين بين وضعي التطابق الكامل وعدم التطابق



الشكل (19) منحنيات تغيرات العزم مع التحميل الكهربائي للمحرك العشرين بين وضعي التطابق الكامل وعدم التطابق

يبين الشكل (20) النتائج البيانية لتغيرات العزم لكل من المحرك المرجعي والمحرك العشرين الأمثل عند مختلف زوايا الإزاحة وعند إجراء مقارنة بين المنحنيين نلاحظ أن

7- النتائج:

- نلاحظ أن العزم مرتبط ارتباط وثيق مع زاوية الازاحة للدائر أي عندما يكون الدائر ساكن في موضع التقابل أو عدم التقابل عند نهاية منطقة عمل الطور فإن العزم سيساوي الصفر مهما تغيرت قيم التحميل الكهربائي لأن المقاومة المغناطيسية ستكون في أدنى قيمة لها.
- نلاحظ أن خطوط السيادة المغناطيسية قد اختارت أفضل مسار لها لتقديم عزم قوي لجذب الدائر ونلاحظ أن تقليل المساحة بشكل كبير يؤدي إلى الوصول إلى ظاهرة التشبع المغناطيسي في الدائر.
- نلاحظ أن العزم قد ازداد بمقدار 15% تقريبا للمحرك الأمثل رباعي الطور ذو 8/6 أقطاب عن المحرك المرجعي.
- تم وضع دليل متكامل بعد نمذجة ومحاكاة عشرين تصميم للمحرك ودراسة كافة حالات العمل الممكنة لتصميم ودراسة عمل محرك المقاومة المغناطيسية المتغيرة رباعي الطور حدد فيه أبعاد كل من الجزئين الثابت والدائر للوصول للعزم الأعظم.
- تحسن جيد في أداء المحرك المستخدم في التطبيقات الصناعية التي تحتاج لعزم عال مثل آلات الضغط الميكانيكية وآلات حقول النفط والمخارط وغيرها.

8- المراجع العلمية:

- Ashwin Raj , Sreekanth P K, 2011, Design of a Switched Reluctance Motor in Ansys Maxwell, International journal of Innovative Research in Science ,Engineering and Technology, India.
 - S. R. Mousavi- Aghdam* (C.A.) and M. R. Feyzi*, Sep. 2014, A New Skewed –Rotor – Pole Switched Reluctance Motor Design, Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, Vol. 10, No. 3
 - M. Hamouda, László Száame2017, Optimum Excitation Angles for Switched Reluctance Motor Drives, XXXIII. Kando Conference,
 - K.Abdul Karim, N.Abdullah , M.N.. Othman , R. N.Firdaus , Z. M. Zulfattah , N. Z. Zainal, 2018 Quick Design of Switched Reluctance Motor and Effect of Switching Angle ANSYS MAXWELL, Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, ISSN: 2180-1843,P 107-110,
- صندوق، د عباس، 2003، " تصميم محرك ذي مقاومة مغناطيسية متغيرة لاستخدامه في وسائل النقل وبخاصة في السيارة الكهربائية" رسالة ماجستير، قسم هندسة الطاقة الكهربائية، جامعة دمشق، سورية.
 - صندوق، د عباس 2005، " تحقيق نموذج محرك كهربي ذي مقاومة مغناطيسية متغيرة والتحكم به لاستخدامه في السيارة الكهربائية" رسالة دكتوراه، قسم هندسة الطاقة الكهربائية، جامعة دمشق، سورية.

Received	2021/7/12	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2021/2/1	قبول البحث للنشر