

## الحساب التحليلي والتجريبي للمحرك التحريضي ثلاثي الطور باستخدام برنامج Maxwell

د. عزت حسن\*

د. زيد بدر\*\*

همام زيتي\*\*\*

(تاريخ الإيداع 8 / 3 / 2021. قُبِلَ للنشر في 14 / 6 / 2021)

### □ ملخص □

نظراً لما تقدّمه مميزات عمل المحرك التحريضي من معلومات هامة حول أدائه وكفاءته، حيث تسمح بحساب جميع القيم التي تحدد نظام عمل المحرك عند مختلف الحملات. سنقدّم في هذا البحث تحليلاً لمميزات عمل المحرك التحريضي الثلاثي الطور باستخدام أحد أهم البرامج المصممة لمحاكاة الآلات الكهربائية حالياً هو برنامج Maxwell، ومقارنة نتائج المحاكاة مع الاختبارات التجريبية. أجريت التجارب في مخبر الآلات الكهربائية في جامعة تشرين، ومقارنة النتائج الحاصلة مع نتائج المحاكاة تبين أن النتائج التجريبية قريبة ومطابقة في بعض الأحيان لنتائج المحاكاة، باستثناء وجود بعض النقاط الشاذة.

الكلمات المفتاحية: محرك تحريضي، Maxwell، تصميم كهرومغناطيسي.

\* أستاذ- قسم هندسة الطاقة الكهربائية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.  
\*\* أستاذ- قسم هندسة الطاقة الكهربائية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.  
\*\*\* طالب دراسات عليا (دكتوراه)- قسم هندسة الطاقة الكهربائية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.

## Analytical and Experimental Calculation of a Three-phase Induction Motor Using Maxwell

Dr .Izzat Hasan \*  
Dr .Zaid Badr\*\*  
Homam Zaity\*\*\*

(Received 8 / 3 / 2021. Accepted 14 / 6 / 2021)

### □ ABSTRACT □

Due to the important information provided by the induction motor characteristics as its performance and efficiency, as it allows the calculation of all values that determine the motor's operating system at different loads. In this paper, we will present an analysis the three-phase induction motor characteristics Using one of the most popular programs currently designed to simulate electrical machines, the Maxwell program, and compare the simulation results with experimental tests. The experiments were conducted in the electrical machines laboratory at Tishreen University by. Comparing the results obtained with the simulation results, it was found that the experimental results are close to the simulation results, and sometimes identical to it. except for the presence of some anomalies.

**Keywords:** Induction Motor, Maxwell, Electromagnetic design.

---

\*Professor, Department of Electric Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\*Professor, Department of Electric Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\*\*Postgraduate Student(Ph.D.), Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**مقدمه:**

تستخدم الآلات التحريضية بشكل أساس كمحركات كهربائية وفي بعض الأحيان كمولدات و تعدّ من أكثر أنواع الآلات الكهربائية انتشاراً واستخداماً في أيامنا هذه، فعند عملها في نظام التحريك تقوم الآلة بتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية، ونظراً لانتشارها الواسع فإنها تستهلك حوالي نصف الطاقة الكهربائية المنتجة في العالم، ويرجع ذلك إلى بساطة تكوينها ورخص ثمنها وخفة وزنها و وثوقيتها العالية في العمل وسهولة قيادتها والتحكم بأدائها وعدم احتوائها على أجزاء سهلة العطب أو سريعة الاهتراء كالمجمع وحلقات الانزلاق بالمقارنة مع آلات التيار المستمر والآلات التزامنية[1].

لقد سميت الآلة التحريضية بهذا الاسم لأن جهد الدوار (القوة المحركة الكهربائية التي تولّد تيار الدائر والساحة المغناطيسية في الدائر) ينشأ في هذا الدوار بالتحريض ولا يأتي من منبع خارجي. كذلك يطلق على هذه الآلات اسم الآلات غير المتوافقة (اللاتزامنية)، لأن سرعة دوران الدائر لا تساوي سرعة دوران الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية[2]. ترتبط عمليات الطاقة التي تحدث في الآلة التحريضية بالتوتر المطبق على الثابت ( $U_1$ ) وتردده ( $f_1$ ) وبالانزلاق ( $S$ ). إن علاقة القيم التي تصف عمليات الطاقة مثل: ( $\cos \varphi_1, I_1, \dot{I}_2, T, \dots$ ) بالانزلاق عند توتر ثابت مطبق على ملفات الثابت و كذلك عند تردد ثابت ( $f_1 = const, U_1 = const$ ) تدعى بالمميزات الكهروميكانيكية[2].

**حسابياً:** يتم الحصول على المعادلات التي تحسب لنا هذه القيم بواسطة الدارة المكافئة للمحرك.

**برمجياً:** يتم استخدام العديد من البرامج مثل MATLAB و Maxwell لتصميم وتحليل العمليات الكهروميكانيكية في الآلة التحريضية.

**مخبرياً:** يتم دراسة المحرك وتتبع بارامتراته الأساسية والحصول على معظمها بقيم مقاسة، ثم يتم الحصول على باقي القيم غير المقاسة حسابياً بشكل بسيط.

في هذا البحث تتم دراسة محرك تحريضي باستطاعة  $550 W$  في مخبر الآلات الكهربائية في جامعة تشرين وتحليل وقياس بارامتراته الأساسية عند تغذيته بتوتر جيبي متغيّر ثلاثي الطور من الصفر حتى التوتر الاسمي وتسجيل القيم المقاسة، ثم حساب باقي القيم اللازمة للحصول على مميزات المحرك.

من أجل نفس المحرك، وانطلاقاً من الحسابات الكهرومغناطيسية، يتم التصميم الكهرومغناطيسي للمحرك واستخدام بارامترات التصميم كمدخلات لبرنامج Maxwell، وبعد تصميم المحرك باستخدام البرنامج يتم اجراء تحليل مميزاته التشغيلية ومقارنتها مع النتائج المخبرية.

**أهمية البحث وأهدافه:**

تكمن أهمية البحث في مقارنته بين الطريقة التجريبية (في مخبر الآلات الكهربائية) والطريقة التحليلية (باستخدام برنامج Maxwell) لحساب وتحليل مميزات المحرك التحريضي والمقارنة بينهما بهدف معرفة دقة التصميم الكهرومغناطيسي والتحليل الحاسوبي في حساب مميزات عمل المحرك التحريضي.

**طرائق البحث ومواده:**

تمت دراسة محرك باستطاعة  $550 W$  في مخبر الآلات الكهربائية في جامعة تشرين وتحليل وقياس بارامتراته الأساسية عند تغذيته بتوتر جيبي متغيّر ثلاثي الطور وتحميله بحمولته الاسمية وتسجيل القيم المقاسة، ثم حساب باقي

القيم للحصول على القيم اللازمة لدراسة بارامترات المحرك. ثم تمت عملية التصميم الكهرومغناطيسي للمحرك اعتماداً على بارامتراته التصميمية واستخدام بارامترات التصميم كمدخلات لبرنامج Maxwell، وبعد تصميم المحرك باستخدام البرنامج تم إجراء تحليل مميزاته التشغيلية ومقارنتها مع النتائج المخبرية.

### 1. الدراسة المرجعية:

تم سابقاً وضع نماذج تمثيلية باستخدام MATLAB للتجهيزات المخبرية في مخبر الآلات الكهربائية في جامعة تشرين و دراسة إمكانية انشاء مخبر حاسوبي خاص لهذه الغاية. حيث تمت مقارنة النموذج التمثيلي مع العناصر الناتجة من التجربة الفعلية [3]. في دراسة أخرى و باستخدام Matlab-Simulink أيضاً تم بناء نموذج لنظام قيادة كهربائي يستخدم محرك تحريضي ثلاثي الطور ذي قفص سنجابي باستخدام الحقل الموجه وذلك للتحكم بكل من السرعة و الفيض والتيار، لإتمام عملية التحكم دون قياس فيض الدائر تم بناء نموذج للفيض انطلاقاً من القيم المقاسة لكل من تيار الثابت وسرعة الدائر التي يمكن قياسها بشكل مباشر وتم التحقق من النموذج بنتائج تم الحصول عليها باستخدام بيئة Matlab-Simulink [4].

تم استخدام برنامج Maxwell لنمذجة ومحاكاة محرك تحريضي ذو دائر مقصور  $\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{24}{22}$  والحصول على توزيع الفيض وكثافة الفيض في الحزمة 3D , 2D من البرنامج بالإضافة إلى بعض المميزات التشغيلية في المحرك [5]. كما تم استخدام برنامج Maxwell لدراسة ومحاكاة المحرك التحريضي المستخدم في السيارات الكهربائية حيث تم إجراء التصميم الكهرومغناطيسي للمحرك وفقاً لمعايير التصميم المحددة. ثم تم التحقق من التصميم التحليلي باستخدام طريقة العناصر المنتهية. اعتماداً على النتائج التي تم الحصول عليها في التحليلات الكهرومغناطيسية. عدّل التصميم السابق للمحرك التحريضي بما يلائم شروط استخدامه في السيارات الكهربائية ثم تم إجراء التحليل الكهرومغناطيسي والحراري للمحرك المصمم باستخدام برنامجي Maxwell® و ANSYS على التوالي. حيث تم اختبار المحرك المصمم عند أقصى درجة حرارة مسموح بها وفقاً لنوع مادة العزل المستخدمة. وأظهرت نتائج التحليلات أن المحرك المصمم يفي بمعايير التصميم [6].

تمت محاكاة عمل نظام متكامل يحتوي على محرك تحريضي ودائرة قيادة ومخطط تحكم في بيئات نمذجة مختلفة لكل جزء من النظام، حيث تم تصميم المحرك باستخدام Ansys-Maxwell وتم تصميم دائرة القيادة باستخدام Ansys-Simplorer بينما تم انجاز مخطط التحكم في بيئة MATLAB-Simulink، تمت دراسة النظام في حالتين هما حالة وجود عطل في دائرة القيادة وكانت الحالة الثانية هي حالة وجود قصر بين طورين من أطوار الثابت، أبدى النموذج مرونة لجهة إمكانية اكتشاف العطل وذلك من خلال مراقبة كل من التيار والعزم الكهرومغناطيسي [7].

نقدّم في هذا البحث مقارنة بين النتائج التجريبية والنتائج التحليلية في برنامج Maxwell للمميزات التشغيلية لمحرك تحريضي تم تصميمه بهدف إجراء بعض التجارب المتعلقة بتحسين التبادل الحراري، حيث بيّنت الدراسة أن المحرك المُصمّم يحقق الغاية المرجوة منه وهو جاهز للبدء بإجراء عملية تحليل حراري سيتم نشر نتائجها تبعاً.

### 2. المميزات الميكانيكية للمحرك التحريضي ثلاثي الطور:

إن الميزة الأكثر تقديراً لخواص المحرك التحريضي هي الميزة الميكانيكية ويقصد بها العلاقة بين العزم والانزلاق (أو السرعة)، ويتم استنتاجها من علاقة العزم [2]:

$$T = \frac{3R_2' U_1^2}{s\omega_1 \left[ (R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (1)$$

والانزلاق:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (2)$$

وبأخذ حالات التشغيل التالية نجد:

عندما  $(S = 0)$  أي  $(n = n_1)$  وتمثل حالة التزامن بحيث يدور المحرك بسرعة  $(n)$  تساوي سرعة التزامن ويكون  $(T = 0)$ .

عندما  $(S = 1)$  أي  $(n = 0)$  وتمثل حالة الإقلاع يكون  $(T = T_{st})$ .

عندما  $(S = Sn)$  أي  $(n = n_n)$  يكون  $(T = T_n)$ .

عندما  $(S = S_{max})$  أي  $(n = n_{max})$  يكون  $(T = T_{max})$ .

يتم استنتاج القيمة الأعظمية للانزلاق باشتقاق علاقة العزم بالنسبة للانزلاق وجعلها مساوية للصفر:

$$\frac{dT}{dS} = 0$$

$$S_{cr} = \frac{R'_2}{X_1 + X'_2}$$

$$S_n = (2 \div 6)\%$$

$$S_{cr} = (10 \div 20)\%$$

وعليه:

$$S_n < S_{cr} \quad (3)$$

إن النسبة بين العزم الأعظمي والعزم الاسمي (عامل التحميل) للمحرك المدروس هي:

$$\lambda = \frac{T_{max}}{T_n} = (1.7 \div 3) \quad (4)$$

عند تطبيق توتر يتسارع المحرك ويكون عزم الإقلاع مساوياً إلى:

$$T_{st} = T_m + T_d \quad (5)$$

$(T_d)$ : هو العزم الديناميكي ويساوي:

$$T_d = J \frac{d\Omega}{dt}$$

$(T_m)$ : هو عزم الحمولة.

لا تظهر مركبة العزم الديناميكي إلا في الحالة العابرة التي يتسارع أو يتباطأ فيها المحرك أي يكون هناك تغير في السرعة ولكن عند الوصول إلى الحالة المستقرة تتعدم مركبة العزم الديناميكي لأن:

$$\frac{d\Omega}{dt} = 0$$

وبالتالي في الحالة المستقرة يكون:

$$T = T_m \quad (6)$$

### 3. تصميم المحرك باستخدام Maxwell:

قبل البدء في تصميم المحرك، يتم تحديد بارامترات التصميم مثل الاستطاعة، عدد الأطوار وجهد التغذية والتردد، المرود المتوقع وعامل الاستطاعة وكثافة التيار في الناقل وكثافة التدفق في الشغرة الهوائية. بعد ذلك، تبدأ عملية التصميم ويتم إجراء المراجعات المنهجية عن طريق تعديل بارامترات التصميم على نموذج المحرك حتى يتم استيفاء معايير التصميم.

يمكن تلخيص خطوات تصميم الآلة الكهربائية على النحو التالي [1 ، 8].

- 1- **التصميم الكهربائي والمغناطيسي:** يتم تحديد أبعاد الجزء الثابت والدوار وقيمة الثغرة الهوائية ونوع اللف وأبعاد وأرقام اللف ومعاملات الملف وطريقة توصيل الملفات اعتماداً على قوانين التصميم الكهرومغناطيسي. بينما يتم تصميم أسنان وقلب الجزء الثابت والدوار واعتماداً على كثافة التدفق المغناطيسي في الثغرة الهوائية وتشبع القلب وكثافة تدفق الهواء.
- 2- **اختيار العزل:** يتم تنفيذ تصميم عزل المحرك اعتماداً على معايير التصميم المعتمدة لتوفير السلامة الكهربائية حيث يتم اختيار نوع العازل بحيث تتناسب درجة حرارة تشغيل المحرك، ويوضح الجدول (1) أنواع العوازل المستخدمة ودرجات الحرارة المسموح بها لكل عازل وفق IEC60034-1 , IEC60089.

الجدول (1) أنواع العوازل المستخدمة ودرجات الحرارة المسموح بها لكل عازل وفق IEC60034-1 , IEC60089.

نوع العازل	Y	A	E	B	F	H	C
درجة الحرارة المسموح بها	90	105	120	130	155	180	أكبر من 180

- 3- **التصميم الحراري:** نظراً لأن مقاومة الملف تزداد عند زيادة درجة الحرارة حسب العلاقة:

$$\rho_t = \rho_0 [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_0)] \quad (7)$$

حيث:

$\rho_t$  - المقاومة النوعية للملف عند درجة حرارة التشغيل.

$\rho_0$  - المقاومة النوعية للمعدن المصنوع منها الملف (النحاس).

$\alpha$  - معامل التمدد الحراري.

$\theta_2$  - درجة الحرارة النهائية.

$\theta_0$  - درجة حرارة الوسط المحيط.

لذلك يتم تنفيذ التصميم الحراري لإبقاء المحرك في درجة حرارة التشغيل المطلوبة حيث يتم تحديد نوع التبريد ومعدل تدفق وسيط التبريد وقنوات التهوية.

- 4- **التصميم الميكانيكي:** يشمل التصميم الميكانيكي للآلة الكهربائية تنفيذ وتصميم المحور وقوس النهاية والهيكل الخارجي للمحرك مع الأخذ بعين الاعتبار سرعة العمل الحرجة والضوضاء واهتزازات الآلة الكهربائية وقوى الشد التي تؤثر على المحور ولحظة القصور الذاتي وما إلى ذلك.

#### 4. مواصفات المحرك:

تم حساب الأبعاد والضياعات الكهرومغناطيسية للآلة أثناء عملية التصميم الكهرومغناطيسي، واستخدمت خواص المواد الداخلة في التصميم وموصلاتها الحرارية وطريقة التبريد كقيم مدخلة، وتم تحديد معاملات الحمل الحراري داخل المحرك تبعاً لشروط الجريان والحركة الدورانية العشوائية للهواء الداخلي أثناء عمل المحرك مع الأخذ بالاعتبار أن مراوح التبريد تعمل، حيث تم إجراء التجربة على محرك تحريضي ثلاثي الطور أحادي الطبقة ذو قفص سنجابي مغلق مزود بمروحة تبريد TEFC استطاعته 550 W مواصفاته مبينة بالجدول (2) [1 ، 8].

الجدول (2) مواصفات المحرك التحريضي المدروس الناتجة من عملية التصميم الكهرومغناطيسي

P= 550	الاستطاعة الاسمية- W
$n_{syn}=1500$	سرعة الدوران - r.p.m
U=220	جهد الخط- V
m=3	عدد الأطوار
P=2	عدد الأقطاب
$f = \frac{n_{syn}}{60} P$ $f = 50$	التردد
$\omega = 2 \pi f$ $\omega = 314.1593$	السرعة الزاوية
$\eta=0.708$	المردود

يبين الجدول (3) الأبعاد الأساسية للمحرك التي استخدمت كمدخلات لبرنامج Maxwell:

الجدول (3) مواصفات المحرك التحريضي المدروس الناتجة من عملية التصميم الكهرومغناطيسي

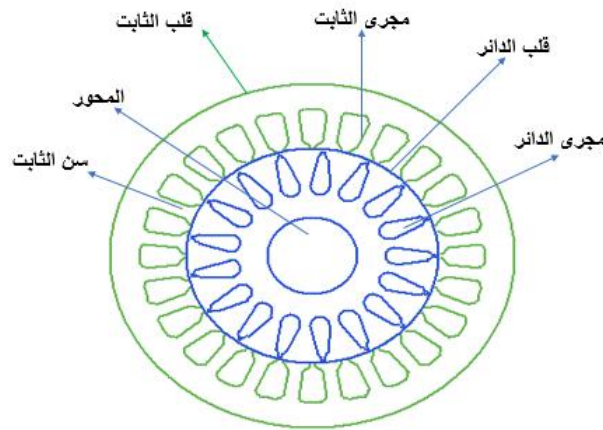
القيمة	الوحدة	الرمز	الجزء
0.116	m	$l$	طول الثابت
0.073	m	$r_1$	نصف القطر الخارجي للثابت
0.013	m	$r_2$	نصف القطر الداخلي للثابت
24	عدد	$Z_1$	عدد مجاري الثابت
22	عدد	$Z_2$	عدد مجاري الدائر
$1.9066 \cdot 10^{-4}$	$m^2$	$S_c$	مساحة مقطع الناقل في مجرى الثابت
0.0725	m	$r_3$	نصف القطر الخارجي للدائر
0.0266	m	$r_4$	نصف القطر الداخلي للدائر

## النتائج والمناقشة:

النتائج:

### 1. مميزات المحرك باستخدام حزمة Ansoft Maxwell RMxprt:

بعد معرفة جميع بارامترات المحرك كما هو وارد في الجدولين (2) و (3) نبدأ بتصميم المحرك باستخدام برنامج Maxwell حيث تستخدم القيم السابقة كمدخلات للبرنامج فنحصل على الشكل التالي:



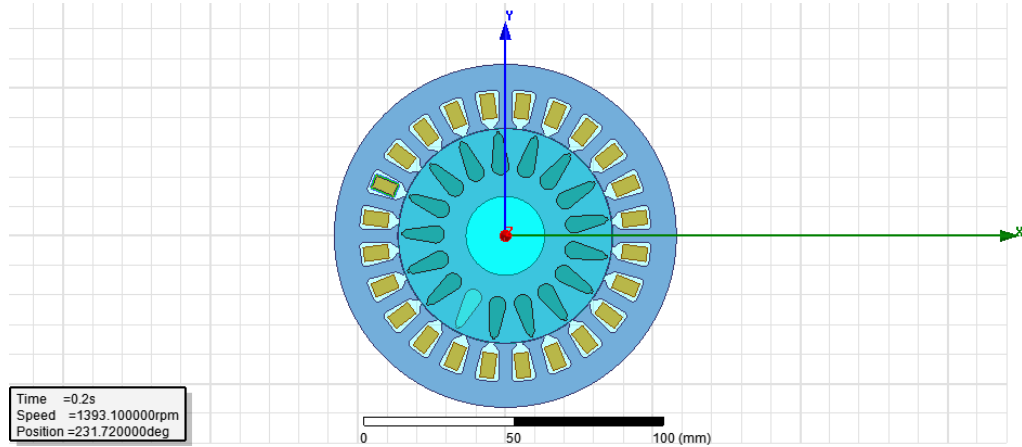
الشكل (1) الصيغة المبدئية للمحرك المدروس باستخدام حزمة Ansoft RMxprt

يمثل الشكل (1) الصيغة المبدئية للمحرك المدروس باستخدام حزمة Ansoft RMxprt، حيث يمكننا اجراء حساب تحليلي للمحرك لمعرفة كفاءة المحرك وبارامتراته الأساسية كما يوضح الشكل (2).

7	Output Power	549.988	W	
8	Input Power	777.309	W	
9	Efficiency	70.7554		%
10	Power Factor	0.605137		
11	Rated Speed	1393.1	rpm	
12	Rated Slip	0.0712689		
13	Rated Torque	3.77002	NewtonMeter	

الشكل (2) البارامترات الأساسية للمحرك المحسوبة باستخدام حزمة Ansoft RMxprt

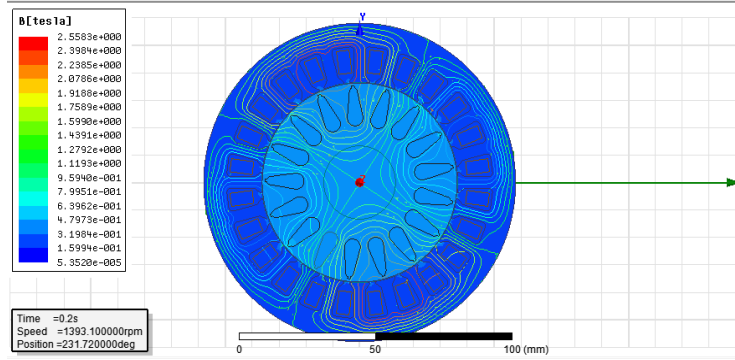
بعد ذلك ننتقل إلى الحزمة Maxwell 2D التي تتيح اجراء الاختبارات المغناطيسية للمحرك كما يوضح الشكل (3).



الشكل (3) المحرك التحريضي باستخدام الحزمة Maxwell 2D

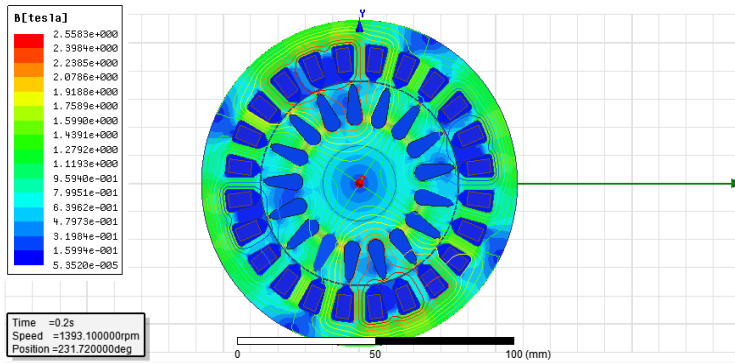
تتيح الحزمة Maxwell 2D إمكانية تحليل الفيض المغناطيسي، يبين الشكل (4) التوزيع المنتظم لخطوط السيلية المغناطيسية الأساسية داخل المحرك كما تظهر بوضوح خطوط الفيض التسريبي.





الشكل (4) خطوط السبالة المغناطيسية الأساسية والتسريية باستخدام الحزمة Maxwell 2D

كما تتيح الحزمة Maxwell 2D إمكانية الحصول على توزيع كثافة الفيض المغناطيسي، يظهر الشكل (5) أن أكبر قيمة لكثافة الفيض تكون في أسنان الثابت وهذا يتوافق مع المبدأ الأساسي لعمل الآلات التحريضية من الناحية المغناطيسية.



الشكل (5) توزيع كثافة الفيض المغناطيسي المغناطيسي في أجزاء المحرك

## 2. الحساب المخبري لمميزات العمل الاسمي للمحرك:

من أجل التحقق من صحة النتائج البرمجية للمحرك المصمم تم استخدام محرك بنفس المواصفات السابقة في مخبر الآلات الكهربائية في جامعة تشرين، حيث تم اجراء كل من اختباري العمل على فراغ والعمل على قصر. من أجل اختبار مميزات المحرك تحت الحموله، تم تحميله بشكل غير مباشر وذلك بربط محوره إلى مولده تيار مستمر تفرعية، ثم تم اقلع المحرك من منبع جهد متغير حتى الوصول إلى الجهد الاسمي و (سرعة العمل على فراغ). من أجل العمل عند الحموله الاسمية للمحرك تم تحميل المولدة التفرعية بحموله أومية متغيرة وزيادة حمولة المولدة يزداد حمل المحرك القائد حتى الوصول إلى التيار الاسمي. أثناء الزيادة التدريجية للحمولة يتم تسجيل كامل البارمترات المقاسة والتي تصف حالة المحرك في كل نقطة بدءاً من نقطة العمل على فراغ حتى نقطة العمل الاسمي. لأجل دراسة كامل مميزات المحرك يتم حساب بعض القيم اللازمة اعتماداً على القيم المقاسة، جميع هذه القيم مبينة في الجدول (3).

الجدول (3) المميزات الأساسية المقاسة والمحسوبة للمحرك المدروس مخبرياً

قيم مقاسة					قيم محسوبة		
التيار	عامل الاستطاعة	السرعة	العزم	الاستطاعة P1	الاستطاعة P2	المردود	الانزلاق
2.04	0.18	1470	0	141	0	0	0.02
2.26	0.51	1444	1.6	422	242	0.57	0.037
2.72	0.71	1413	3.1	689	458.67	0.65	0.058
2.92	0.74	1383	3.6	802	550	0.68	0.078
3.2	0.78	1365	4.2	900	457.38	0.5	0.09

### مناقشة النتائج:

- تم في هذا البحث تصميم المحرك التحريضي الثلاثي الطور حسابياً ومحاكاته حاسوبياً والتأكد من النتائج مخبرياً:
- ❖ إن تصميم المحرك حسابياً معقد وطويل الحساب ولكنه يعطينا جميع القيم التي نحتاجها في عملية التصميم، كما أن بعض القيم الناتجة من عملية الحساب ضرورية لاستخدامها كمدخلات في عملية المحاكاة.
  - ❖ إن التعامل مع برنامج Maxwell سهل ومريح بعد توفر المعطيات الأساسية اللازمة لعملية التصميم كما أنه يعطينا تصوّر واضح عن أداء المحرك ومميزاته، ناهيك عن أنه يحل كثافة الفيض ويبين توزع خطوط الفيض المغناطيسي داخل المحرك وهذا لا توفره الطريقة الحسابية.
  - ❖ قبل البدء بإجراء الاختبارات تم تأمين محرك يحمل المواصفات المستخدمة في عملية المحاكاة، حيث تم حساب باقي القيم اللازمة اعتماداً على قوانين التصميم الكهرومغناطيسي، وإجراء التجارب عليه تبين أن النتائج متقاربة مع كل من النتائج الحسابية ونتائج المحاكاة، وهذا يتوافق مع النتائج المنشورة سابقاً في هذا المجال.
  - ❖ تمثل هذه الورقة البحثية مرحلة من بحث متكامل سيتم فيه إجراء تعديل تصميمي على المحرك المدروس بهدف تخفيف الأثر الحراري للضياعات في ملف الثابت على عازلية الملفات، ودراسة أثر التقنية المستخدمة لتخفيف الحرارة (تجريبياً و تحليلياً) على البارامترات الطاقية للمحرك، وسيتم نشر نتائج هذه الدراسة تبعاً.

### الاستنتاجات والتوصيات:

#### الاستنتاجات:

تم في هذا البحث استخدام طريقتين لحساب وتحليل المحرك التحريضي الثلاثي الطور، وكانت النتائج مقبولة ومتقاربة، حيث أكدت النتائج المخبرية صحة التصميم الحسابي ودقة العمل باستخدام برنامج Maxwell للحصول على باقي البارامترات مثل كثافة الفيض وتوزع خطوط الفيض المغناطيسي، أي أن استخدام برنامج Maxwell 2D في عملية التصميم يتيح للمصمم إجراء دراسة كهرومغناطيسية شاملة والحصول على جميع مميزات التشغيل للمحرك، وبالتالي فإن المحرك المصمم جاهز لإجراء باقي الاختبارات المتعلقة بزيادة الحملية والتحليل الحراري مثلاً.

#### التوصيات:

إن أحد الأعمال المستقبلية كنتمة لهذا البحث يمكن أن يكون:

- اجراء التحليل الحراري للمحرك باستخدام Ansys لمعرفة درجة الحرارة في كل جزء منه، بحيث يكون المحرك جاهزاً لإضافة التعديل الذي يهدف للتخفيف من الأثر الحراري للضياعات في ملف الثابت.
- دراسة إمكانية ادخال برنامج Maxwell في الخطة التدريسية لطلاب هندسة الطاقة الكهربائية في جامعة تشرين.

### References:

- [1] Pyrhonen, J, Jokinen, T and Hrabovcova, V “*Design of Rotating Electrical Machine*” ©John Wiley & Sons, Ltd. ISBN, 2008, PP668.
- [2] Hassan, I, N ” *Induction Machines*”. Tishreen University, 2003, pp 600.
- [3] Mahmoud, A, A " *Modeling Electrical Machines Using Matlab and Simulink*" Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Engineering Science Series Vol. (28) No (1) 2006, pp 65-81.
- [4] Merhej, M " *Modeling of three-phase induction motor drive system using oriented field*" Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol . ( 73) No. (2) 2102, pp 91-107.
- [5] Ahmet Nur, Zeki Omaç and Eyyüp Öksüztepe " *Modelling and Analyzing of Induction Motor Using Three-Dimensional Finite Element Method*". Valencia -Spain, A. NUR et al./ ISITES,2015, pp 457-461.
- [6] Cenk Ulu, Oğuz Korman and Güven Kömürgöz " *Electromagnetic and Thermal Design/Analysis of an Induction Motor for Electric Vehicles*" International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research Vol. 8, No. 2, March 2019, pp 239-246.
- [7] Bensalem,Y and M, N, Abdelkrim " *Modeling and Simulation of Induction Motor based on Finite Element Analysis*" International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS) Vol. 7, No. 4, December 2016, pp. 1100~1109.
- [8] Hassan, I, N ” *Design of Electrical Machines*”. Tishreen University, 1995, pp 494.