

دراسة تأثير معامل الحمل الحراري القسري على التبادل الحراري في المحرك التحريضي الثلاثي الطور

الدكتور المهندس عزت حسن*

الدكتور المهندس زيد بدر**

المهندس همام زيتي***

ملخص

تلعب طريقة جريان وسيط التبريد داخل الآلة الكهربائية دوراً هاماً في عملية التبادل الحراري بينها وبين الوسط الخارجي. يمكن أن نميّز نوعين من الحمل الحراري: الحر والقسري، وذلك حسب نوع القوة المسببة لجريان أو حركة المائع على سطح الجسم الصلب. وتبعاً لنوع الجريان فيما إذا كان صفيحي أو مضطرب فإن عامل الحمل الحراري يقسم إلى مركبتين: ساكنة ودورانية. نسعى في هذا البحث إلى دراسة أثر تغيير معاملات الحمل الحراري القسرية (الدورانية) على التبادل الحراري للآلة الكهربائية مع الوسط الخارجي، حيث تتم الدراسة بطريقتين هما طريقة البارامترات المجمعة ونمذجة معادلاتها باستخدام برنامج MATLAB، وطريقة العناصر المنتهية باستخدام برنامج ANSYS. أعطت النتائج قيم مقارنة للطرفين لجهة تحسين عملية التبادل الحراري للآلة عند تحسين المركبة الدورانية لعامل الحمل الحراري.

كلمات مفتاحية: محرك تحريضي، تحليل حراري، ANSYS، Maxwell، MATLAB.

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

Study of the Forced convection coefficient on Thermal Exchange in a Three phase Induction Motor

Dr .Eng .Izzat Hasan *

Dr .Eng .Zaid Badr**

Engineer Homam Zaity***

ABSTRACT

The way the refrigerant circulates inside the electrical machine plays an important role in the heat exchange process between it and the outside medium. Two types of free and forced convection can be distinguished according to the type of force causing the flow or movement of the fluid on the surface of a solid particle. Depending on the type of flow in it, if it is laminar or turbulent, the convection factor is divided into two components: static and rotating. In this paper, we seek to study the effect of the change of coercive (rotational) convection coefficients on the heat exchange of the electrical machine with the external medium, where the study is carried out in two methods: the combined parameters method and their equations modeling using the MATLAB program, and the finite element method using the ANSYS program. The results gave comparable values for the two parties in terms of improving the heat exchange process of the machine when improving the rotational component of the heat convection factor.

Keyword: *Induction Motor, Thermal Analysis, ANSYS, Maxwell, MATLAB*

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

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

*****Postgraduate Student, Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Syria.**

1. المقدمة:

يعدّ تطور قطاع الكهرباء عاملاً هاماً في التقدم العلمي والتقني بحيث يعبر عن مستوى التنمية والانتاج في جميع القطاعات: الصناعي والنقل والزراعي. ويعود الدور الأكبر في عملية التطور هذه إلى تصميم وتصنيع واستثمار الآلات الكهروميكانيكية بشكلها التقليديين: المولدات والمحركات.

تستهلك المحركات الكهربائية الجزء الأكبر من الطاقة الكهربائية المولدة والتي تتحوّل، بفعل عملها، إلى طاقة ميكانيكية. تتنوّع المحركات الكهربائية المستخدمة في سير العمليات الانتاجية المختلفة من حيث مبدأ العمل والتصميم والبناء، بما يؤمن الاستخدام الأكثر كفاءة لأنظمة نقل الحركة الكهربائية. كل هذه العوامل تحدد الغرض الرئيس لتصميم الآلة الكهروميكانيكية وهو: تحقيق أعلى مستوى للمؤشرات الفنية والاقتصادية.

يرافق عملية تحويل الطاقة في الآلات الكهربائية بشكل عام ضياعات مختلفة ومهدورة (غير قابلة للعكس). هذه الطاقة الضائعة تتحول إلى حرارة بفعل جول، والتي يؤدي انتشارها في الآلة إلى تسخين الأقسام الفعالة والتصميمية لها، وبالتالي ارتفاع درجة حرارتها. تنتشر الحرارة في أقسام الآلة بشكل غير متجانس حيث تكون على الغالب الأقسام الفعالة لها درجة حرارة أعظمية والسطح الخارجي للآلة أقل درجة حرارة. ويؤدي هذا إلى تدفق الحرارة من الأقسام الفعالة إلى الأجزاء أو الأقسام التصميمية للآلة ومنه إلى الوسط الخارجي المحيط بها، وبالتالي تعتبر الآلة الكهربائية ليس فقط نظام كهروميكانيكي بل أيضاً وحدة حرارية. [1]

عند تصميم الآلة الكهربائية يتم تحديد شكل وأبعاد العناصر، التي يجب أن تؤمن عمل وظيفي ذو وثوقية عالية للأجزاء النشطة منها. كما ويتم تحديد متانة وقساوة جميع أجزاء الآلة المعرضة لتأثير قوى ميكانيكية. أيضاً في هذه المرحلة يتم التطرق إلى مسائل تشكيل مسار التبريد وذلك بهدف تأمين تبريد فعال، الأمر الذي سيسمح باستثمارها لفترة طويلة وبالتالي ضمان مؤشرات فنية واقتصادية عالية للآلة الكهربائية. [2]

لكي تعمل الآلة كهربائية بموثوقية وبمؤشرات طاقية عالية يُشترط عند تصميمها أن ترفق بنظام تبريد فعال يستند على الحسابات الحرارية وهذا النظام عبارة عن مجموعة من قنوات مسار التبريد يتحرك عبرها وسيط مبرد (غاز أو سائل) تحت تأثير عمل عناصر ضاغطة، كالمراوح أو المضخات أو عناصر مركبة في الآلة الكهربائية تقوم بنفس الدور، وتؤمن حركة قسرية موجهة للوسيط المبرد. يتمحور الشرط الرئيسي لنظام التبريد في تأمينه لمستوى مقبول لاحتراق

الأجزاء الرئيسية من الآلة الكهربائية كالمفاتيح مثلاً. كما ويعتبر هذا الشرط ضرورياً لتأمين أطول فترة استثمار ممكنة للآلة الكهربائية وبمستوى وثوقية عمل عالٍ [2].

تتعدد طرق التحليل الحراري للآلات الكهربائية، منها ما يعطي نتائج مباشرة ودقيقة للنقاط الأكثر أهمية في الآلة مثل برنامج MOTOR-CAD الذي أطلقته شركة Motor design limited، والذي يؤمن سهولة وسرعة في الحساب، ولكنه يُفسح للمستخدم مجال محدود للعمل بحيث يجب التقيد بالبناء الهندسي للمحرك المدخل مسبقاً للبرنامج. ومنها ما يعطي نتائج مقبولة الدقة ويعطي للمصمم مرونة في تحديد المعطيات الأساسية للبنية التصميمية للمحرك وإدخال التعديلات التي يراها المصمم أو الباحث ضرورية لتحسين أداء المحرك مثل:

- ❖ طريقة العناصر المنتهية (FEA) Finite Element Analysis.
 - ❖ وطريقة ديناميكا الموائع الحسابية: Computational Fluid Dynamics (CFD).
 - ❖ بالإضافة لطريقة البارامترات المجمعة Lumped-parameter Thermal Model.
- وسنجري عملية التحليل الحراري للمحرك التحريضي في هذا البحث كل من طريقتي: البارامترات المجمعة والعناصر المنتهية.

2. أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في اقتراح حل لمشكلة لاتزال إحدى أكثر المشاكل شيوعاً. وهي التخفيف من أثر الحرارة المنبعثة -نتيجة الضياعات المختلفة- على كفاءة المحرك ومنع انهيار عازليته، وذلك من خلال تحسين المركبة الدورانية لمعامل الحمل الحراري الداخلي للمحرك مما ينعكس إيجاباً على استثمار المحركات التحريضية وزيادة من عمر العازلية.

3. طرائق البحث ومواده:

تمت محاكاة الحالة الحرارية للمحرك عند نقطة العمل الاسمية بطريقتين:

- 1- طريقة النموذج البارامتري المجمع ونمذجة معادلاته في برنامج (MATLAB).
- 2- طريقة العناصر المنتهية التي يستخدمها برنامج ANSYS في عملية التحليل الحراري.

وبعد الحصول على النتائج قمنا بمقارنة درجة الحرارة في النقاط الأساسية في المحرك عند تحسين المركبة الدورانية مع درجة حرارة النقاط المقابلة لها في الحالة الطبيعية.

4. الدراسة المرجعية

يربط المرجع [5] الدراسة الحرارية بالدراسة الكهرومغناطيسية، حيث تم تحديد قيمة الضياعات (النحاسية والحديدية) بناء على التحليل الكهرومغناطيسي الذي يتم خلال دورة عمل واحدة، أما التحليل الحراري فيحتاج أكثر من دورة عمل واحدة، وذلك لأن زمن الاستجابة الكهرومغناطيسي أقل من زمن الاستجابة الحراري. واستخدمت قيم الضياعات المحسوبة كمدخلات للتحليل الحراري.

لاحظ الباحث ارتفاع قيمة الضياعات النحاسية بشكل كبير مع ارتفاع درجة الحرارة. وانخفاض قيمة الضياعات الحديدية في الدائر مع ارتفاع درجة الحرارة. كما استنتج انخفاض قيمة عزم الدوران بنسبة 4% عند ارتفاع درجة الحرارة من 20 إلى 172 درجة مئوية.

تم حساب درجات الحرارة في نقاط مختلفة من المحرك باستخدام طريقة العناصر المنتهية **Finite Element Method (FEM)**، وللتحقق قام الباحث بمقارنة نتائج هذه الطريقة في التحليل الحراري مع النتائج التي يعطيها برنامج **MOTOR-CAD**، حيث تبين له أن نتائج الطريقتين متساوية تقريباً، ما عدا درجة حرارة أسنان الثابت، وهذا بسبب مواجهة الأسنان للثغرة الهوائية. ويعود ذلك إلى احتواء **MOTOR-CAD** على معطيات مفصلة تجعل نتائجه أكثر دقة في عملية التحليل الحراري.

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 [6].

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 [7].

تمت محاكاة عمل نظام متكامل يحتوي على محرك تحريضي ودارة قيادة ومخطط تحكم في بيانات نمذجة مختلفة لكل جزء من النظام، حيث تم تصميم المحرك باستخدام Ansys-

Maxwell وتمّ تصميم دارة القيادة باستخدام Ansys-Simplorer بينما تم انجاز مخطط التحكم في بيئة MATLAB-Simulink، تمت دراسة النظام في حالتين هما حالة وجود عطل في دارة 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 الكهرطيسي [8].

أما في المرجع [3] فقد تم فيه وضع مخطط حراري مكافئ للمحرك التحريضي ثلاثي الطور عند درجات حماية ميكانيكية وأنظمة تبريد مختلفة ووضعت المعادلات الجبرية الخاصة لهذا المخطط. أظهر النموذج كفاءة في إمكانية معرفة درجات الحرارة في أي جزء من أجزاء المحرك، وبناء على ذلك تم تحسين أداء المحرك عن طريق تحسين عمليات التبادل الحراري (عن طريق التغيير في قيمة الناقلية الحرارية λ).

يلاحظ من الدراسات السابقة جميعها أن بعض عمليات البحث تركز على دراسة أثر ارتفاع درجة الحرارة على أداء المحرك، وإمكانية تحسين عمليات التبادل الحراري عن طريق تحسين معاملات التوصيلية الحرارية، فيما يدرس بعضها الآخر تأثير وجود التوافقيات العليا، وزيادة درجة الحرارة المرافق لتواجد هذه التوافقيات.

ندرس في هذا البحث أهمية تحسين المركبة الدورانية لمعامل الحمل الحراري الداخلي في تبديد الحرارة الناتجة عن الضياعات المختلفة من داخل المحرك إلى الوسط الخارجي وتتم الدراسة وفق طريقتي البارامترات المجمعّة والعناصر المنهية.

5. الضياعات في المحرك التحريضي:

إن دراسة الضياعات بمختلف أشكالها أمر بالغ الأهمية قبل البدء بالدراسة الحرارية، لكونها المنابع الحرارية التي تشكل المدخل للمعادلات الحرارية في المحرك. لذلك يجب معرفة توزيع الضياعات في جميع أجزاء المحرك.

تقسم الضياعات في المحرك التحريضي إلى ضياعات أساسية وإضافية، وتتكون الضياعات الأساسية من الضياع الكهربائي الناتج عن مرور التيار في الملفات وتسمى ضياعات نحاسية، ومن الضياعات الحديدية في الدارة المغناطيسية للمحرك نتيجة تيارات فوكو الإحصارية والتعويق المغناطيسي. أما الضياعات الإضافية فتشمل الضياعات السطحية والترددية (النبضية) والضياعات في كل من الملفات والدارة المغناطيسية الناتجة عن الفيض المتسرب وتشوه الساحة

المغناطيسية في الثغرة الهوائية عند الحمولة، على شكل نسبة: 30% من الضياعات الإضافية تحدث في أسنان الثابت و 40% منها يحدث في الملفات في المجاري و 30% منها يحدث في حديد الدائر. يتم تجاهل الضياعات في الرولمانات ويمكن تضمينها كمنبع حراري في المحور. وبسبب التناظر يتم دراسة نصف المحرك فقط وبالتالي يتم أخذ نصف الضياعات في النموذج الحراري [11 , 10].

6. مواصفات المحرك المستخدم في عملية التحليل الحراري للنموذجين:

تم حساب الأبعاد والضياعات الكهرومغناطيسية لآلة 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 التحليل الحراري على محرك تحريضي ثلاثي الطور ثنائي الطبقة ذو قفص سنجابي مغلق مزود بمروحة تبريد TEFC استطاعته 30 KW مواصفاته وأبعاده مبينة بالجدول بالجدولين (1 ، 2) [2].

الجدول (1) مواصفات المحرك التحريضي الذي أجريت عليه عملية النمذجة

$P=30.10^3$	الاستطاعة الاسمية - W
$n_{syn}=1500$	سرعة الدوران - r.p.m
$U=690$	جهد الخط - V
$U_{sp\Box} = \frac{U}{\sqrt{3}} = 398.3717$	جهد الطور - V
$m=3$	عدد الأطوار
$2P=4$	عدد الأقطاب
$f = \frac{n_{syn}}{60} P \quad f = 50$	التردد
$\omega = 2 \pi f \quad \omega = 314.1593$	السرعة الزاوية
$\cos \varphi_n = 0.84$	عامل الاستطاعة
$\eta=0.927$	المردود
$\sigma_{cu20^\circ C} = 57 \cdot 10^6$	الموصلية الكهربائية للنحاس عند الدرجة

	20°C
$\sigma_{Al20^\circ C} = 37 \cdot 10^6$	الموصلية الكهربائية للألمنيوم عند الدرجة 20°C
$P_{1.5}=6.6$	الضياعات الحديدية في واحدة الكتلة من المادة المصقحة (الضياع النوعي): $W/kg, 1.5T, 50 Hz$

الجدول (2) أبعاد المحرك - m

الجزء	الرمز	القيمة بـ m
طول الثابت	l	0.2066
نصف القطر الخارجي للثابت	r_1	0.169
نصف القطر الخارجي للسِّن	r_2	0.1351
الخطوة السنّية	τ_u	0.0106
عدد المجاري	n	48
نصف القطر الداخلي للسِّن	r_3	0.1075
عرض سن الثابت	b_{ds}	0.006812
نصف قطر اللفة	r_4	$5718 \cdot 10^{-3}$
سماكة العازلية	d_i	0.0005
مساحة المقطع المكافئ للنحاس في المجرى	S_c	$9066 \cdot 10^{-4}$
نصف القطر الخارجي للدائر	r_5	0.2134
نصف قطر حلقة القسم الجبهوي	r_t	0.1213

7. تصميم الشبكات الحرارية باستخدام النموذج البارامتري المجمع:

تطرح الحرارة المكتسبة في التجهيزات الكهربائية والناجمة عن الضياعات المختلفة فيها في الحالة المستقرة إلى الوسط الخارجي عبر انتقال الحرارة بأشكال مختلفة: توصيل، حمل وإشعاع. [4 , 9]

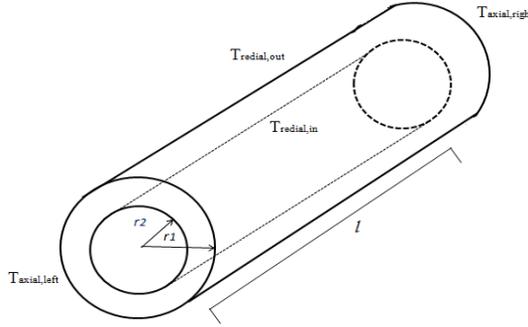
1.7 انتقال الحرارة بالتوصيل:

تنتقل الحرارة بين أجزاء المحرك المتلاصقة بالتوصيل، وتعطى المقاومة الحرارية التي تصف انتقال الحرارة بالتوصيل بالعلاقة (1) [9]:

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda.S} \quad (1)$$

حيث أن: l - طول الجسم ويقاس بـ m ، λ - معامل التوصيل الحراري وتقاس بـ $\frac{W}{m.^{\circ}C}$ ، S - مساحة المقطع وتقاس بـ m^2 .

من المعروف أن الأجزاء الرئيسية للألة مصممة بحيث تأخذ شكلاً أسطوانياً كما هو مبين في الشكل (1)



الشكل (1) الشكل العام للجسم الاسطواني ببعديه الشعاعي والمحوري ودرجات الحرارة المرتبطة بكل منهما

r_1 نصف قطر الأسطوانة الخارجية r_2 نصف قطر الأسطوانة الداخلية

$T_{axial,right}$ انتقال الحرارة محورياً إلى يمين الأسطوانة $T_{axial,left}$ انتقال الحرارة محورياً إلى يسار

الأسطوانة

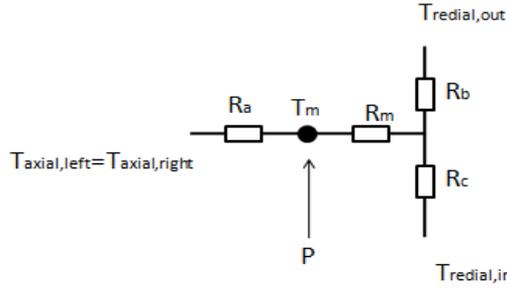
$T_{radial,out}$ انتقال الحرارة شعاعياً إلى خارج للأسطوانة $T_{radial,in}$ انتقال الحرارة شعاعياً إلى داخل الأسطوانة

لشرح انتقال الحرارة في جسم أسطواني نفترض مايلي:

- تتدفق الحرارة في الاتجاهين المحوري والشعاعي بشكل مستقل.

- عقدة الحرارة الوسطية هي التي تحدد التدفق الحراري في كلا الاتجاهين الشعاعي والمحوري.
- تتوزع الحرارة المتولدة بشكل منتظم.

بالإضافة إلى الافتراضات السابقة، فإن تأثير التدفق الحراري بالاتجاه المحيطي قليل في معظم نقاط الآلة ولذلك لن يعتمد الانتقال بالاتجاه المحيطي بشكل رئيسي كما الشعاعي والمحوري، إنما سيحسب فقط في النقاط التي يكون فيه ذو أهمية أثناء عملية التحليل الحراري. عند أخذ الافتراضات السابقة بعين الاعتبار، نحصل على شبكتين منفصلتين ثلاثيتي الأطراف. تمثل إحداها انتقال الحرارة في الاتجاه المحوري والأخرى بالاتجاه الشعاعي. وبما أن المحرك متناظر بالنسبة لمحوره الشاقولي، تختصر الشبكة الحرارية الخاصة بانتقال الحرارة بالاتجاه المحوري إلى مقاومة حرارية مضاعفة تمثل الانتقال الحراري في هذا الاتجاه، كما هو مبين بالشكل (2).



الشكل (2) الشبكة الحرارية للجسم الاسطواني بالاتجاهين الشعاعي والمحوري

$T_{axial,right}$ انتقال الحرارة محورياً إلى يمين الأسطوانة
 $T_{axial,left}$ انتقال الحرارة محورياً إلى يسار الأسطوانة

$T_{radial,out}$ انتقال الحرارة شعاعياً إلى خارج للأسطوانة
 $T_{radial,in}$ انتقال الحرارة شعاعياً إلى داخل الأسطوانة

تتكون هذه الشبكة من عقدتين داخليتين وأربع مقاومات حرارية R_a, R_m, R_b, R_c ، تعطى

على الترتيب بالعلاقات [10]:

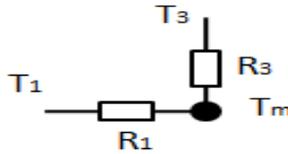
$$R_a = \frac{l}{6\pi\lambda_a(r_1^2 - r_2^2)} \quad (2)$$

$$R_b = 2R_{1r} = \frac{1}{2\pi\lambda_r l} \left[1 - \frac{2r_2^2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{(r_1^2 - r_2^2)} \right] \quad (3)$$

$$R_c = \frac{1}{2\pi\lambda_r l} \left[\frac{2r_1^2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{(r_1^2 - r_2^2)} - 1 \right] \quad (4)$$

$$R_m = \frac{-1}{4\pi(r_1^2 - r_2^2)\lambda_r l} \left[r_1^2 + r_2^2 - \frac{4r_1^2 r_2^2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{(r_1^2 - r_2^2)} \right] \quad (5)$$

تطبق العلاقات السابقة على الأجزاء الاسطوانية في المحرك، وبالنسبة لكل من ملفات الثابت والقسم الجبهوي والمحور. تمثل وفق الحالة الخاصة حيث $r_2=0$ ، حيث تأخذ شكل قضبان اسطوانية توضح دارتها في الشكل (3).



الشكل (3) الشبكة الحرارية بالاتجاهين الشعاعي والمحوري عندما $r_2=0$

وعندها تحسب المقاومتين R_3 و R_1 بالمعادلتين [9]:

$$R_1 = \frac{l}{6\pi\lambda_a r_1^2} \quad (6)$$

$$R_3 = \frac{1}{4\pi\lambda_r l} \quad (7)$$

2.7 انتقال الحرارة بالحمل:

يحدث الحمل الحراري عندما تنتقل الحرارة بين جسم صلب ومائع متحرك (غاز أو سائل)، وبالعكس على الحد الفاصل بين المادتين. وحسب نوع القوة المسببة لجريان أو حركة المائع على سطح الجسم الصلب يمكن أن نميز نوعين من الحمل الحراري هما الحمل الحراري الحر أو الطبيعي والحمل القسري (عند وجود مروحة تبريد مثلاً). وسواء كانت حركة المائع طبيعية أم قسرية فإننا سَنَميِّز نوعين من الجريان ولكل منهما قوانينه الخاصة، فإذا تحركت جزيئات المائع بشكل منتظم يكون الجريان صفحي، أما إذا تحركت جزيئات المائع بشكل عشوائي يكون الجريان مضطرب حيث كل جزيئة تمتاز بسرعة مختلفة بالقيمة والاتجاه. وتعطى المقاومة الحرارية R_{th} التي تصف انتقال الحرارة بالحمل بالعلاقة (8) [9]:

$$R_{th} = \frac{1}{\lambda_c S} \quad (8)$$

حيث أن: S - مساحة سطح التبادل الحراري بـ m^2 ، λ_c - هي معامل الحمل الحراري $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$. ونظراً لاختلاف نوع الجريان في الآلات الكهربائية في الحالة الساكنة عنه في الحالة الدورانية فإن معامل الحمل الحراري λ_c يأخذ قيم مختلفة تبعاً للنقطة التي يتم فيها الحمل الحراري وتبعاً لوجود نظام تهوية أو عدم وجوده (مروحة). وبالتالي يشار لمعامل الحمل الحراري λ_c برمز λ_r في الحالة الدورانية ورمز λ_s للحالة الساكنة (المراوح غير فعالة)، وتبعاً لمكان الحمل الحراري نَميِّز ثلاث قيم لهذا المعامل في كل حالة:

- $\lambda_{1r}, \lambda_{1s}$ - انتقال الحرارة بين الهيكل والهواء الخارجي
- $\lambda_{2r}, \lambda_{2s}$ - انتقال الحرارة بين الثابت والدائر عن طريق الثغرة الهوائية
- $\lambda_{3r}, \lambda_{3s}$ - انتقال الحرارة بين حديد الثابت والدائر والملفات الطرفية أو الأغشية الخارجية وهواء الأغشية الخارجية.

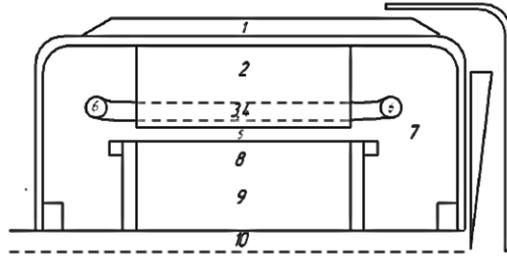
3.7 انتقال الحرارة بالإشعاع:

فسرَ العالمان أينشتاين وبلانك الإشعاع الحراري على أنه تدفق فوتوني كوانتي يمتاز بكتلة وكمية حركة وبساحة كهرومغناطيسية، وينتقل من جسم لآخر (الجسمان لهما درجة حرارة مختلفة عن الصغر المطلق) على شكل أمواج كهرومغناطيسية مختلفة الطول. في الآلات الكهربائية، الإشعاع الحراري ليس ذو أهمية كبيرة كما هو الحال بالنسبة لكل من التوصيل والحمل الحراري. ويكون انتقال الحرارة بالإشعاع ذو أهمية لآلة كهربائية عند عدم وجود مروحة في نظام التهوية وبالتالي تنتقل الحرارة بالحمل الحراري الطبيعي فقط وبالإشعاع. [4]

8. النموذج الحراري البارامتري المجمع:

يعتبر النموذج الحراري البارامتري المجمع واحداً من النماذج التي تدرس العمليات الحرارية في المحرك التحريضي مثل الحساب التحليلي الدقيق (نموذج الضياع الموزع) والتحليل العددي أو الطريقة العقدية (نموذج الضياع المركز) ويعتبر هذا النموذج بسيطاً إلى حد ما، ومعقداً إذا أردنا تحديد درجات الحرارة في معظم عناصر الآلة. بشكل عام، النموذج البارامتري المجمع هو طريقة لتبسيط عمل الأنظمة الموزعة مكانياً في حيز يتألف من عناصر متلاصقة تقرّبنا من فهم سلوك أو عمل النظام الموزع تحت افتراضات معينة. تعتمد هذه الطريقة في حل المسائل الحرارية على وضع دارات حرارية بالتشابه مع الدارات الكهربائية، التي يكون فيها التحليل الرياضي أبسط بكثير من حل معادلات ماكسويل من أجل النظام الفيزيائي الحقيقي. حيث أن الكميات الحرارية تناظر الكميات الكهربائية كما هو معروف.

تقسم الآلة الكهربائية هندسياً إلى عدد من الأجزاء (العناصر) المجمعة شكل (4)، وكل جزء يعتبر منبع حراري ويرتبط مع الأجزاء المجاورة بمقاومة حرارية، حيث تم تمثيل مصادر الضياعات النحاسية والحديدية والإضافية كمنابع حرارية. مع الأخذ بالاعتبار أن التوليد الحراري يتركز في نقطة واحدة منه تمثل متوسط درجة الحرارة للجزء، وتتصل الأجزاء المتجاورة مع بعضها البعض من خلال مقاومات حرارية.



الشكل (4) الأجزاء الرئيسية للمحرك التحريضي

10	7 الهواء الداخلي	4 ملفات الثابت	1 الهيكل
		المحور	
	8 ملفات الدائر	5 الثغرة الهوائية	2 قلب الثابت
	9 قلب الدائر	6 القسم الجبهوي	3 أسنان الثابت

تأخذ المكونات الصلبة لكل من الهيكل (1)، والثابت (2،3)، والملفات (4،6) والدائر (8،9) والمحور (10) شكلاً اسطوانياً، واستناداً لشكلها الاسطواني صممت شبكة المقاومات

الحرارية الخاصة بها. يوجد مكونان آخرين يمثلان الثغرة الهوائية (5) والهواء الداخلي (7). وتتصل الأجزاء العشر مع بعضها مباشرة، أو عبر مقاومات حرارية إضافية [9].

1.9 تحليل النموذج الحراري للمحرك التحريضي باستخدام LPTM:

الهدف من هذا البحث هو إيجاد متوسط درجات الحرارة لعناصر النموذج الحراري، يتألف النموذج الحراري للمحرك التحريضي ذو التصميم المغلق TEFC من 10 عقد (نقاط) حرارية كما في الشكل (4)، لكل عقدة منها شبكتها الحرارية الخاصة، ويجمع هذه الشبكات الحرارية مع بعضها ينتج المخطط الحراري الكلي للمحرك التحريضي الموضح بالشكل (5).

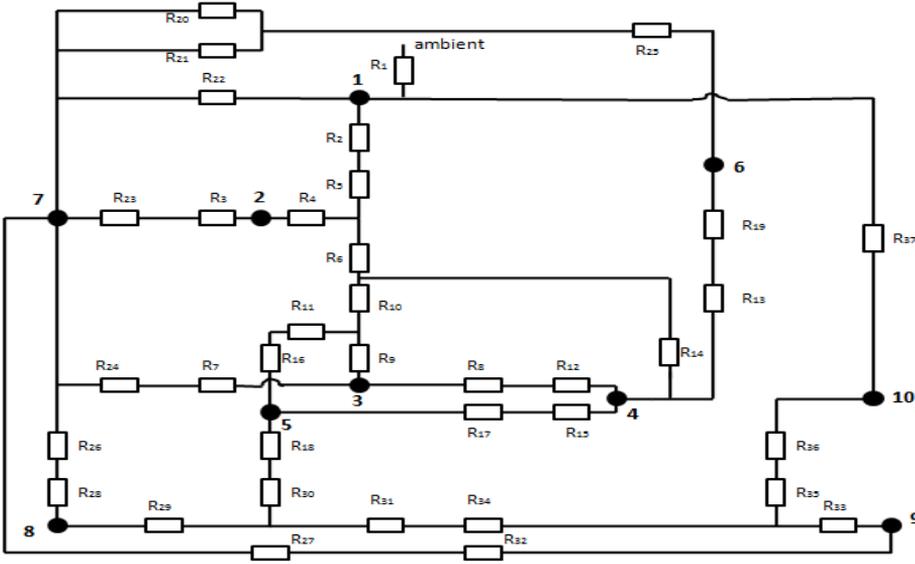
من أجل تحليل الحالة المستقرة نحسب ارتفاع درجة حرارة العقد من المعادلة المصفوفية:

$$G^{-1}P \quad \Delta T = \quad (9)$$

حيث أن: $-P$ مجموع الضياعات في كل عقدة، $-\Delta T$ ارتفاع درجة الحرارة. تستخدم مقاومات عناصر الشبكة الحرارية للحصول على مصفوفة ناقلات حرارية أبعادها $n * n$ ، حيث n عدد العقد في النموذج. ويتم تعريف مصفوفة الناقلات الحرارية بالشكل:

$$G = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{1,i}} & -\frac{1}{R_{1,2}} \dots & -\frac{1}{R_{1,n}} \\ -\frac{1}{R_{2,1}} & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{2,i}} \dots & -\frac{1}{R_{2,n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ -\frac{1}{R_{n,1}} & -\frac{1}{R_{n,2}} \dots & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{n,i}} \end{bmatrix}$$

حيث العنصر القطري هو مجموع ناقلات الشبكة المتصلة بالعقدة n $G(i,j)$ الناقلية الحرارية الموصولة مع العقد i,j بإشارة سالبة. وبحل المعادلة (9) نحصل على حل الحالة المستقرة.



الشكل (5) المخطط الحراري الكلي للمحرك التحريضي

7 الهواء الداخلي	4 ملفات الثابت	1 الهيكل
	10 المحور	
8 ملفات الدائر	5 الثغرة الهوائية	2 قلب الثابت
9 قلب الدائر	6 القسم الجبهوي	3 أسنان الثابت

10. دراسة المحرك باستخدام Maxwell:

قبل البدء في تصميم المحرك، يتم تحديد بارامترات التصميم مثل الاستطاعة، عدد الأطوار، التردد، جهد التغذية، المردود المتوقع، عامل الاستطاعة، كثافة التيار في الناقل وكثافة التدفق في الثغرة الهوائية. بعد ذلك تبدأ عملية التصميم، ويتم إجراء المراجعات المنهجية عن طريق تعديل بارامترات التصميم على نموذج المحرك حتى يتم استيفاء معايير التصميم الأخرى كالتصميم الحراري و الميكانيكي واختبار العزل [11 ، 2].

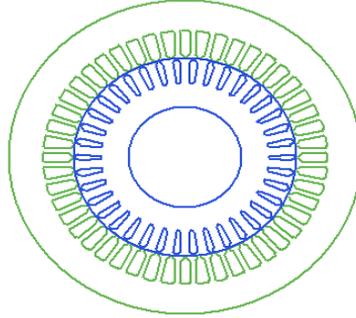
يمكن تلخيص خطوات تصميم الآلة الكهربائية على النحو التالي [8 ، 2]

1- التصميم الكهربائي و المغناطيسي: يتم تحديد أبعاد الجزء الثابت والدوار وسماكة الثغرة الهوائية ونوع اللف وأبعاد وأرقام ومعاملات الملف وطريقة توصيل الملفات اعتماداً على قوانين التصميم الكهرومغناطيسي. أما تصميم أسنان وقلب الجزء الثابت والدوار يتم اعتماداً على كثافة التدفق المغناطيسي في الثغرة الهوائية وتشبع القلب.

- 2- اختيار العزل: يتم تنفيذ تصميم عزل المحرك اعتماداً على معايير التصميم المعتمدة لتوفير السلامة الكهربائية مع مراعاة درجة حرارة تشغيل المحرك.
- 3- التصميم الحراري: نظراً لأن مقاومة الملف تزداد مع ارتفاع درجة الحرارة، فإن للتصميم الحراري تأثير مهم على كفاءة المحرك. لذلك يتم تنفيذ التصميم الحراري بما يضمن عمل المحرك ضمن مجال درجة الحرارة المسموحة. في التصميم الحراري، يتم تحديد نوع التبريد ومعدل تدفق وسيط التبريد وقنوات التهوية وما إلى ذلك.
- 4- التصميم الميكانيكي: يشمل التصميم الميكانيكي للآلة الكهربائية تنفيذ وتصميم كل من المحور وقوس النهاية والهيكل الخارجي للمحرك مع الأخذ بعين الاعتبار سرعة العمل الحرجة والضوضاء واهتزازات الآلة الكهربائية أثناء العمل وقوى الشد التي تؤثر على المحور ولحظة القصور الذاتي وما إلى ذلك.

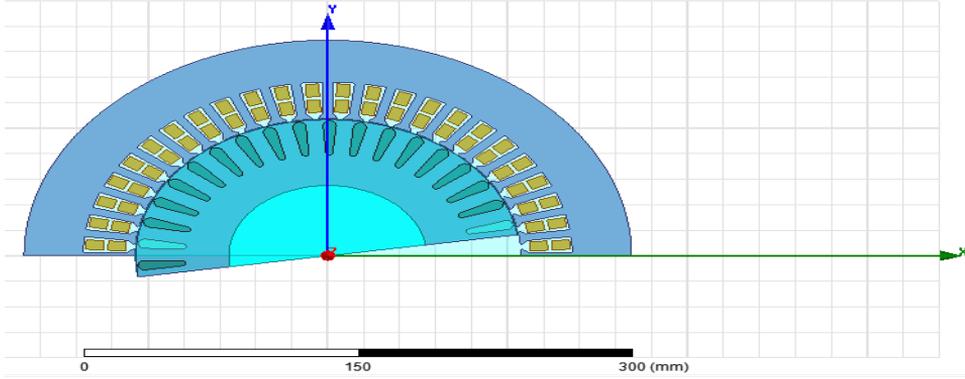
1-10 تصميم المحرك باستخدام حزمة Maxwell 2D و Ansoft RMxprt:

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



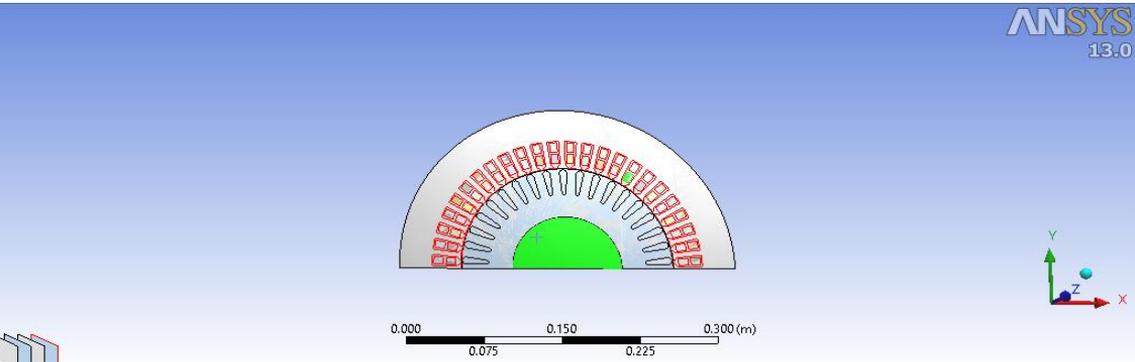
الشكل (6) الصيغة المبدئية للمحرك المدروس باستخدام حزمة Ansoft RMxprt

يمثل الشكل (6) الصيغة المبدئية للمحرك المدروس باستخدام حزمة Ansoft RMxprt ، حيث يمكننا إجراء حساب تحليلي للمحرك لمعرفة كفاءة المحرك وبارامتراته الأساسية. بعد ذلك ننتقل إلى الحزمة Maxwell 2D لإجراء الاختبارات المغناطيسية كما هو مبين في الشكل (7):



الشكل (7) الصيغة المبدئية للمحرك المدروس باستخدام حزمة Maxwell 2D

بعد التأكد من سلامة النموذج المصمم وجاهزيته للعمل يتم الانتقال إلى برنامج ANSYS 13 و اجراء التحليل الحراري كما يوضح الشكل (8):



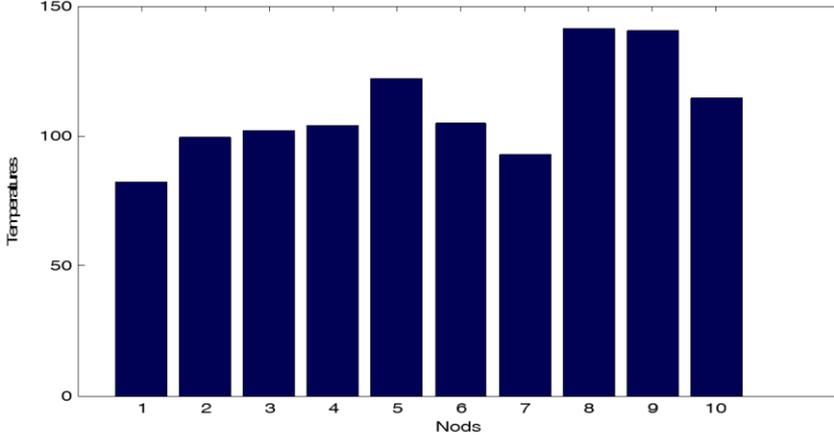
الشكل (8) المحرك التحريضي في ANSYS 13

11. النتائج:

1.11 نتائج نمذجة المعادلات الحرارية للمحرك التحريضي باستخدام LPTM:

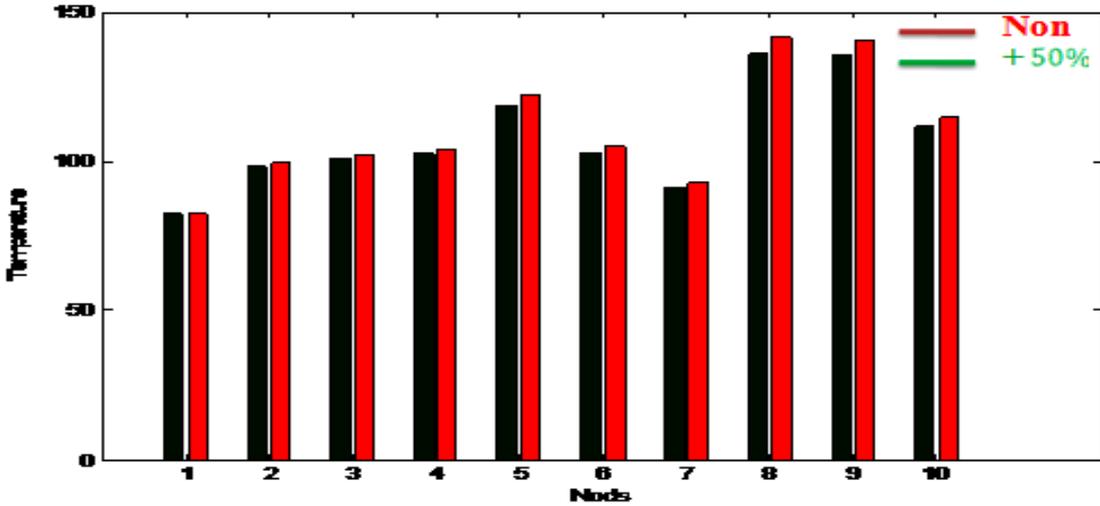
بعد وضع المخطط الحراري للمحرك كما في الشكل (8) يتم صياغة المعادلات التي تحسب قيم المقاومات الحرارية واعتماداً على قيم هذه المقاومات يتم حساب الناقلات الحرارية الذاتية والتبادلية، وبضرب مقلوب مصفوفة الناقلات الحرارية بمصفوفة الضياعات نحصل على تغيير درجة الحرارة ΔT في نقاط المحرك المدروسة عند نقطة التشغيل الاسمية، حيث تتألف مصفوفة الضياعات من عمود واحد ومن عدد أسطر يساوي عدد أعمدة مصفوفة الناقلات، وتعبّر أسطر مصفوفة الضياعات عن أجزاء المحرك بالترتيب المدروس سابقاً آخذين بالاعتبار الضياع الذي

يحدث في هذا الجزء، وقد تم حساب درجة حرارة العقد عند نظام العمل الاسمي للآلة مع الاعتبار أن معدل درجة حرارة الوسط المحيط يساوي 25 درجة. يظهر الشكل (9) درجات الحرارة في النقاط المدروسة من المحرك باستخدام LPTM. من الشكل نلاحظ أن أعلى درجة حرارة تساوي 140.75 درجة وهي في النقطة 9 من المحرك أي في قلب الدائر.



الشكل (9) درجات الحرارة في النقاط المدروسة من المحرك باستخدام LPTM

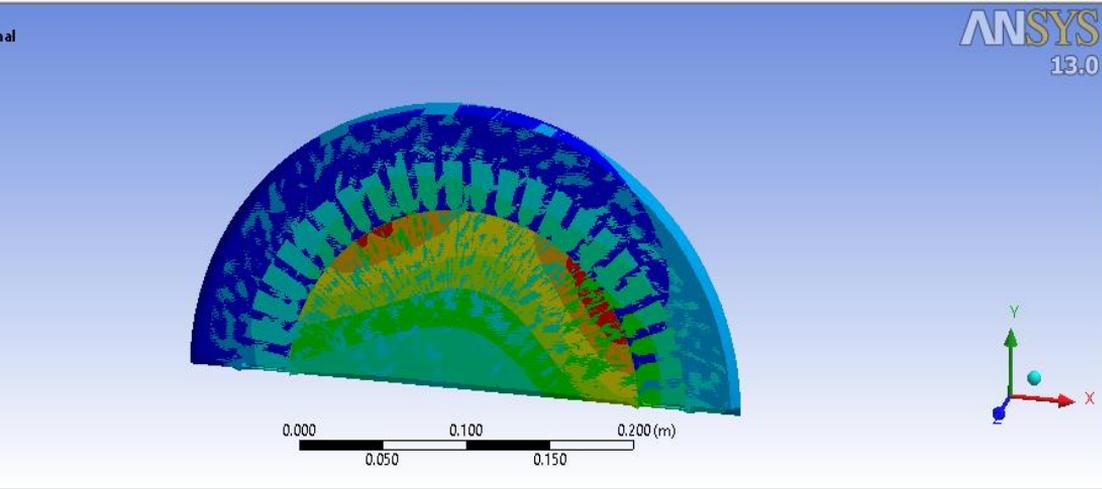
تم استخدام النموذج لإجراء اختبارات تحسين معامل الحمل الحراري الداخلي. يبين الشكل (10) درجات الحرارة في عقد المحرك بعد تحسين التهوية الداخلية. حيث انخفضت درجة الحرارة من 2 إلى خمس درجات في مختلف أجزاء المحرك بعد تحسين معامل الحمل الحراري الداخلي بمقدار 50%.



الشكل (10) درجات الحرارة في عقد المحرك بعد تحسين معامل الحمل الحراري الداخلي

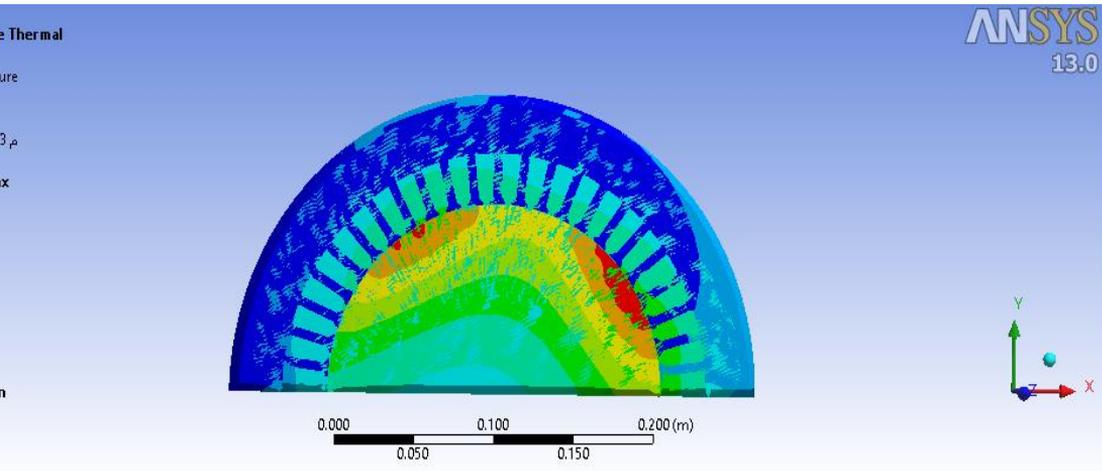
2.11 نتائج الدراسة الحرارية باستخدام ANSYS :

تم إجراء التحليل الحراري في الحالة المستقرة بما يحاكي عمل المحرك لفترة معينة من الوقت ريثما يحدث تغيير في درجة الحرارة. تم الحصول على الضياعات في الآلة من نتائج التحليل الكهرومغناطيسي في Maxwell 2D، حيث يتم استخدام هذه النتائج كمدخلات لبرنامج التحليل الحراري ANSYS. يبين الشكل (11) نتائج عملية التحليل الحراري للمحرك التحريضي ذو المواصفات المذكورة في الجدولين (1 ، 2) قبل تحسين معامل الحمل الحراري حيث يتبين من الشكل أن أكبر قيمة لدرجة الحرارة تساوي 142.97 درجة في الجزء الدائر وهي قيمة مقبولة تبعاً لكون العازل المستخدم في المحرك من النوع H.



الشكل (11) نتائج عملية التحليل الحراري للمحرك التحريضي باستخدام ANSYS

بعد ذلك تم اجراء التحليل الحراري للمحرك بعد تحسين معامل الحمل الحراري الداخلي عن طريق تحسين معامل الحمل الحراري الداخلي بنسبة: 50% كما في الشكل (12) حيث نلاحظ انخفاض درجات الحرارة في أجزاء المحرك.



الشكل (12) درجات الحرارة في أجزاء المحرك بعد تحسين معامل الحمل الحراري

12. مناقشة النتائج:

تم فيما سبق تحليل ومحاكاة الحالة الحرارية للمحرك التحريضي بطريقتي البارامترات المجمعمة والعناصر المنتهية. أبدى النموذجين فعالية في تحديد درجات الحرارة في النقاط موضوع الدراسة، ويمكن تلخيص النتائج بمايلي:

1- تمت عملية النمذجة على محرك تحريضي ثلاثي الطور والحصول على درجات الحرارة في العقد الحرارية المدروسة. وحيث أن الانهيار الحراري في المحرك يحدث في ملفات الثابت والدائر، تمت مقارنة النتائج مع درجة الانهيار الحراري للمواد المستخدمة في العزل والتي تقدر بـ 155 درجة وتبين أن النتائج مقبولة.

2- أظهر النموذجين مرونة في إمكانية إجراء اختبارات تحسين معامل الحمل الحراري للمحرك المدروس.

3- تبين من خلال التجارب الحاسوبية أن تحسين معامل الحمل الحراري الداخلي يحسن من درجات الحرارة في أجزاء المحرك بشكل جيد، الأمر الذي ينعكس إيجاباً على أداء المحرك عندما يراد قيادته بواسطة مبدلة مثلاً.

4- هذا الانخفاض في درجة الحرارة في كل من القسم الفعال والقسم الجبهوي سوف يزيد من عمر العازلية، وسوف يقلل من احتمالات الانهيار الحراري عند ظروف عمل غير طبيعية قد يتعرض لها المحرك أثناء عمله.

13. الاستنتاجات:

من خلال ما سبق يمكن أن نستنتج ما يلي:

إن تحسين معامل الحمل الحراري الداخلي يمكن أن يخفف من درجة الحرارة في مختلف أجزاء المحرك، وحيث أن عمر العازل يتناقص بشكل أسّي مع ارتفاع درجة الحرارة وبالتالي فإن هذا الانخفاض في درجة الحرارة سوف يزيد من عمر عازلية الملفات. وبالنظر إلى المرونة التي يبيدها النموذجين في إمكانية إجراء اختبارات تحسين عمليات التبادل الحراري يمكن القول أنهما ملائمين لإجراء الاختبارات اللازمة للوصول إلى نتائج مقبولة عند التصميم الحراري للمحركات التحريضية.

14. التوصيات:

إنّ أحد الأعمال المستقبلية كتتمة لهذا البحث يمكن أن يكون:

- دراسة أثر تحسين معامل الحمل الحراري الداخلي في المحركات التحريضة على مميزاتها الكهروميكانيكية.
- إجراء اختبارات عملية ومقارنتها مع نتائج البرمجة.

المراجع REFERENCES

[1] Hassan, I, N ” *Induction Machines*”. Tishreen University, 2003, pp 600.

[2] Hassan, I, N ” *Design of Electrical Machines*”. Tishreen University, 1995, pp 494.

[3] Hasan. I, N,, Sheikhouk, H and Suleiman, N. ” *Thermal Calculation for Three-Phase Induction Motors, Using the Thermal Equivalent Modeling*” Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Engineering Sciences Series Vol. (27) No (1) 2005.

[4] Housam Al-din, A, A and Zhirh, M. ” *High Current Technical in power Supply Electrical Network*” , Lattakia, Syria, pp 342.

[5] LOMBARD, J and MARION, F. “ *Using analytical approach with finite element analysis for coupling magnetic and thermal*

analysis for motors” Cedrat SA., chemin de Malacher-Inovallée, MEYLAN Cedex 2007, PP 38-56.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] ROBERTS, D. " *The application of an induction motor thermal model to motor protection and other functions*". PhD thesis, University of Liverpool. 1986, PP 63-75.

[10] CHIN, Y.K., D.A. STATON. " *Thermal Analysis Lumped-Circuit Model And Finite Element Analysis*" 2003, PP 103-112.

[11] PYRHONEN, J., JOKINEN, T and HRABOVCOVA, V " *Design of Rotating Electrical Machine* "©John Wiley & Sons, Ltd. ISBN, 2008, PP668.

