

Thermal Analysis Of Induction Motor Using The Combined Parametric Model

Dr. Izzat Hasan *
Dr. Alaa Aldeen Housam Aldeen**
Engineer Homam Zaity***

(Received 4 / 10 / 2017. Accepted 5 / 12 / 2017)

□ ABSTRACT □

This paper presents an explanation of one of the analytical methods used in thermal analysis of the induction motor. The thermodynamic analysis was performed on a three phase Totally Enclosed Fan-Cooled (TEFC) induction motor according to the combined parameter method, which assumes that the parameter of whatever object can be studied on one point of this object that represents to the mean parameter point. Then we modified the motor design by adding non-insulated aluminum plates between the windings in the stator slots to improve the heat transfer that is caused by the copper losses in these windings to the internal air. The thermal model has been modified according to the change resulting from this design modification. The thermal equations of the two cases were modeled and compared. The results showed that the addition of plates led to a decrease in the temperature of the stator winding by two degrees, the temperature of the end winding by one and a half of degree, and decreased the temperature of the air gap by one degree Celsius, which is reflected positively on the investment of induction motors and increase the age of isolation .

*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.

التحليل الحراري للمحرك التحريضي باستخدام النموذج البارامتري المجمع

الدكتور عزت حسن*

الدكتور علاء الدين حسام الدين**

همام زيتي***

(تاريخ الإيداع 4 / 10 / 2017. قُبِلَ للنشر في 5 / 12 / 2017)

□ ملخص □

يقدم هذا البحث شرحاً لإحدى الطرق التحليلية المستخدمة في التحليل الحراري للمحرك التحريضي. حيث تم إجراء عملية التحليل الحراري على محرك تحريضي ثلاثي الطور مغلق ومزود بمروحة تبريد وفق طريقة البارامترات المجمع التي تفترض أن البارامتر أياً كان في أي جسم يمكن أن يدرس على نقطة واحدة من هذا الجسم تمثل نقطة البارامتر المتوسطة. ثم قمنا بتعديل تصميمي على المحرك بأن أضفنا صفائح غير معزولة من الألمنيوم بين الملفات ضمن مجاري الثابت بهدف تحسين عملية انتقال الحرارة الناتجة عن الضياعات النحاسية في هذه الملفات إلى الهواء الداخلي. تم تعديل النموذج الحراري تبعاً للتغير الحاصل نتيجة هذا التعديل التصميمي، حيث تمت نمذجة المعادلات الحرارية للحالتين وإجراء المقارنة بينهما، حيث أظهرت نتائج النمذجة أن إضافة الصفائح أدت إلى انخفاض في درجة حرارة القسم الفعال للملفات بمقدار درجتين، كما انخفضت درجة حرارة القسم الجبهوي درجة ونصف الدرجة، وانخفضت درجة حرارة الثغرة الهوائية بمقدار درجة مئوية واحدة، الأمر الذي ينعكس إيجابياً على استثمار المحركات التحريضية وزيادة عمر العازلية.

* 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 (ماجستير) - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

مقدمة:

تعدّ الآلات التّحريضية التي تستخدم بشكل أساس كمحركات كهربائية وفي بعض الأحيان كمولدات من أكثر أنواع الآلات انتشاراً واستخداماً في أيامنا، ويرجع ذلك إلى بساطة تكوينها ورخص ثمنها وخفة وزنها ووثوقيتها العالية في العمل وسهولة قيادتها والتحكم بأدائها وعدم احتوائها على أجزاء سهلة العطب أو سريعة الإهلاك كالمجمع بالمقارنة مع آلات التيار المستمر والآلات التّزامنية.

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].

بسبب البنية التصميمية للآلة التحريضية التي يدخل فيها مواد ذات موصلية حرارية مختلفة عن بعضها، فإن الآلة الكهربائية تعتبر كتلة غير متجانسة حرارياً، أي أنه لا يمكن اعتبار جميع أقسام الآلة تملك نفس الفعالية في عملية نقل الحرارة وتبديدها، لذا عند تصميم أي آلة كهربائية يجب أن يؤخذ ذلك بالحسبان، وكلما كان المصمم قادراً على تحسين عملية انتقال الحرارة من المنابع الحرارية إلى الوسط الخارجي كلما تحسنت مؤشرات الطاقة للآلة وتحسنت مواصفات عملها وزادت موثوقيتها وزمن استثمارها، وهو ما نسعى إليه في هذا البحث [3 , 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، حيث تحدد العقد الحرارية تلقائياً في النقاط الأكثر أهمية من المحرك، ويعتمد على الضياعات بمختلف أنواعها بشكل أساسي في عملية التحليل الحراري، بحيث تشمل النتائج إمكانية مراقبة درجات الحرارة أثناء دورة العمل ومراقبة درجة حرارة وسيط التبريد إن وجد بشكل مستمر. بالإضافة الساعات الحرارية يمكن إجراء تحليل الحالة العابرة أيضاً. غير أنه يُسمح 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 وفق طريقة البارامترات المجمعة [11 , 8].

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 إضافة صفائح

الألمنيوم التي سيحدث وجودها بين الملفات في مجاري الثابت تغيّراً في الدارة الحرارية للمحرك وبالتالي ستزيد من انتقال الحرارة من الملفات إلى الهواء الداخلي وهذا سينعكس إيجاباً على استثمار المحركات التحريضية والزيادة من عمر العازلية المستخدمة بالمقارنة مع محرك آخر غير مزود بهذه الصفائح ويعمل عند نفس الاستطاعة .

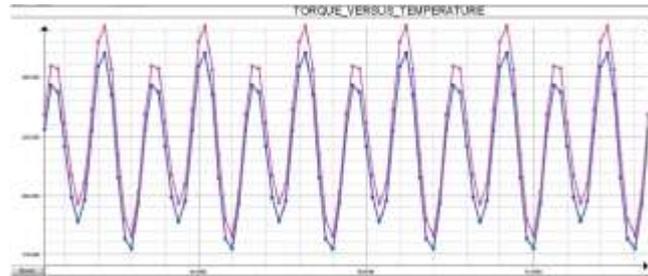
طرائق البحث ومواده:

تمّ نمذجة المعادلات الحرارية للمحرك التحريضي باستخدام برنامج (MATLAB) على الحاسب الشخصي، وبعد الحصول على النتائج قمنا بمقارنة درجات الحرارة في النقاط الأساسية في المحرك بدون صفائح الألمنيوم وبوجودها.

الدراسة المرجعية

يربط المرجع [5] الدراسة الحرارية بالدراسة الكهرومغناطيسية، حيث تم تحديد قيمة الضياعات (النحاسية والحديدية) بناء على التحليل الكهرومغناطيسي الذي يتم خلال فترة كهربائية واحدة، أما التحليل الحراري فيحتاج أكثر من فترة كهربائية 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 كما هو مبين بالشكل (1).



الشكل (1) : عزم الدوران عند ارتفاع درجة حرارة الدائر من 20 C إلى 172.7 C

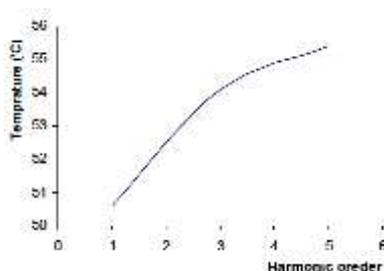
تم حساب درجات الحرارة في نقاط مختلفة من المحرك باستخدام طريقة العناصر المنتهية **Finite Element Method (FEM)**، وللتحقق قام الباحث بمقارنة نتائج هذه الطريقة في التحليل الحراري مع النتائج التي يعطيها برنامج **MOTOR-CAD** كما هو موضح في الجدول (1):

الجدول (1) مقارنة نتائج الحساب الحراري لكل من **FEM method** و **MOTOR-CAD** في بعض نقاط المحرك

% of difference	MOTOR-CAD	FEM method	
1.5 %	170.2	172.7	الملف
14.4 %	121.2	103.7	أسنان الثابت
0.6 %	105.4	106	الثغرة الهوائية
3.4 %	102.3	105.8	المحور

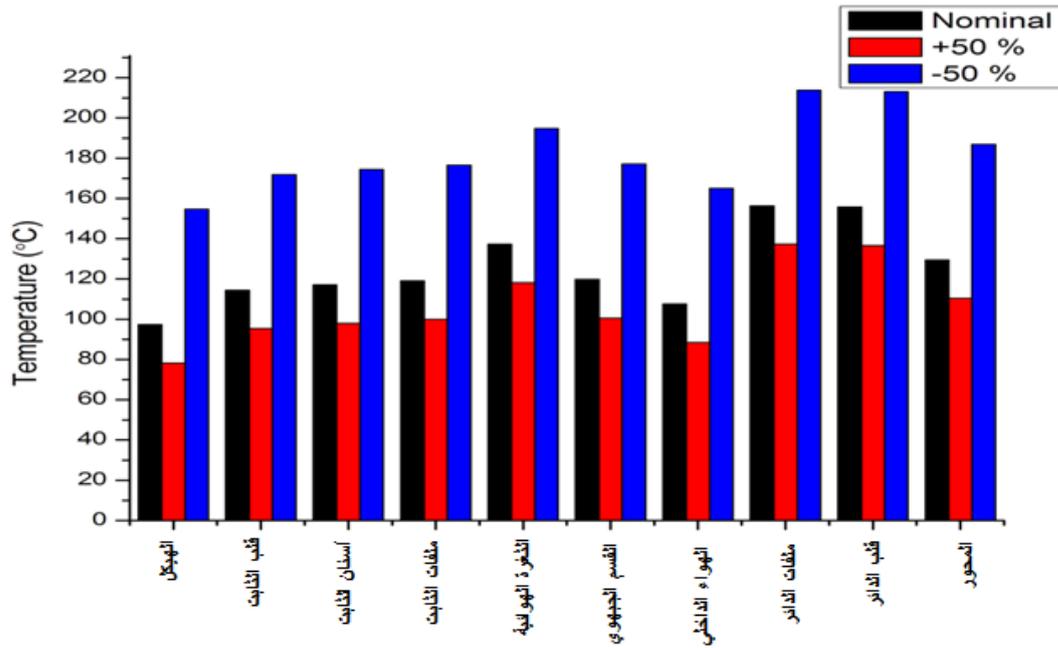
حيث يتبين من الجدول أن نتائج الطريقتين متساوية تقريباً، ما عدا درجة حرارة أسنان الثابت، وهذا بسبب مواجهة الأسنان للثغرة الهوائية. ويعود ذلك إلى احتواء **MOTOR-CAD** على معطيات مفصلة تجعل نتائجه أكثر دقة في عملية التحليل الحراري.

ونظراً لارتباط ارتفاع حرارة المحرك التحريضي بالضياعات وخصوصاً الضياعات النحاسية، ولأن وجود التوافقيات العليا الناتج عن تشوه موجتي الجهد والتيار يزيد من هذه الضياعات، فقد درس كل من **MIRZAMANI** و **CHOOBARI** تأثير وجود التوافقيات العليا على الحالة الحرارية للمحرك التحريضي تحليلياً وتجريبياً حيث تبين ضرورة أخذ وجود هذه التوافقيات بعين الاعتبار عند الدراسة الحرارية إذا لم يتم ترشيحها وأعطيت جداول تبين نسبة الزيادة على كل من الضياعات النحاسية والحديدية الواجب أخذها بعين الاعتبار لكل توافقية كنسبة مئوية من التوافقية الأساسية [6]، انظر الشكل (2).

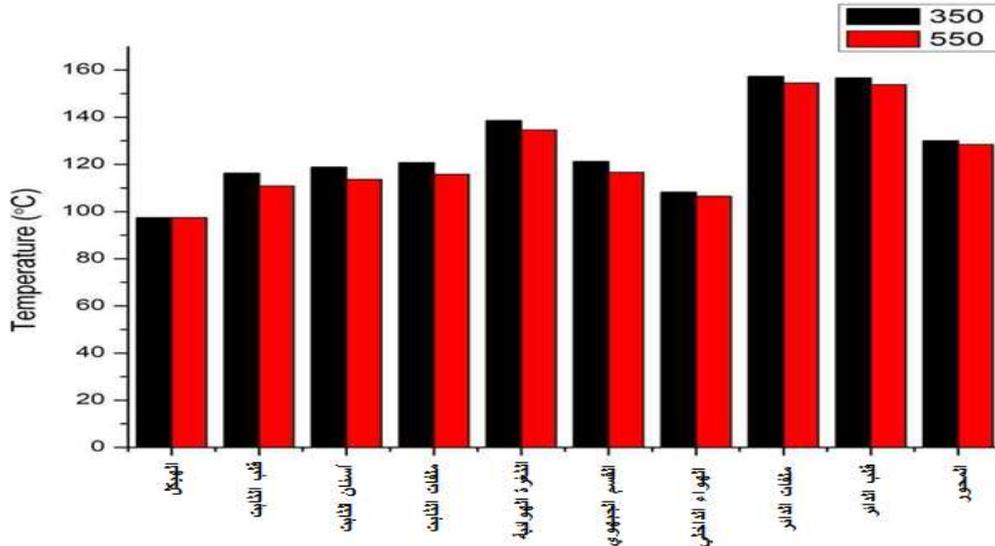


الشكل (2) علاقة درجة الحرارة بالتوافقيات

في نفس الإطار درس **BOUSBAINE** الحالة الحرارية للمحرك التحريضي المقاد بمبدلة، وتبين ارتفاع درجة الحرارة في جميع النقاط المدروسة من المحرك بعد عملية النمذجة، حيث قارن حالة المحرك في حالتي التغذية: من مبدلة، ومن منبع جيبي، ونصح بضرورة تحسين نظام التهوية للمحرك عندما يراد تغذيته من منابع غير جيبيية [7]. المرجع [8] بيّن دراسة أجريت بطريقة البارامترات المجمعّة حيث تم تصميم نموذج حراري لمحرك تحريضي مغلق **TEFC**، وتمت نمذجة المعادلات الحرارية للمحرك عند نقطة العمل الاسمية للحصول على درجات الحرارة في نقاط المحرك، ومن ثم إجراء تحليل الحساسية بتغيير معاملات الحمل الحراري في المحرك بنسبة $\pm 50\%$ وتبين الأثر الكبير لهذا التغيير على درجات الحرارة في المحرك كما هو مبين بالشكل (3).

الشكل (3) تحليل الحساسية عند تغيير معاملات الحمل الحراري الداخلي بمقدار $\pm 50\%$

حيث انخفضت درجة حرارة العقدة بنسبة 16% عند زيادة معامل الحمل الحراري داخل المحرك بنسبة 50%، وارتفعت درجة حرارة العقدة بنسبة 50% عند تقليل معامل الحمل الحراري داخل المحرك 50%، وشمل تحليل الحساسية تغيير معامل التوصيل الحراري الخاص بعملية انتقال الحرارة من الوجه الداخلي للهيكل إلى الوجه الخارجي وتبين أن زيادة هذا المعامل بنسبة 30% تخفّض درجة الحرارة بمقدار 11%، كما يوضح الشكل (4).

الشكل (4) تحليل الحساسية عند تغيير معامل التوصيل لمادة الهيكل بمقدار $\pm 30\%$

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 الموصلية الحرارية، فيما يدرس بعضها الآخر تأثير وجود التوافقيات العليا، وزيادة درجة الحرارة المرافق لتواجد هذه التوافقيات واقتراح تحسين التهوية للمحركات التي تعمل في هذه الظروف، دون أن تقدم حلولاً بنويّة تحسّن من عمليات نقل الحرارة من النقاط الأكثر حساسية لارتفاع درجة الحرارة داخل المحرك.

نقدّم في هذا البحث تعديلاً تصميمياً لهذه الغاية، من خلال إضافة صفائح من مادة جيدة الموصلية الحرارية بين ملفات الثابت لتحسين عملية انتقال الحرارة منها، وتتم الدراسة وفق طريقة البارامترات المجمعّة بحيث يتم تعديل الدارة الحرارية للنقاط التي تتبادل الحرارة مع هذه الصفائح. ودراسة النموذج الحراري لمحرك تحريضي ثلاثي الطور مغلق ومزود بمروحة تبريد TEFC قبل إضافة هذه الصفائح وبعد إضافتها.

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 توزع 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 الإعصارية 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 الحموله، 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 [9 , 8].

6. الدراسة الحرارية:

الحرارة المكتسبة في التجهيزات الكهربائية والناتجة عن الضياعات المختلفة فيها في الحالة المستقرة، أي عند الوصول إلى درجة الحرارة النهائية، تطرح إلى الوسط الخارجي عبر انتقال الحرارة بأشكال مختلفة: توصيل، حمل وإشعاع [10 , 4].

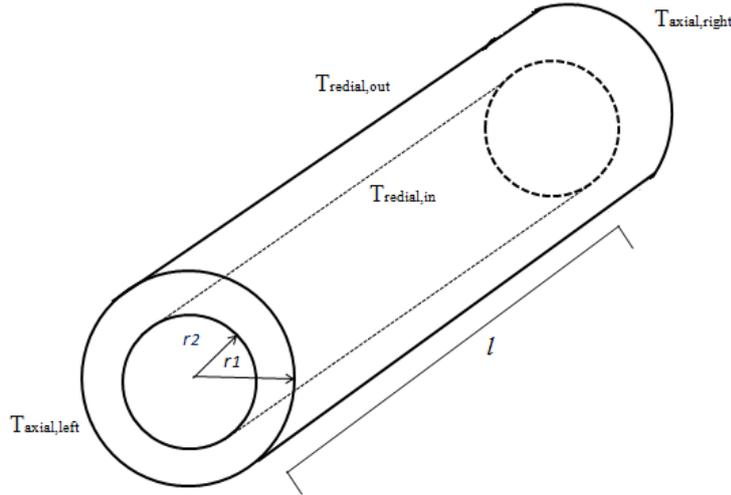
6.1 انتقال الحرارة بالتوصيل:

تنتقل الحرارة بين أجزاء المحرك المتلاصقة بالتوصيل، وتعطى المقاومة الحرارية التي تصف انتقال الحرارة بالتوصيل بالعلاقة (1) [10]:

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

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

من المعروف أن الأجزاء الرئيسية للألة مصممة بحيث تأخذ شكلاً اسطوانياً كما هو مبين في الشكل (5)



الشكل (5) الشكل العام للجسم الاسطواني ببعديه الشعاعي والمحوري ودرجات الحرارة المرتبطة بكل منهما

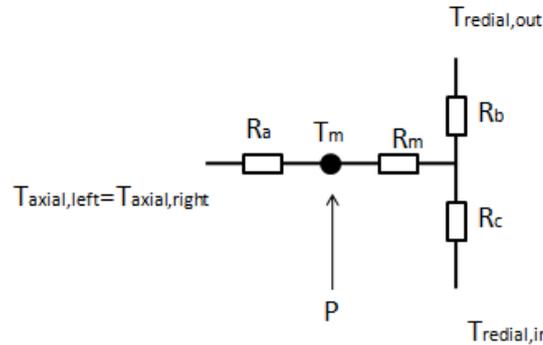
r_1 نصف قطر الأسطوانة الخارجية
 r_2 نصف قطر الأسطوانة الداخلية
 $T_{axial,right}$ انتقال الحرارة محورياً إلى يمين الأسطوانة
 $T_{axial,left}$ انتقال الحرارة محورياً إلى يسار الأسطوانة
 $T_{radial,out}$ انتقال الحرارة شعاعياً إلى خارج للأسطوانة
 $T_{radial,in}$ انتقال الحرارة شعاعياً إلى داخل الأسطوانة

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 المحيضي قليل في معظم نقاط الآلة ولذلك لن يعتمد الانتقال بالاتجاه المحيضي 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 (6).



الشكل (6) 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]:

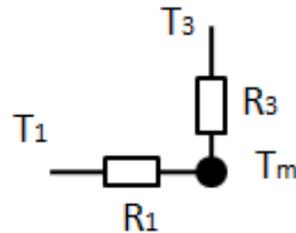
$$R_a = \frac{l}{6\pi\lambda_a(r_1^2 - r_2^2)} \quad (2)$$

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

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

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

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 (7).



الشكل (7) الشبكة الحرارية بالاتجاهين الشعاعي والمحوري عندما $r_2=0$

وعندها تحسب المقاومتين R_2 و R_3 بالمعادلتين [10]:

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

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

6.2 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 سنميز نوعين من الجريان ولكل منهما قوانينه الخاصة، فإذا تحركت جزيئات المائع بشكل منتظم يكون الجريان صفيحي، 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) [10]:

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

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 نميز 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 .

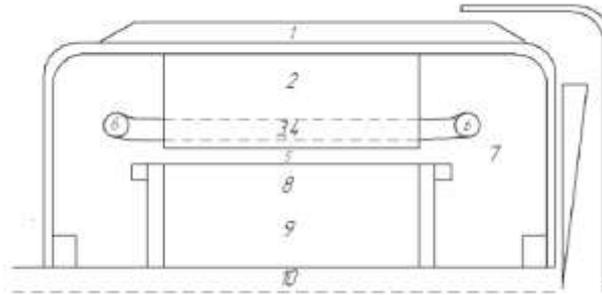
6.3 انتقال الحرارة بالإشعاع:

فسر العالمان أينشتاين وبلانك الإشعاع الحراري على أنه تدفق فوتوني كوانتي يمتاز بكتلة وبكمية حركة وبساحة كهرومغناطيسية، وينتقل من جسم لآخر (الجسمان لهما درجة حرارة مختلفة عن الصفر 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.

7. 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 العنقودية (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 تقرباً من فهم سلوك أو عمل النظام الموزع تحت افتراضات معينة. تعتمد هذه الطريقة في حل المشاكل الحرارية على وضع دارات حرارية بالتناظر مع الدارات الكهربائية، التي يكون فيها التحليل الرياضي أبسط بكثير من حل معادلات ماكسويل من أجل النظام الفيزيائي الحقيقي. حيث أن الكميات الحرارية الكميات الكهربائية كما هو معروف.

تقسم الآلة الكهربائية هندسياً إلى عدد من الأجزاء (العناصر) المجموعة شكل (8)، 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 (8) الأجزاء الرئيسية للمحرك التحريضي

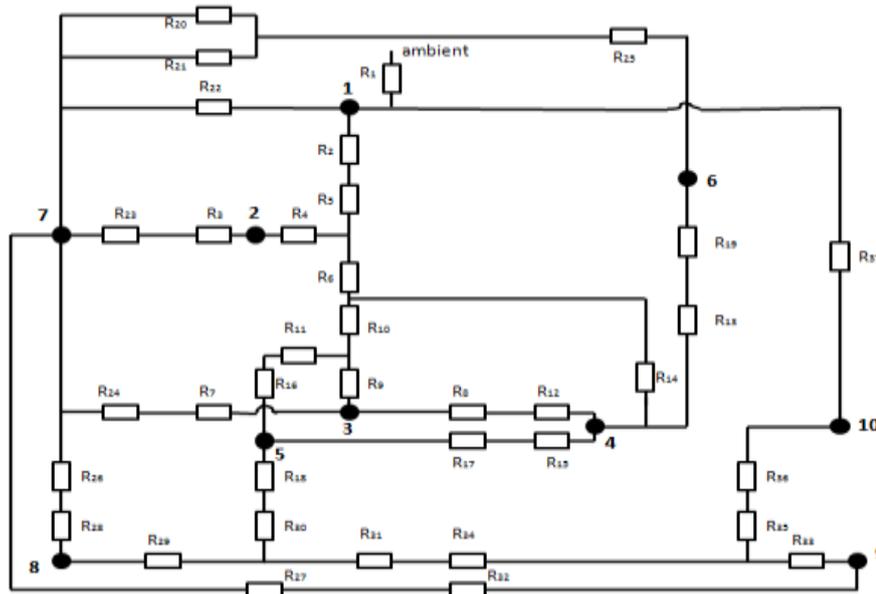
10 المحور	7 الهواء الداخلي	4 ملفات الثابت	1 الهيكل
8 ملفات الدائر	5 الثغرة الهوائية	2 قلب الثابت	
9 قلب الدائر	6 القسم الجبهوي	3 أسنان الثابت	

تأخذ المكونات الصلبة لكل من الهيكل (1)، والثابت (3،2)، والملفات (4،6)، والدائر (9،8) 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 [10].

النتائج والمناقشة:

تحليل النموذج الحراري للمحرك التحريضي:

الهدف من هذا البحث هو إيجاد متوسط درجات الحرارة لعناصر النموذج الحراري، قبل وبعد إضافة صفائح الألمنيوم في مجاري قلب الثابت، حيث أنه من المفترض أن تساعد هذه الصفائح في طرد الحرارة الزائدة في الملفات إلى الهواء الداخلي. في الحالة الطبيعية، يتألف النموذج الحراري للمحرك التحريضي ذو التصميم المغلق TEFC من 10 عقد حرارية كما في الشكل (8)، لكل عقدة منها شبكتها الحرارية الخاصة، ويجمع هذه الشبكات الحرارية مع بعضها لينتج المخطط الحراري الكلي للمحرك التحريضي الموضح بالشكل (9).

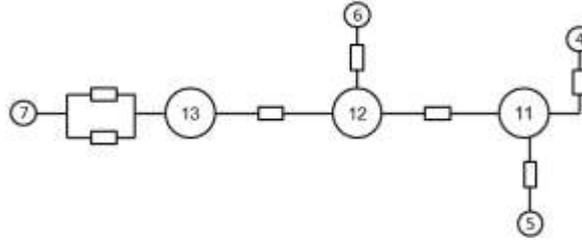


الشكل (9) المخطط الحراري الكلي للمحرك التحريضي

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

وبعد إضافة الصفائح يصبح عدد العقد الحرارية 13. العقد الثلاث الإضافية هي على الترتيب كما يوضح

الشكل (10):

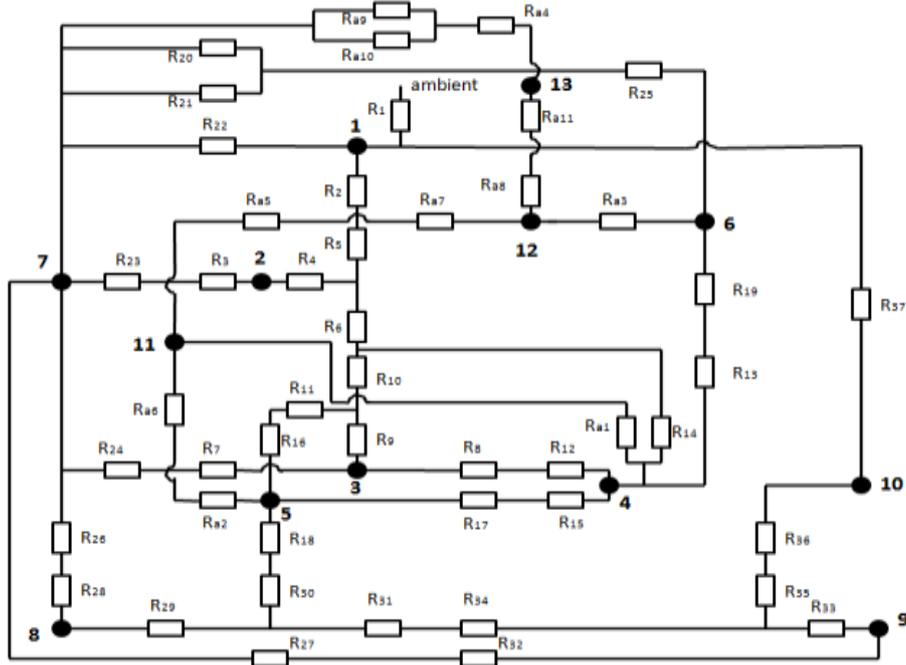


الشكل (10) مخطط حراري جزئي لصفحة الألمنيوم في مجاري الثابت

11 الجزء من الصفحة في القسم الفعال للملفات 12 الجزء من الصفحة الموجود في القسم الجبهوي للملفات

13 الجزء البارز من صفحة الألمنيوم في الهواء الداخلي

تنتقل الحرارة إلى العقدة (11) بشكل شعاعي-محيطي من الملفات (4)، وتتبادل الحرارة بشكل شعاعي مع الثغرة الهوائية (5)، وبشكل محوري مع العقدة (12)، أما العقدة (12) فتنتقل إليها الحرارة شعاعياً من القسم الجبهوي (6)، وتتبادل الحرارة محورياً مع النقطتين (11) و(13)، والعقدة (13) تتبادل الحرارة محورياً مع العقدة (12) وشعاعياً محورياً مع الهواء الداخلي (7). توضع المعادلات الخاصة بالتبادل الحراري لهذه النقاط مع بعضها ومع نقاط المحرك الأخرى اعتماداً على علاقات الانتقال الحراري بالاتجاهين الشعاعي والمحوري المذكورة سابقاً. لكل عقدة من العقد الـ (13) السابقة شبكتها الحرارية الخاصة، ويجمع هذه الشبكات الحرارية مع بعضها ينتج المخطط الحراري الكلي للمحرك التحريضي والمزود بصفائح ألمنيوم في مجاري الثابت الموضح بالشكل (11).



الشكل (11) المخطط الحراري الكلي للمحرك التحريضي المزود بصفائح ألمنيوم في مجاري الثابت

1 الهيكل 4 ملفات الثابت 7 الهواء الداخلي 10 المحور

2 قلب الثابت 5 الثغرة الهوائية 8 ملفات الدائر

3 أسنان الثابت 6 القسم الجبهوي 9 قلب الدائر

11 الجزء من الصفحة في القسم الفعال للملفات 12 الجزء من الصفحة الموجود في القسم الجبهوي للملفات

13 الجزء البارز من صفحة الألمنيوم في الهواء الداخلي

حيث أشير للمقاومات الخاصة بالصفائح بالرمز R_a .

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

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

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

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

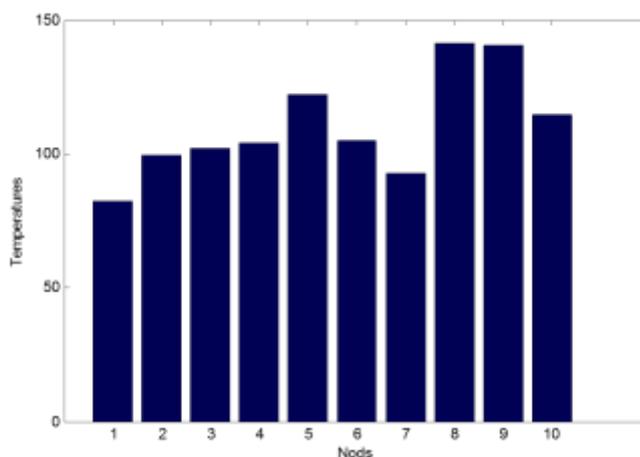
حيث العنصر القطري هو مجموع ناقلات الشبكة المتصلة بالعقدة n ، $G(i,j)$ الناقلية الحرارية الموصولة مع العقد i,j بإشارة سالبة. ويحل المعادلة (9) نحصل على حل الحالة المستقرة.

2.8 نمذجة المعادلات الحرارية للمحرك التحريضي:

تم حساب الأبعاد والضياعات الكهرومغناطيسية للألة أثناء عملية التصميم الكهرومغناطيسي، واستخدمت خواص المواد الداخلة في التصميم وموصلياتها 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 مراوح التبريد، حيث طبقت معادلات التبادل الحراري على محرك تحريضي ثلاثي الطور ثنائي الطبقة ذو قفص سنجابي مغلق مزود بمروحة تبريد TEFC استطاعته 30 KW.

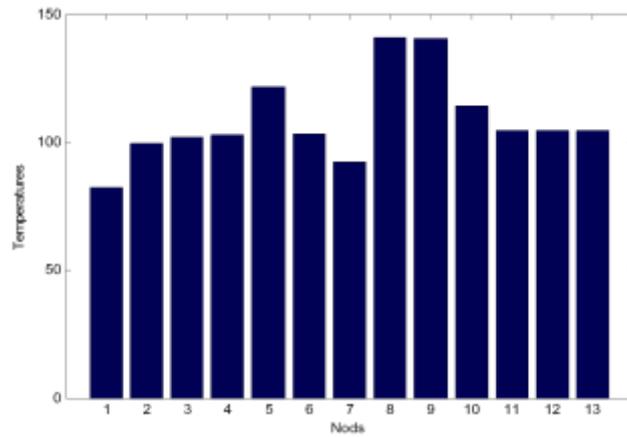
وقد تم حساب درجة حرارة العقد للحالتين (قبل إدخال الصفائح وبعد إدخالها) عند نقطة العمل الاسمية للألة مع الاعتبار أن معدل درجة حرارة الوسط المحيط يساوي 25 درجة.

يظهر الشكل (11) درجة حرارة نقاط المحرك غير المزود بصفائح الألمنيوم:



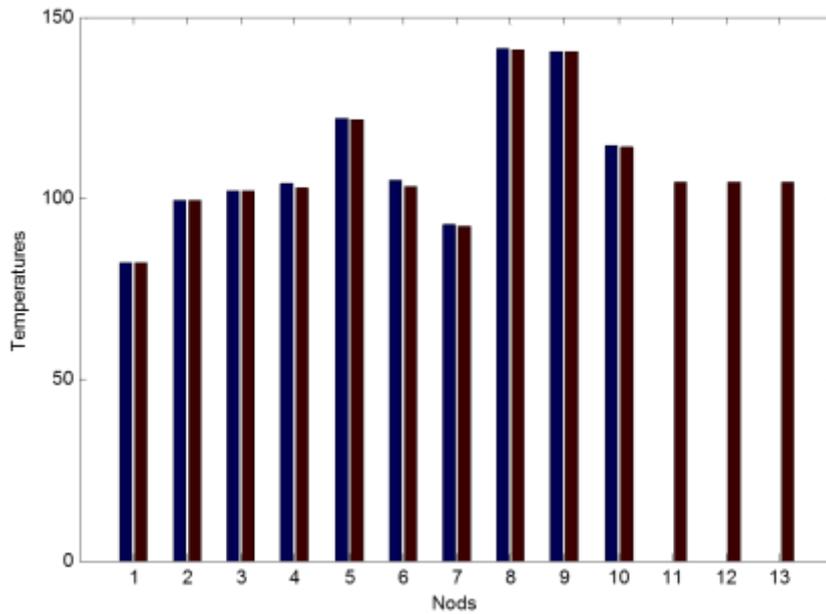
الشكل (11) درجات حرارة نقاط المحرك غير المزود بصفائح الألمنيوم

وفي الشكل (12) درجات حرارة نقاط المحرك المزود بصفائح الألمنيوم:



الشكل (12) درجات حرارة نقاط المحرك المزود بصفائح الألمنيوم

بالمقارنة بين درجات الحرارة للحالتين نلاحظ انخفاض درجة حرارة القسم الفعال للملفات بمقدار درجتين، كما انخفضت درجة حرارة القسم الجبهوي درجة ونصف الدرجة، وانخفضت درجة حرارة الثغرة الهوائية بمقدار درجة مئوية واحدة. وهذا مبين في الشكل (13).



الشكل (13) مقارنة بين درجات حرارة نقاط المحرك بدون صفيحة وبوجود صفيحة

مناقشة النتائج:

تم فيما سبق إجراء نمذجة للمعادلات الخاصة بالمحرك بالاعتماد على النموذج البارامتري المجمع الذي يمكننا من معرفة درجات الحرارة في جميع النقاط الهامة من المحرك. أبدى النموذج فعالية في تحديد درجات الحرارة في النقاط موضوع الدراسة، ويمكن تلخيص النتائج بمايلي:

1- تمت عملية النمذجة على محرك تحريضي ثلاثي الطور مغلق مزود بمروحة تبريد وغير مزود بصفائح الألمنيوم، وحصلنا 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 تقدّر بـ 155 درجة وتبيّن أن النتائج مقبولة.

2- تم إجراء الدراسة على نفس المحرك ولكن بعد إجراء تعديل في عملية التصميم، بحيث تم إدخال صفائح رقيقة من الألمنيوم بين الملفات في مجاري الثابت وعلى طول القسم الفعال بحيث تبرز إلى الهواء الداخلي عبر ساق حلقة القسم الجبهوي. وأجري تعديل الشبكات الحرارية لجميع أجزاء المحرك التي تتبادل الحرارة مع هذه الصفائح، كما تم وضع الشبكات الحرارية لنقاط الصفيحة في كل القسم الفعال والقسم الجبهوي والقسم البارز من الصفيحة.

3- تم إجراء عملية النمذجة لمعادلات المحرك بعد التعديل ولوحظ انخفاض درجة حرارة القسم الفعال للملفات بمقدار درجتين، كما انخفضت درجة حرارة القسم الجبهوي درجة ونصف الدرجة، وانخفضت درجة حرارة الثغرة الهوائية بمقدار درجة مئوية واحدة.

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 للمحرك قد يتعرّض لها .

الاستنتاجات والتوصيات:

من خلال ما سبق يمكن أن نستنتج ما يلي:

إن إضافة صفائح من مادة جيدة التوصيلية الحرارية كالألمنيوم يمكن أن يخفف من درجة الحرارة في القسم الفعال والقسم الجبهوي من الملفات، حيث يحدث الانهيار الحراري للمادة العازلة في هذين الجزأين. وبالنظر إلى المرونة التي يبديها النموذج في إمكانية تغيير نوعية الصفائح -وبالتالي توصيليتها الحرارية- وأبعادها يمكن القول أنه نموذج جيد لإجراء الاختبارات اللازمة للوصول إلى نتائج مقبولة عند الشروع بإدخال هذا التعديل إلى المحركات قيد الصناعة.

إنّ أحد الأعمال المستقبلية كنتمة لهذا البحث يمكن أن يكون:

- التطبيق العملي لمحرك تحريضي مزوّد بهذه الصفائح وقياس درجات الحرارة في ملفاته وقسمه الجبهوي ومقارنتها مع نتائج النمذجة.
- دراسة إمكانية جعل الصفائح تمس حلقة القسم الجبهوي بالإضافة إلى ساقيه لأن ذلك قد يساعد من تخفيض الحرارة في جميع نقاط القسم الجبهوي.

المراجع

- [1] د. عزت حسن، الآلات الكهربائية (الآلات التحريضية)، جامعة تشرين، اللاذقية 2003، 485 صفحة.
- [2] د. عزت حسن، "تصميم الآلات الكهربائية"، منشورات جامعة تشرين، اللاذقية 1995، 538 صفحة.
- [3] د. عزت حسن، د. حبيب شيخوك، نزار سليمان، الحساب الحراري لمحرك تحريضي ثلاثي الطور باستخدام التمثيل الحراري المكافئ، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية، سلسلة العلوم الهندسية، المجلد 27، العدد 1، 2005، ص 65 إلى ص 71 .
- [4] د. علاء الدين حسام الدين، د. محمد زهيرة، تقنية التيارات العالية في شبكات التغذية الكهربائية، اللاذقية، سوريا 2006، 415 صفحة .
- [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] MIRZAMANI, O, H., CHOUBARI, A. "Study of Harmonics Effects on Performance of Induction Motors" Sharif University, Tehran, IRAN 2002, PP 77-86.
- [7] BENAMROUCHE, N., KHALDI R and BOUSBAINE. A." Harmonic loss effects on temperature rise in inverter fed induction motor". University of Derby U.K 1997, PP 57-63.
- [8] VTOROV, V., NERG, J., "Cmmband Electromagnatic And Thermal Design Platform For Totally Enclosed Induction Machines" Lappeenranta, May 20, 2010, PP 75.
- [9] PYRHONEN, J., JOKINEN, T and HRABOVCOVA, V "Design of Rotating Electrical Machine "©John Wiley & Sons, Ltd. ISBN, 2008, PP668.
- [10] 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.
- [11] CHIN, Y.K., D.A. STATON. "Thermal Analysis Lumbed-Cercuit Model And Finite Element Analisis" 2003, PP 103-112.