

Monitoring of Hot-Spot Temperature in a Power Transformer With natural Cooling System

Dr. Tammam Hayder*
Dr. Mouhmad Zeherah**
Moulla Ibrahim***

(Received 12 / 6 / 2016. Accepted 8 / 10 / 2017)

□ ABSTRACT □

Calculation of Hot-Spot temperature in power transformers is one of the current and important research topics. Although this issue has been processed and marketed in industry for years, it is still a research subject. There are still physical models developed for calculation of the Hot-Spot temperature, depending on the cooling system.

The most common standards in practice are (IEC60076-7, IEC 354, IEEE C571-91). The latest one is IEC60076-7. However, this is still used by some manufactures, as is the IEEE C571-91 by American manufactures.

This article deals with the calculation of Hot-Spot temperature in power transformers according to the abovementioned standards and to the thermal equivalent circuit too. Based on realistic measurements were carried out by means of a measurement device, which is designed and implemented for this purpose, on a 230/66 kV Chinese transformer, which was recently delivered and in a substation in the Syrian electrical network installed.

Keywords: Hotspot temperature, Natural cooling, Power electrical transformers, Top oil temperature, Bottom oil temperature, Winding transformers, Load factor.

* Assistant Professor, department of electric power engineering, faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen university, Syria.

** Professor, lecturer, department of electric power engineering, faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen university, Syria.

*** Postgraduate student, department of electric power engineering, faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen university, Syria.

مراقبة درجة الحرارة الأعظمية في محولة استطاعة ذات تبريد طبيعي

الدكتور تمام حيدر *

الدكتور محمد زهيرة **

معلا ابراهيم ***

(تاريخ الإيداع 12 / 6 / 2017. قُبِلَ للنشر في 8 / 10 / 2017)

□ ملخص □

يعد موضوع حساب درجة الحرارة الأعظمية (Hot-Spot Temperature) في محولات القدرة الكهربائية على درجة عالية من الأهمية والمعاصرة. وعلى الرغم من تبنيه من قبل الشركات الصانعة للمحولات وتسويقه ما يزال موضوعاً بحثياً بامتياز، إذ يجري باستمرار تطوير نماذج فيزيائية لحساب درجة الحرارة الأعظمية للمحولات تبعاً لنوع نظام التبريد المستخدم.

عملياً فرضت نفسها ثلاث مواصفات قياسية دولية IEEE C57-91، IEC 60076-7 و IEC 354، يعد أحدثها المواصفة IEC 60076-7 إلا أن المواصفة الأقدم IEC 345 ماتزال تستخدم بالإضافة الى المواصفة IEEE C57-91 المعتمدة لدى الشركات الأميركية المصنعة للمحولات.

تتناول هذه المقالة موضوع حساب درجة الحرارة الأعظمية في محولات القدرة الكهربائية وفق المواصفات السابقة الذكر وأيضاً وفق نموذج الدارة الحرارية المكافئة للمحولة استناداً إلى قياسات عملية جرى أخذها باستخدام جهاز قياس صمم ونفذ لهذه الغاية، وقد أجريت هذه القياسات على محولة 230/66 kV من صناعة شركة صينية جرى توريدها وتركيبها حديثاً في إحدى محطات التحويل في الشبكة السورية.

الكلمات المفتاحية: درجة الحرارة الأعظمية، التبريد الطبيعي، محولات القدرة الكهربائية، درجة حرارة أعلى الزيت، درجة حرارة أسفل الزيت، ملفات المحولة، عامل التحميل.

* مدرس - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

** استاذ - 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:

تعد أنظمة مراقبة الحرارة في محولات القدرة الكهربائية من الأنظمة الحديثة التي باتت تستخدم بشكل واسع في العقود الأخيرة، وذلك بهدف تشخيص الحالة الفنية للمادة العازلة في المحولة وتحديد العمر المتبقي لها وكذلك بهدف تحديد قدرتها على التحميل الزائد لفترة زمنية قصيرة. تتألف هذه الأنظمة من حساسات لقياس درجات الحرارة ونقلها الى أجهزة رقمية موصولة معها لتتم معالجتها وفق خوارزميات رياضية تحدد درجة الحرارة الأعظمية الكائنة في الجزء العلوي من الملفات.

تترود معظم محولات القدرة الحديثة وخصوصاً المحولات ذات الاستطاعات الكبيرة في شبكات النقل بمثل هذا النظام. إلا أن معظم المحولات الأقدم الموجودة بالشبكة السورية على اختلاف استطاعاتها غير مزودة بمثل هذا النظام مما يجعل إجراء دراسة تتناول البنية الصلبة والمرنة لهذه الأنظمة وإمكانية تطويرها محلياً وتركيبها على المحولات الموجودة في الشبكة أمراً ملحاً لما لتحديد درجة الحرارة الأعظمية من أهميه في تحسين إمكانية المناورة وتحميل المحولة تحميلاً زائداً لفترات زمنية محددة، أمر لا يبدو الآن على درجة عالية من الأهمية نظراً لإمكانية التوليد المحدود والتقنين ولكن سيكون دون أدنى شك على درجة عالية من الأهمية في مرحلة إعادة الأعمار.

على الرغم من وجود مواصفات قياسية متعددة (أهمها المذكورة في الملخص) إلا أنه لا توجد قناعة بدقة مطلقة لأي من هذه المواصفات مما يستدعي إجراء دراسة عملية على محولة استطاعة حقيقية لرصد الفروق بين هذه المواصفات وكذلك الفروق بينها وبين نموذج حراري مكافئ للمحولة.

أهمية البحث وأهدافه:

تتبع أهمية البحث من النقاط التالية:

- تصميم دائرة قياس عملية تمكننا من قياس درجات حرارة في محولات القدرة الكهربائية بهدف حساب درجة الحرارة الأعظمية وطرحها كنموذج أولي (prototype).
- إجراء دراسة مقارنة بين المواصفات القياسية العالمية الأساسية المستخدمة في حساب درجة الحرارة الأعظمية في محولات القدرة الكهربائية ومقارنتها مع نتائج الحساب باستخدام الدارة الحرارية.
- تقديم إمكانية لتصنيع جهاز مراقبة لدرجة الحرارة الأعظمية وتزويد محولات القدرة الكهربائية الموجودة بالشبكة السورية به بهدف تحسين إمكانية المناورة من خلال التحميل الزائد لفترات قصيرة (فترات الذروة).

طرائق البحث ومواده:

ما يزال بحث السلوك الحراري للمحولة وتحديد درجة الحرارة الأعظمية فيها موضوعاً بحثياً معاصراً [1]. إذ تعد درجة الحرارة الأعظمية العامل الأكثر تأثيراً في حياة العازل الورقي لملفات المحولة وبالتالي تعتمد هذه الدرجة في تحديد العمر الفني للمحولة وتقادمها، كما تتيح مراقبة درجة الحرارة الأعظمية للمحولة إمكانية تحميلها تحميلاً زائداً لفترات قصيرة، ما يعرف بالتحميل الديناميكي [2]. تجرى الاختبارات الأولى لهذه الدرجة في المصنع بهدف تحديد سعة التحميل لمحولات الاستطاعة عند قيمة درجة حرارة وسط محيط محددة ثم تقوم أجهزة المراقبة بحساب هذه الدرجة عند شروط التحميل الحقيقي [3]، [4].

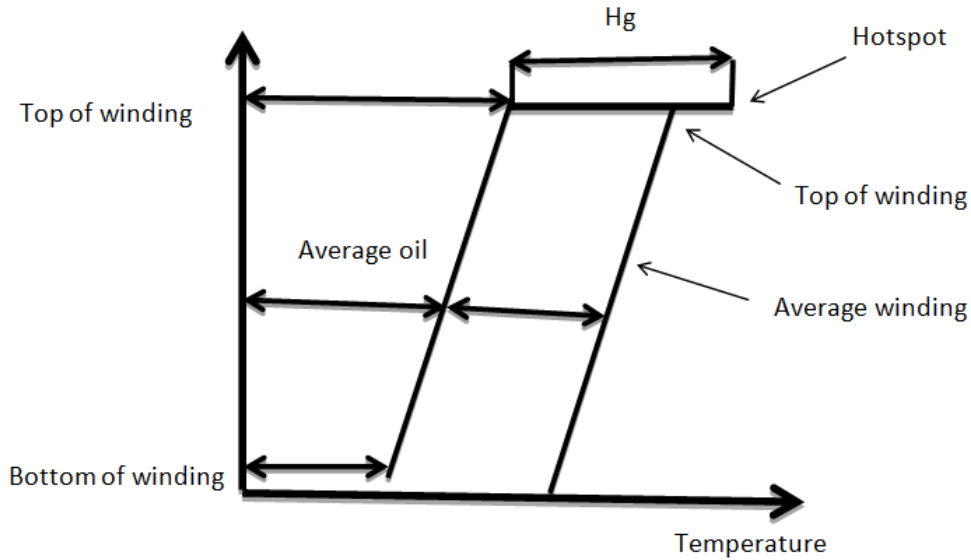
تشير المراجع الى عدد من الطرق المطورة في جامعات ومراكز بحثية اعتماداً على دارات حرارية مكافئة، ابسطها الدارة الحرارية ذات الجسم الواحد وأقدها الدارة التفصيلية [5]، [6] وكذلك على دراسات تعتمد على التحليل باستخدام طريقة الفروق المنتهية لتحديد درجة الحرارة الأعظمية [4].

نتطرق في هذا البحث في دراسة تجريبية تحليلية للمواصفات العالمية الأساسية المستخدمة في تحديد درجة الحرارة الاعظمية وإجراء مقارنة بينها و كذلك مقارنتها مع نموذج حراري مكافئ للمحولة يعتمد الدارة الحرارية ذات الجسمين. بداية سنقوم باستعراض هذه المواصفات.

1 المواصفات العالمية الاساسية المستخدمة:

IEC Publication 354, Loading guide for oil –immersed power transformers 1-1

ما يميز هذه المواصفة [7] هو اعتبار منحنيات درجة الحرارة لكل من الملف والزيت منحنيات خطية صاعدة بغض النظر عن نوع نظام التبريد للمحولة كما هو مبين بالشكل (1).



الشكل (1) تَوَزَع درجة حرارة الزيت و حرارة الملفات.

حيث نلاحظ أن توزع درجة الحرارة الأعظمية في ملفات المحولة وفق هذه المواصفة يكون خطي وموازي لتوزع درجة حرارة الزيت. و أما درجة الحرارة الأعظمية فهي أعلى من درجة حرارة الزيت الأعظمية، يعبر العامل Hg عن الفرق بين درجة حرارة الزيت ودرجة الحرارة الأعظمية في المحولة ويؤخذ عادة بين (1.5-1).

تحسب درجة الحرارة الأعظمية للمحولات ذات التبريد الطبيعي باستخدام العلاقة:

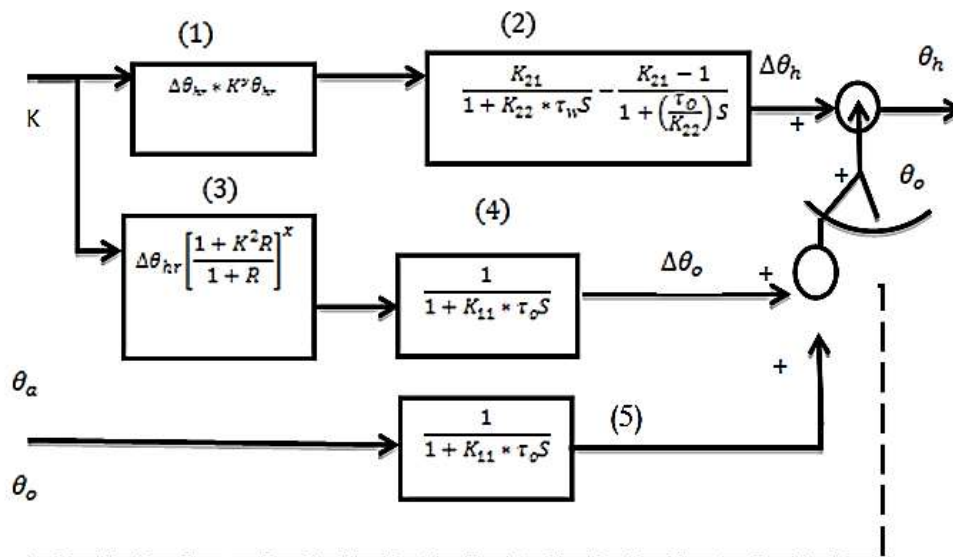
$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{or} \left(\frac{1 + R * K^2}{1 + R} \right)^x + Hg_r * k^y \quad (1)$$

حيث:

- θ_h : درجة الحرارة الأعظمية.
- Hg_r : الفرق بين درجة الحرارة الأعظمية ودرجة حرارة أعلى الزيت.
- $\Delta\theta_{or}$: تغير ارتفاع درجة حرارة أعلى الزيت.
- θ_a : درجة حرارة الوسط المحيط.
- R : نسبة الضياعات.
- y : عامل تمدد الملف.
- k : عامل التحميل.
- X : عامل تمدد الزيت

IEC 60076-7, Loading guide for oil –immersed power transformers 2-1-3

وهي المواصفة الأحدث [8] تعتمد في حساب درجة الحرارة الأعظمية على حل المعادلات التفاضلية التي تعبر عن تدرج قيمة هذه الدرجة وفق المخطط المبين بالشكل (2). حيث تحدد الثوابت $K_{11}, K_{21}, K_{22}, x, y, \tau_w, \tau_o$ حسب حجم المحولة ونوع نظام التبريد المعتمد فيها.



الشكل (2) المعادلات التفاضلية التي تستخدم لحساب درجة الحرارة الأعظمية.

من الشكل (2) نجد أن:

K (عامل التحميل) و θ_a (درجة حرارة الوسط المحيط) تمثلان دخل الخوارزمية،

في حين يكون خرجها درجة الحرارة الأعظمية θ_h .

الصندوقان (1) و (2) يعبران عن تغير درجة الحرارة الأعظمية ($\Delta\theta_{hr}$) كتابع لعامل التحميل.

الصناديق (3)، (4) و (5) تعبر عن تغير درجة حرارة أعلى الزيت ($\Delta\theta$) كتابع لعامل التحميل ودرجة حرارة

الوسط المحيط. عند التمكن من قياس درجة حرارة أعلى الزيت كإشارة كهربائية من خلال حساس بالتالي يمكن تعديل

المخطط ليصبح ممثلاً بالخط المنقط والاستغناء عن الصندوقان (3) و (4) في الشكل (2).

IEEE C57-91 Guide for Loading Mineral-Oil Immersed Transformer 3-1

تعتمد هذه المواصفة [9], [10] من حيث المبدأ التوابع الأسية في توصيف السلوك الحراري للمحولة بشكل

مشابه للمواصفة IEC345 ويتم حساب درجة الحرارة الأعظمية للمحولة ذات التبريد الطبيعي بالمعادلة.

$$\theta_H = \theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H \quad (2)$$

حيث:

θ_A : درجة حرارة الوسط المحيط. $\Delta\theta_{TO}$: تغير درجة حرارة أعلى الزيت.

$\Delta\theta_H$: تغير درجة الحرارة الأعظمية.

وتحسب قيم $\Delta\theta_{TO}$ و $\Delta\theta_H$ باستخدام العلاقات:

$$\Delta\theta_{TO} = (\Delta\theta_{TO,U} - \Delta\theta_{TO,i}) * \left(1 - \exp^{\frac{-1}{\tau T_0}}\right) + \Delta\theta_{TO,i} \quad (3)$$

$$\Delta\theta_{TO,i} = \Delta\theta_{TO,R} * \left(\frac{(k_i^2 * R)}{(R+1)}\right)^n \quad (4)$$

$$\Delta\theta_{TO,u} = \Delta\theta_{TO,R} * \left(\frac{(k_u^2 * R)}{(R+1)}\right)^n \quad (5)$$

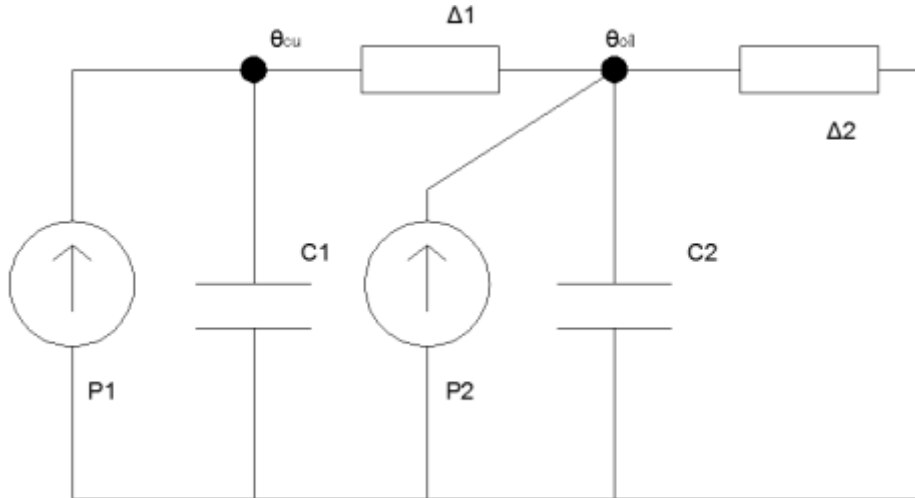
$$\Delta\theta_H = \Delta\theta_{H,R} * K^{2m}_u \quad (6)$$

حيث:

- $\Delta\theta_{TO,i}$: تغير درجة حرارة أعلى الزيت البدائي.
 $\Delta\theta_{TO,u}$: تغير درجة حرارة أعلى الزيت النهائي.
 $\Delta\theta_H$: تغير درجة حرارة الملف.
 k_i : عامل التحميل الابتدائي.
 m, n : ثوابت تتعلق بنوع نظام التبريد.
 $\Delta\theta_{H,R}$: القيمة الابتدائية لتغير درجة حرارة الملف.
 $\Delta\theta_{TO,R}$: القيمة الابتدائية لتغير درجة حرارة أعلى الزيت.
 k_u : عامل التحميل النهائي.

2 النموذج الحراري للمحولة :

تتراوح النماذج الحرارية المكافئة للمحولة بين النموذج ذو الجسم الواحد وحتى النماذج التفصيلية التي تستخدم حتى الآن لملفات أو محولات صغيرة، يجري قياس توزع الحرارة فيها مخبرياً. في هذا البحث اعتمدنا الدارة المكافئة للمحولة ذات الجسمين [6] والمبينة في الشكل (3) كونها الدارة الأنسب لدراسة السلوك الحراري لمحولات الاستطاعة الكبيرة.



الشكل (3) نموذج الدارة الحرارية

حيث:

- P_1 : الضياعات الحرارية في الملفات (ضياعات الدارة القصيرة).
 P_2 : الضياعات في القلب الحديدي و الغلاف (الضياعات على فراغ).
 C_1 : السعة الحرارية للملفات النحاسية.
 θ_{cu} : ارتفاع درجة الحرارة للملفات.
 Δ_1 : الموصلية الحرارية بين ملفات المحولة و الزيت.
 C_2 : السعة الحرارية للزيت والقلب المعدني.

θ_{oil} : ارتفاع درجة حرارة الزيت.

Δ_2 : الموصلية الحرارية بين زيت المحولة و الهواء.

حيث تعطى الموصلية الحرارية بالعلاقتين:

$$\Delta_1 = K_1(\theta_{cu} - \theta_{oil})^{n_1} \quad (7)$$

$$\Delta_2 = K_2(\theta_{oil})^{n_2} \quad (8)$$

و السعات الحرارية تعطى بالعلاقتين:

$$C_1 = m_{cu} * C_{cu} \quad (9)$$

$$C_2 = (m_{fe} * C_{fe}) + (m_{oil} * C_{oil}) \quad (10)$$

حيث:

$$n_1 = \left(\frac{2}{y}\right) - 1 \quad (11)$$

$$n_2 = \left(\frac{1}{x}\right) - 1 \quad (12)$$

بكتابة معادلتى العقديتين و باستخدام المتحولات وبعد التعويض والإصلاح يتم حساب كلاً من درجة حرارة الزيت

والمفاتيح للخطوة k من العلاقتين التاليتين:

$$\theta_{cu,k+1} = \theta_{cu,k} + \frac{\Delta t}{C_1} \left(P_1 - \Delta_{1,k} (\theta_{cu,k} - \theta_{oil,k})^{n_1+1} \right) \quad (13)$$

$$\theta_{oil,k+1} = \theta_{oil,k} + \frac{\Delta t}{C_2} \left(P_2 + k_1 (\theta_{cu,k} - \theta_{oil,k})^{n_2+1} - k_1 \theta_{oil,k}^{n_2+1} \right) \quad (14)$$

حيث :

n_1 : ثابت يتعلق بعامل تمدد الملف.

C_{fe} : السعة الحرارية النوعية للحديد.

n_2 : ثابت يتعلق بعامل تمدد الزيت.

C_{cu} : السعة الحرارية النوعية للنحاس.

K_1 : ثابت يتعلق بحجم المحولة و نظام تبريدها.

C_{oil} : السعة الحرارية النوعية للزيت.

K_2 : ثابت يتعلق بحجم المحولة و نظام تبريدها.

X : عامل تمدد الزيت.

m_{cu} : كتلة النحاس.

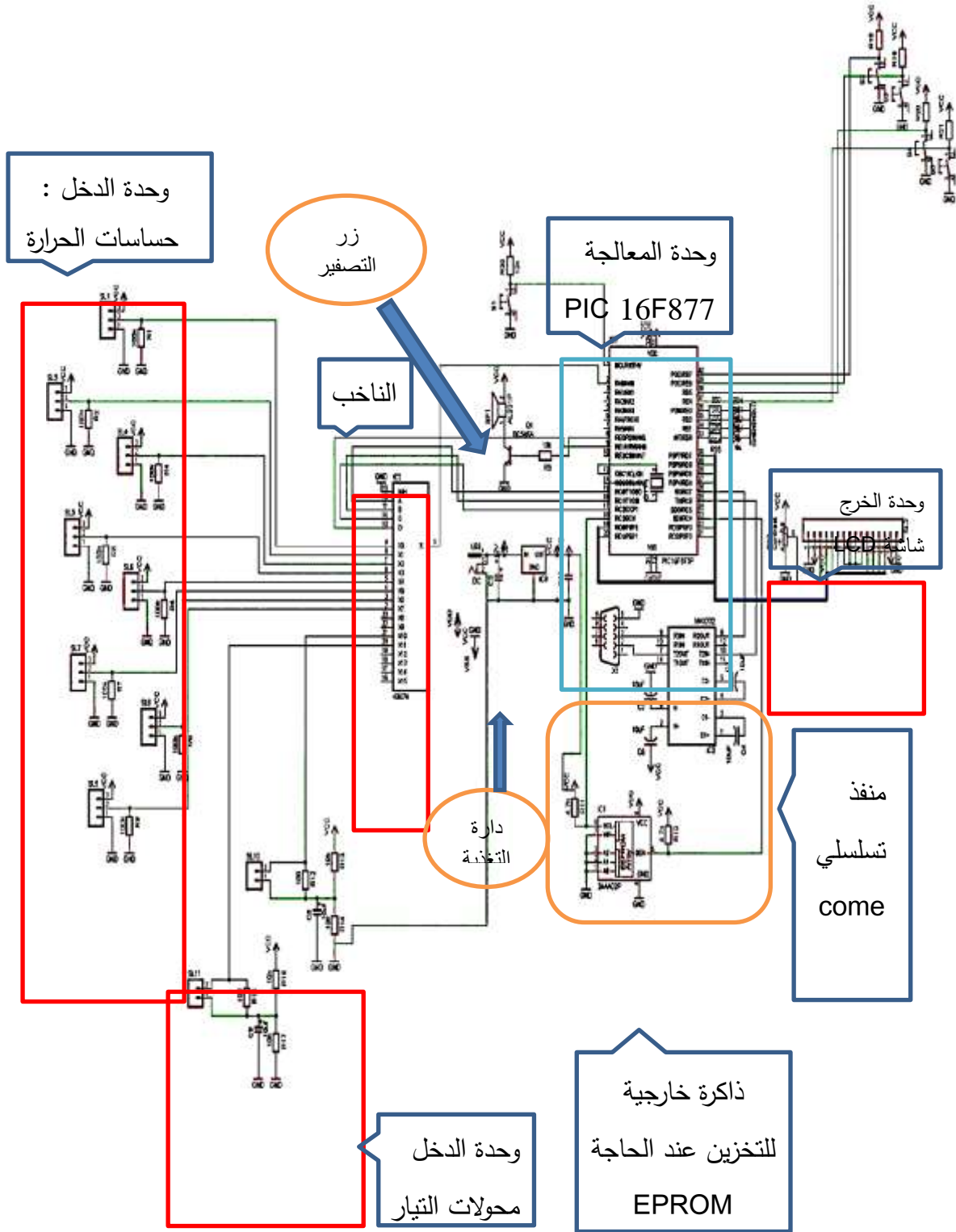
y : عامل تمدد المفاتيح.

m_{oil} : كتلة الزيت.

m_{fe} : كتلة الحديد.

3- جهاز القياس:

يتكون جهاز القياس المبين في الشكل (4) الذي تم تنفيذه وتصميمه من الوحدات التالية:



الشكل (4) مخطط تفصيلي للجهاز المصمم.

■ وحدة الدخل:

✓ حساسات حرارة من نوع LM35 [11]:

1-وحدة المعالجة المركزية CPU

2-الذاكرة وتنظيم الذاكرة

3-آليات المقاطعة

4-هزاز الشريحة

5-مؤقت المراقبة ونمط الراحة

6-نظام التصفير

ب- محيطيات المتحكم

تتقسم محيطيات المتحكم إلى قسمين أولهما ما يقوم بربط المتحكم مع الوسط الخارجي مثل أقطاب الدخل/خرج، المحولات ADC، وحدة التعديل PWM والقسم الثاني ما ينفذ تعليمات داخلية كالمؤقتات، والمحيطيات المتاحة مع متحكمات PIC هي:

1-نواخذ الدخل/خرج ذات الأغراض العامة

2-ذاكرة المعطيات EEPROM الداخلية

3-نافذة الاتصالات التسلسلية المتوافقة SSP

4-قائد الشاشة LCD

■ وحدة الخرج:

تقاد معظم شاشات الإظهار السائلة LCD بمتحكمات متوافقة وتعتبر هذه الشاشات متوفرة بشكل واسع وقليلة الكلفة وتتراوح أحجامها من 8 إلى 80 محرف و تتعدد أنواعها مختلفة عن بعضها بعدد المحارف في كل سطر وعدد الأسطر في الشاشة، نذكر أن الأكثر شيوعاً هي ذات 16 أو 20 محرف مع سطر أو سطرين أو أربعة أسطر في الشاشة. يتم اظهار درجات الحرارة والتيارات الحمولة من خلال شاشة الإظهار LCD التي توصل مع بوابة المتحكم D.

يتم نقل القياسات التي تم جمعها من الجهاز المصمم من خلال الاتصال مع الحاسوب عبر وصله منفذ تسلسلي come. ويتم التعامل مع القياسات المأخوذة من الجهاز باستخدام برنامج حاسوبي مصمم بلغة ال MATLAB. ولتسهيل التعامل تم تصميم واجهه رسومية (Graphical User Interface in MATLAB)، تمكنا من التعامل بسهولة مع البيانات المأخوذة من الجهاز.

استخدمت في عمليات الوصل بين حساسات الحرارة والجهاز وبين محولات التيار والجهاز كوابل STP التي تستخدم عادة في نقل المعطيات في الشبكات الحاسوبية رُوعي تأريض الجهاز وتمديد الكابلات بحيث لا تتشكل حلقات تؤدي الى نشوء تيارات تحريضية.

أهداف البحث:

- ❖ إجراء قياسات على محولة استطاعة بواسطة جهاز القياس المنفذ (فقرة (3-3)) لكل من درجة حرارة الوسط المحيط ودرجة حرارة أعلى الزيت ودرجة حرارة أسفل الزيت. بالإضافة الى قياس كلا من التيار الاولي والثانوي للمحولة بأوقات مختلفة وعند معاملات تحميل مختلفة.
- ❖ حساب درجة الحرارة الاعظمية للمحولة وفق المواصفات العالمية المذكورة سابقاً (1-3)، وأيضاً باستخدام الدارة الحرارية المكافئة للمحولة (2-3) ومقارنة نتائج الحساب هذه بين بعضها البعض.

النتائج والمناقشة:**النتائج:**

اجريت الدراسة على محولة استطاعة 230/66 KV صينية المنشأ تم توريدها الى الشبكة السورية ووضعها في الخدمة في محطة تحويل اللاذقية، مواصفاتها:

Power transformer data

Producer	SFZ China	Frequency	50 Hz
Type of connection	Y/ Δ – 11	Open circuit losses	53830 W
Short circuit losses	289600 W	Rated current	313.8 / 1093.5 A
Rated power	125000/125000 KVA	Oil in radiator	4648 (L)
Oil	43000(L)	Copper weight	30000 Kg
Core weight	43000Kg	Cooling system	ONAN/ONAF 86.4%/100%
Rated voltage	23000 \pm 14 * 1.2%/66000V		

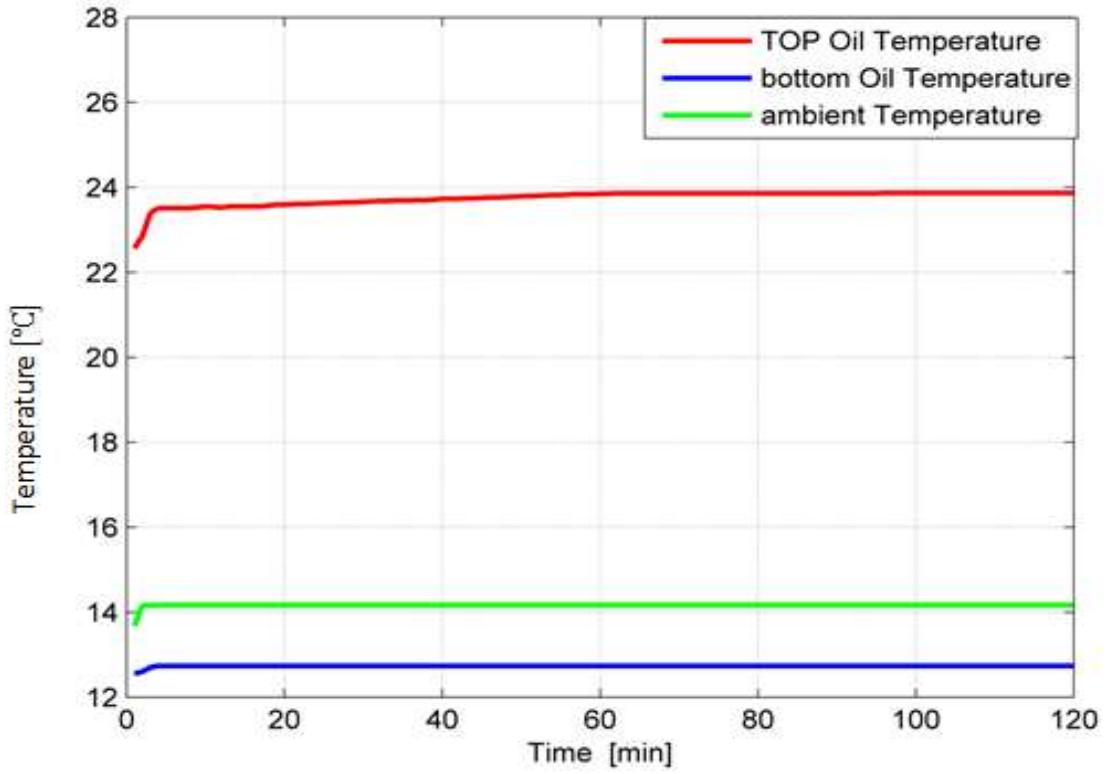
نظام تبريد هذه المحولة ONAN (Natural Cooling of Oil and Air). أي أن حركة كل من الزيت والهواء

طبيعية.

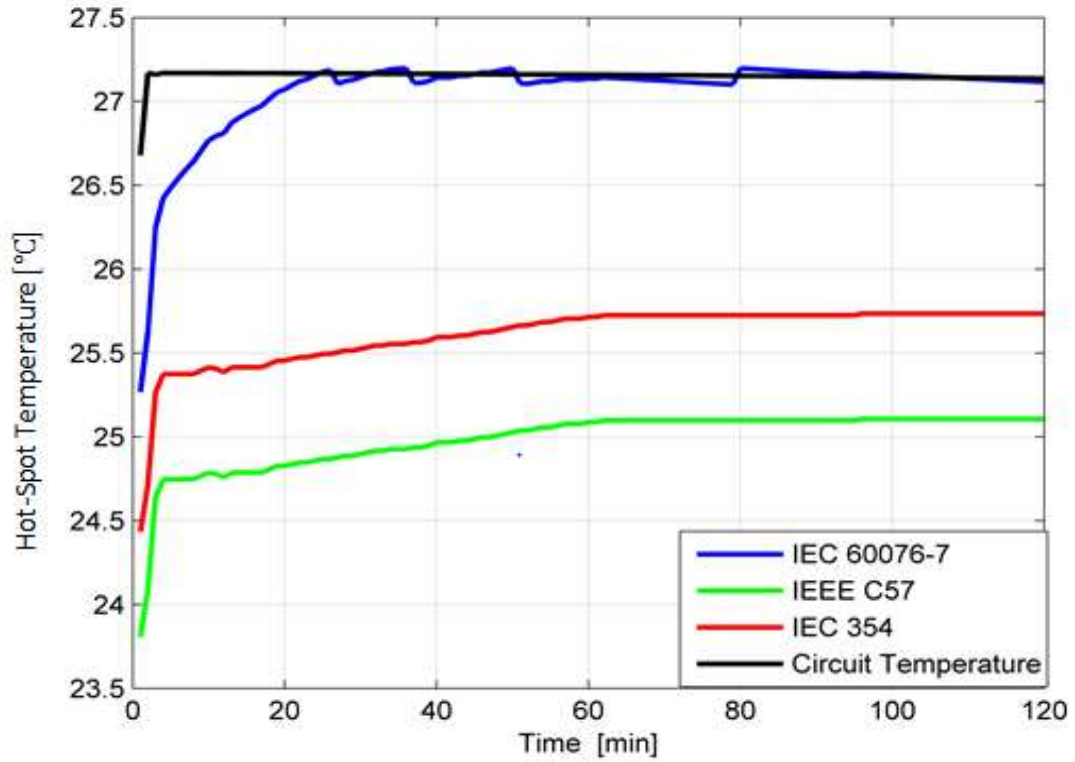
تم أخذ القياسات في فترات زمنية مختلفة بخطوة مقدارها دقيقة واحدة عند عوامل تحميل مختلفة، استخدمنا في قياس درجة الحرارة أعلى الزيت حساس حرارة تم وضعة على حامل الحساس الحراري المورد مع المحولة. أما قياس درجة حرارة أسفل الزيت فقد تم تركيب الحساس على الهيكل الخارجي للمحولة، وتم أخذ عينات من الزيت عند المخرج و قياس حرارتها حيث تبين أن الفرق بين درجة حرارة الزيت ودرجة الحرارة التي تم قياسها بالحساس صغير لدرجة يمكن إهماله. قيس تيار حمل المحولة من خلال محولات التيارات على طرفي المحولة.

بعد ذلك جرى حساب درجة الحرارة الأعظمية وفق المواصفات القياسية السابقة باستخدام برنامج MATLAB. بالإضافة الى ذلك تم حساب درجة الحرارة الأعظمية وفق النموذج الحراري، حيث أخذت القيم الابتدائية من نتائج القياس.

اخترنا في هذه المقالة نتائج قياس وحساب نموذجية لثلاث فترات زمنية في أيام مختلفة من شهر نيسان لعام 2017. الفترة الزمنية الأولى من الساعة (9-11) حيث معامل التحميل 0.176 (الأشكال 6، 7). يبين الشكل (6) نتائج قياس درجات حرارة الوسط وأعلى وأسفل الزيت، يبين الشكل (7) درجة الحرارة الأعظمية في المحولة محسوبة وفق المواصفات الثلاثة وأيضاً وفق الحساب باستخدام الدارة الحرارية المكافئة للمحولة.

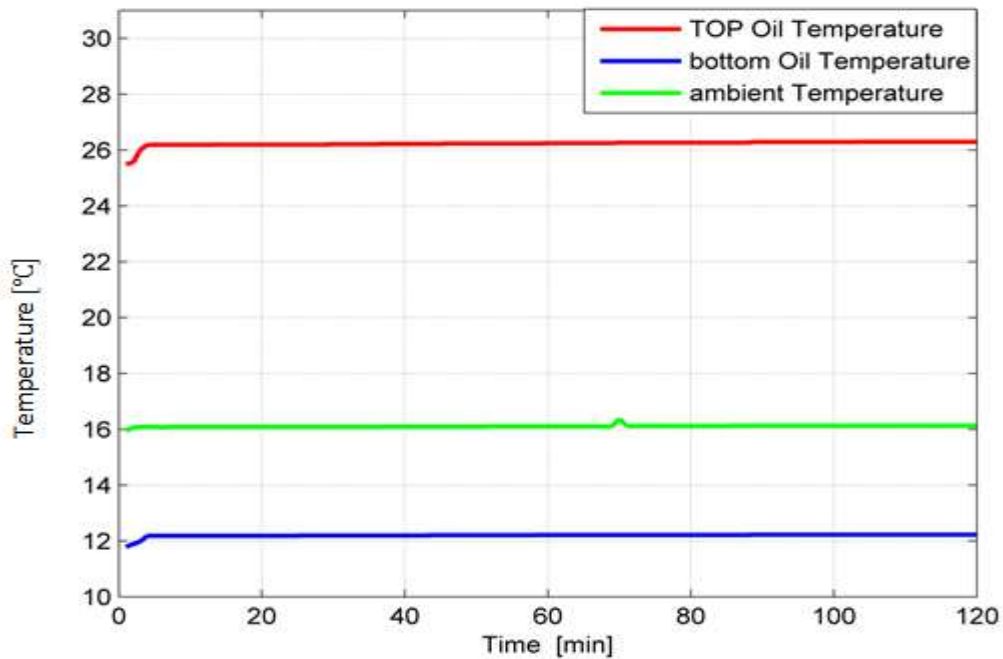


الشكل (6) تغيرات درجة حرارة الوسط المحيط وأعلى و أسفل الزيت خلال الفترة الزمنية (9-11).

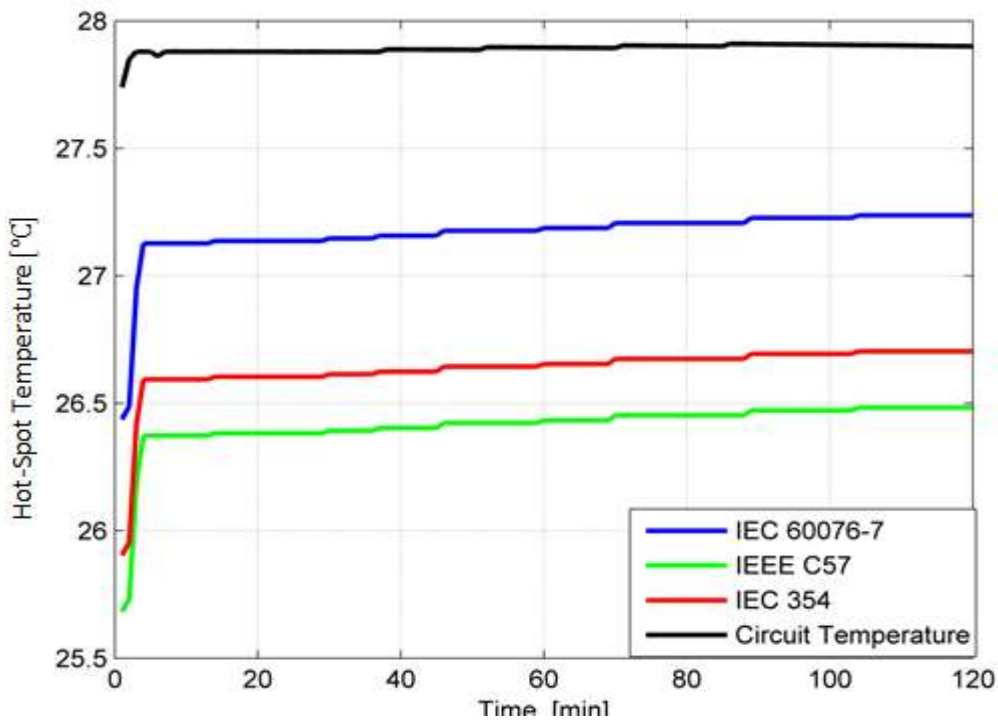


الشكل (7) تغيرات درجة الحرارة الأعظمية وفق المواصفات الثلاثة و وفق الدارة المكافئة الحرارية خلال الفترة الزمنية (9-11).

عند الفترة الزمنية الثانية بين الساعة (1-11) حيث معامل التحميل 0.08 (الاشكال 8,9) حيث يبين الشكل (8) نتائج قياس درجات حرارة الوسط المحيط وأعلى وأسفل الزيت. والشكل (9) يبين درجة الحرارة الأعظمية في المحولة محسوبة وفق المواصفات الثلاثة وأيضا وفق الحساب باستخدام الدارة الحرارية المكافئة للمحولة.

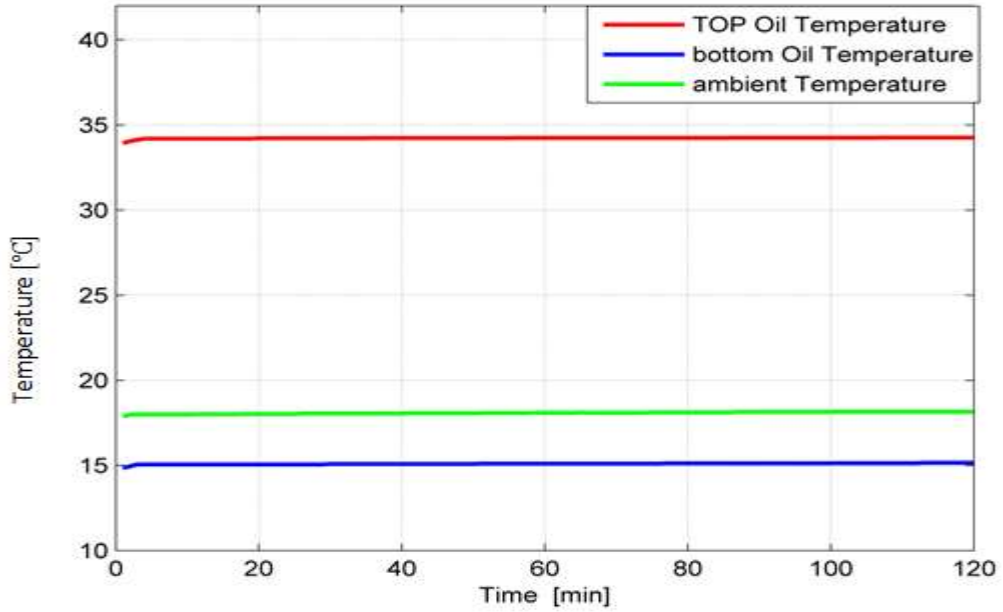


الشكل (8) تغيرات درجة حرارة الوسط المحيط وأعلى و أسفل الزيت خلال الفترة الزمنية (1-11).

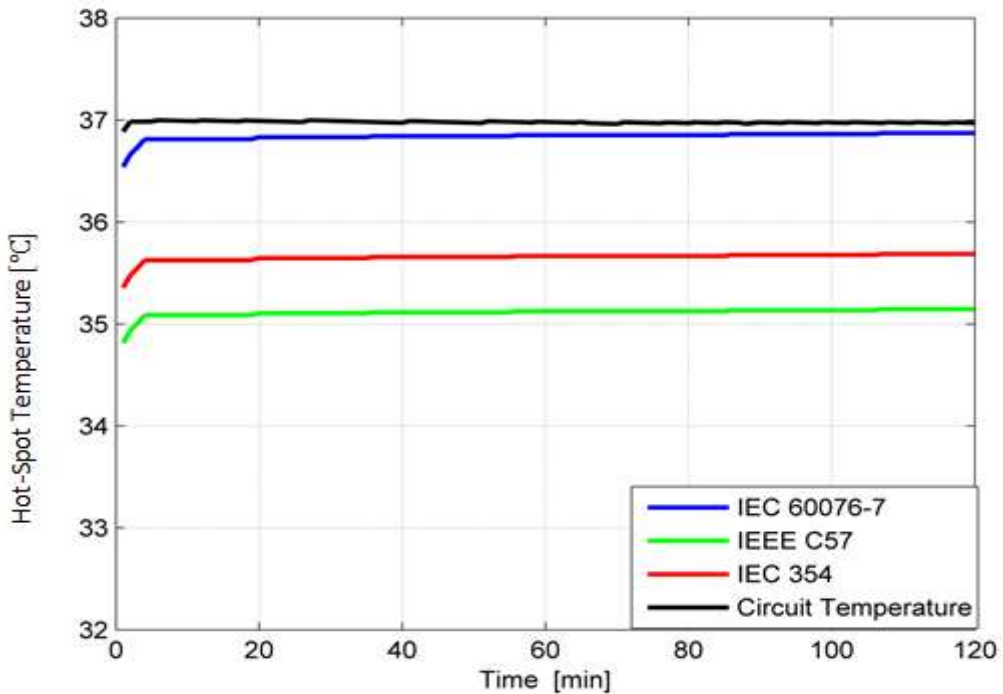


الشكل (9) تغيرات درجة الحرارة الأعظمية وفق المواصفات الثلاثة و وفق الدارة المكافئة الحرارية خلال الفترة الزمنية (1-11).

عند الفترة الزمنية الثالثة بين الساعة (3-1) حيث معامل التحميل 0.208 (الاشكال 10,11) حيث يبين الشكل (10) نتائج قياس درجات حرارة الوسط المحيط وأعلى وأسفل الزيت. والشكل (11) يبين درجة الحرارة الأعظمية في المحولة محسوبة وفق المواصفات الثلاثة وأيضا وفق الحساب باستخدام الدارة الحرارية المكافئة للمحولة.

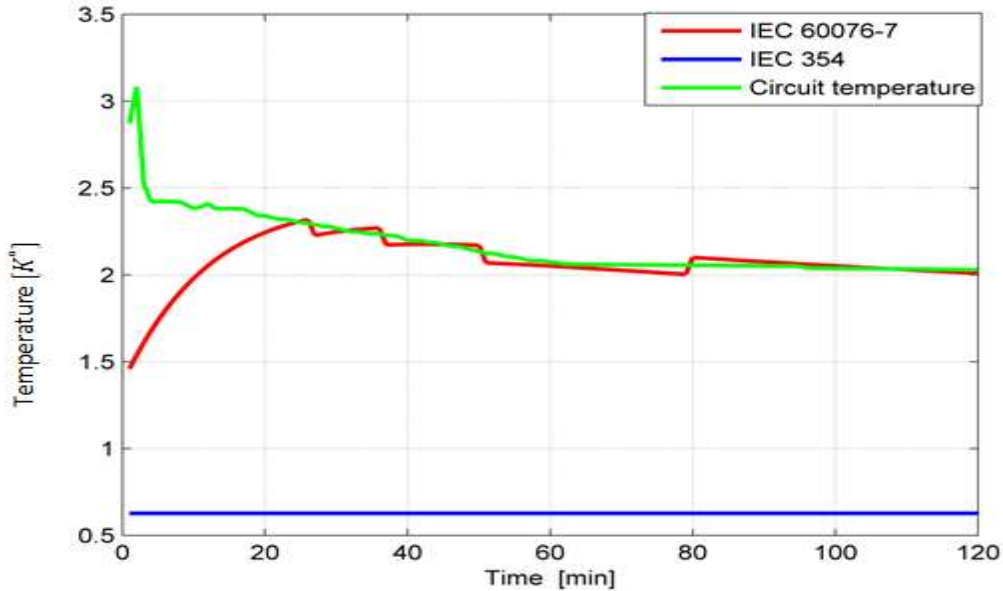


الشكل (10) تغيرات درجة حرارة الوسط المحيط وأعلى و أسفل الزيت خلال الفترة الزمنية (3-1).

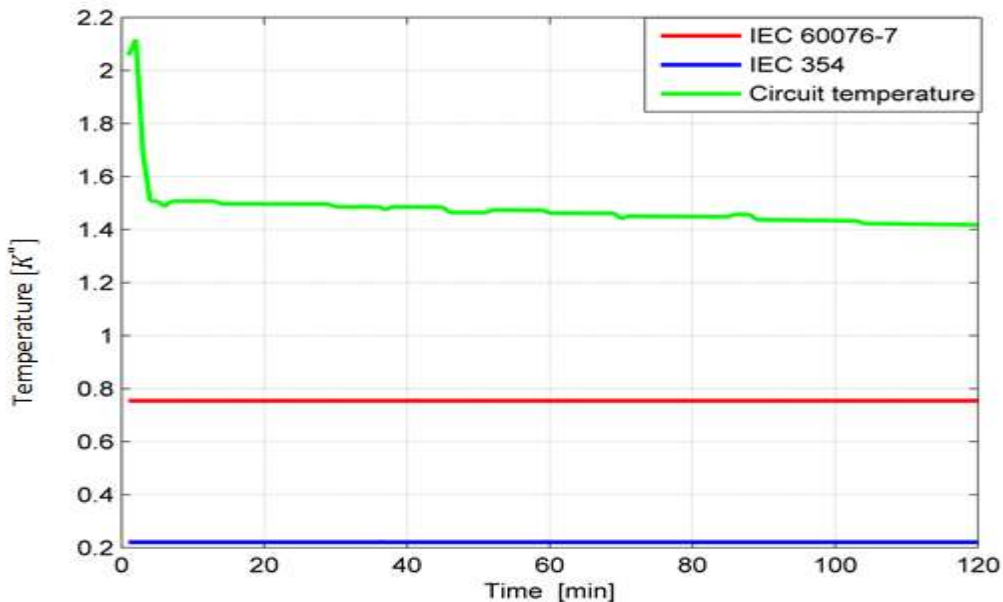


الشكل (11) تغيرات درجة الحرارة الأعظمية وفق المواصفات الثلاثة و وفق الدارة الحرارية المكافئة خلال الفترة الزمنية (3-1).

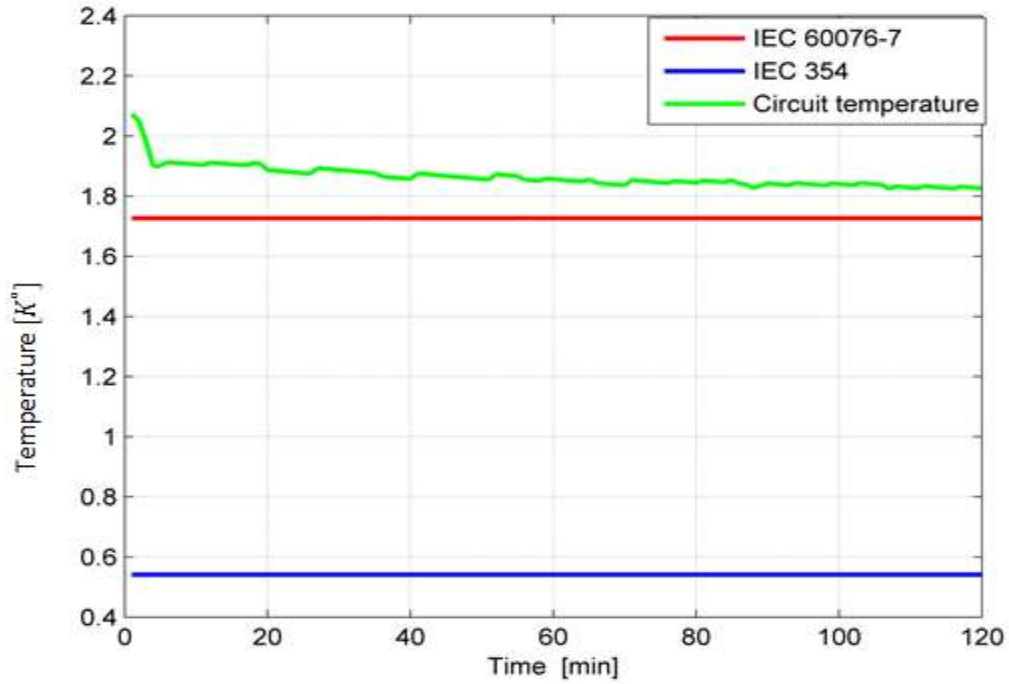
من الواضح تماماً من الأشكال (7,9,11) أن المواصفة IEEE C57 هي الأكثر محافظةً (أعطت درجات الحرارة الأعظمية الأقل) و لذلك اعتمدت كمرجع (Reference) في تقييم النتائج و تم حساب الفرق في درجات الحرارة الأعظمية بين تلك الناتجة من الحساب باستخدام هذه المواصفة وتلك الناتجة من الحساب باستخدام خوارزميات المواصفات IEC 345 و IEC 60076-7 و كذلك الناتجة من الحساب باستخدام الدارة الحرارية المكافئة للفترات الزمنية الثلاث الأشكال (12,13,14).



الشكل (12) فروق درجات الحرارة الأعظمية بالنسبة للمحولة باستخدام المواصفة IEEE C57 في الفترة (9-11).



الشكل (13) فروق درجات الحرارة الأعظمية بالنسبة للمحولة باستخدام المواصفة IEEE C57 في الفترة (11-1).



الشكل (14) فروق درجات الحرارة الأعظمية بالنسبة للمحولة باستخدام المواصفة IEEE C57 في الفتره (3-1).

مناقشة النتائج :

❖ نظراً لوضع التقنين الراهن في سوريا جرت القياسات كافة عند عوامل تحميل منخفضة (جداً) اعلاها خلال الفترة الزمنية من الساعة (3-1) لم يتجاوز % 20 من تحميل المحولة الاسمي. وهي الفترة التي قيست فيها درجات الحرارة الأعلى للزيت، وهذا يعود لارتفاع عامل التحميل وكذلك لارتفاع درجة حرارة المحيط الخارجي، (الشكل 10).

❖ قيم درجات الحرارة الأعظمية المحسوبة باستخدام المواصفة IEEE C-57 هي الأدنى دوماً (الأشكال 7، 9، 11).

❖ الفروق بين درجات الحرارة الأعظمية المحسوبة باستخدام المواصفات القياسية وكذلك الدارة الحرارية المكافئة في حدود الدرجتين فقط وتبدوا قيم الفروق هذه متقاربة عند عوامل التحميل ودرجات حرارة الوسط المحيط المختلفة (الأشكال 12، 13، 14).

❖ درجات الحرارة الأعظمية المحسوبة باستخدام المواصفة الأحدث (IEC 60076-7) هي الأقرب لتلك المحسوبة باستخدام الدارة الحرارية المكافئة.

❖ لوحظ خلال العمل ان حساسية المواصفة IEC 60076-7 لتغيرات في الحمل هي الأعلى وايضاً الاستجابة وهذا يعود لاعتماد هذه المواصفة على المعادلات التفاضلية في الحساب.

الاستنتاجات والتوصيات:

- دون أدنى شك تتمتع المواصفة IEC 60076-7 بالمزايا الكثيرة في حساب درجة الحرارة الاعظمية ولكن تعد أيضاً الحسابات المجراة باستخدام المواصفتين الأخرتين على درجة مقبولة من الدقة وهذا يفسر اعتماد بعض الشركات المصنعة للمواصفة IEC 354 حتى الآن وهي المواصفة الأبسط في عملية البرمجة والحساب.
- يبدو ان الحساب باستخدام الدارة المكافئة الحرارية ذو دقة مرضية ويمكن فعلاً التعويل على هذه الدارة في دراسات ذات صلة بموضوع السلوك الحراري للمحولة.
- جهاز القياس المنفذ ذو كلفة مقبولة جداً يحتاج للتطوير في اتجاهين، الاتجاه الأول: برمجة خوارزمية لحساب درجة الحرارة الأعظمية، الأفضل خوارزمية المواصفة IEC 60076-7 ولكن يمكن أيضاً اعتماد خوارزمية IEC 354 لبساطتها، الاتجاه الثاني: بناء احترافي للجزء الصلب يجعل من هذا الجهاز قابلاً للاعتماد والتسويق.
- يمكن استخدام الجهاز في مراقبة درجة الحرارة الأعظمية في المحولات الزيتية حتى القديمة منها وهو امر ايجابي يفيد في معرفة تقادم العازليه وكذلك في عملية المناورة في الحمل (تحميل ديناميكي) وخصوصاً في الشبكات المحملة تحمياً كبيراً عند حدود التحميل الاسمي للمحولات وربما تتجاوزه قليلاً لفترات زمنية قصيرة.

المراجع:

- [1]: ANNUAL REPORT, *Institute for Energy Transport and high Voltage technic*. Stuttgart University, 2016
- [2]: *Dynamic loading of Substation Distribution Transformer*, ARISONA STATE University, August 2014.
- [3]: Intelligent monitoring system, Type IEC Users manule ABB Powers and productivity for a betters world, 2008.
- [4]: Ts Catalog: Temperature SMPervisor for oil –immersed Transformers Treotech 2014.
- [5]: Thermal modeling of transformer based on PT -1000 Sensor Gothenburg, SWEDEN, 2014
- [6]: RADAKOVIC, Z; FESER, K, *A New Method for the Calculation of the Hot-Spot Temperature in Power Transformers With ONAN Cooling*; IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVER Y, VOL. 18, NO. 4, OCTOBER 2003.
- [7]: IEC 60354, Loading guide for oil-immersed power transformers IEC 1991, 2nd Edition.
- [8]: IEC 60076-7, Loading guide for oil-immersed power transformers IEC 60076-7 , first edition 2005.
- [9]: Guide for Loading Mineral- oil-immersed transformers , IEEE standard C57-91 1995.
- [10]: TAUFIQ , M, WANG, Z, *Transformer Hotspot Temperature Calculation using IEEE Loading Guide*, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-24, 2008.
- [11]; WWW.ti.com