

تجارب و خبرات مع أنظمة عزل تتحمل درجات الحرارة العالية و متطلبات الحمل الزائد

## Experiences with high-temperature insulation systems & overload requirements

C.PERRIER\*, M.-L.COULIBALY

T.STIRL, J.HARTHUN

GE GRID Solutions

GE Grid Solutions

France

Germany

مراجعة:

ترجمة:

م/ أحمد مصطفى الأسرم

1. م/ أحمد محمد عبد الحافظ

م/ فوزي شحاتة إبراهيم

2. م/ أمنية محمود فهمي

1

## الملخص:

- مكونات نظام العزل الكهربائي داخل المحولات (مواد عازلة صلبة , الزيت العازل)
- درجة الحرارة العامل المهمين الذي يسبب إنهيار العزل
- المتطلبات التقليدية للتصنيف الحراري للمواد (مواد ذو تصنيف حراري (أ) تتحمل درجات حرارة حتى  $105^{\circ}\text{C}$  الزيت المعدني..)
- في المقابل استخدام مواد عازلة تتحمل درجات الحرارة العالية يؤدي إلي تصميم محسن أو تحمل درجات الحرارة العالية
- زيت الإستر (Natural Ester Oil): يتحمل درجات حرارة أعلي من الزيوت المعدنية, يساهم في تطوير أنظمة العزل في تحمل درجات الحرارة العالية

2

ينقسم البحث إلى ثلاث أجزاء:

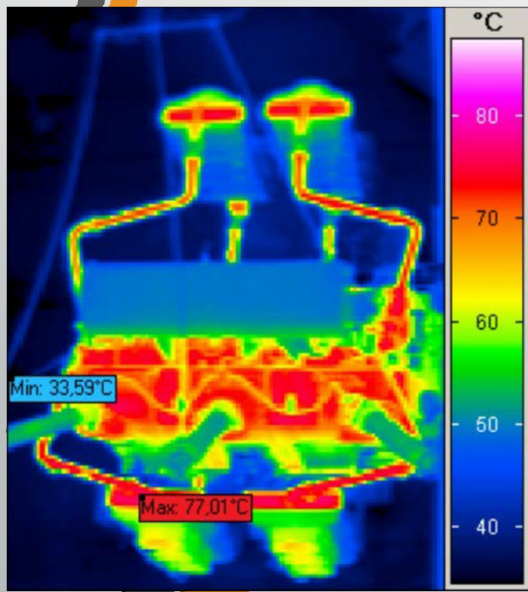
- **الجزء الأول:** النتائج المعملية لمعرفة توقيت إنهيار العزل الكهربائي (التقادم) لعينات المواد السليلوزية (Kraft Paper) المغمورة في الزيت المعدني و زيت الإستر (Natural Ester Oil), و مقارنة بين التصميمات المختلفة التي تتحمل درجات الحرارة العالية لمحول قوي قدرة 80 MVA و محول آخر قدرته 515 MVA



Figure 1: Ageing of sealed vials filled with insulating liquid and Kraft paper

3

- الجزء الثاني: مثال لمحول قوي قدرة 70MVA, و إمكانية زيادة التحميل الزائد عليه لتصل قدرته إلى 100MVA و ذلك بعد إجراء الحسابات اللازمة:



1. الحسابات الهيدروحرارية
2. التصميم الكهربائي و حساب المفايد
3. تأثير تسريب الفيض المغناطيسي
4. إختبارات الحرارة (Heat Run test)

4

الجزء الأخير: بعض الحلول التكميلية لتطوير و بحث إمكانية تحسين التبريد (المراوح و الطلمبات المحسنة) التي تتيح للمحول تحمل درجات الحرارة العالية.

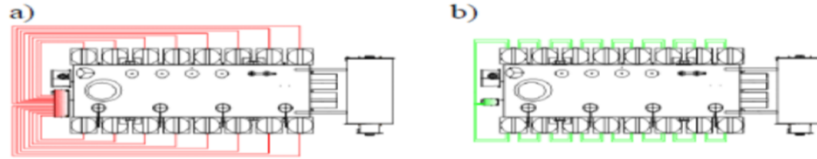


Figure 7: Schematic top view of a transformer with conventional two fans group (a) and innovative approach to control the fans (b)



Figure 8: First 40/50 MVA, ONAN/ONAF grid coupling transformer with new speed-controllable fans with EC technology manufactured in Germany in 2009

5

## 2. التصميمات التي تتحمل درجات الحرارة العالية

- طبقاً لمواصفة ال IEC 60076 part 14 و طبقاً للمعايير الدولية يمكن تصميم محولات حجمها أقل عن طريق أنظمة العزل المختلطة و الإستفادة من مواد العزل ذات التصنيف الحراري الأعلى من مواد العزل التقليدية مثل (مواد تتحمل درجات حرارة اعلي من 155°C , TUP) بدلاً من مواد العزل التقليدية (Kraft paper)
- عند دمج تلك المواد مع زيت الإستر (Natural Ester Oil), يمكن الحصول علي تصميمات للجزء الفعال (Active Part) حجمها و أوزانها أقل مقارنة التصميمات التقليدية و يمكن أيضاً تقليل المفايد

6

## 2.1 أنظمة العزل:

- نظام العزل يتكون من مواد العزل الصلبة و الزيت المستخدم و بالتالي فإن الاداء الحراري لمواد العزل الصلبة يتم تقييمه دائما مقرونا بالزيت المستخدم
- يتكون المحول من ملفات منفصلة يفصلها من بعضها حواجز عزل و قنوات تبريد مثلما يستخدم ورق العزل في عزل الكابلات بينما الفواصل و الخوابير و قنوات التبريد تكون من مادة البرسيان
- طبقا لل IEC 70076 part 14, يوجد ثلاث أنواع لمواد العزل:

1. مواد عزل تقليدية (تصنيف حراري (أ) تتحمل درجات حرارة حتي  $105^{\circ}\text{C}$ )

2. عزل هجين الذي ينقسم إلي (شبه هجين, هجين مختلط, هجين بالكامل)

3. عزل يتحمل درجات الحرارة العالية

7

## مقارنة بين زيت الإستر (Natural Ester Oil) و الزيت المعدني (Mineral Oil)

Properties	Standard	Mineral Oil	Natural Ester Liquid
Fire Safety Class	IEC	O1	K2
Flash Point ( $^{\circ}\text{C}$ )	ASTM	Limit 145	Limit 275
	IEEE	-	Min. 275
	IEC	$\geq 135$	Min. 250
Fire Point ( $^{\circ}\text{C}$ )	ASTM	Limit 170	Limit 300
	IEEE	-	Min. 300
	IEC	-	Min. 300
Calorific Value MJ/kg	Ref. [23]	46	37.5
Transformer separation distance requirement from other transformer or building or other substation equipment	FM GLOBAL STANDARD 3990	1/10th The distance required for mineral oil immersed transformers	
Requirement of Fire extinguishing system		needed	Not required even for indoor application

8



**Table 5.** Environmental impacts of transformer insulating liquids.

Properties	Standard	Mineral Oil	Natural Ester Liquid	Ref. no.
Biodegradability at 28 days	Method OECD 301 F	<10%	>94%	20, 26
Soil Eco-toxicity	OECD Methods	Toxic/forms toxic products	Non-Toxic fresh as well as aged oil	27, 28
Acute aquatic toxicity	OECD 203	Toxic	Non-Toxic	20
Acute Oral toxicity	OECD 420	Toxic	Non-Toxic	20
Contamination with ground water		To avoid contamination with ground water oil compartment in the foundation is needed	Due to Fast biological degradation, on major leakage no need of oil compartment in the foundation	29
Total life cycle carbon footprint	Dept. of Commerce NIST BEES V 4.0	Natural Ester has less than 2 % of the carbon foot print than mineral oil.		20
Overall environmental impact	Dept. Of Commerce NIST BEES V4.0	1/4th Impact Of Mineral Oil		20
Greenhouse gases attributed to transformer liquid for its complete life cycle	TONS per 1000 Gallons	4.18	0.075	20
Carbon Neutral		Not Carbon Neutral	Carbon Neutral	30
Corrosive sulphur	ASTM D1275-06 Method B	Non Corrosive	Not Detected	20

9

**Table 9.** Pour point of different insulating liquids.

Properties	Standard	Mineral Oil	Natural Ester Liquid	Ref. no
Pour Point (°C)	ASTM	≤ -40 (°C)	≤ -10 (°C)	13, 14
	IEEE		≤ -10 (°C)	
		IEC	≤ -40 (°C)	≤ -10 (°C)
Tendency to develop voids		Natural ester has reduced tendency to develop voids when cooled beyond its Pour Point Temperature.		35
Cold Start		No special care required to be taken during cold start of natural ester immersed transformer.		34, 35
Ambient falls below 0°C		Recommended to run transformer under No Load Condition		29

10

**Table 13.** Transformer MVA rating and dimensional challenges.

	Mineral Oil	Natural Ester Liquid	Ref No.
Continuous MVA capacity	Using natural ester liquid, continuous MVA capacity of existing mineral oil immersed transformer can be increased up to around 12 % (Ref 27 suggest up to 20%) keeping same losses and impedance at base MVA.		20, 43, 44
Footprint Of Transformers	Using natural ester liquid, despite increase in MVA rating of mineral oil transformer, 20% reduction in overall size of the transformer footprint and 18% in volume.		43
Energy Efficient Transformer	For natural ester liquid immersed transformer, though increase in rating and reduced in size, losses can be maintained same as mineral oil immersed transformer.		43, 45
Sludge Formation	Natural esters generate less sludge as compared to mineral oil. Only 1/20 the sludge is formed in natural esters in comparison with mineral oil.		20, 43
Life Cycle Cost and Capital expenditure	Natural esters immersed transformer can result into much lower life cycle costs and deferred capital expenditure.		43
High Temperature Insulation	To take advantage of reduction of cellulose degradation, higher temperature rises are possible if high temperature materials in line with IEC 60076: Part 14 can be used. In such cases the foot print of transformer can be reduced. Also, Natural ester high fire point increases the fire safety of high temperature transformers.		45

11

## 2.2 إختبار التقادم (إنهيار العزل الكهربائي)

- طبقا لل IEC 70076 فإن خصائص العزل السليلوزي يمكن أن تتحسن عند إستخدام زيت الإستر
- بالتالي تم إختبار بوضع عينة من ورق العزل السليلوزي (Kraft paper) في قارورة مقفولة و غمرها بالزيت المعدني التقليدي و قارورة أخرى و غمرها بزيت الإستر
- تم التسخين لعدة أشهر علي درجة حرارة 150°C

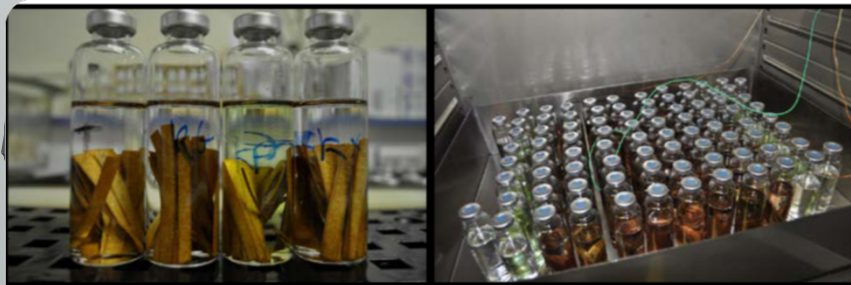


Figure 1: Ageing of sealed vials filled with insulating liquid and Kraft paper

12

## أولاً: درجة البلمرة (polymerization Degree)

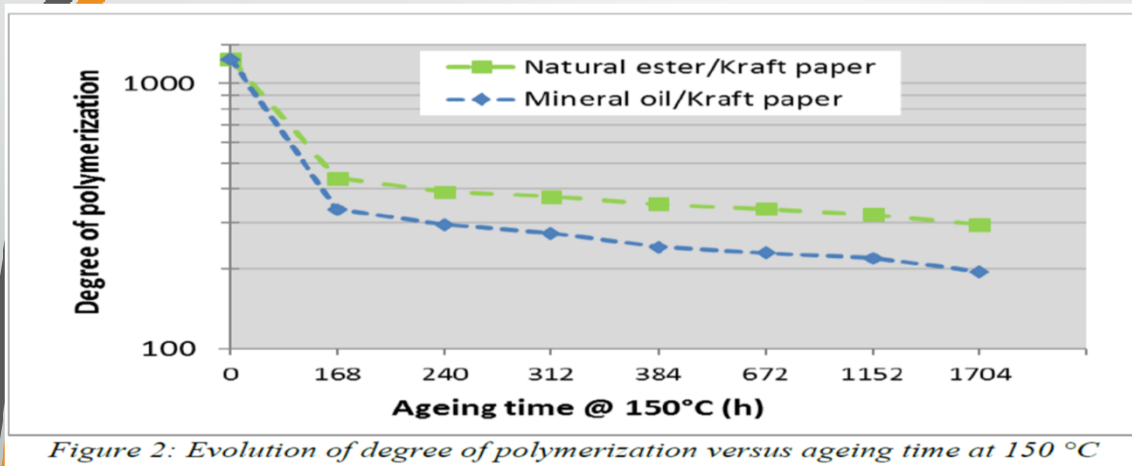


Figure 2: Evolution of degree of polymerization versus ageing time at 150 °C

بوضوح الشكل 2، فإن درجة البلمرة PD للورق السليلوزي عند إستخدام زيت الإستر يعتبر أعلي لنفس المدة مما يؤكد التأثير الإيجابي لزيت الإستر علي العمر الافتراضي لورق السليلوز

13

## ثانياً: الأحماض المتكونة خلال مدة الإختبار

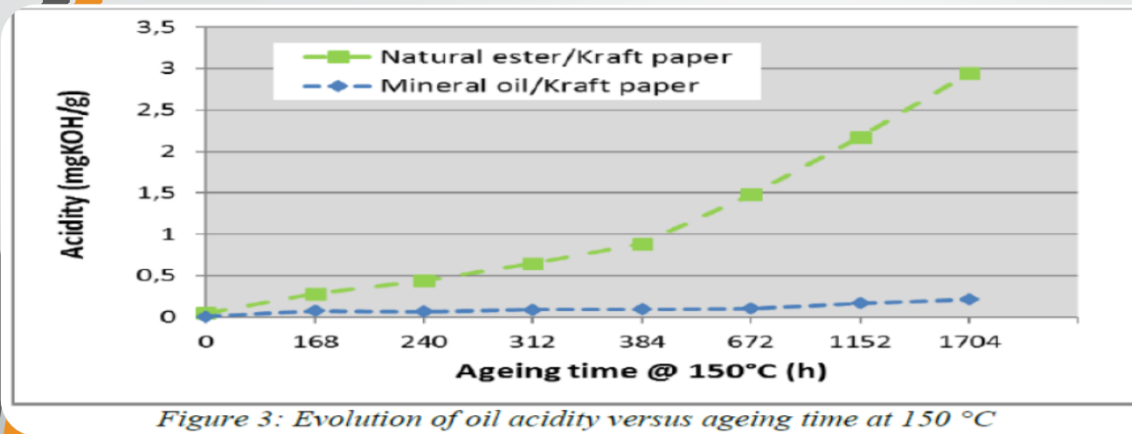


Figure 3: Evolution of oil acidity versus ageing time at 150 °C

الشكل رقم 3 يشير إلي أن الاحماض المتكونة في زيت الإستر تعتبر أقوى من الاحماض المتكونة في الزيت المعدني التقليدي، حيث أنه مرتبط بإستهلاك المياه و يمكن تفسيره أنه تفاعل تحلل المياه، كما هو موضح في دراسات أخرى من الملخص C من ال IEC 60076-14 (2)، إن تكون تلك الأحماض لم يكن له تأثير علي المواد العازلة، حيث أنها لا تؤثر علي تقادم ورق العزل السليلوزي بالشكل الكبير.

14

## 3.2 حسابات لمقارنة متغيرات التصميم:

- **بلخص الجدول رقم (1):** مقارنة بين متغيرات التصميم لمحول قوي متوسط قدرته 80 MVA و محول قوي قدرة اعلي قدرته 515 MVA
- إن الجدول يتضمن أنظمة العزل المختلفة المذكورة سابقا و أيضا نوع الزيت المستخدم و تأثيرها علي درجات حرارة الملفات و النقاط الساخنة (Hot Spots) و أيضا حجم المحول و الوزن أيضا

15

	Option 1: Conventional	Option 2: Semi Hybrid	Option 3: Mixed Hybrid	Option 4: Full Hybrid	Option 5: High Temperature	Option 6: High Temperature
<b>T°C:</b> Ambient / oil / winding (hot spot)	40 / 60 / 65 (78)	40 / 60 / 75 (90)	40 / 60 / 65 (100)	40 / 60 / 105 (125)	40 / 90 / 105 (125)	40 / 90 / 95 (110)
<b>Conductor insulation</b>	Kraft paper	TUP	Material $\geq 155$ °C & Kraft paper	Material $\geq 155$ °C	Material $\geq 155$ °C	TUP
<b>Solid insulation</b> (e. g. cylinders, strips)	Pressboard	Pressboard	Material $\geq 155$ °C & Pressboard	Material $\geq 155$ °C & Pressboard	Material $\geq 155$ °C	Pressboard
<b>Liquids</b>	Mineral oil	Mineral oil	Mineral oil	Mineral oil	Natural ester	Natural ester
<b>Weight 80 &amp; 515 MVA</b>	100 %	98 %	97 %	96 %	93 %	95 %
<b>Costs 80 &amp; 515 MVA</b>	100 %	98 %	100 %	98 %	118 %	102 %

*Table 1: Design variants for high-temperature transformers 80 MVA and 515 MVA*

16

## 4.2 خبرات مع محول يتحمل درجات الحرارة العالية

- إن المثال القادم يوضح محول تم تطويره و تصنيعه لشركة سكك حديدية.
- تم إستعمال **زيت إستر طبيعي** كزيت العزل بدلا من الزيت المعدني التقليدي.
- تم إستعمال مواد البولي أرميد كمادة عزل للملفات المعروف عنها انها مقاومة للتمزق و مقاومة لدرجة الحرارة.
- تم تصميم هذا المحول لتحمل التحميل الزائد بشكل مؤقت
- و أيضا لزيادة العمر الافتراضي للمحول عند وضع التشغيل الطبيعي.
- بعض مكونات مواد العزل ستظل تتكون من مواد تقليدية مثل أفرخ البرسبان و خشب الكونتر.
- إن التصميم المقترح يتكون من نظام عزل شبه هجين (**Semi-Hybrid**) مما يتيح أن تتحمل البقع الساخنة درجات حرارة عالية

17



18



### 3. إمكانية زيادة التحميل الزائد

- بصف الفصل التالي: إمكانية التحميل الزائد لمحور قوي قدرته 70 MVA , ليصل قدرته إلى 100 MVA
- أولاً: قام العميل بعمل الحسابات الهيدرو-حرارية التي تؤكد إمكانية تنفيذ المشروع.
- ثانياً: قامت الشركة المصنعة بالتاكيد علي قدرة المحول علي تحمل الفيض المغناطيسي الزائد عن طريق الحسابات الإلكترومغناطيسية.

19

### 2.3 التصميم الكهربائي:

- إن التقدير الأولي للمحول أوضح انه ممكن زيادة قدرة المحول إلي **100MVA** عن طريق تبريد محسن (معزز). حتي يكون هناك معامل أمان اعلي في التصميم الحراري للمحول.
  - للتذكير, فإنه يوجد العديد من خصائص التصميم لابد من مراجعتها لتتم عملية زيادة قدرة المحول:-
1. إجمالي مفاقد المحول.
  2. سلوك تسريب الفيض المغناطيسي.
  3. سرعة الزيت في الملفات ( لتجنب الكهرباء الإستاتيكية).
  4. هل جميع الملحقات قادرة على تحمل التيار الزائد (العوازل ، مغير الجهد ، إلخ) ؟

20

## 1.2.3 حساب المفاقد: لابد من حساب إجمالي المفاقد لتحديد قدرة التبريد المطلوب:

1. مفاقد اللا حمل No Load Losses تتكون في القلب الحديدي و لا تتاثر قيمتها بالحمل

و تنقسم إلى:

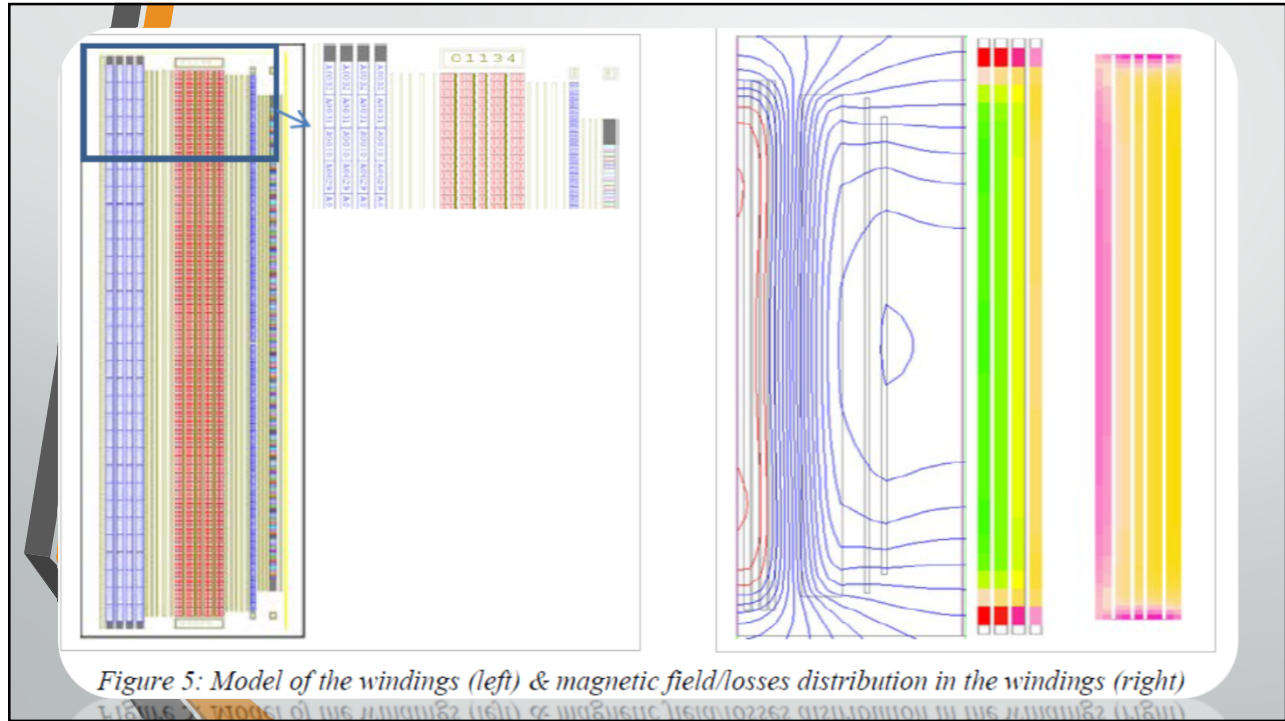
- Hysteresis Losses
- Eddy Current Losses in Core Lamination
- $I^2 \cdot R$  Losses due to no-load current in the primary and secondary windings

21

## 2. مفاقد الحمل (Load Losses) و تنقسم إلى:

- مفاقد نحاسية  $(Copper Losses) = I^2 \cdot R$
- مفاقد دوامية يمكن حسابها عن طريق FEM: Finite Element Method
- فإن المفاقد الدوامية سببها عن طريق المجال المغناطيسي و مساحة مقطع الاسلاك. كما موضح بالشكل 5
- إن المفاقد تزيد في الملفات في الأعلى و الأسفل نظرا لأن المجال القطري يمر في الملفات في هذه المناطق.

22



23

إن حسابات المفاقد للأحمال المختلفة للمحولات (70 MVA & 515 MVA) ملخصة في الجدول التالي:

100 MVA	70MVA	
32 KW	32 KW	مفاقد الحمل (No-Load Losses)
517.5 KW	253.7 KW	المفاقد النحاسية (Copper Losses)
24.8 KW	12.3 KW	المفاقد الدوامية (Eddy Losses)
25.2 KW	13 KW	المفاقد الشاردة (Stray Losses)
599.5 KW	311 KW	إجمالي المفاقد

24

### 2.2.3 تأثير تسريب الفيض المغناطيسي

- إن تلك المفاقد تحدث في الأجزاء المعدنية مثل هيكل التجميع ( Yoke Beams, Flitch beams) و تانك المحول.
- يجب التحكم في التسريب في الفيض المغناطيسي لمنع تسخين الاجزاء المعدنية.
- يمكن تحقيق ذلك عن طرق إستخدام شرائح نحاسية أو Flux Shunts
- إن محول القوي قدرة 70MVA ملحق به بارات ستانلس ( Flux Shunts) عندما يزيد التحميل علي المحول من 70MVA إلي 100MVA يزيد تسريب الفيض المغناطيسي
- و لذلك فإن كثافة الفيض تزيد في ال Flux Shunts في جسم تنك المحول تقريبا من ( 0.55 T إلي 0.79T )
- لو أن كثافة الفيض المغناطيسي زادت, ستتسبب بارات الستانلس ( Flux Shunts) و بالتالي يتسرب المزيد من الفيض المغناطيسي لجسم تانك المحول.
- إن الحسابات أظهرت أن كثافة الفيض المغناطيسي للبارات أقل من معيار التصميم و أن أداء المحول لن يتأثر

25

### 3.2.3 التصميم الحراري: زيادة معامل الأمان تم عمل الآتي.:

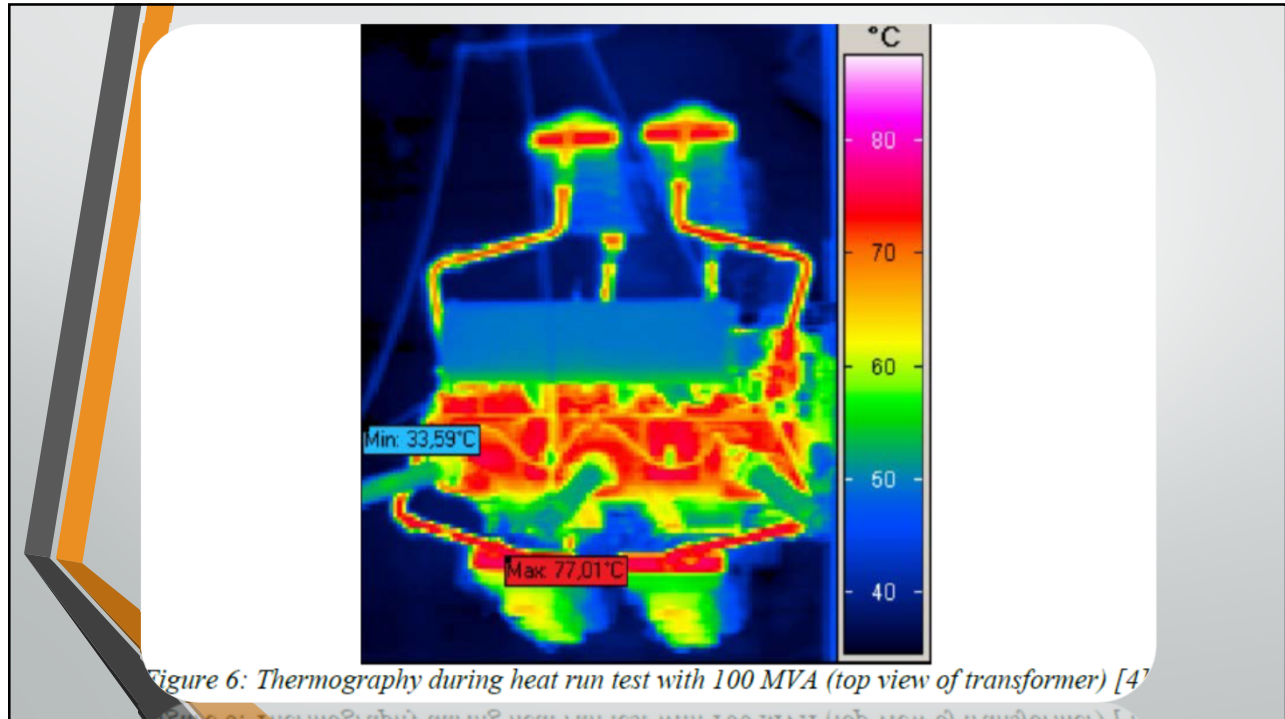
- تم زيادة قدرة التبريد من 2\*186 KW إلى 2\*300 KW
- تم زيادة سرعة سريان الزيت من 2\*100 m<sup>3</sup>/h إلى 2\*150 m<sup>3</sup>/h
- تم عزل الملفات من مادة ال TUP

26

### 3.3 الإختبارات

- تم إجراء إختبار مدي قدرة المحول علي تحمل التحميل الزائد خلال إختبار الحرارة في معمل الإختبار
- تم تعديل سرعة الزيت لتصل إلي  $300\text{m}^3/\text{h}$ . و تم زيادة الحمل إلي 100 MVA
- يمكن حساب أعلي درجة للزيت و أعلي درجة حرارة للبقعة الساخنة.
- تم تركيب حساسات درجة حرارة للملفات لمعرفة درجة حرارة البقعة الساخنة بشكل اوضح.
- إن الصورة الحرارية (شكل رقم 6) يوضح عدم وجود أي بقع ساخنة علي جسم تانك المحول

27



28



## 4. تحسين التبريد

مميزات التبريد التدريجي المبتكر بدلا من مجرد تقسيم المراوح علي مجموعتين:

- تحسين التحكم في قدرة التبريد عن طريق إستخدام مراوح سرعتها متغيرة
- عمر إفتراضي أعلى للمراوح (Brushless DC)
- إستهلاك تيار أقل في بداية التشغيل
- زيادة كفاءة الموتور إلي 90%
- تقليل كبير في إستهلاك الكهرباء و بالتالي يمكن تقليل تكلفة التشغيل

29

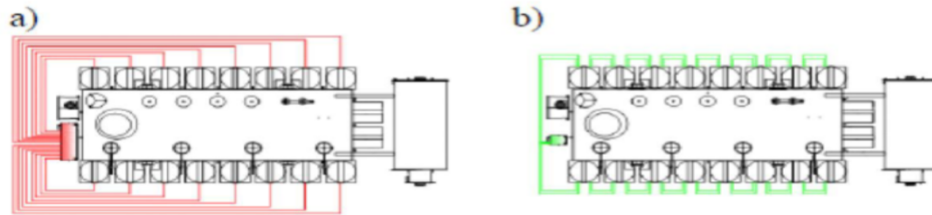


Figure 7: Schematic top view of a transformer with conventional two fans group (a) and innovative approach to control the fans (b)



Figure 8: First 40/50 MVA, ONAN/ONAF grid coupling transformer with new speed-controllable fans with EC technology manufactured in Germany in 2009

30

## مقارنة بين أداء المراوح القياسية و المراوح الحديثة:

- تم مقارنة أداء المراوح القياسية بأداء المراوح الحديثة التي يتم التحكم فيها إلكترونياً (Electronically Commuted-EC)
- عند استخدام المراوح الحديثة فإن الضوضاء تقل بنسبة 20dbA
- يمكن زيادة التحميل و تقليل المفاويع باستخدام تكنولوجيا ال EC للمراوح الحديثة
- بالإضافة إلى ذلك فإنه يوجد **فكرة جديدة و هي التحكم في سرعة** الطلمبات للمحولات ال (Oil Forced) أو المحولات ال (Oil Directed).
- و بالتالي فإن كفاءة الطلمبات و المحول ككل يمكن التحكم فيها و زيادتها أيضاً.
- يتم استخدام طلمبات ريشية لتبريد المبردات.
- إن تلك الطلمبات يمكن ان تولد سرعة سريان عالية و لكن تتحمل ضغط محدود
- الميزة هنا أن سريان الزيت ممكن حتي بعد إطفاء الطلمبات نظرا لأن الطلمبات لديها إنخفاض محدود في الضغط (Low Pressure Drop).
- معني ذلك أنه يمكن التبريد عن طريق الحمل (Natural Convection) خلال الملفات و معدات التبريد.

31

- في حالة التبريد Oil-to-air أو Oil-to-Water يتم استخدام طلمبات من نوع Inline Pumps عادة
- تلك الطلمبات يمكن ان تتحمل مستوي ضغط عالي مقارنة بالطلمبات الريشية.
- إن ذلك الضغط ضروري لدفع الزيت خلال المبردات و الملفات.
- يمكن إستعمال طلمبات يمكن التحكم في سرعتها لتحسين عمل المحول
- بالتالي إن الطاقة المطلوبة لتشغيل تلك الطلمبات (المفاويع) يمكن تقليلها (تحسينها).
- يمكن **الجمع بين المراوح و الطلمبات** التي يمكن التحكم في سرعاتهم للتحكم في درجات حرارة الزيت حيث يمكن إستعمالهم علي نطاق واسع.
- و بالتالي تقل الإنبعاثات الناتجة من المحول و تقل عملية التقادم بناء علي ذلك

32

## 5. الخلاصة (Conclusion)

- قدم هذا البحث العديد من الطرق لتحسين اداء المحول بفضل مواد العزل التي تتحمل درجة الحرارة العالية ذو التصنيف الحراري الأعلى TUP أو التصميم المحسن للمحول.
- فإن الجمع بين ورق العزل المعالج حراريا ذو التصنيف الحراري الأعلى TUP مع افرخ البرسبان pressboard وزيت الاستر الطبيعي بمثابة حل وسط جيد بين مؤشرات الأداء والتكاليف.
- قدرة التحميل الزائد علي المحول يمكن ان تزيد بفضل الدراسة المفصلة وأيضًا من خلال التعاون الوثيق بين المستخدم والشركة المصنعة.
- أخيرًا : يمكن تقليل المفاوئد نتيجة التحكم في مراوح التبريد عن طريق إستخدام تكنولوجيا التحكم الإلكتروني

33

شكرا للإستماع

34