

## Design of Insulated Cables to Reduce Gassing Issues in Power Transformers تصميم الكابلات المعزولة لتقليل مشاكل الغازات في محولات القوي

D. VIR  
SPX Transformer Solutions, Inc.  
USA

T.M. GOLNER  
SPX Transformer Solutions, Inc.  
USA

### Translators

Eng. Ahmed Mohamed Abd EL Hafez (ELMACO)  
Eng. Omnia Mahmoud Fahmy (ELMACO)

### Reviewers

Eng. ESMAT Abd EL RAHMAN(ELMACO)  
Pro. Dr. Hany Mohamed Hasaneen

1

### SUMMARY

### الملخص

- عادة ما يستخدم تحليل الغاز الذائب Dissolved Gas Analysis-DGA أثناء اختبارات قبول المصنع
- للمساعدة في تحديد ما إذا كانت هناك أية مشكلات حرارية في محول القوي.
- في حين أن الأسلاك المعزولة داخل الملفات قد تكون مساهما رئيسيا في الغازات المولدة
- هناك عناصر أخرى من محولات القوي مثل الكابلات المعزولة التي أصبحت أكثر أهمية في توليد الغازات - وخاصة أول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون.
- يمكن أن تكون المشكلة أكثر خطورة على محولات القوي المصنعة لعملاء أمريكا الشمالية حيث من الشائع توصيل مغير جهد LTC على جانب جهد الضغط المنخفض للمحول.
- ينتج عن ذلك استخدام كابلات مساحة مقطعها أكبر بأطوال طويلة نسبياً تعمل أفقياً بطول المحول.
- يتم استخدام كابلات متعددة بشكل متوازي من أجل تحميل التيار على مغير الجهد LTC بسعة تيار كبيرة

2

1

- وقد لوحظ أنه عندما تتجاوز الكابلات حوالي 85 درجة مئوية ، فإن الغازات المتولدة من الكابلات تصبح جزءًا كبيرًا من إجمالي الغاز المتولد.
- قد يتم تجاوز درجة الحرارة هذه خلال اختبارات ارتفاع درجة الحرارة الزائد.
- **Overload temperature rise tests**
- حجم الكابلات (قطر النحاس بالإضافة إلى العزل) يجعل من الصعب ثني الكابلات (الشعيرات-النهايات) كما هو مطلوب
- ويتطلب أيضًا بنية دعم وتثبيت كبيرة للتعامل مع وزن الكابلات
- **لذا فإن أحد الحلول المقترحة لهذه المشكلة** هو استخدام عزل الكابلات الذي يستخدم مواد تقلل من الغازات المتولدة و تتحمل درجات الحرارة العالية ( مواد ذات تصنيف حراري أعلي).
- قد يكون العزل مصنوعًا من نوع واحد من المواد أو قد يكون بمزيج من المواد التي قد تؤدي إلى تقليل الغازات كما هو مطبق.
- مع الاختيار المناسب للمواد والتصميم ، سيكون من الممكن تشغيل الكابلات عند درجات حرارة أعلى من المعتاد مع الحفاظ على درجات حرارة الملف وفقًا للمواصفات القياسية دون إنتاج الغازات المفرط

3

- عادة ما يكون العزل المستخدم للكابلات هو ورق العزل السليلوزي ذو التصنيف الحراري الأعلى.
- في حين أنه يمكن استخدام هذه المواد بأمان عند درجة حرارة تشغيل تبلغ 105 درجة مئوية
- كما ذكر سابقًا، فإن تلك المادة ستُخفي توليد الغازات للمحول بأكمله عندما تكون درجة حرارة تشغيل الكابلات أعلى من 85 درجة مئوية.
- **سيعرض ذلك البحث** ، قمنا بمراجعة أنماط الغازات للمواد الحالية وتقييم أداء أنواع أخرى من المواد العازلة وتصميم عزل الكابلات.
- من المحتمل أن يكون أحد الحلول لهذه المشكلة هو استخدام مواد عزل تتحمل درجات الحرارة العالية
- يتولد منها كمية غاز محدودة، و تكون متوفرة تجاريا.
- هذا من شأنه أن يتيح المجال لمرور تيار أعلى في الكابلات ، مما يقلل من حجم النحاس أو عدد الكابلات اللازمة في تطبيق معين.

4

- **يستعرض هذه البحث** العديد من المواد التي تقلل من توليد الغازات بالإضافة إلى التصميمات التي تستخدم المواد التي تقلل من توليد الغازات أيضا مع مواد العزل التقليدية التي من الممكن أن توفر حل إقتصاديا
- و ذلك من أجل الحد من مشاكل الغازات (الغير مرغوب فيها) و التحكم في التكلفة المتعلقة بالكابلات.
- لقد تم تصنيع العديد من المواد و مواد العزل. و تم اختبار كل من مواد العزل منفصلة و تم اختبار أيضا الكابل بالكامل (شامل العزل الخاص به).
- تضمنت إختبارات مواد العزل تقييم تطور توليد الغاز (الغير مرغوب فيه) مع درجة الحرارة.
- في المقابل فإن الإختبارات للكابل بالكامل تضمنت إختبار إرتفاع درجة الحرارة Temp. Rise و اداء العزل Dielectric behavior و تضمنت أيضا أداء الكابل Processing Parameters و توزيع درجات حرارة العزل Temp. profile of insulation

5

- **و بناءا علي تلك النتائج** فإنه من الممكن تحديد مواد العزل المناسبة و التصميم المناسب لهيكل العزل للحفاظ علي متانة الكابل مع تقليل قابليته لإخفاء الغازات في القلب الحديد و الملفات.
- و تلك التحسينات سينتج عنها كابلات أسهل في التجميع و أسهل في دعمها و تثبيتها، مع المحافظة علي اداء نظام الكابلات عموما.

6

## 1. Introduction

## 1. المقدمة

- إن الشبكات الكهربائية (الخدمات) و العملاء الآخرين الذين يشترطون محولات القوي يستخدمون اختبار تحليل الغازات الذائبة **DGA** (Dissolved Gas Analysis) لمراقبة أداء المحول خلال مدة تشغيله
- و خلال ذلك يأملون بتحديد إذا كان هناك أي مشاكل قبل وصول المحول لحالة حرجة.
- إن اختبار تحليل الغازات الذائبة (**DGA**) يتم بشكل دوري خلال اختبارات قبول المحول داخل المصنع
- يمكن ذلك خلال اختبار العزل (**Dielectric test**) وأيضاً خلال اختبار إرتفاع درجة الحرارة (**Temp. Rise Test**).
- من الشائع أن يطلب العملاء اختبارات التشغيل الزائد للحرارة **overload heat run tests** لتحديد قدرة المحول علي التشغيل بما يتجاوز قيم لوحة بيان المحول في ظروف التشغيل المعتادة لفترات زمنية قصيرة.

7

- في حين أن خصائص سريان وتدفق الزيت والتبريد للمحول (وتحديداً مجموعة القلب الحديدي والملف) محددة جيداً من قبل مهندس تصميم المحولات
- في حين أن درجات حرارة نظام الكابلات غير محكم كما هو مطلوب .
- و تكون المشكلة أكثر وضوحاً علي الكابلات المطلوبة لتحمل التيارات العالية في جميع الأوقات ، والتيارات تكون عالية جداً أثناء التحميل الزائد.
- وتظهر المشكلة أكثر وضوحاً في سوق أمريكا الشمالية حيث يوجد مغير جهد (**Load tap changer-LTC**) أو (**On-load tap changer-ONTC**) في جانب الضغط المنخفض من المحول.
- في الحقيقة أن جانب الضغط المنخفض للمحول يجب أن يستخدم كابلات أكبر للتيار
- وغالباً ما يعمل بطول المحول (أفقياً وليس رأسياً) يعني أن إجمالي طول الكابلات المستخدمة **طويلة جداً** لهذا الجزء من التطبيق في محول القوي.
- غالباً ما يكون من الضروري استخدام كابلات متعددة بشكل متوازٍ مما يجعل المشكلة أكثر وضوحاً (انظر الشكل كل 1 أدناه).

8

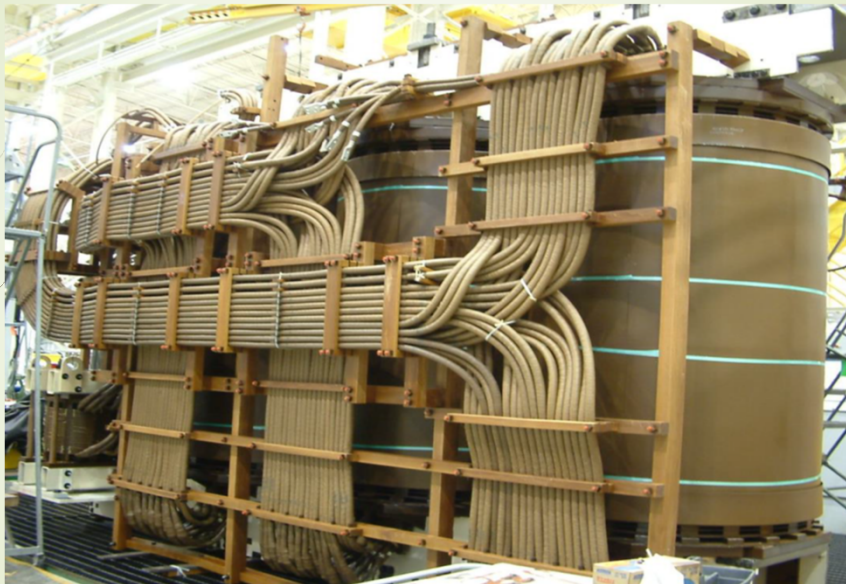


Figure 1 Typical Low Voltage Cabling on LTC Unit

9

- عندما يحتاج أحد العملاء إختبار درجة الحرارة للتحميل الزائد **overload heat run** يتم تشغيله في وضع غيرالمتعاد (Neutral), وستحمل الكابلات بتيار الحمل الزائد إلى LTC .
- في حين ان حجم العزل الموجود في الكابلات على الرغم من أنه أقل من العزل في الملفات يكون كبير
- ويمكن أن يساهم في تأثير توليد الغاز (ولا سيما أول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون) خلال اختبارات المصنع
- يمكن أن تكون المشكلة أكثر حدة على الوحدات ذات مغير الجهد ذي الجهد العالي (69 كيلو فولت أو أكبر).
- تتطلب متطلبات الجهد العالي سمك عزل أكبر على الكابل وهذا بدوره يؤدي إلى سخونة الكابل عند التشغيل.
- يتمثل الحل في استخدام كابل به مقطع نحاس أكبر a greater copper cross section ، مما سيزيد من تكلفة الكابل ويزيد من صعوبة إخراج الاطراف (due to larger crimp terminals)
- و يترتب علي ذلك أيضا صعوبة في تحديد مسار الكابلات ( حيث أن حجم الكابلات أكبر فيصبح ثني الكابلات أصعب بسبب مساحة مقطع النحاس و زيادة سمك العزل المستخدم).
- أشار الاختبار إلى أن الحل الصحيح لكلا هاتين المشكلتين هو تغيير نظام العزل على الكابلات حيث يمكن أن يؤدي إستخدام مادة تتحمل درجات الحرارة العالية إلى تقليل الغازات دون التأثير على حياة المحول
- وتعتمد إحدى المواد المتاحة في السوق تجارياً تعتمد على **ألياف الأراميد** وهي قادرة على أن تتحمل درجات حرارة تزيد عن 150 درجة مئوية بدون وجود غازات ملحوظة وبشكل مؤثر وبدون تقادم في العمر الافتراضي للمحول ويمكن قياسها **ذو كثافة منخفضة للغاية ولا تتدمر إلا عند درجات تصل 500 درجة** و بالتالي فإن المواد التي يمكن إستخدامها كعزل للكابلات تتكون من ورق الأراميد منخفض ومتوسط الكثافة

5

10

تم تقييم عدة عينات من عزل الكابلات كالتالي:

1. ورق السليلوزي التقليدي المعالج حراريا (TUP Thermally Upgraded Cellulose)
2. ورق الأراميد منخفض الكثافة
3. خليط ورق الأراميد منخفض الكثافة مع ورق ال TUP
4. خليط من ورق الأراميد مع ورق السليلوز

حيث أنه تم تقييم تلك المواد في دراسة لتحديد كل من:

1. العزل
2. ارتفاع درجات الحرارة
3. خصائص الغازات المتكونة

11

و تشير نتائج الإختبار إلي أن تصميم عزل الكابلات يمكن أن يقلل من الغازات الغير مرغوب فيها

و في المقابل يحسن طريقة توصيل و تركيب الكابلات دون تغيير تكلفة نظام الكابلات بشكل كبير.

يعتبر تكلفة مادة الأراميد أعلى بكثير من ورق ال TUP, وبالتالي يُستبعد إستبدال ورق الأراميد بدلا من ورق ال TUP,

و لكن في حالة إختيار سمك عزل أقل (2-3 مم) يترتب علي ذلك تخفيض محتمل في حجم النحاس الذي يمكن ان يعوض التكلفة العالية لمادة العزل (الاراميد).

إن جميع العينات مساحة مقطعها بطول 300 متر مكعب (152 مم 2) مع عزل من 2 إلى 5 مم (انظر الشكل 2 أدناه)

12



Figure 2 Cross-section of Cable Under Evaluation

13

### طريقة التقسيم

- كان التقييم الأولي في الدراسة هو تحديد درجة الحرارة التي تبدأ عندها أنواع العزل المختلفة في المساهمة بكمية كبيرة من الغازات المثيرة للقلق
- وقد تم ذلك عن طريق أخذ عينات من أنظمة العزل قيد الاختبار ، ومعالجتها على نحو مماثل للطرق المستخدمة في تصنيع المحول
- ووضعهم في أوعية مغلقة تم ملأها مسبقا بالنيتروجين ثم تم ملأها بالزيت، ثم تم وضعها في غرفة تجفيف لتتم عملية التقادم في درجات حرارة مختلفة لمدة 48 ساعة مع عينة من الزيت، ثم تم سحبها وإجراء اختبار تحليل الغازات الذائبة **DGA**.
- بمجرد تحديد درجات الحرارة التي بدأ عندها تكون الغازات، تم تصميم الكابلات بناء على كل ما سبق
- و تم عمل إختبار إرتفاع درجات الحرارة للكابلات و تم معرفة درجات الحرارة للكابلات داخل الكابلات
- تم عمل ذلك عن طريق توصيل التيار الكهربى بقيم مختلفة للكابلات الملامسة لبعضها و تم مراقبة:
  - درجة حرارة النحاس
  - 1. حرارة الزيت
  - 2. حرارة سطح الكابل
  - 3. درجة الحرارة ما بين الكابلات المتلاصقين
  - 4. درجة الحرارة بين منتصف الكابل لسطح الكابل

14

- تم مراقبة درجات الحرارة عن طريق Thermocouples
- وتم مراقبة التيار عن طريق استخدام Clamp on CT's
- **بالنسبة لخواص العزل تم إختبار:**
- 1. إختبار إنبهار العزل كابل مقابل كابل (Cable to Cable)
- 2. إختبار إنبهار العزل كابل مقابل الأرضي (Cable to ground)
- تم تحديد خواص العزل عن طريق توجيه موجات نبضية (Impulsive waves) حيث يتم إطلاق التيار علي كابل بحيث يكون الكابل الاخر أرضي (Grounded) وذلك في حالة كابل مقابل كابل (Cable to Cable).
- أو يتم ثني الكابل ( لعمل إجهاد ميكانيكي علي العزل) و إطلاق التيار عليه مباشرة مقابل سطح أرضي وذلك في الحالة الثانية كابل مقابل الأرضي (Cable to Ground).
- و قد تم إختبار العينات في البداية عند قيمة 70% من جهد إنبهار العزل المتوقع, و بعد 3 محاولات ناجحة تم زيادة قيمة الجهد بقيمة 25 KV.

15

- **نتائج الاختبار الحراري**
- كان الإختبار الأولي لتحديد المعدل النسبي للغازات المتولدة و تحديد إذا كان معدل الغازات المتولدة يزيد بشكل سريع عند درجة حرارة معينة.
- كما ذكر سابقًا ، كانت الطريقة المستخدمة عن طريق وضع عينات الكابلات ب مواد العزل المختلفة داخل سلسلة من أوعية للغازات مغلقة مغمورة بالزيت المعدني التقليدي بعناية وفقًا لمعايير IEEE C57.106 per
- كانت نسبة المادة قيد الاختبار تقريبًا ضعف النسبة الطبيعية
- وقد تم ذلك عن قصد للحصول على تأثير الغاز أكثر وضوحا.
- تم اختبار عينة واحدة أيضًا دون استخدام أي مواد عازلة من أجل تحديد خصائص الغاز الأساسية.
- أحتوي وعاء الإختبار علي 2 لتر من الزيت المعدني للمحولات و 12.5% فراغ للغازات.
- تم رفع درجات الحرارة علي العينات تدريجيا من (50,75,85,95,105,115,125,130,140,150oC) بعد 48 ساعة
- وتم سحب عينة (50 mlتقريبًا) عن طريق حقنة وإرسالها إلى مختبر خارجي للتقييم.
- تم رسم البيانات الخاصة بكمية ثاني أكسيد الكربون واستخدامها لتحديد بداية عملية التسخين بالغاز للمواد العازلة المختلفة.

16



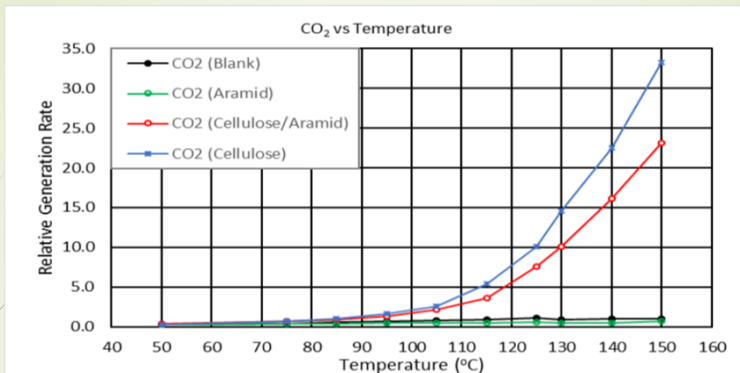


Figure 3 Relative CO2 Generation vs Temperature

- أظهرت المعلومات أن كل من TUP وورق السليلوز / الأراميد المخلوط يبدأ في إظهار مستويات أعلى من الغازات تبدأ حوالي عند درجة حرارة **85°C** درجة مئوية
- حيث بدأ يتزايد ويتسارع معدل الغازات مع زيادة درجة الحرارة (انظر الشكل 3 أدناه).
- تشير المعلومات إلي ان العزل المكون من **ورق الأراميد منخفض الكثافة لا يتولد** منه نسبة غاز (**CO2**) ثاني أكسيد الكربون **أعلى من معدل توليد العينة الفارغة** (التي تم سحبها من العينة التي بدون ورق عازل).

17

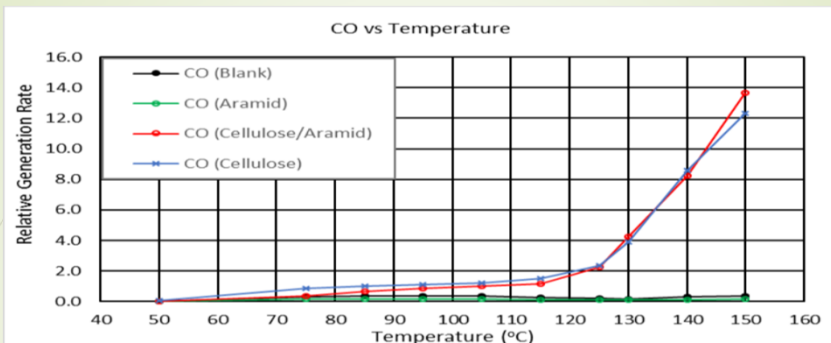


Figure 4 Relative CO Generation vs Temperature

- تم تقييم بيانات أول أكسيد الكربون بالمثل (**CO**) وتم وضع المعلومات و القيم في رسم بياني (انظر الشكل رقم 4)
- إن توليد غاز أول أكسيد الكربون (**CO**) في العينة الخاصة بورق العزل المعالج حرارياً (**TUP**) و العينة الأخرى الخاصة **بالخليط المكون من ورق العزل السليلوز و ورق الأراميد** يعتبر مستقرًا إلى حد كبير حتى حوالي 115 درجة مئوية
- لكن معدل توليد غاز أول أكسيد الكربون **تسارع فوق درجة الحرارة هذه** (يزيد بشكل كبير).
- **مرة أخرى**، فإن **ورق الأراميد منخفض الكثافة لا يتولد** منه نسبة غاز أول أكسيد الكربون أعلى منها شوهد في **العينة الفارغة** (العينة التي بدون ورق عازل).
- تم استخدام هذه المعلومات لتحديد الظروف الضرورية لتقليل انبعاثات الغاز في عزل الكابلات

18

- أشارت نتائج إختبار تحليل الغازات الذائبة (DGA) إلى أن أفضل الحلول لنظام عزل جديد **هو أن يتكون من جزئين:**
- الجزء الأول **ورق الأراميد منخفض الكثافة** أو مادة مشابهة لها لتتحمل درجات الحرارة المرتفعة و تكون ملاصقة لجسم الكابل نفسه
- و الجزء الثاني (الخارجي) يتكون من **ورق السليلوز المعالج حراريا (TUP)** في الجزء الأقل حرارة من عزل الكابل (بعيدا عن جسم الكابل).
- تشتمل العينات التي تم تصنيعها للاختبار على التركيبات العازلة التالية:
- 1. ورق العزل المعالج حراريا (TUP) سمك 5 مم
- 2. ورق الأراميد منخفض الكثافة سمك 2 مم
- 3. ورق الأراميد منخفض الكثافة سمك 3 مم
- 4. طبقة من ورق الأراميد منخفض الكثافة سمك 2 مم و طبقة من ورق العزل المعالج حراريا (TUP) سمك 2 مم
- 5. طبقة من ورق الأراميد منخفض الكثافة سمك 1.5 مم و طبقة من **خليط ورق السليلوز مع الأراميد** سمك 2 مم

19

- تم إجراء الإختبارات التالية لتحديد مدى **إرتفاع درجة حرارة النحاس داخل الكابل** و أيضا لتحديد مدى إرتفاع درجة الحرارة في العزل. إن درجات الحرارة المهمة هي كالتالي و موضحة في الشكل رقم 5 و 6 أسفل:
- 1. درجة حرارة في المساحة بين النحاس و أول طبقة في العزل (على سطح النحاس)
- 2. درجة الحرارة في المساحة بين **طبقتين العزل** المستخدم لعزل النحاس في الكابل (عند نقطة الوسط للعزل)

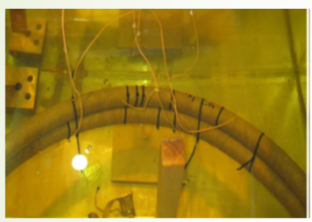


Figure 5 Samples on Temperature Rise

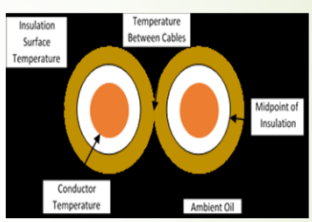


Figure 6 Showing Thermocouple Locations

- أستخدم إختبار الحرارة عدد من محولات التيار التي تم تغذيتها لتوليد التيار في عينات الإختبار.
- إن عينات الإختبار كانت عبارة عن عدد 2 كابل تم تربيطهم علي التوازي.
- أقصى تيار تم مروره في الكابلات كان **1600** أمبير بسبب معاوقة كابلات الإختبار و معاوقة محولات التيار.
- التيارات التي تم مرورها في الإختبار كانت 400,600,800,1200,1600 amps.

20

أشارت نتائج ارتفاع درجات الحرارة أن **أقصى ارتفاع** بدرجات الحرارة في العينة (النحاس) الخاصة ب**ورق الأراميد منخفض الكثافة سمك 3 مم** (أنظر الشكل رقم 7).

إن ذلك متوقع حيث أن التوصيل الحراري **لمادة الأراميد منخفض الكثافة يعتبر أقل من مادة السليلوز**.

يلاحظ أن زوج الكابلات المعزول بمادة **السليلوز المعالج حرارياً (TUP)** سمك 5 مم ارتفع درجة حرارة الكابل **20°C** عند **1200 amps**

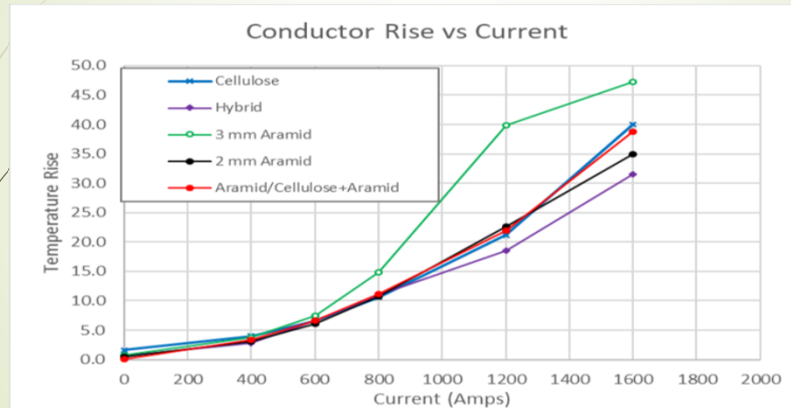


Figure 7 Temperature Rise of Conductor vs Current

21

بالتالي فإن درجة حرارة ورق العزل **المعالج حرارياً (TUP)** في العينة التي يتكون فيها العزل بالكامل من تلك المادة سمك 5 مم **هي نفس درجة حرارة النحاس**.

أما في حالة نظام العزل **المكون من طبقتين**, فإن درجة الحرارة المهمة هي في **النقطة الواقعة بين الطبقتين** (بين طبقة ورق الأراميد منخفض الكثافة و طبقة الأقل منها- أنظر الشكل رقم 8).

أما في حالة العزل المكون من طبقتين (ورق الأراميد منخفض الكثافة سمك 2مم + الورق المعالج حرارياً TUP سمك 2 مم) فإن طبقة الورق المعالج حرارياً TUP لا تصل حرارتها إلى **20°C** إلا عند **1900 amps** تقريبا لزوج الكابلات.

إن ذلك يشير إلى أن العزل المتكون من طبقتين **ينتج عنه كمية غاز أقل من العزل** المتكون من الطبقة التقليدية لزوج الكابلات عند 1200 amps.

و يشير أيضا إلى أنه يمكن تغذية الكابل المعزول **بتلك الطبقتين** من العزل المذكور سابقا بتيار أشد بقيمة 50% عن التصميم التقليدي للكابل (إى تحميل تيار أعلى بنسبة 50% مقارنةً بالتصميم التقليدي للكابلات).

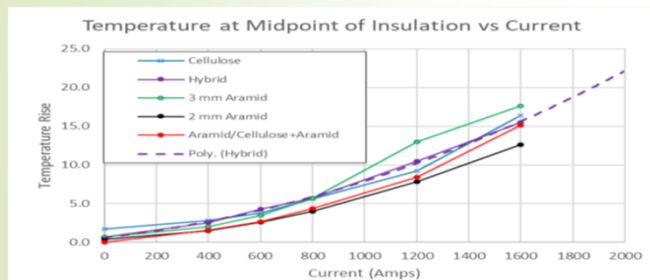


Figure 8 Temperature Rise of Insulation at Midpoint vs Current

أما في حالة الكابل المعزول ب**ورق الأراميد منخفض**

فإنه يمكن **زيادة التيار بنسبة 200%** عن التيار المار

في الكابل المعزول **بالعزل التقليدي TUP**.

و ذلك يعتمد إلى حد كبير إلى القدرة علي خفض درجة حرارة

و درجات حرارة مواد العزل للاجزاء الأخرى

مثل (عزل أسلاك المفاتيح, التوصيلات التي يتم ربطها بالإكسسورات)

22

11

## نتائج اختبار العزل الكهربائي

- وكان المجال الأخير للقلق هو قدرة أو صمود المواد المختلفة المستخدمة لعزل الكابلات علي تحمل العزل الكهربائي.
- إن إنهيار العزل المتوقع للكابلات هو إنهيار بسبب الظروف الفجائية impulse conditions إن الإنهيار يمكن أن يكون في حالة كابل مقابل كابل **cable to cable** أو حالة الكابل مقابل الأرضي **Cable to ground**
- و قد تم وضع الكابلات تحت ظروف التشغيل القياسية (التقليدية) أثناء تصنيع المحول ( التسخين و التجفيف و تم غمرهم بالغاز).
- و قد تم ربط بعض الكابلات سويا (انظر الشكل 9 أدناه) والثاني تم تأريضه impulse signal وتم تغذية كابل واحد بإشارة فجائية

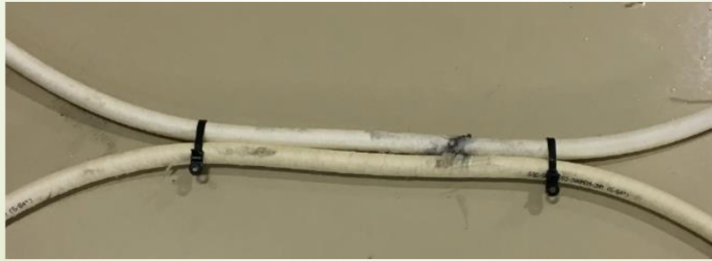


Figure 9 Sample used for Cable to Cable Tests

23

- تم تغذية الكابل بشحنة فجائية تقريبا 1.2 negative polarity 50  $\mu$ Sec wave, إن قوة الشحنة كانت حوالي 70 % من القيمة المتوقع أن يحدث عندها إنهيار للعزل
- و تم زيادة قيمة الفولت 25KV بمجرد حدوث عدد ثلاث شحنات ناجحة.
- أشارت النتائج إلى أن الكابلات المعزولة بورق أراميد منخفضة الكثافة بنسبة 100% أو معزولة بطبقتين من العزل المزدوج **تفوقت بكثير من الكابلات** المعزولة بمادة السليلوز المعالج حراريا (انظر الشكل 10).

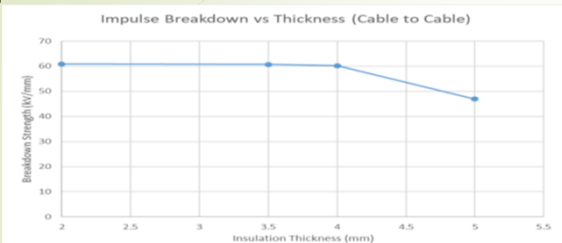


Figure 10 Cable to Cable Breakdown Voltage (kV/mm)

- و كانت العينات كالتالي:
- 1. العينة الأولى: 100% ورق الأراميد منخفضة الكثافة سمك 2 mm
- 2. العينة الثانية: عبارة عن طبقتين: الطبقة الداخلية هي ورق الأراميد منخفضة الكثافة, الطبقة الخارجية هي خليط من ورق السليلوز مع ورق الأراميد. سمك العزل بالكامل 3.5 mm
- 3. العينة الثالثة: عبارة عن طبقتين: الطبقة الداخلية هي ورق الأراميد منخفضة الكثافة, الطبقة الخارجية هي ورق السليلوز المعالج حراريا. TUP. سمك العزل بالكامل 4 mm
- 4. العينة الرابعة: 100% ورق السليلوز المعالج حراريا. TUP. سمك العزل 5 mm

24

12

- أما بالنسبة للجزء الثاني من الإختبار (كابل مقابل الأرضي **Cable to Ground** فإن الكابلات موضع الإختبار تم **ثنيها علي أقل نصف قطر ثني** يمكن و تم وضعها مقابل سطح معدني مسطح **Ground Plane** (انظر الشكل 11 أدناه)

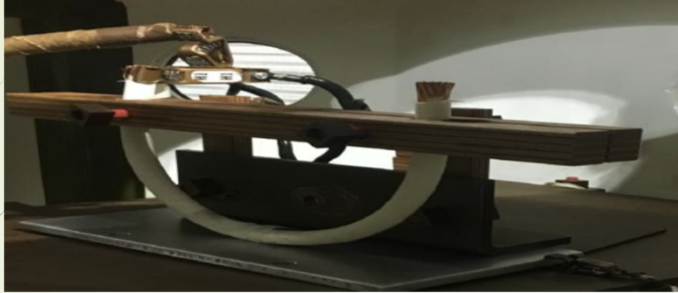


Figure 11 Test Fixture for Cable to Ground (Bent)

- تم عمل الإختبار بنفس الأسلوب مثل الطريقة السابقة كابل مقابل كابل **Cable to Cable**
- وكانت النتيجة ان العينة المعزولة **فقط بورق الأراميد** أو معزولة **بطبقتين واحدة** منهم **هي الأراميد**
- **تفوقت مرة أخرى** على الكابل العادي **المعزول بالسليولوز TUP** ( انظر الشكل 12 أدناه).
- **لاحظ أن** قيم انهيار العزل الكهربائي للكابل إلى الأرض **the cable to ground** كانت **أقل من** كابل إلى كابل **cable to cable** بسبب تعرض الكابل **لإجهادات ميكانيكية** والحركة والإزاحة المحتملة نتيجة عملية الثني..

25

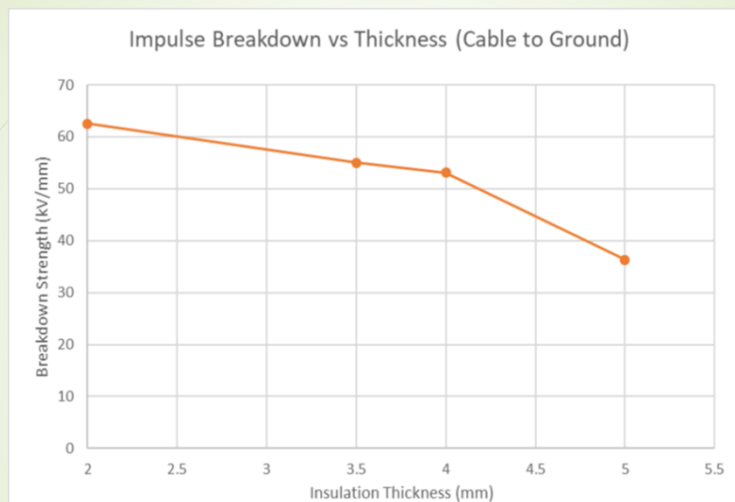


Figure 12 Cable to Ground Breakdown (kV/mm)

26

## 5. Conclusion

## 5. الخلاصة

- لقد أثبت الاختبار الذي تم تلخيصه في هذا البحث:
- أنه من الممكن تصميم نظام عزل للكابلات من شأنه أن يقلل من تأثير الغازات الخارجية الذي قد ينتج عن أنظمة عزل الكابلات التقليدية.
- ومن العمل الذي تم إنجازه، يبدو أن نظام العزل المحسّن لتطبيق الجهد المنخفض سيكون:
- عبارة عن ورق عزل منخفض الأراميد و منخفض الكثافة بنسبة 100 % والذي يسمح بمرور تيار نسبيته 200 % في الكابل أفضل من العزل التقليدي.
- بالنسبة لأنظمة الجهد العالي، يمكن استخدام النظام المزدوج باستخدام مزيج من طبقتين: الطبقة الداخلية ورق الأراميد منخفض الكثافة والطبقة الخارجية هي ورق السليلوز المعالج حرارياً TUP حيث إن ذلك العزل يمكن من تحمل تيار أشد من النظام التقليدي بنسبة 150 %.
- من الاختبار الذي أُجرى لهذا التقييم، يتضح أنه نظراً لاستخدام كمية كبيرة من ورق السليلوز المستخدمة في صناعة ورق العزل السليلوز/الأراميد الخليط، فإنه لا يؤثر بشكل كبير علي تقليل الغازات المتولدة من عزل الكابل ولا يحسن من خصائص إنبعاث الغازات وتأثيرها في عزل الكابلات.
- إن عزل الكابلات لا بد أن تُصمم لظروف تشغيل و درجات حرارة أعلي من درجة حرارة العزل المستخدم علي أسلاك الملفات Winding
- المزايا الأخرى لنظام العزل المقترح هي:
- 1. تقليل حجم النحاس في الكابل أو تقليل عدد الكابلات
- 2. زيادة مرونة الكابل بسبب تقليل السمك و تقليل حجم النحاس في الكابل
- 3. تقليل حجم الكابل او تقليل عدد الكابلات المستخدمة يترتب عليه تقليل تعقيد الهيكل المستخدم في تثبيت وتدعيم تلك الكابلات
- إن الأبحاث في المستقبل بالتأكيد ستتضمن تقييمات إضافية لمواد عزل أخرى تتحمل درجات الحرارة العالية و إمكانية دمجها مع المواد الحالية

27

28