

出國報告（出國類別：實習）

# 大容量變壓器之設計、製造、品管及試驗技術

服務機關：台灣電力公司營建處

姓名職稱：何曉碩 電機工程師

派赴國家：義大利、德國、荷蘭、法國

出國期間：102年10月17日至102年11月24日

報告日期：103年1月10日

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

大容量變壓器之設計、製造、品管及試驗技術

頁數 38 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/陳德隆/(02)23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

何曉碩/台灣電力公司/營建處電氣組/電機工程師/(02)23666965

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：102 年 10 月 17 日至 102 年 11 月 24 日

出國地區：義大利、德國、荷蘭、法國

報告日期：103 年 1 月 10 日

分類號/目

關鍵詞：變壓器、設計、製造、品管、試驗、耐短路電流試驗、中性點接地電阻、防爆設備

內容摘要：本次出國計畫任務為「大容量變壓器之設計、製造、品管及試驗技術」。本報告內容係將本次分別在義大利 DeMEPA 顧問公司、CESI 試

驗機構、TELEMA S.P.A.公司、德國 Alstom 公司、荷蘭 KEMA 試驗機構及法國 Sergi 公司，實習對於大容量變壓器設計、製造、品管、試驗技術及保護方式等方面做資料收集及記錄。

目前本公司新建之火力發電廠機組容量日益增大，其主變壓器之容量已達 1000MVA，對於廠商變壓器的承製能力越來越要求，而耐短路電流試驗為驗證變壓器廠商設計製造能力之一項重要試驗，本次出訪先於 DeMEPA 顧問公司參與變壓器相關課程，參訪 CESI 大電力試驗室，再於 KEMA 見證變壓器耐短路電流實驗；另外關於變壓器製造品管及變壓器相關設備介紹，也在此報告中作闡述；對於本次所收集的資料可作為未來工程設計及圖審之參考。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://open.nat.gov.tw/reportwork>)

## 大綱

壹、目的

貳、過程

參、大容量變壓器之設計、製造、品管及試驗等技術實習

一、耐短路電流試驗(Short Circuit Withstand Test)

- (一) 受測主變壓器規格
- (二) 試驗接線方式
- (三) IEEE/IEC 國際規範標準比較
- (四) 試驗電流計算
- (五) 試驗程序及結果

二、綠色變壓器開發

- (一) 密封式變壓器
- (二) 植物油的發展
- (三) 低噪音變壓器
- (四) 變壓器線上監測系統

三、變壓器防爆設備

- (一) 動機
- (二) 動作原理
- (三) 案例

四、變壓器中性點接地電阻設備

- (一) 中性點接地特性
- (二) 中性點接地方式
- (三) 接地電阻設計材質選用

肆、大容量變壓器實習課程內容專家審查會議辦理情形

伍、心得及建議

## 壹、目的

目前本公司新建之火力發電廠機組容量日益增大，其主變壓器之容量已達 1000MVA，由於國內廠商以往並無如此大之變壓器製造經驗，本公司亦無運轉經驗，對於廠商之承製能力及本公司之規劃設計及監造能力都是一項挑戰，因此確有必要學習國外之技術及經驗。藉由派員至國外參加變壓器之訓練課程，研習變壓器之設計、製造、品管及試驗技術，了解國外變壓器專家如何設計、製造、監測保護及操作運轉大型變壓器，如何規範及確認變壓器品質、評估使用狀況及年限、變壓器未來趨勢，與國外變壓器專家討論及交換應用上之經驗等相關問題，並參觀試驗機構實驗室、變壓器工廠及其附屬設備工廠，深入了解變壓器製程、試驗及保護方式。變壓器原屬國產化保護項目，國內變壓器廠商多與日本變壓器廠技術合作。今變壓器採購已開放予美國、歐盟、日本、瑞士、加拿大、挪威、冰島、香港、新加坡及以色列之產品及廠商，派員至歐盟國家變壓器製造廠家進一步了解及蒐集變壓器規劃、設計考量及運轉維護需求及變壓器線上監視系統及保護系統，使本公司技術規範順利與國際技術接軌。

## 貳、過程

本次出國行程如下

日期	工作內容
10/17-10/18	往程(台北－巴黎－米蘭)
10/19-10/22	DeMEPA 參訪、參與變壓器相關課程、經驗交流 於米蘭
10/23-10/25	CESI 參訪、變壓器相關試驗技術及品管研討、經驗交流 於米蘭
10/26-10/31	TELEMA S.P.A.參訪、變壓器中性點接地設備研討、經驗交流 於米蘭
11/1-11/8	Alstom 參訪、變壓器相關技術研討、經驗交流 於門興格拉德巴赫 (Mönchengladbach)
11/9-11/15	KEMA 參訪、參與變壓器短路試驗 於阿納姆(Arnhem)
11/16-11/22	Sergi 參訪、變壓器防爆設備研討、經驗交流 於巴黎
11/23-11/24	返程(巴黎－台北)

在 DeMAPA 顧問公司實習期間，由 Mr. Angelo Geroli 博士及 Mr. Ferruccio Giornelli 博士授課，課程內容包括高壓電力試驗室設備概要、變壓器試驗課程、變壓器品質管理探討，最後針對本次課程之問題互相討論。

在 CESI 試驗機構實習期間，由 Mr. Franco Pizzi 及 Mr. Giorgio Crippa 簡介電力試驗室設備、變壓器試驗及變壓器品質管理，並參觀 CESI 廠區不同電壓等級之電力試驗室，最後針對本次行程之問題互相討論。

在 TELEMA S.P.A.公司實習期間，先由 Mr. Flavio Ferrario 說明變壓器中性點接地電組設備設計方式，再由 Mr. Danilo Bacchiega 簡介 TELEMA S.P.A.公司及該公司產品總類，並對該公司銷售實績概況做一說明，之後前往工廠參觀變壓器中性點接地電組設備生產

製造流程，最後針對本次行程之問題互相討論。

在 Alstom 公司實習期間，先由 Mr. Heiko Schneider 及 Mr. Ismail Illath 簡介 Alstom 公司及該公司產品總類，並對該公司銷售實績概況做一說明，之後由 Mr. Heribert Brune 說明林口案備用主變壓器耐短路電流試驗程序，結束後前往工廠參觀變壓器生產製造流程，並針對變壓器品質管理探討，參觀完工廠後由 Mr. Jens Weenen 介紹變壓器線上監視系統及展示，最後針對本次行程之問題互相討論。

在 KEMA 試驗機構實習期間，由 Mr. Ruben Wiggers 說明變壓器耐短路電流試驗程序，並作最後調整確認，在 KEMA 見證變壓器耐短路電流試驗過程並與 KEMA 技術交流，本次林口案備用主變壓器在 KEMA 試驗結果變壓器阻抗 (Impedance) 變化量為 0.7% 符合規範要求，之後主變壓器將送回廠內開蓋檢查及通過變壓器出廠試驗後 KEMA 將出正試報告。

在 Sergi 公司實習期間，由 Mr. Rui Da Silva 簡介 Sergi 公司及該公司產品總類，並對該公司銷售實績概況做一說明，並說明變壓器防爆設備之設計理念，之後前往工廠參觀變壓器防爆設備生產製造流程，最後針對本次行程之問題互相討論。

## 參、大容量變壓器之設計、製造、品管及試驗等技術實習

本次實習內容主要分為四大項，第一部份為變壓器耐短路試驗技術，第二部份為綠色變壓器之開發，第三部份為變壓器防爆設備介紹，第四部份為變壓器中性點設備之介紹。

### 一、耐短路電流試驗(Short Circuit Withstand Test)

耐短路電流試驗為變壓器特殊試驗中的一項，因礙於試驗實驗室的設備容量不足及試驗費用所費不貲，除了實際實施外，國際標準亦規定以計算方式計算變壓器的耐短路電流能力。目前正在執行中的林口更新擴建計畫，合約中規定主變壓器須實行耐短路電流試驗，耐短路電流試驗需依照 IEEE C57.12.90 或是 IEC 60076-5 標準實施。

#### (一) 受測主變壓器規格：



**受測主變壓器規格**

- ❖ 額定容量：單相-333MVA
- ❖ 額定電壓與接線：
  - 高壓側(Y接): 345 kV
  - 低壓側(Δ接): 24.375kV
- ❖ 額定頻率：60Hz
- ❖ 百分阻抗：23%
- ❖ 冷卻方式：導油風冷ODAF
- ❖ 無載切換器NVTC：+7.5% ~ -2.5%

台電電力公司 誠信 關懷 創新 服務

圖 1

圖 1 為林口更新擴建計畫主變壓器規格。

(二) 試驗接線方式：

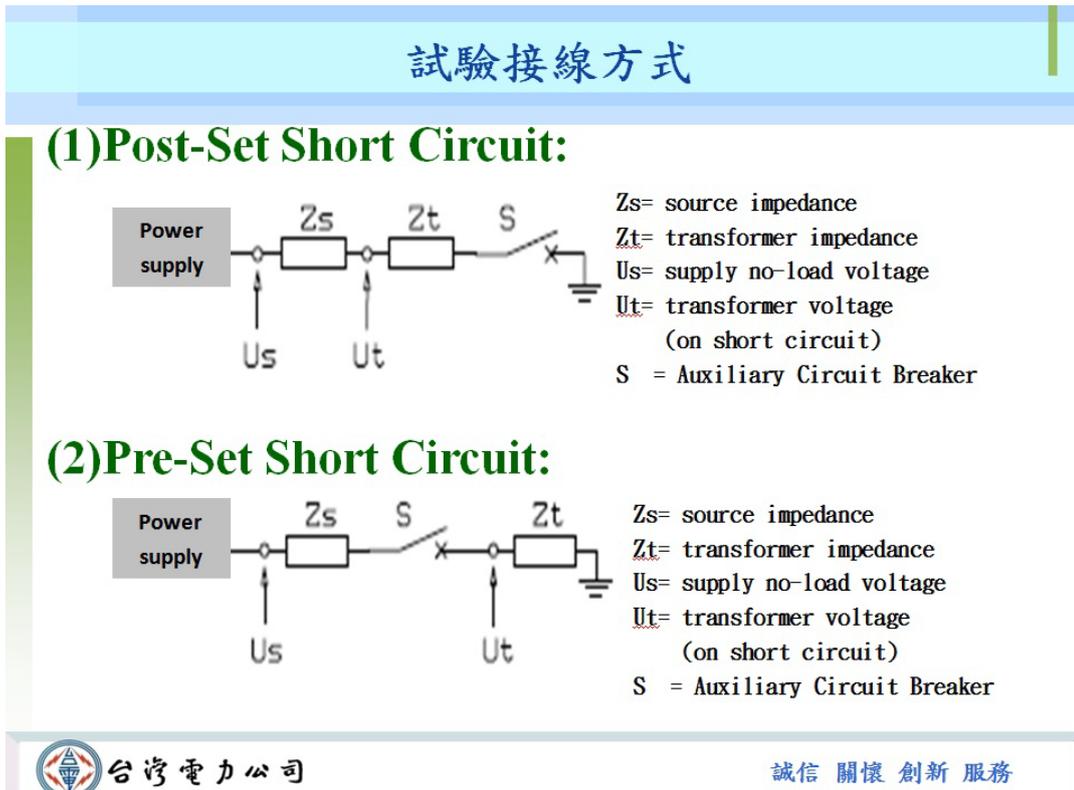


圖 2

耐短路電流試驗接線方式有 2 種方法，第 1 種為 Post-Set 法，第二種為 Pre-Set 法，接線圖如圖 2 所示，其中試驗電源(Power Supply)由電網供應或是發電機供應，這與試驗室的建置方式有關。Post-Set 法為電源達到試驗容量後先投入受測變壓器高壓側，使變壓器先加壓激磁，低壓側開路，待變壓器激磁穩定後，低壓側短路，持續 0.25 秒後斷開，紀錄試驗波形。Pre-Set 法為低壓側先短路，高壓側開路，待電源達到試驗容量後，由高壓側投入，持續 0.25 秒後斷開，紀錄試驗波形。使用 Pre-Set Short Circuit 測試方法變壓器激磁電流(Inrush Current)可能疊加在短路試驗電流可能超過變壓器承受能力，Post-Set Short Circuit 測試方法高壓側先加壓無激磁電流問題。KEMA 採用 Pre-Set Short Circuit 測試方法。

(三) IEEE/IEC 國際規範標準比較：

1. 變壓器依容量大小分類不同：依照 IEEE C57.12.00 變壓器依容量大小分為 4 類，依照 IEC 60076-5 變壓器依容量大小分為 3 類，IEEE 及 IEC 標準分類如下，本次試驗變壓器在 IEEE 為第 4 類變壓器而在 IEC 為第 3 類變壓器。

依照 IEEE Std C57.12.00	(單相)	(三相)
Category I：	5~500kVA	15~500kVA 以內
Category II：	501~1667kVA	501~5000kVA
Category III：	1668~10000kVA	5001~30000kVA
Category IV：	10000kVA 以上	30000kVA 以上

依照 IEC 60076-5：

Category I： 2500kVA 以內

Category II： 2501~10000kVA

Category III：10000kVA 以上

2. 耐短路電流試驗能力試驗次數的不同：依照 IEEE C57.12.90 試驗標準，耐短路電流試驗次數為每相 6 次，其中 2 次試驗電流需為非對稱電流；依照 60076-5 試驗標準，耐短路電流試驗次數為每相 3 次。

3. 百分阻抗 (Impedance) 變化量的不同：依照 IEEE C57.12.90 試驗標準，阻抗變化量在 2% 內可接受；依照 60076-5 試驗標準，阻抗變化量在 1% 內可接受，然而阻抗變化量介於 1~2% 內購買者與變壓器製造商可協議試驗結果能否接受，林口主變壓器採購規範規定阻抗變化量需小於 1%。

(四) 試驗電流計算：

1. 對稱短路電流計算：

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S} \quad (1)$$

$$Z_t = \frac{z_t \times U_s^2}{S} \quad (2)$$

$$I_{sy} = \frac{U}{\sqrt{3} \times (Z_t + Z_s)} \quad (kA) \quad (3)$$

其中  $I_{sy}$ : 對稱短路電流  $U$ : 變壓器繞組電壓  $Z_t$ : 變壓器短路阻抗  $Z_s$ : 系統短路阻抗

Us:系統額定電壓 S:系統短路容量

Ur:變壓器繞組電壓 zt:變壓器阻抗 Sr:變壓器容量

計算步驟：

Step-1.系統額定電壓(Us)為 345kV,系統短路電流(Ui)為 63kA,所以系統短路容量(S)為  $\sqrt{3} \times 345\text{kV} \times 63\text{kA}$ ,以上參數代入(1)式可得系統短路阻抗(Zs)為 3.162 ( $\Omega$ )。

Step-2.變壓器阻抗(zt)為 23.58%,變壓器繞組電壓(Ur)為  $345\text{kV}/\sqrt{3}$ ,變壓器容量(Sr)為 333MVA,以上參數代入(2)式可得變壓器短路阻抗(Zt)為 28.041 ( $\Omega$ )。

Step-3.將系統短路阻抗(Zs)及變壓器短路阻抗(Zt)代入(3)式即可求得對稱短路電流(Isy)為 6.373(kA)。

計算式如下：

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S} = \frac{(345\text{kV})^2}{\sqrt{3} \times 345\text{kV} \times 63\text{kA}} = 3.162(\Omega)$$

$$Z_t = \frac{z_t \times U_r^2}{S_r} = \frac{23.58 \times (345\text{kV}/\sqrt{3})^2}{100 \times 333\text{MVA}} = 28.041(\Omega)$$

$$I_{sy} = \frac{U}{\sqrt{3} \times (Z_t + Z_s)} (\text{kA}) = \frac{345\text{kV}/\sqrt{3}}{\sqrt{3} \times (28.041 + 3.162)} = 6.373(\text{kA})$$

2.非對稱短路電流計算：

$$I_{asy} = k \times I_{sy} = 17.742$$

$$k = 2.784$$

$$\frac{x}{r} = \frac{23.58}{0.24} = 98$$

其中 Iasy:非對稱短路電流 Isy:對稱短路電流 k:非對稱系數

x:變壓器電抗 r:變壓器電阻

Step-1. 經由實際量測可得變壓器電抗(x)為 23.58 ( $\Omega$ )，變壓器電阻(r)0.24 ( $\Omega$ )，可得 x/r 比為 98，經查 IEEE C57.12.00 table-14 可得非對稱系數(k)為 2.784。

Step-2. 將非對稱系數(k)乘以對稱短路電流( $I_{sy}$ ) 即可求得非對稱短路電流( $I_{asy}$ )為 17.742(kA)。

另依 IEEE C57.12.90 規定，試驗電流範圍可介於 95% ~ 105%。計算結果如圖 3 所示。

### Calculation sheet short-circuit current

System power of :	37650 MVA	System voltage of:	345 kV
tap position	5 Max.	2 Nom.	1 Min.
tap voltage	214,12 kV	199,19 kV	194,21 kV
impedance voltage %	24,30 %	23,58 %	23,33 %
resistance (75°C)	0,230 %	0,240 %	0,240 %

#### TAP POSITION 5 Max.

Supply voltage:	214,12 kV	Terminal voltage:	195,63 kV
Short cir. current	min. value	calculated	max. value
HV current	5555,1 A	5847,5 A	6139,8 A
HV peak current	15,465 kA	16,279 kA	17,093 kA
LV current	48,79 kA	51,36 kA	53,92 kA
LV peak current	135,83 kA	142,98 kA	150,12 kA
HV reactance:	33,45 Ohm	HV inductance:	88,74 mH

#### TAP POSITION 2 Nom.

Supply voltage:	199,19 kV	Terminal voltage:	179,04 kV
Short cir. current	min. value	calculated	max. value
HV current	6054,1 A	6372,7 A	6691,3 A
HV peak current	16,855 kA	17,742 kA	18,629 kA
LV current	49,46 kA	52,07 kA	54,67 kA
LV peak current	137,71 kA	144,95 kA	152,20 kA
HV reactance:	28,09 Ohm	HV inductance:	74,52 mH

#### TAP POSITION 1 Min.

Supply voltage:	194,21 kV	Terminal voltage:	173,46 kV
Short cir. current	min. value	calculated	max. value
HV current	6236,0 A	6564,2 A	6892,4 A
HV peak current	17,361 kA	18,275 kA	19,188 kA
LV current	49,68 kA	52,29 kA	54,90 kA
LV peak current	138,30 kA	145,58 kA	152,85 kA
HV reactance:	26,42 Ohm	HV inductance:	70,09 mH

圖 3

(五) 試驗程序及結果

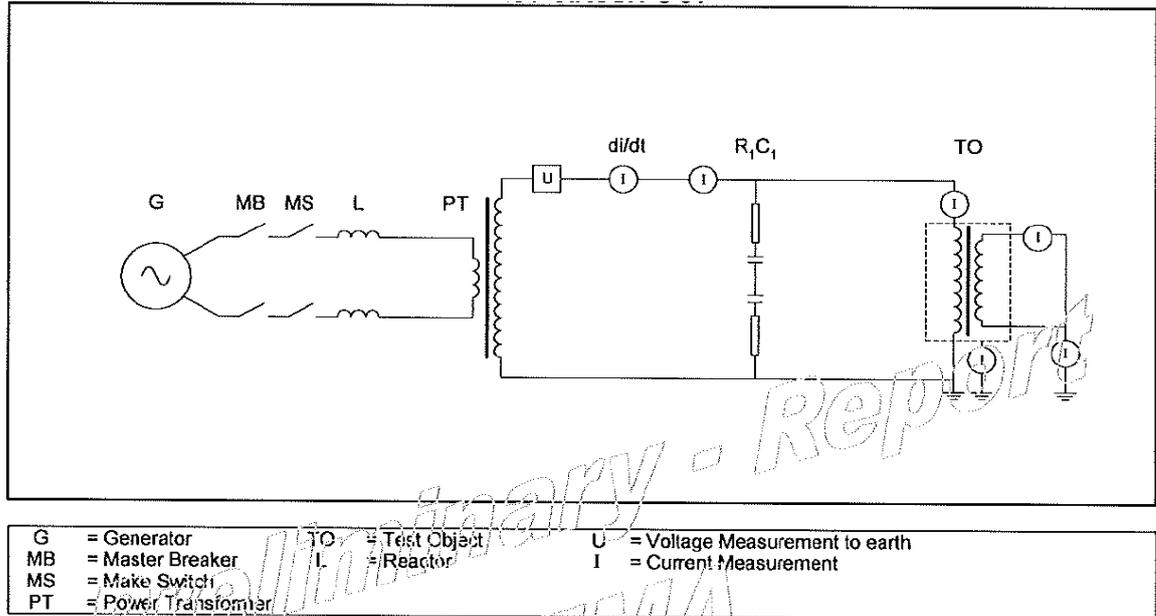


圖 4

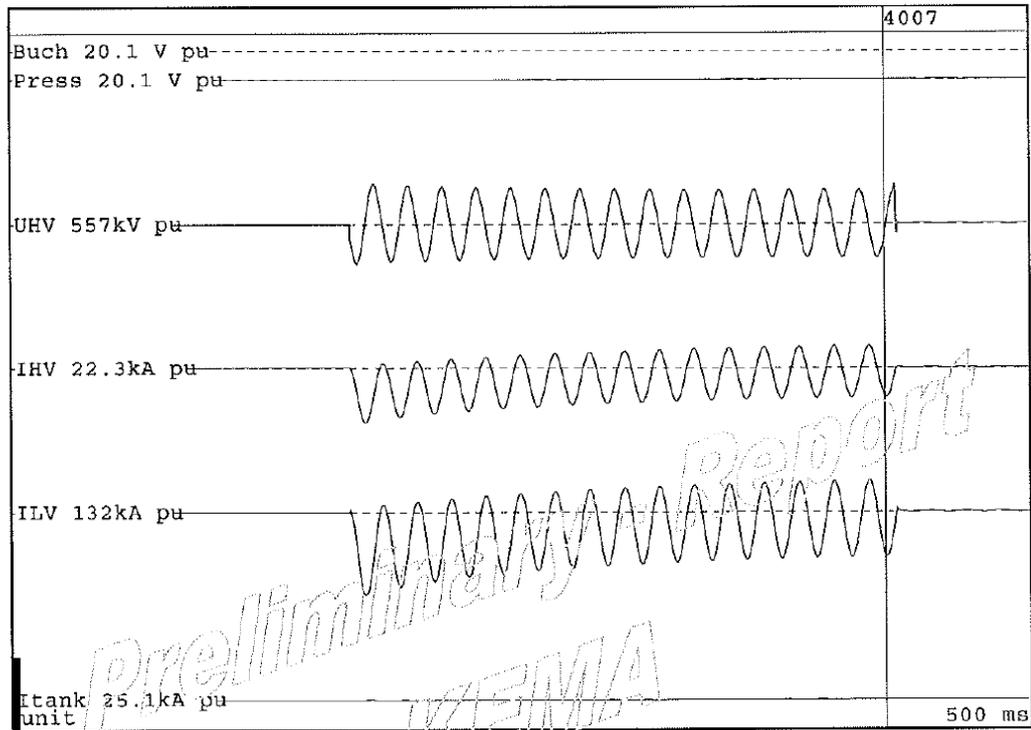
圖 4 為試驗單線圖，KEMA 實驗室採用 Pre-Set 試驗方式。

- Measurement of impedance in minimum, rated and maximum tap position.
- minimum tap position:*
  - 50% shot for adjustment of the circuit and measurement system
  - checking of protection system
  - 80% shot for adjustment of the circuit and final check of the measurement system
  - 100% shot
  - Measurement of impedance (and evaluation of the results)
  - 100% shot
  - Measurement of impedance (and evaluation of the results)
- rated tap position:*
  - 80% shot for adjustment of the circuit
  - 100% shot
  - Measurement of impedance (and evaluation of the results)
  - 100% shot
  - Measurement of impedance (and evaluation of the results)
- maximum tap position:*
  - 80% shot for adjustment of the circuit
  - 100% shot
  - Measurement of impedance (and evaluation of the results)
  - 100% shot
  - Measurement of impedance (and evaluation of the results)
- Measurement of impedance in minimum, rated and maximum tap position.

圖 5

在試驗前需先量測記錄變壓器阻抗值，然後將變壓器電壓切換器調整在最高電壓位置開始試驗，依次試驗最高電壓、額定電壓及最低電壓，試驗次數共 6 次，其中於最高及最低電壓分別試驗非對稱電流承受能力，每次試驗時間 0.25 秒，詳細試驗程序詳圖 5。

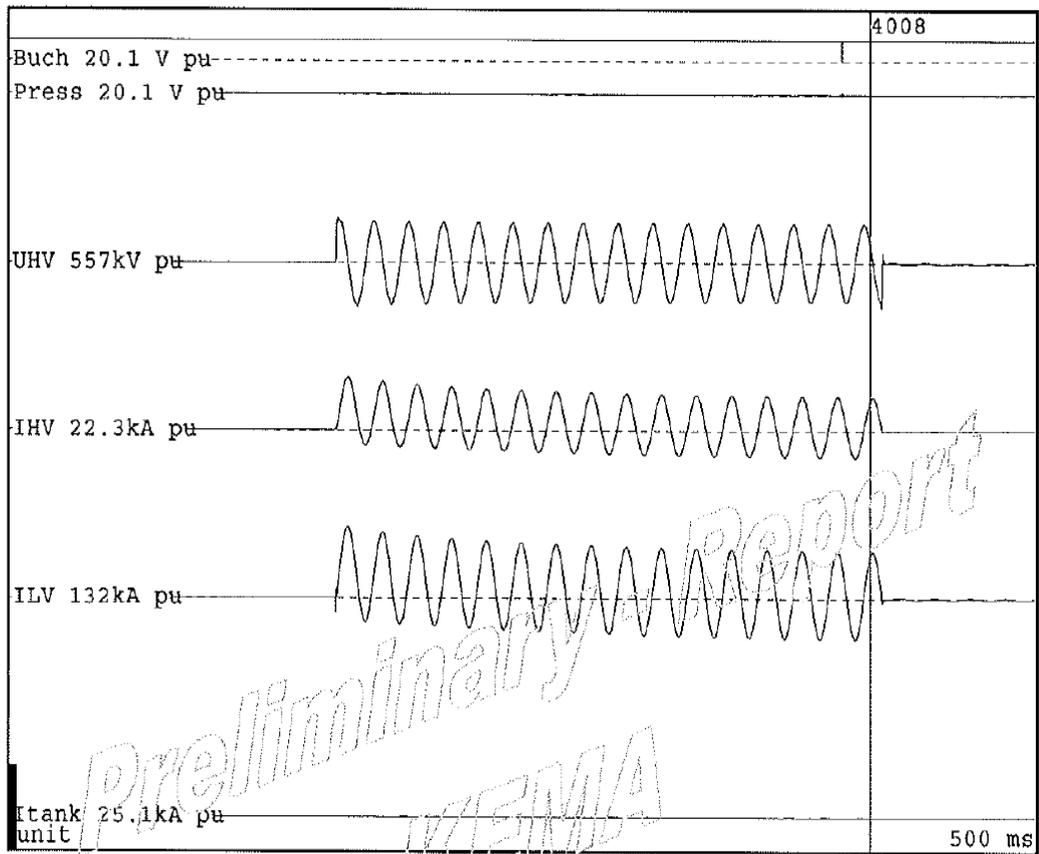
1. 試驗結果-Tap#5(Shot1,非對稱短路電流)：



**TEST NUMBER: 131109-4007**

Phase		-
Tap position		5
Voltage, phase value, beginning	kV	202
Voltage, phase value, end	kV	184
Current HV-winding, peak value	kA	-16,9
Current HV-winding, phase value, beginning	kA	5,82
Current HV-winding, phase value, end	kA	5,65
Current HV-winding, phase value, average	kA	5,78
Current LV-winding, peak value	kA	-152
Current LV-winding, phase value, beginning	kA	52,1
Current LV-winding, phase value, end	kA	49,2
Current LV-winding, phase value, average	kA	51,2
Current duration	s	0,263

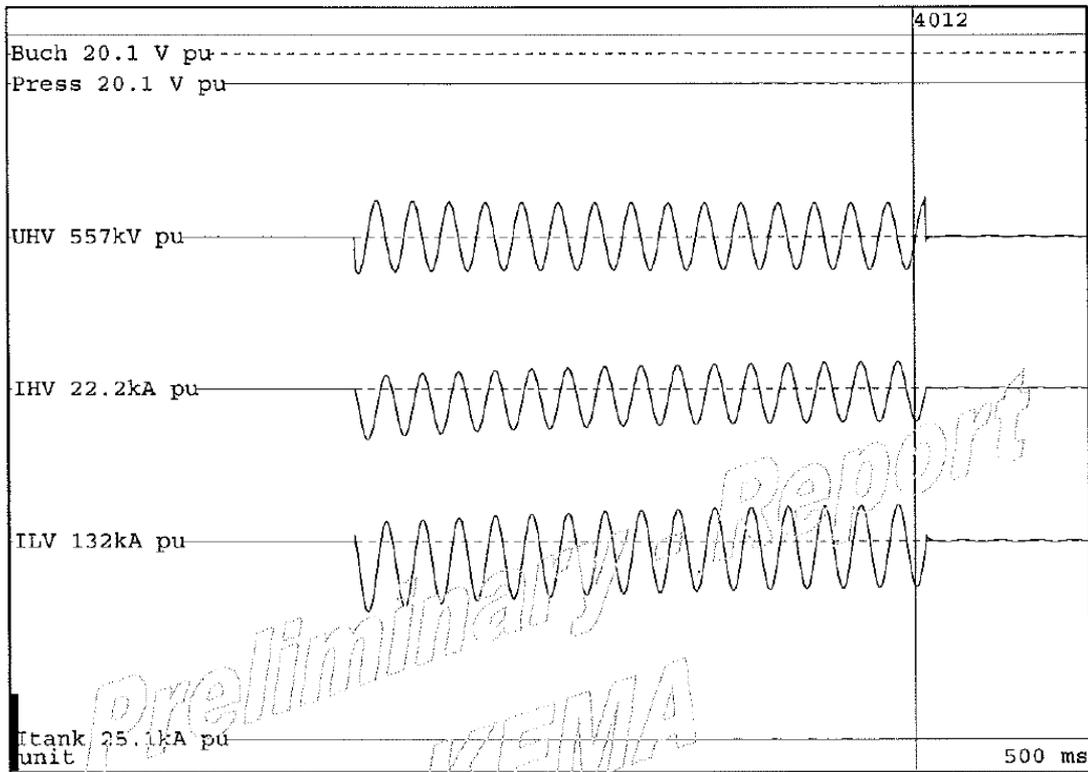
2. 試驗結果-Tap#5(Shot2,對稱短路電流)：



**TEST NUMBER: 131109-4008**

Phase		-
Tap position		5
Voltage, phase value, beginning	kV	194
Voltage, phase value, end	kV	184
Current HV-winding, peak value	kA	14,0
Current HV-winding, phase value, beginning	kA	5,88
Current HV-winding, phase value, end	kA	5,68
Current HV-winding, phase value, average	kA	5,82
Current LV-winding, peak value	kA	111
Current LV-winding, phase value, beginning	kA	49,3
Current LV-winding, phase value, end	kA	48,8
Current LV-winding, phase value, average	kA	49,2
Current duration	s	0,261

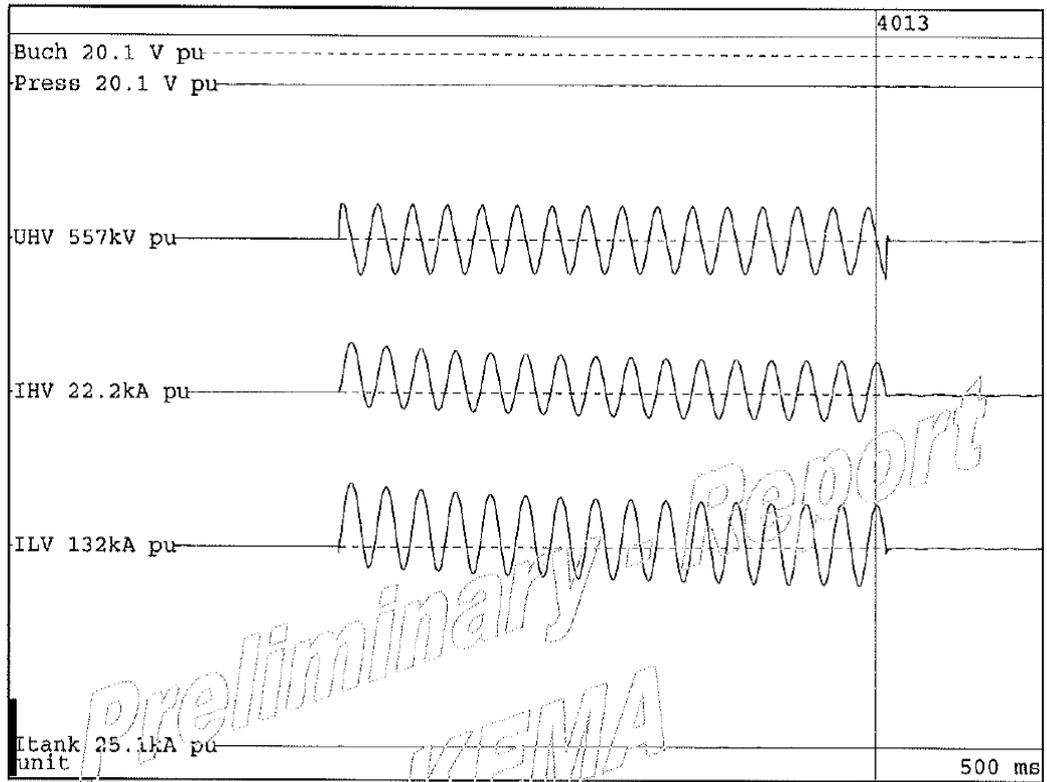
3. 試驗結果-Tap#2(Shot3,對稱短路電流)：



**TEST NUMBER: 131109-4012**

Phase		-
Tap position		2
Voltage, phase value, beginning	kV	178
Voltage, phase value, end	kV	173
Current HV-winding, peak value	kA	-14,7
Current HV-winding, phase value, beginning	kA	6,26
Current HV-winding, phase value, end	kA	6,20
Current HV-winding, phase value, average	kA	6,26
Current LV-winding, peak value	kA	-122
Current LV-winding, phase value, beginning	kA	51,5
Current LV-winding, phase value, end	kA	50,5
Current LV-winding, phase value, average	kA	51,2
Current duration	s	0,260

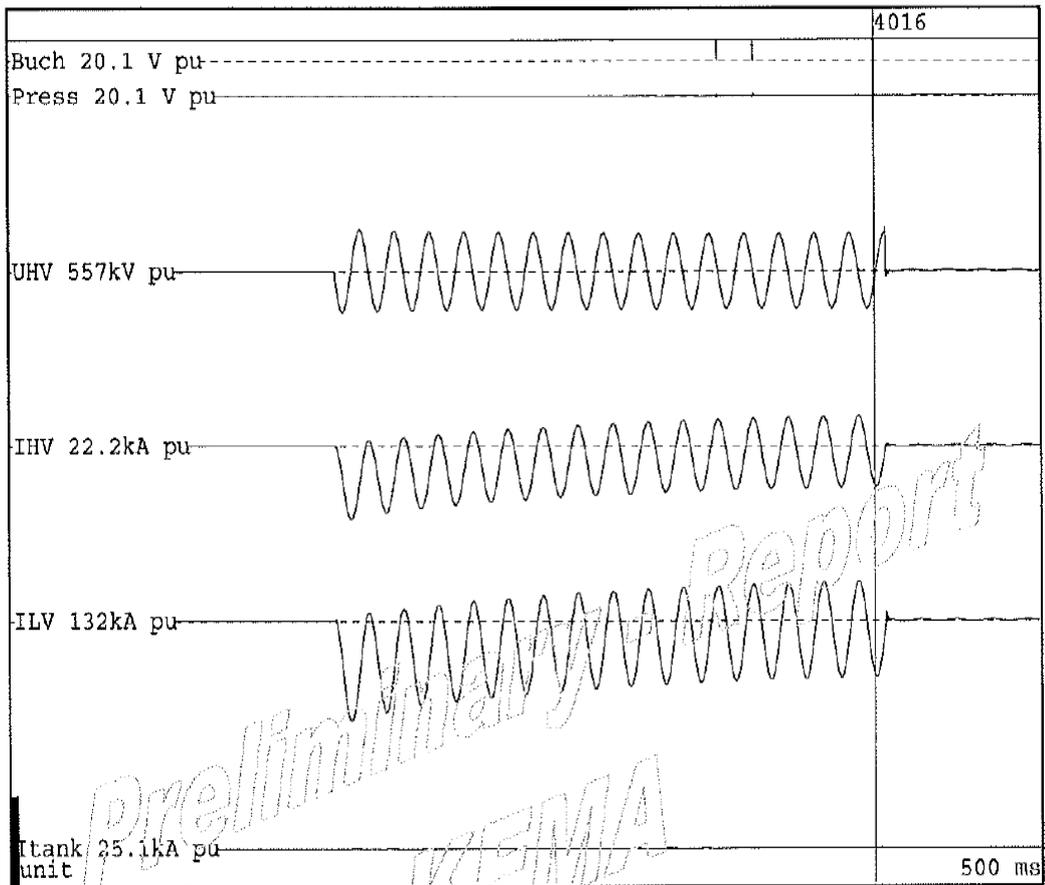
4. 試驗結果-Tap#2(Shot4,對稱短路電流)：



**TEST NUMBER: 131109-4013**

Phase		-
Tap position		2
Voltage, phase value, beginning	kV	178
Voltage, phase value, end	kV	173
Current HV-winding, peak value	kA	14,4
Current HV-winding, phase value, beginning	kA	6,17
Current HV-winding, phase value, end	kA	6,07
Current HV-winding, phase value, average	kA	6,15
Current LV-winding, peak value	kA	108
Current LV-winding, phase value, beginning	kA	49,5
Current LV-winding, phase value, end	kA	48,9
Current LV-winding, phase value, average	kA	49,5
Current duration	s	0,260

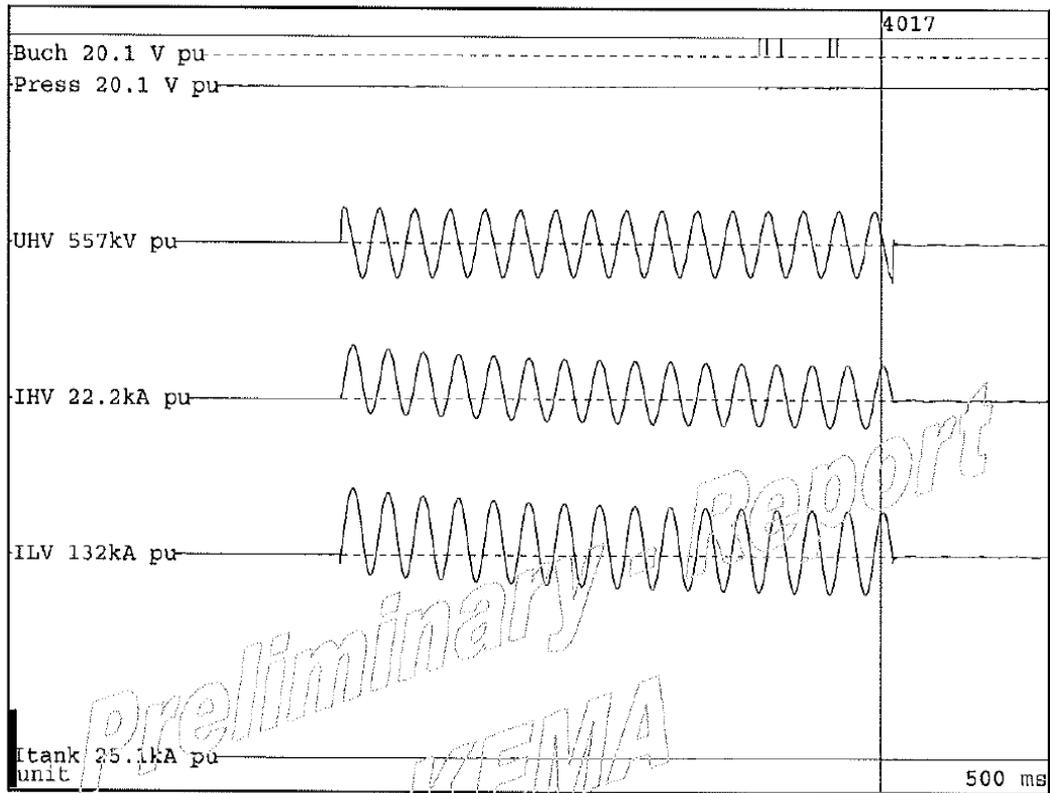
5. 試驗結果-Tap#1(Shot5,非對稱短路電流)：



**TEST NUMBER: 131109-4016**

Phase		-
Tap position		1
Voltage, phase value, beginning	kV	178
Voltage, phase value, end	kV	169
Current HV-winding, peak value	kA	-18,6
Current HV-winding, phase value, beginning	kA	6,50
Current HV-winding, phase value, end	kA	6,40
Current HV-winding, phase value, average	kA	6,48
Current LV-winding, peak value	kA	-150
Current LV-winding, phase value, beginning	kA	52,7
Current LV-winding, phase value, end	kA	51,1
Current LV-winding, phase value, average	kA	52,2
Current duration	s	0,262

6. 試驗結果-Tap#1(Shot6,對稱短路電流)：



**TEST NUMBER: 131109-4017**

Phase		-
Tap position		1
Voltage, phase value, beginning	kV	173
Voltage, phase value, end	kV	168
Current HV-winding, peak value	kA	15,1
Current HV-winding, phase value, beginning	kA	6,41
Current HV-winding, phase value, end	kA	6,30
Current HV-winding, phase value, average	kA	6,38
Current LV-winding, peak value	kA	111
Current LV-winding, phase value, beginning	kA	50,2
Current LV-winding, phase value, end	kA	49,5
Current LV-winding, phase value, average	kA	50,2
Current duration	s	0,260

耐短路電流實施 6 次後，變壓器外觀無變形，百分阻抗(Impedance)變化量為 0.7%，與林口主變壓器採購規範規定阻抗變化量需小於 1%，初步判斷無異常，之後主變壓器將送回廠內開蓋檢查及通過變壓器出廠試驗後 KEMA 將出正試報告。

本次試驗變壓器為 Alstom 德國變壓器工廠製造，工廠地點位於德國門興格拉德巴赫；試驗地點為 KEMA 實驗室，KEMA 實驗室地點位於荷蘭阿納姆，變壓器透過船運的方式從德國運送到荷蘭 KEMA 實驗室後，變壓器在位於河岸邊之船上接受耐短路試驗，試驗照片詳圖 6、圖 7。



圖 6



圖 7

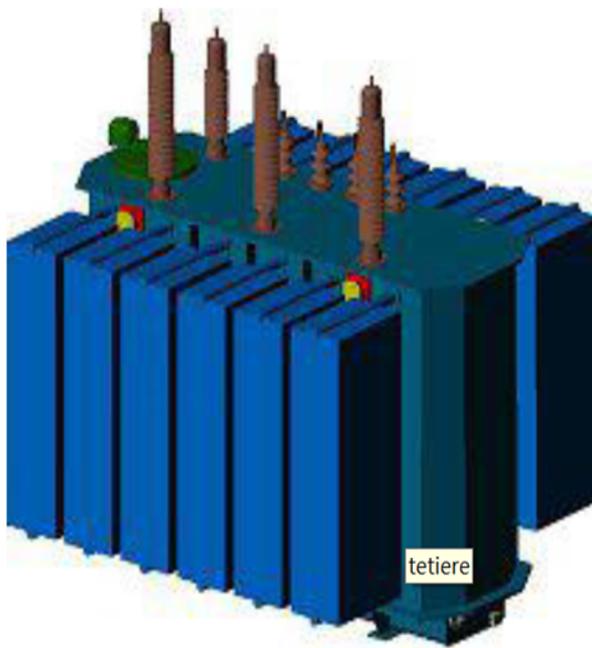
## 二、綠色變壓器開發

目前趨勢多著重在智慧電網及綠色能源，Alstom 開發的綠色變壓器多以環保、減少維護人力並延長變壓器使用年限做發展，本節將介紹 Alstom 綠色變壓器開發情形。

### (一) 密封式變壓器：

密封式變壓器與傳統式變壓器主要差別在於，密封式變壓器無儲油槽、油管、隔膜式橡皮袋及吸濕呼吸器，密封式變壓器可以避免水氣及氣體進入變壓器內造成絕緣油或是絕緣材料的老化，且無須更換或維護上述設備。此外密封式變壓器冷卻裝置有特殊設計，可容納絕緣油膨脹的體積，密封式變壓器另採用真空分接頭切換裝置，可避免切換電壓產生的電弧使絕緣油分解而造成接觸子腐蝕，導致切換裝置故障。圖 8 為密封式變壓器示意圖，圖 9 為密封式變壓器優點，圖 10 為密封式變壓器運轉實績。

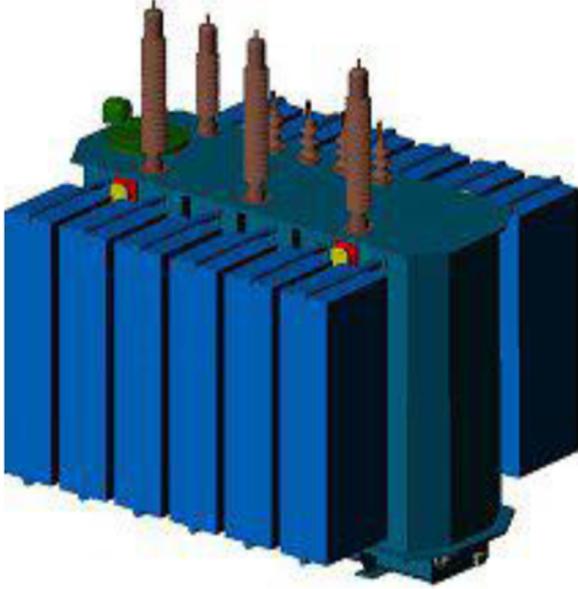
### 密封式變壓器：



- No conservator
- HV-condenser-bushing
- No pipes
- No breather for tank
- Vacuum tap changer
- Pressure relief device
- Oil-volume change trough expansion radiators
- No gas cushion under tank cover
- Oil level and filling pipes
- Buchholz protection device
- Stain less steel ball valves

圖 8

## 密封式變壓器優點：



- Low-maintenance
- No Breathers
- By means of Vacutap-OLTC, **no** contact erosion, **no** switch gases, **no** time-oriented maintenance
- no oil ageing by oil-oxidation
- no moisture absorption of oil
- no hydro-compensator with maintenance and exchange
- reduction of the oxydative depolymerization of the cellulose
- Clear prolongation of lifetime or higher load possible (with higher temperature rise)

圖 9

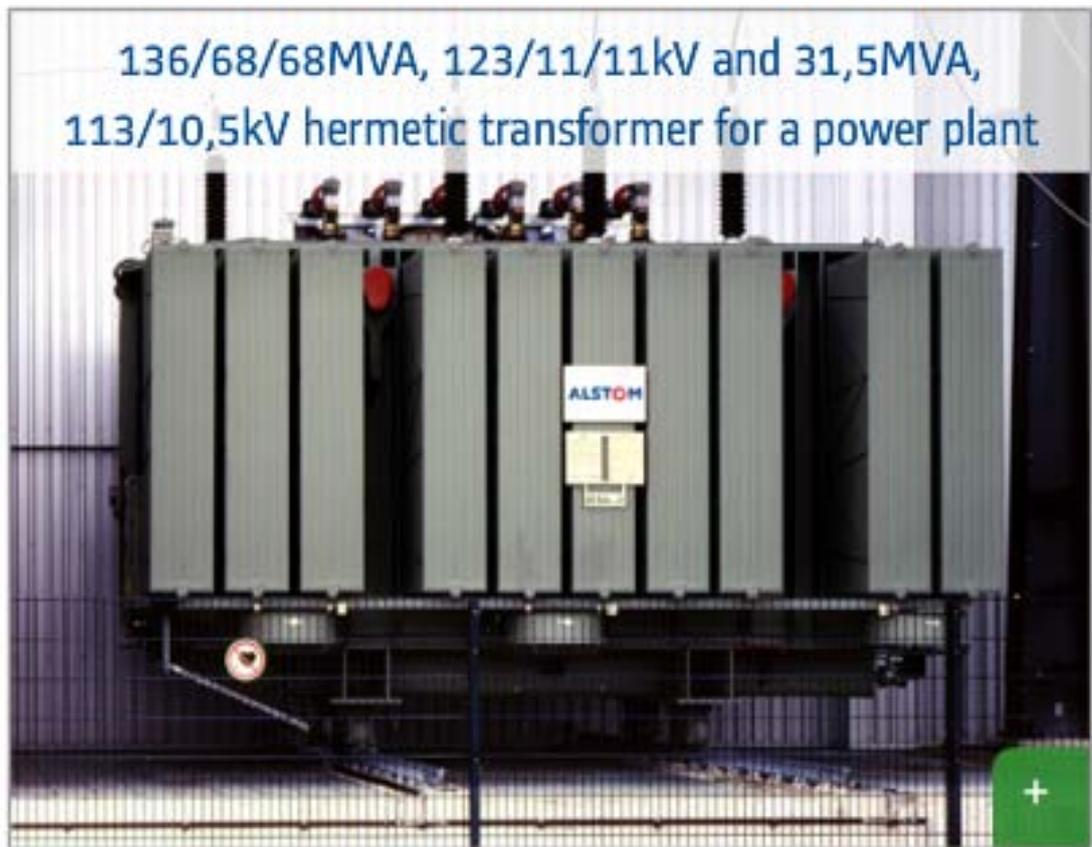


圖 10

(二) 植物油的發展：

目前大多數變壓器絕緣油以使用礦物油為主，但礦物油生物分解能力差，變壓器換油後使用過的絕緣油回收處理成本高，礦物油容易對環境造成破壞等問題，現在 Alstom 公司已開發出以植物油取代礦物油來當變壓器之絕緣油，歐洲海上風力電網因怕變壓器絕緣油外漏污染海洋，已有用植物油來當變壓器絕緣油運轉實績圖 11，植物油與礦物油特性比較如表 1 所示。



圖 11

	著火點(°C)	閃火點(°C)	生物分解力	熱穩定度	黏滯性 (mm <sup>2</sup> /s)	流動點(°C)
植物油	>350	>300	98% in 28 days	高	32-33 at 40 °C	-20 ~ -26
礦物油	150-180	140-160	25% In 28 days	低	8-10 at 40 °C	-57

表 1

植物油優點如下：

1. 著火點及閃點高，不易發生火災
2. 生物分解力高，對環境不會造成汙染
3. 高溫不易分解穩定性佳

植物油缺點如下：

1. 價格昂貴
2. 製造商少，生產量少，交貨時程久
3. 無國際規範
4. 油中氣體偵測系統不適用
5. 黏滯性高，熱交換率低
6. 流動點低，在低溫環境流動性差

雖然植物油對環境影響較小，但還是有許多須要努力克服的缺點。

### (三) 低噪音變壓器：

變壓器在開始設計階段先用 3D 軟體模擬降噪之設計，例如：減少磁通密度、減少鐵心的應力、鐵心共振及外箱共振的管控、箱體降噪等設計，如圖 12 所示，另外在箱體與鐵心間加入特殊反振動板設計降低振動頻率及在變壓器與地面間安裝彈性層吸收振動，如圖 13 所示，冷卻器方面則選擇低噪音的風扇及油泵馬達亦可降低變壓器噪音的產生。

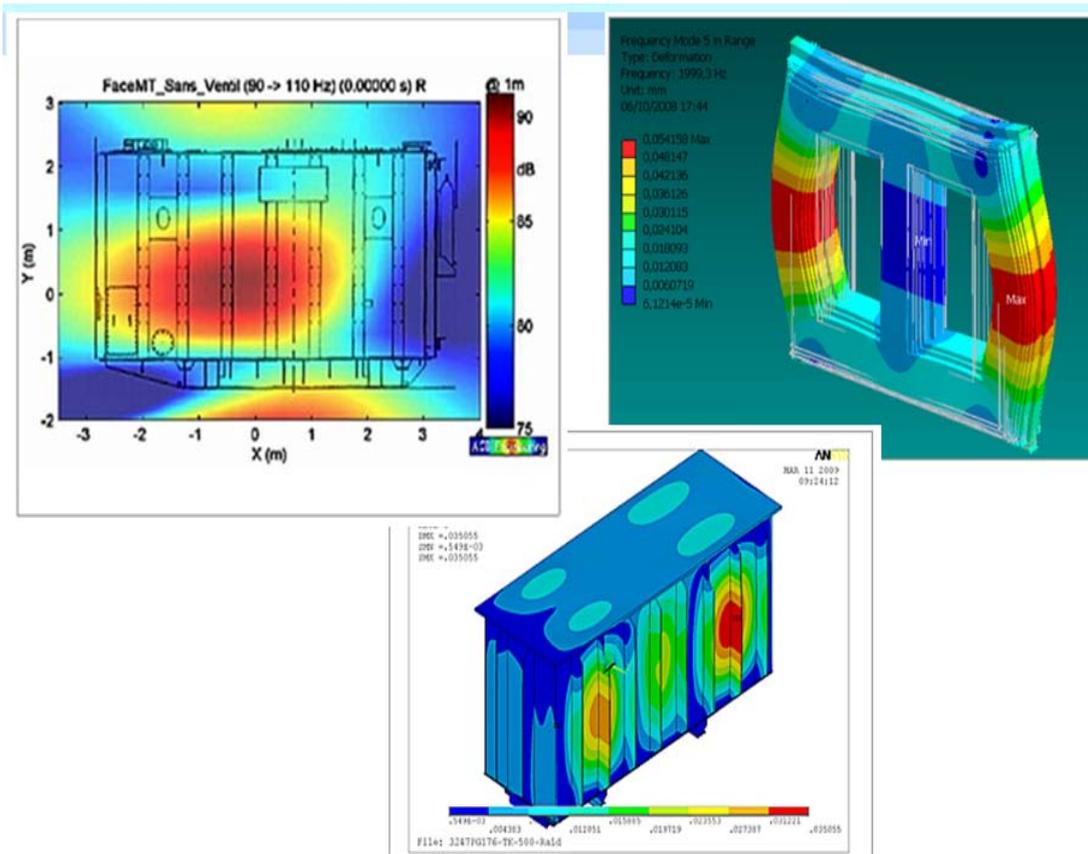


圖 12

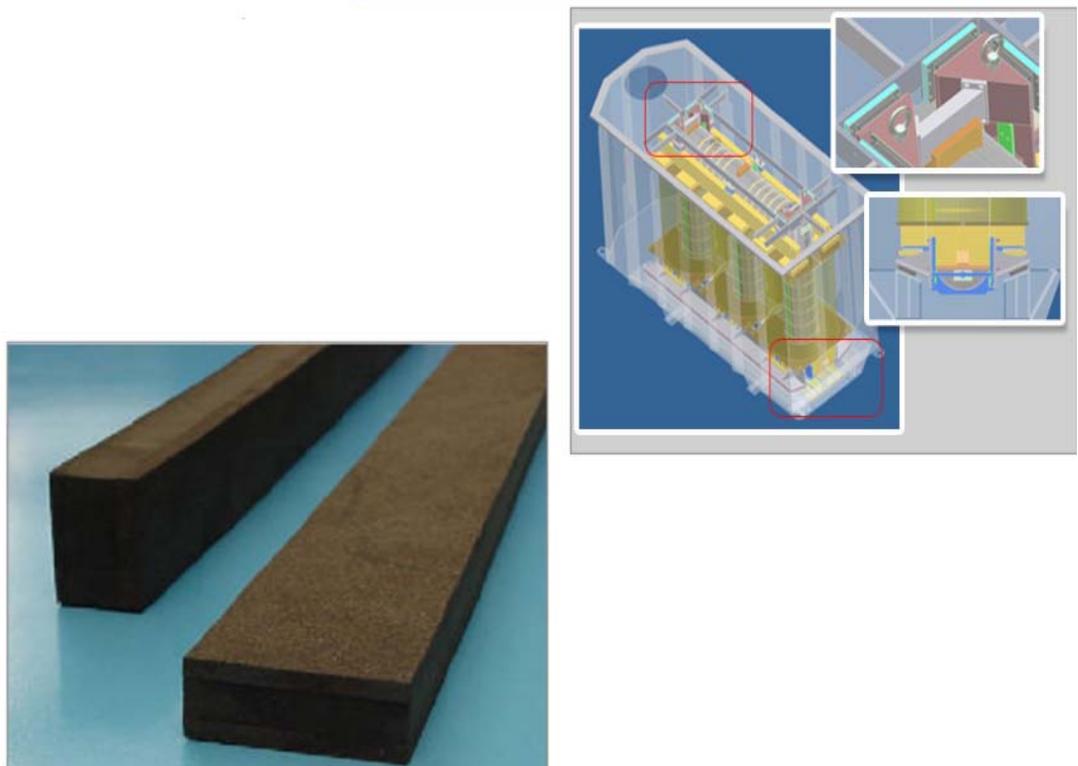


圖 13

#### (四) 變壓器線上監測系統：

Alstom 的變壓器線上監測系統目前開發出的型號為 MS3000，主要監測位置為鐵心繞組、套管、冷卻系統及分接頭切換裝置四大部份，監測項目如圖 14、15 所示，MS3000 IED 模組為主要分析數據之核心，一台 MS3000 IED 模組可串連十台變壓器，變壓器線上監測系統架構圖如圖 16 所示，變壓器線上監測系統優點如下：

1. 評估變壓器狀況提醒維護時間，減少維護週期，減少維護成本，與傳統定期維護更換材料等方式不同
  2. 提前預警，預防事故發生
  3. 評估變壓器壽命
  4. 紀錄變壓器各項數據，掌握變壓器狀況，未來發展智慧型電網不可缺少之設備
- Apparent power (MVA)
  - Load factor
  - Load current and operating voltage on HV side
  - Winding temperature (direct measurement)
  - Hot-spot temperature
  - Ageing rate
  - top and bottom oil temperature
  - Gas and moisture in oil content
  - moisture of paper
  - Circuit states of Buchholz relay, oil level indicator, over pressure relief device etc.
  - OLTC position
  - Number of switching operations of OLTC
  - Sum of switched load current of OLTC
  - Power consumption of OLTC motor drive
  - Number of switching operations of pre-selector and selector
  - Diverter switch current during switching operation
  - Time of inrush current
  - Switching time and switched energy
  - Assessment of mechanical quality of tap changer
  - Oil temperature and difference in OLTC main tank
  - Ambient temperature
  - Operating times and circuit state of fans with cooling efficiency

圖 14

- Fiber optic hot-spot measurements
- Partial discharge
- Bushing power factor ( $\tan \delta$ )
- Transformer power factor ( $\cos \Phi$ )
- Transformer efficiency
- Bottom oil temperature
- Monitoring module temperature
- Moisture of OLTC oil
- Gas quantity and rate in Buchholz relay
- Oil pressure and oil pressure differences
- Accelerations (tank wall, OLTC)
- Oil level
- Humidity of air inside conservator
- Air pressure
- Cooling power
- Intake and outlet cooling equipment temperature
- Difference of intake and outlet temperature
- AVR
- Control of cooling equipment
- Digital status information etc
- Others on request

圖 15

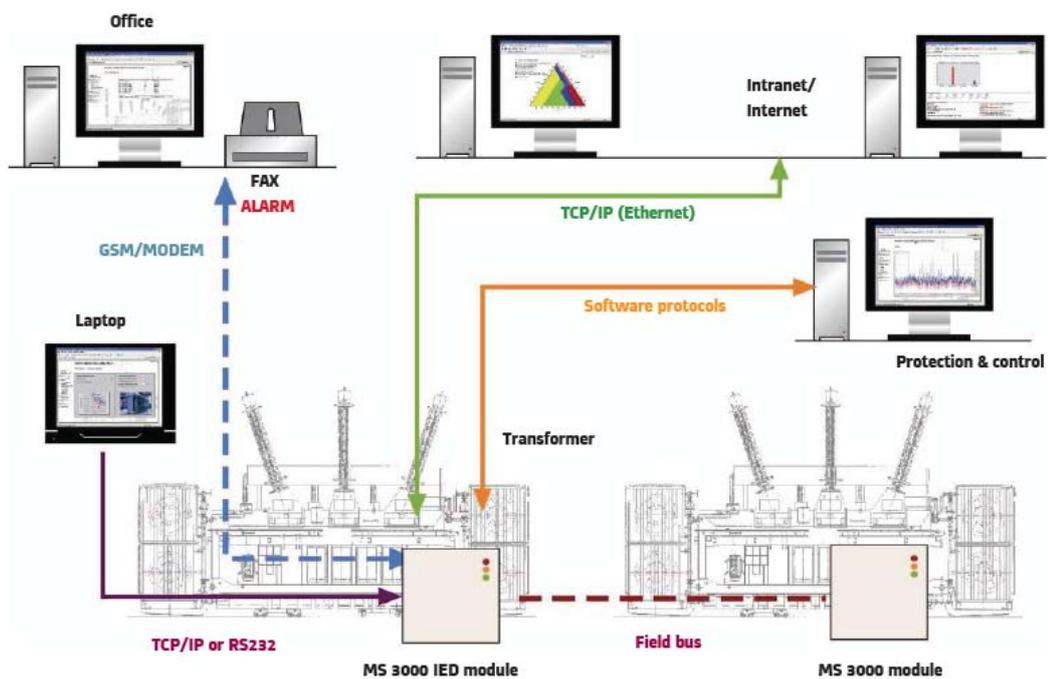


圖 16

### 三、變壓器防爆設備

本節介紹法國 Sergi 公司的變壓器防爆設備，此設備主要功能為避免油浸式變壓器發生內部短路故障時，油槽爆裂引起火災。

#### (一) 動機：

隨著用電需求的增加，全球各地建置越來越多的電力系統，近年來隨著原物料的上漲，變壓器製造商為節省成本，而增加了運轉風險，變壓器爆炸時有所聞，所以有了變壓器防爆設備的發展。目前變壓器保護裝置有：釋壓裝置、衝擊油壓電驛、布氏電驛，而當電驛偵測到故障信號進而跳脫斷路器的動作時間，已來不及防止變壓器因內部發生短路故障時引起大量氣體產生出的氣壓而爆炸。

#### (二) 動作原理：

變壓器防爆設備基本配置如圖 17 所示，當變壓器本體或是 OLTC 發生短路事故時，釋壓裝置中的破裂片受到一定大小的動態壓力波衝擊而動作，部分絕緣油將衝入油氣分離箱，因短路事故產生的可燃性氣體可由排氣管排出。當釋壓裝置已動作且氮氣裝置偵測到一電氣故障信號，5 分鐘後氮氣裝置將開始排入氮氣進入變壓器箱體，氮氣作用為冷卻變壓器及持續將因短路事故產生的可燃性氣體排出變壓器內部，因為短路事故產生的氣體有了排出的管道，內部壓力得到釋放，所以變壓器不會爆炸，動作原理示意圖如圖 18 所示，運轉實績如圖 19、圖 20 所示。

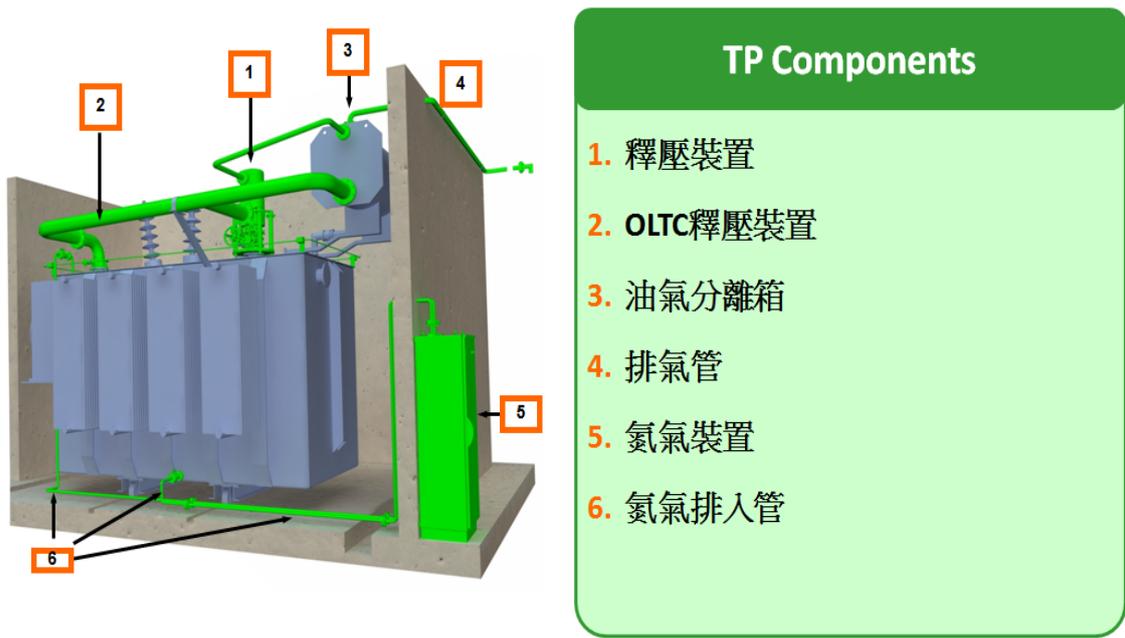


圖 17

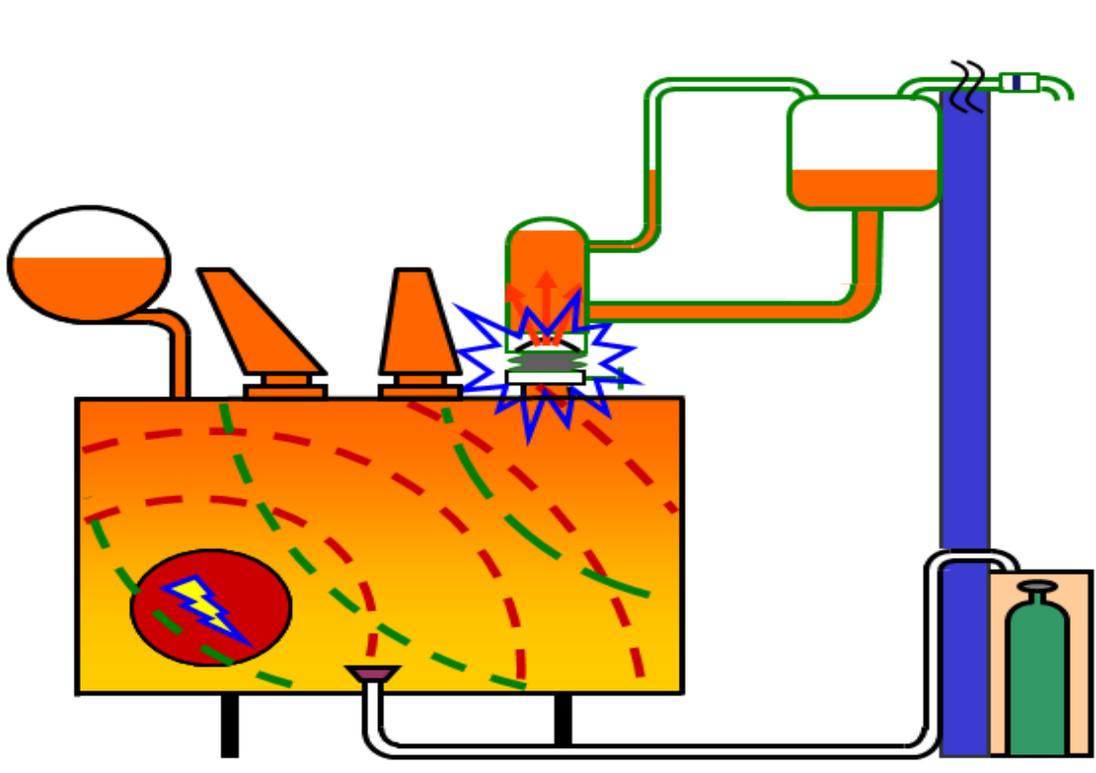


圖 18



圖 19

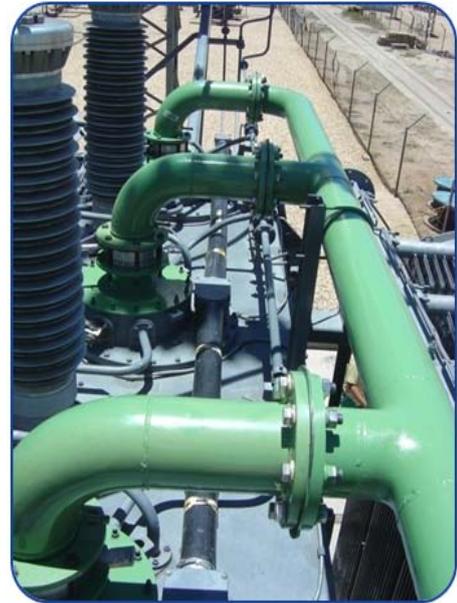


圖 20

(三) 案例：

俄羅斯一水力電廠於 2013 年 5 月 3 日變壓器內部發生短路故障，表 2 為各保護設備動作時間，當發生故障 20ms 後變壓器防爆設備動作，故障 54ms 後斷路器動作，故障 86ms 後釋壓閥動作，此變壓器有裝設防爆設備所以無進一步事故的發生。

Time	Events	Pressure Calibration	Time after fault (Milliseconds)
19:08:57.095	Transformer Fault		0
19:08:57.115	TRANSFORMER PROTECTOR ACTIVATION	1.2 bar Atmospheric, 17.63 psi	20
19:08:57.149	Circuit Breaker Operation		54
19:08:57.181	Pressure Relief Valve Operation	0.8 bar Atmospheric, 11.75 psi	86

表 2

四、變壓器中性點接地電阻設備

在電力系統中如果未接地將造成浮動中性點，浮動中性點將造成全系統的電位升高，將對所有設備及人員造成損害。變壓器中性點接地電阻設備在線路發生故障時可抑制過電流及高電壓，可以有效保護設備及人員的安全。

(一) 中性點接地特性：

1. 降低運轉和維護費用
2. 降低暫態過電壓
3. 當故障發生時，容易找出故障點
4. 改進系統和設備故障保護
5. 提高供電可靠性

## 6. 增進人員及設備之安全性

### (二) 中性點接地方式及選用：

1. 直接接地:變壓器阻抗須夠大才可中性點直接接地，主要功用為限制故障電流
2. 電抗接地:此種接地方式常用於發電機中性點接地系統
3. 電阻接地:此種接地方式常用於 2.4~15kV 系統
4. 接地變壓器接地:當設備無中性點可供接地時，可以利用接地變壓器接地方式創造出一中性點接地。

### (三) 變壓器中性點接地電阻設備之設計及選用：

變壓器中性點接地電阻設備的選用須配合故障清除時間及接地電流對三相故障電流，另外還須考慮電驛的電流設定。因電阻值會隨溫度改變，當溫度過高，電流流過變壓器中性點接地電阻設備將變小，而無法達到保護設備的作用，依據 IEEE 32 規定，在一般額定電流下電阻溫升不得超過 385 度，在故障清除時間設計為 10 分鐘之中性點接地電阻設備，電阻溫升不得超過 610 度，在故障清除時間設計為 1 分鐘或小於 10 秒之中性點接地電阻設備，電阻溫升不得超過 760 度，一般電阻材質選用為不鏽鋼，從表 3 可以看出，不鏽鋼 430 的溫度係數為  $0.00135(\Omega/^\circ\text{C})$ ，在 760 度溫升的電阻變化為 102.6%，即當溫升達到 760 度，流過中性點接地電阻設備的電流將大幅減少，所以變壓器中性點接地電阻設備之電阻材質選用非常重要，變壓器中性點接地電阻設備之溫度、電流、電阻及消耗故障容量的關係如圖 21 所示，變壓器中性點接地電阻設備如圖 22 所示。

Stainless Steel Type	Temperature Coefficient of Resistivity ( $\Omega/^\circ\text{C}$ )	Per unit Change in Resistance after 10 Seconds (%)
AISI 430	0.001350	102.6
AISI 304	0.001000	76
18SR	0.000397	30.2
1JR	0.000120	9

表 3

電阻值隨溫度改變：

$$R_f = R_i (1 + \alpha \Delta T)$$

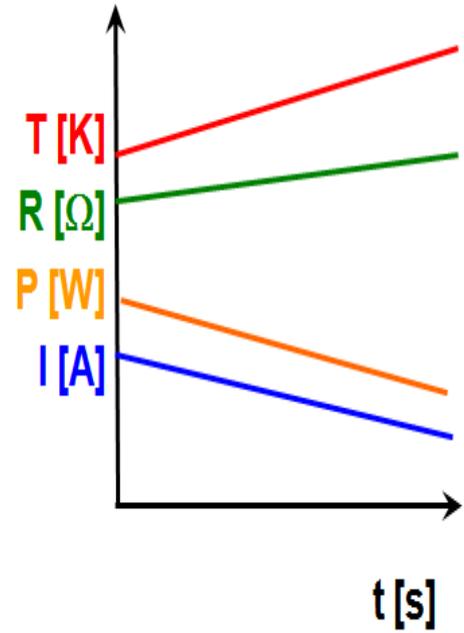
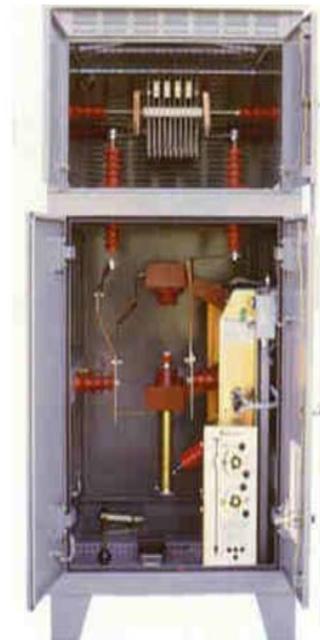


圖 21



IP 54 Grounding Resistor  
 57,7 ohms 300 A for 10 sec. - 30 /√3 kV  
 equipped with incoming bushing insulator and 2 current transformer



IP23/IP54 Grounding Resistor  
 20 ohms, 100 A for 5 sec. - 3,6/√3 kV  
 equipped with load-break switch

**ELENA**

圖 22

#### 肆、 大容量變壓器實習課程內容專家審查會議辦理情形

102年9月26日針對實習課程內容召開審查會，各單位提出問題及詢問國外機構答覆如下：

一、 因廠家礙於工廠/現場設備須與甲方協調試驗方式，請洽國外機構是否有類似經驗提供參考。

答：國外機構均表示無類似經驗，國際標準亦會有明確替代方案可以依循，廠家應負責改善工廠或現場之試驗設備。

二、 現在公司傾向延長變壓器使用壽命，例如：繞組重繞或絕緣材料更新，請洽國外機構是否有類似經驗提供參考。

答：國外機構表示變壓器延長壽命有幾點需要注意：

1. 變壓器使用 30~40 年舊的規範不一定可以符合新的規範。
2. 變壓器使用 30~40 年變壓器繞組重繞或絕緣材料更新，價格高昂且高風險需妥善評估。
3. DeMEPA 及 Alstom 有部門提供變壓器延壽評估及建議服務。

三、 洽國外廠商有關變壓器事故案例之防患措施，供本公司參考。

答：國外機構建議安裝變壓器線上偵測系統及變壓器防爆設備，來預防變壓器事故發生。

四、 建議洽詢國外機構變壓器製造上品管流程及試驗方法，例如：變壓器之製程停留點、檢驗點及相關標準。

答：國外機構表示主要製程停留點、檢驗點如下：

1. 進料檢查
2. 鐵心檢查

3. 繞組檢查
4. 變壓器烘乾
5. 箱體製造
6. 出廠試驗

五、建議洽詢國外機構有關線上即時型偵測設備（油中氣體分量分析、套管功率因數、部分放電偵測等）用於變壓器之實際運轉經驗。

答：曾經有使用者抱怨下載資料太慢，一週的資料要下載一小時及線上即時型偵測設備只存取到一台油中氣體分量分析的資料；以上兩點已經改善。

## 伍、心得及建議

本次出訪先於 DeMEPA 實習高壓電力試驗室設備概要、變壓器試驗課程、變壓器品質管控探討，建立一個高壓電力試驗室是非常困難的，需要足夠的設計經驗，未來隨著電力容量及電壓的提升，高壓電力試驗室設備的擴充能力也變的十分重要，一個複合性的高壓電力試驗室可以一次測試多種設備，可更符合實際運轉的需求。隨著變壓器容量的提高及變壓器在電力系統中的重要性，變壓器的試驗越來越重要，採購變壓器時廠家需依國際規範進行出廠試驗及現場試驗，以確保變壓器品質。要採購一台好的變壓器，首先是要有好的變壓器採購規範，再來就是變壓器製造商的製造能力，製造出來的變壓器要經過出廠試驗，試驗通過後，良好的包裝，運輸到現場安裝，至最後商轉，每步驟皆需要有良好的品管機制，確保變壓器可以安全運轉。

在 CESI 參觀高壓電力試驗室，CESI 廠區有不同電壓等級之電力試驗室，每個實驗室都有專人負責維護操作，也有專人負責品管及品質服務，分層負責每個人在自己的專業領域上相當專業，令人印象深刻。

在 TELEMA 實習中性點接地電阻設備如何保護變壓器，預防接地故障短路電流損害設備，了解其設計原理及技術交流外，另外參觀中性點接地電阻設備製造工廠，在工廠內，每個區域分工詳細，進料區，製造區，存放區，TELEMA 公司因為吸收他家公司經驗更改各區位置及產品生產動線，提高生產效率。TELEMA 公司產品除了中性點接地電阻設備外，另外有通風設備，鐵路煞車系統設備，令我了解一家公司不可以只靠一種產品生存，需要順應市場方向，將工廠的產能達到最高，除了當地員工外也有大陸員工及台灣員工，相互學習不同國家的文化，在面對各國不同的客戶，有不一樣的應對能力。

在 Alstom 變壓器工廠內看到變壓器製造生產流程，小容量變壓器已開發出繞組自動繞線機，鐵心剪裁為機器剪裁外，大容量變壓器的繞組繞線還是需要人工方式，整個工廠的動線及安全防護，做的非常好，繞組區旁就是鐵心堆疊區，鐵心及繞組組立完成後即可送到烤箱烘乾，地上有貼區域線及各警示標語。隨著環保意識抬頭，開發綠色變壓器產品，是未來的一大趨勢，不論是降低噪音，植物油的開發，或是密封式變壓器，變壓器未來將朝向高效率、

低污染、低維護及高壽命做研發目標。變壓器線上監視系統可以即時提供變壓器狀況，就如同變壓器的醫生隨時診斷各個設備的運轉情形，自動判斷維護保養時程，提前預警減少故障發生，變壓器線上監視系統亦是智慧型電網開發，變壓器所需的設備。

在 KEMA 高壓電力試驗室見證變壓器耐短路電流試驗，進入接待中心要先看安全宣導錄影帶，因為變壓器耐短路電流試驗需要整個高壓電力試驗室的電力，所以試驗日期選擇在假日的時候，試驗前一天 KEMA 的工程師先跟我們解說試驗流程及做最後的檢查，試驗當日在控制室透過螢幕觀查試驗變壓器，雖然在控制室中還是可以聽到短路試驗電流流過變壓器所發出的巨響，本次林口案備用主變壓器在 KEMA 試驗結果變壓器阻抗(Impedance)變化量為 0.7%符合規範要求。KEMA 高壓電力試驗室隨處可見警告標語，處處提醒人員注意安全。

在參觀 Sergi 公司，發現這間公司有南非員工、俄羅斯員工、葡萄牙員工、是個小型的聯合國，不同國家有不同的文化，對擴展海外事業有極大的幫助，也得知有些國家已將此設備納入採購合約或是標準，變壓器防爆設備在非洲及中南美洲已有廣大的使用者。實習變壓器防爆設備的過程中得知以前曾用破裂片這個裝置來保護變壓器，但是因為其他保護設備的發展及以前設計方式的缺點而被取代，Sergi 公司研發出來的變壓器防爆設備是利用破裂片的原理加上模擬軟體來決定變壓器防爆設備的尺寸及規格。

一台品質優良的變壓器不只要有好的設計更要有好的品管。建議未來在大型變壓器之工程可於規範中可訂定專業顧問公司作變壓器 Design Review。製造方面可要求廠商落實 ISO 的品管制度，於每個製造細節作詳實的品管記錄。有關新式設備或其他設計，建議有國際規範規定，再納入採購規範。