

一 般

台灣電力股份有限公司 102 年度  
研究計畫 546-2102-0004

# 密封型桿上變壓器構造暨保護 設備之研究完成報告

台灣電力股份有限公司  
中華民國 102 年 11 月

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

本報告書僅供

政府機關參考

請勿轉載

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

# 密封型桿上變壓器構造暨保護設備之研究 完成報告

研究方式：合作研究

執行期間：100 年 11 月 16 日至 102 年 11 月 15 日

計畫主持人：郭宗益

〈財團法人艾爾電氣研究發展教育基金會〉

鄭強〈台電綜合研究所〉

研究人員：周至如、蔡孟伸、陳昭榮

〈國立臺北科技大學〉

唐勝、葉朝義、馮輝正、吳博安、呂梅毓

〈財團法人艾爾電氣研究發展教育基金會〉

執行單位：財團法人艾爾電氣研究發展教育基金會

台電綜合研究所

## 摘要

密封型桿上變壓器在台電配電系統中使用數量頗多；近幾年來，運轉中陸續發生數起故障及噴油事故，不僅降低系統供電可靠度，且對台灣電力公司形象影響至巨。因此如何提升桿上變壓器品質、防範事故發生，實為刻不容緩之事。本計畫將就桿上變壓器內部結構及其附屬配件，從設計面、製造面、檢驗面詳細檢討提昇變壓器品質之方法。同時研討密封型桿上變壓器、饋線配件規範、密封型桿變各種保護裝置之啟閉特性，被保護範圍，上下游間之饋線整體保護協調計算，藉以確保密封型桿上變壓器品質，提升供電可靠度。

年度研究項目重點大致如下(基本上大部分項目均跨年度進行)：

第一年度將蒐集國內外文獻與標準，瞭解桿上變壓器故障類型，及分析原因；接著深入瞭解與分析台電公司 C035 材料規範，提出增修材料規範之建議事項，包括：(1)絕緣油、絕緣紙規範，(2)繞組短路、層間短路之檢測方法，(3)鐵心磁通密度、渦流損檢測法，(4)高低壓套管位置之規範及檢測方法，(5)其他附屬配件於工廠及現場執行部分放電試驗檢測規範，(6)變壓器製造之中間檢查及出廠試驗規範。

第二年度將對桿上變壓器附屬配件結構作模擬及評估，以探討放置位置之影響，並分析內置油開關、熔絲、避雷器等設備動作特性與性能，以及探討桿上變壓器故障指示器之型式、裝置地點、材料之性能及對工安之影響。此外，檢討並計算饋線上、下游之保護協調關係，包含二次變電所饋線電源側、主幹線分段(隔離)開關、分歧線熔絲鏈開關、密封型桿上變壓器之遮斷開關、全域型限流熔絲，以及密封型桿上變壓器二次側電路。

**關鍵詞：**密封型桿上變壓器、材料標準、保護協調、故障指示器、有限元素分析

# ABSTRACT

Sealed Type Pole Transformers are frequently used in the distribution system of Taiwan Power Company. In recent years, several faults occurred during the operation of these transformers. These events not only reduced the reliability of the power system, also gave the negative impact to the TPC's image. How to improve the quality of these transformers, and to prevent the occurrence of the faults are two important issues for TPC. In this project, the internal structure and accessories of these transformers are reviewed from several aspects, including design, manufacture and inspection. The transformer and feeder accessory specification, protection devices, protected regions, protection device coordination are also studied. The results can be used to improve the transformer quality and maintain the power system reliability.

The study items are basically divided into two years as follows:

During the first year, the literatures and standards related to this research are collected in order to gain insight knowledge of transformer fault types and root causes. Following the literature study, the C035 material specifications are investigated. Modifications of existing specifications are then proposed. These specifications include: 1) insulation materials including oil and paper; 2) inspections of winding short circuit or layer short circuit; 3) inspection of core flux and eddy current loss; 4) locations and inspection of high and low voltage bushings; 5) inspection of on-site partial discharge execution on accessories; 6) inspection guide line of transformer midterm and shipment.

For the second year, simulation and evaluation of sealed pole transformer and accessories are carried, including the impact of the installation locations. The operation characteristics and performance of internal switch, fuse, and lightning arrester are also examined. The types, locations, material, performance and impact to the safety of fault indicators are studied. Coordination between the up-stream and down-stream protective devices and the transformer are calculated and verified. The devices include the source side of feeder in secondary substations and the main feeder sectionalized switches, lateral fuse links, disconnect switches, current-limited fuses and the secondary of the sealed type pole transformers.

**Key Words:** Sealed Pole Transformer, Material Standard, Protective Coordination, Fault Indicator, Finite Element Analysis

## 目錄

摘要 .....	I
ABSTRACT .....	II
目錄 .....	III
圖目錄 .....	VII
表目錄 .....	XIV
第一章 緒論 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究目的 .....	7
1.3 研究內容 .....	7
第二章 密封型桿上變壓器故障探討 .....	9
2.1 密封型桿上變壓器故障統計 .....	9
2.2 密封型桿上變壓器故障肇因分析 .....	12
2.2 本章結論 .....	29
第三章 C035 材料規範探討 .....	30
3.1 擬定材規有關變壓器箱體氣密及入油規範 .....	30
3.2 擬定材規有關絕緣紙材質規範及管制方案 .....	41
3.3 探討密封型桿上變壓器一、二次側繞組短路及繞組層(匝)間短路之 檢測試驗方法及準則 .....	44
3.4 研擬鐵心磁通密度與渦流損於工廠試驗之檢測方法 .....	48
3.5 依據現行套管井裝置規格及變壓器油面高度，探討變壓器套管井沿 面距離與閃絡關聯性 .....	72
3.6 密封型桿上變壓器高壓套管井耐候性及部分放電檢測方法與準 則 .....	77
3.6.1 密封型桿上變壓器高壓套管井耐候性及其材料規範 C035 增修 訂之探討分析及建議 .....	77
3.6.2 在工廠及現場執行部分放電檢測方法及準則 .....	85
3.7 研議變壓器中間檢查之項目，執行時機，要點及成效評估 .....	98
3.8 本章結論 .....	105
第四章 密封型桿上變壓器附屬配件結構、開關設備動作特性及保護協 調 .....	111

4.1 絕緣特性 .....	111
4.2 有限元素法與電場計算 .....	113
4.3 附屬配件建立分析模型與分析 .....	124
4.3.1 系統架構與電磁場分布之分類 .....	124
4.3.2 高壓套管電場分析 .....	127
4.3.3 二次套管電場分析 .....	144
4.3.4 全域型限流熔絲電場分析 .....	149
4.3.5 氧化鋅避雷器電場分析 .....	155
4.3.6 綜合討論 .....	159
4.4 壓力釋放裝置 .....	164
4.5 附屬配件配置原則之改善建議事項 .....	164
4.6 內置遮斷開關之啟閉特性與試驗及絕緣油溫昇之影響 .....	168
4.6.1 遮斷開關動作原理 .....	168
4.6.2 啟閉特性之重要參數 .....	170
4.6.3 台電對遮斷開關啟閉特性及相關試驗規定 .....	172
4.6.4 斷路器與熔絲之標準文獻探討 .....	174
4.6.5 絕緣油溫昇之影響檢討 .....	180
4.6.6 遮斷開關啟閉特性與試驗及絕緣油溫昇對其影響建議 .....	182
4.7 全域型熔絲之啟斷特性及保護區域與協調及改善建議 .....	182
4.7.1 限流熔絲之各項額定值及測試標準 .....	182
4.7.2 耐衝擊電壓(BIL)及交流耐壓測試 .....	183
4.7.3 啟斷能力測試 .....	185
4.7.4 無線干擾測試 .....	187
4.7.5 溫昇測試 .....	188
4.7.6 時間電流特性測試 .....	188
4.7.7 液體強度測試 .....	188
4.7.8 全域型熔絲之啟斷特性 .....	189
4.7.9 全域型熔絲之保護區域及協調 .....	191
4.7.10 改善及建議事項 .....	195
4.8 避雷器動作特性及保護區域與協調以及改善建議 .....	196
4.8.1 背景簡介 .....	196

4.8.2 避雷器動作特性介紹及相關參數 .....	198
4.8.3 避雷器保護區域及絕緣協調 .....	203
4.8.4 標準文獻與廠家試驗報告比對 .....	206
4.8.5 模型建立及參數設定 .....	220
4.8.6 密封型桿上變壓器雷擊突波分析 .....	225
4.8.7 結論及建議事項 .....	233
4.9 本章結論 .....	234
<b>第五章 密封型桿上變壓器之故障指示器 .....</b>	<b>237</b>
5.1. 故障指示器之動作原理與型式 .....	237
5.1.1 故障指示器之動作原理 .....	237
5.1.2 故障指示器之型式 .....	238
5.1.3 觸發電流(Trip Current)額定之選用 .....	240
5.1.4 湧入電流之抑制(Inrush Current Restraint) .....	241
5.1.5 誤復歸之抑制(False Reset Restraint) .....	242
5.1.6 電纜相鄰之效應(Proximity Effect) .....	243
5.1.7 故障指示器之指示元件 .....	243
5.2 故障指示器之裝設方式及裝設地點 .....	244
5.3 故障指示器之材料特性 .....	247
5.3.1 故障指示器材料之耐候性 .....	247
5.3.2 故障指示器之安全性 .....	249
5.3.3 故障指示器之使用壽命、維護週期、成本 .....	250
5.4 本章結論 .....	251
<b>第六章 檢討計算饋線上下游之保護協調關係 .....</b>	<b>256</b>
6.1 饋線設備保護協調概念 .....	256
6.1.1 熔絲-熔絲之協調 .....	258
6.1.2 電驛-熔絲協調 .....	261
6.2 故障電流計算 .....	261
6.3 保護協調 .....	263
6.4 保護協調案例分析 .....	265
6.5 本章結論 .....	295
<b>第七章 結論與建議 .....</b>	<b>296</b>

7.1 密封型桿上變壓器故障肇因分析 .....	296
7.2 C035 材料規範完整性 .....	296
7.3 附屬配件結構、開關設備動作特性及保護協調 .....	301
7.4 密封型桿上變壓器之故障指示器 .....	304
7.5 饋線上下游之保護協調 .....	305
參考文獻 .....	307
附錄一 預定進度甘梯圖 .....	313
附錄二 工作會議與參訪時程 .....	318
附錄三 避雷器水平與垂直置放分析 .....	321
附錄四 台電材料標準 A008 (2010-3)「預鑄型高壓電纜接頭及配件」增修條 文 .....	326

## 圖目錄

圖 1-1 桿上變壓器外觀 .....	2
圖 1-2 變壓器發生損壞事故流程 .....	4
圖 1-3 保護電驛系統示意圖 .....	5
圖 2-1 材規 C035 圖 1 變壓器內部接線圖 .....	17
圖 3-1 材規 C035 圖 5 變壓器外殼正視圖(單位:mm) .....	30
圖 3-2 套管井絕緣封套 .....	32
圖 3-3 套管井裝妥絕緣封套後 .....	32
圖 3-4 二次套管橡膠被覆嚴重龜裂脫落，銅導體外露，變壓器一、二次繞組燒損，絕緣油劣化變色 .....	34
圖 3-5 變壓器一、二次繞組正常，絕緣油未劣化，但二次套管橡膠被覆有龜裂脫落情形 .....	34
圖 3-6 變壓器絕緣油由二次套管外洩，沿箱體外側流出，油漬清楚可見 .....	35
圖 3-7 變壓器漏油後，桶內油面下降，二次套管(含銅接頭)及一次套管井(含引線)均露出油面 .....	35
圖 3-8 變壓器桶內油面高度達到標準油面線 .....	41
圖 3-9 試片之端邊累積方法(以試片長度為 280mm 為例) .....	48
圖 3-10 以第一方法量測之電路( $V_f$ 為平均值型電壓計) .....	49
圖 3-11 以第二方法量測之電路( $V_f$ 為平均值型電壓計) .....	49
圖 3-12 量測鐵損之電路( $V_f$ 為平均值型電壓計) .....	51
圖 3-13 30ZH100, 0.3mm 矽鋼板 Core Loss 圖例 .....	52
圖 3-14 直讀式鐵損測試器(Direct Reading Iron Loss Tester) .....	53
圖 3-15a 無負載損測定接線圖(IEEE std 「無載損測定」接線圖) .....	53
圖 3-15b 無負載損測定接線圖(CNS 「無載損測定」接線圖) .....	54
圖 3-16 密封型桿上變壓器製造流程種類之一 .....	103
圖 4-1 Rogowski 電極 .....	112
圖 4-2 火花電位梯度與間隙長的關係 .....	112
圖 4-3 電場強度與間隙長的關係 .....	113
圖 4-4(a) 解析問題之區域 .....	114
圖 4-4(b) 將求解區分割許多成小區塊 .....	114

圖 4-5 有限元素法流程圖 .....	115
圖 4-6 二維空間中之兩平板 .....	116
圖 4-7 兩平板間的電場大小分布 .....	117
圖 4-8 沿+y 軸方向兩平板間的電場大小 .....	117
圖 4-9 兩平行間的等電位面與電場向量圖 .....	118
圖 4-10 兩平板間包含複合介質 .....	118
圖 4-11 沿+y 軸方向兩平板間的電場大小 .....	120
圖 4-12 兩平板間包含複合介質的電場大小分布 .....	120
圖 4-13 圓導體對平板結構 .....	121
圖 4-14 圓導體對平板結構的電場大小分布 .....	122
圖 4-15 P 點與 G 點間電場大小 .....	122
圖 4-16 圓導體對平板結構的等電位面與電場向量圖 .....	123
圖 4-17 密封型桿上變壓器之正視圖與前視圖 .....	125
圖 4-18 軟體建模之三維圖與上視圖 .....	125
圖 4-19 軟體建模之正視圖與側視圖 .....	126
圖 4-20(a) C 型鐵心模型 .....	126
圖 4-20(b) 二維場模型 .....	126
圖 4-21(a) 圓柱型繼鐵器模型 .....	127
圖 4-21(b) r-z 平面模型 .....	127
圖 4-22 套管以 z 軸成軸對稱 .....	127
圖 4-23 高壓套管尺寸規格圖 .....	128
圖 4-24 高壓套管模型圖 .....	128
圖 4-25 高壓套管接線端子的電場強度分布 .....	130
圖 4-26 高壓套管接線末端的等電位面圖 .....	130
圖 4-27 高壓套管表面的電場強度分布 .....	131
圖 4-28 桶壁表面的電場強度分布 .....	131
圖 4-29 高壓引線絕緣物的電場強度分布 .....	132
圖 4-30 變壓器桶內空氣中的電場強度分布 .....	132
圖 4-31 缺油時變壓器桶內空氣中的電場強度分布 .....	133
圖 4-32 將高壓套管接線末端改成球型之示意圖 .....	134
圖 4-33 接線末端為球型時電場強度分布 .....	134

圖 4-34 接線末端為球型時之等電位面圖 .....	134
圖 4-35 球型導體半徑的改變與圓筒導體電場強度比較 .....	135
圖 4-36 油中高壓引線絕緣物電場強度分布 .....	136
圖 4-37 高壓套管絕緣罩模型圖 .....	136
圖 4-38 加上絕緣罩高壓套管接線端子電場強度分布 .....	137
圖 4-39 加上絕緣罩變壓器桶內空氣中電場強度分布 .....	137
圖 4-40 加上絕緣罩缺油時變壓器桶內空氣中的電場強度分布 .....	138
圖 4-41 加上絕緣罩高壓套管接線端子電場強度分布 .....	139
圖 4-42 加上絕緣罩缺油時變壓器桶內空氣中的電場強度分布 .....	139
圖 4-43 加上絕緣罩變壓器桶內空氣中電場強度分布 .....	140
圖 4-44 二次套管尺寸規格圖 .....	145
圖 4-45 二次套管模型圖 .....	145
圖 4-46 二次側引出線電場強度分布 .....	145
圖 4-47(a) 距離為 50mm 兩電極於上方的空氣中 .....	147
圖 4-47(a) 距離為 50mm 兩電極於下方的絕緣油中 .....	148
圖 4-48 高壓套管與二次套管間之等電位面圖 .....	148
圖 4-49 二次套管之電場強度分布圖 .....	149
圖 4-50 熔絲與簡化圖 .....	149
圖 4-51 熔絲尺寸規格(前視圖) .....	150
圖 4-52 熔絲尺寸規格(上視圖) .....	150
圖 4-53 熔絲模型圖 .....	151
圖 4-54 熔絲電場強度分布 .....	152
圖 4-55 避雷器尺寸規格(前視圖) .....	155
圖 4-56 避雷器尺寸規格(上視圖) .....	156
圖 4-57 避雷器與避雷器模型圖 .....	156
圖 4-58 避雷器與熔絲模型圖(中心相距 120mm) .....	156
圖 4-59 避雷器電場強度分布 .....	158
圖 4-60 熔絲絕緣距離(正視圖) .....	163
圖 4-61 熔絲絕緣距離(上視圖) .....	163
圖 4-62 典型遮斷開關外觀 .....	169
圖 4-63 典型遮斷開關構件平面圖範例 .....	169

圖 4-64 最小動作 TCC 範例圖 .....	170
圖 4-65 完全清除 TCC 範例圖 .....	170
圖 4-66 驅弧型熔絲啟斷之回復電壓波形範例 .....	171
圖 4-67 斷路器啟斷之暫態電壓波形範例 .....	171
圖 4-68 變壓器內部接線圖 (C035(2010-07)之圖 1) .....	172
圖 4-69 TRV 之兩參數表示法示意圖 .....	175
圖 4-70 全波衝擊電壓 .....	184
圖 4-71 X/R 比與電流轉換因數曲線圖 .....	185
圖 4-72 典型限流熔絲熔體構造 .....	189
圖 4-73 典型限流熔絲之構造 .....	190
圖 4-74 限流型熔絲之啟斷特性 .....	191
圖 4-75 第一類液浸式變壓器破壞曲線 .....	192
圖 4-76 變壓器保護曲線協調範例 1 .....	193
圖 4-77 變壓器保護曲線協調範例 2 .....	194
圖 4-78 材規 C035 圖 1 變壓器內部接線圖 .....	197
圖 4-79 氧化鋅避雷器構造圖 .....	198
圖 4-80 理想避雷器與氧化鋅避雷器之 V-I 工作特性 .....	199
圖 4-81 氧化鋅的穩定性與熱崩潰趨勢示意圖 .....	199
圖 4-82 氧化鋅避雷器之等效電路 .....	200
圖 4-83 典型油浸式變壓器絕緣能力與避雷器之電壓時間絕緣協調曲 線 .....	204
圖 4-84 暫態過電壓試驗動作時間試驗曲線圖(試樣編號#10) .....	217
圖 4-85 暫態過電壓試驗動作時間試驗曲線圖(試樣編號#11) .....	217
圖 4-86 暫態過電壓試驗動作時間試驗曲線圖(試樣編號#12) .....	218
圖 4-87 暫態過電壓試驗動作時間試驗曲線圖(試樣編號#13) .....	218
圖 4-88 暫態過電壓試驗動作時間試驗曲線圖(試樣編號#14) .....	218
圖 4-89 密封型桿上變壓器系統模型 .....	221
圖 4-90 配電系統 11.4kV 電源及其等效阻抗 ATP 模型 .....	221
圖 4-91 變壓器內部等效電路模型 .....	222
圖 4-92 避雷器參數設定及特性曲線(COOPER 廠家) .....	223
圖 4-93 避雷器參數設定及特性曲線(JK 廠家) .....	223

圖 4-94 雷擊電流 8/20 $\mu$ s 模型建立及參數設定 .....	224
圖 4-95 雷擊電流 8/20 $\mu$ s 模擬波形 .....	224
圖 4-96 負載等效阻抗模型 .....	225
圖 4-97 雷電流注入電源一次側時，一次側端電壓波形(CP 廠家) .....	226
圖 4-98 雷電流注入電源一次側時，一次側端電流波形(CP 廠家) .....	226
圖 4-99 雷電流注入電源一次側時，一次側線圈電壓波形(CP 廠家) ...	227
圖 4-100 雷電流注入電源一次側時，限流熔絲電流波形(CP 廠家) .....	227
圖 4-101 雷電流注入電源一次側時，避雷器電流波形(CP 廠家) .....	227
圖 4-102 雷電流注入電源一次側時，二次側端電壓波形(CP 廠家) .....	227
圖 4-103 雷電流注入電源一次側時，二次側端電流波形(CP 廠家) .....	227
圖 4-104 雷電流注入電源一次側時，二次側線圈電壓波形(CP 廠家) ...	227
圖 4-105 雷電流注入電源一次側時，一次側端電壓波形(JK 廠家) .....	228
圖 4-106 雷電流注入電源一次側時，一次側端電流波形(JK 廠家) .....	228
圖 4-107 雷電流注入電源一次側時，一次側線圈電壓波形(JK 廠家) ...	229
圖 4-108 雷電流注入電源一次側時，限流熔絲電流波形(JK 廠家) .....	229
圖 4-109 雷電流注入電源一次側時，避雷器電流波形(JK 廠家) .....	229
圖 4-110 雷電流注入電源一次側時，二次側端電壓波形(JK 廠家) .....	229
圖 4-111 雷電流注入電源一次側時，二次側端電流波形(JK 廠家) .....	229
圖 4-112 雷電流注入電源一次側時，二次側線圈電壓波形(JK 廠家) ...	229
圖 4-113 雷電流注入電源一次側時，一次側端電壓波形(避雷器裝設於電源 端) .....	230
圖 4-114 雷電流注入電源一次側時，一次側端電流波形(避雷器裝設於電源 端) .....	230
圖 4-115 雷電流注入電源一次側時，避雷器電流波形(避雷器裝設於電源 端) .....	231
圖 4-116 雷電流注入電源一次側時，二次側端電壓波形(避雷器裝設於電源 端) .....	231
圖 4-117 雷電流注入電源一次側時，二次側端電流波形(避雷器裝設於電源 端) .....	231
圖 4-118 雷電流注入電源一次側時，一次側端電壓波形(避雷器裝設於限流 熔絲) .....	232

圖 4-119 雷電流注入電源一次側時，一次側端電流波形(避雷器裝設於限流熔絲) .....	232
圖 4-120 雷電流注入電源一次側時，限流熔絲電流波形(避雷器裝設於限流熔絲) .....	233
圖 4-121 雷電流注入電源一次側時，避雷器電流波形(避雷器裝設於限流熔絲) .....	233
圖 4-122 雷電流注入電源一次側時，二次側端電壓波形(避雷器裝設於限流熔絲) .....	233
圖 4-123 雷電流注入電源一次側時，二次側端電流波形(避雷器裝設於限流熔絲) .....	233
圖 5-1 地下配電線路故障指示器裝置位置參考圖 .....	238
圖 5-2 線路故障指示器吊卦於三相高壓架空相線上裝置情形(a) .....	238
圖 5-3 線路故障指示器吊卦於三相高壓架空相線上裝置情形(b) .....	239
圖 5-4 架空線路裝設故障指示器情形(a) .....	239
圖 5-5 架空線路裝設故障指示器情形(b) .....	240
圖 5-6 熔絲肘型端頭 .....	246
圖 5-7 熔絲肘型端頭故障(電壓)指示器 .....	247
圖 6-1 傳統主保護與後備保護設備之定義(依安裝位置而定) .....	257
圖 6-2 傳統的電力系統保護協調圖 .....	258
圖 6-3 熔絲鏈與環境溫度之關係 .....	259
圖 6-4 透過時間-電流曲線進行熔絲協調方式 .....	260
圖 6-5 熔絲鏈之時間-電流曲線 .....	260
圖 6-6 TR01-6A, C.L.F.FUSE 20C, TR25kVA 保護協調曲線 .....	263
圖 6-7 TR01-12A, C.L.F.FUSE 40C, TR50kVA 保護協調曲線 .....	264
圖 6-8 TR01-24A, C.L.F.FUSE 40C, TR100kVA 保護協調曲線 .....	264
圖 6-9 案例一饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖 .....	265
圖 6-10 案例一 FCB/分歧線熔絲/25kVA 變壓器協調曲線計算 .....	270
圖 6-11 案例一 FCB/分歧線熔絲/50kVA 變壓器協調曲線計算 .....	271
圖 6-12 案例一 FCB/分歧線熔絲/100kVA 變壓器協調曲線計算 .....	272
圖 6-13 案例二饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖 .....	273
圖 6-14 案例二 FCB/分歧線熔絲/25kVA 變壓器協調曲線計算 .....	276

圖 6-15 案例二 FCB/分歧線熔絲/50kVA 變壓器協調曲線計算 .....	277
圖 6-16 案例三饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖 .....	278
圖 6-17 案例三 FCB/分歧線熔絲/25kVA 變壓器協調曲線計算 .....	281
圖 6-18 案例三 FCB/分歧線熔絲/50kVA 變壓器協調曲線計算 .....	282
圖 6-19 案例四饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖 .....	283
圖 6-20 案例四 FCB/分歧線熔絲/25kVA 變壓器協調曲線計算 .....	284
圖 6-21 案例四 FCB/分歧線熔絲/50kVA 變壓器協調曲線計算 .....	287
圖 6-22 案例四 FCB/分歧線熔絲/100kVA 變壓器協調曲線計算 .....	288
圖 6-23 案例五饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖 .....	289
圖 6-24 案例五 FCB/分歧線熔絲/25kVA 變壓器協調曲線計算 .....	292
圖 6-25 案例五 FCB/分歧線熔絲/50kVA 變壓器協調曲線計算 .....	293
圖 6-26 案例五 FCB/分歧線熔絲/100kVA 變壓器協調曲線計算 .....	294

## 表目錄

表 1-1 變壓器常見的故障性質與其不良案例 .....	3
表 2-1 密封型變壓器故障統計表 .....	9
表 2-2 民國 100 年密封型桿上變壓器廠牌別故障件數統計表 .....	19
表 3-1 襯墊試驗項目、試驗方法及合格標準 .....	38
表 3-2 絕緣油試驗項目及標準 .....	40
表 3-3 耐電壓試驗及衝擊電壓試驗標準 .....	46
表 3-4 磁滯損與渦流損的結構比例 .....	55
表 3-5 一次套管井之特性試驗項目及試驗標準值 .....	84
表 3-6 二次套管之特性試驗項目及試驗標準值(原材規表 9) .....	85
表 4-1 文獻公式與有限元素法之比較 .....	123
表 4-2 改變 S 時 P 與 G 點的電場大小 .....	123
表 4-3 改變 R 時 P 與 G 點的電場大小 .....	123
表 4-4 高壓套管與各帶電體元件間的距離 .....	128
表 4-5 分析高壓套管時所用的參數與電源 .....	129
表 4-6 改變球型導體半徑時油中最大電場強度變化 .....	135
表 4-7 改變高壓引線中心與桶壁距離的電場強度變化 .....	136
表 4-8(a) 正常油位時絕緣油與桶內空氣的電場強度值 .....	140
表 4-8(b) 缺油時絕緣油與桶內空氣的電場強度值 .....	140
表 4-9 高壓套管電壓升高時油與空氣中電場強度值 .....	141
表 4-10 二次套管與各帶電體元件間的距離 .....	145
表 4-11 分析二次套管時所用的參數與電源 .....	146
表 4-12 二次套管與高壓套管間距離與電場強度的關係 .....	149
表 4-13 熔絲與各帶電體元件間的距離 .....	151
表 4-14 分析熔絲時所用的參數與電源 .....	151
表 4-15 熔絲電場強度與夾件距離的關係 .....	153
表 4-16 熔絲電壓升高時油中電場強度值 .....	153
表 4-17 避雷器與各帶電體元件間距離 .....	157
表 4-18 分析避雷器時所用的參數與電源 .....	157
表 4-19 避雷器電場強度與熔絲距離的關係 .....	158
表 4-20 避雷器電壓升高時油中電場強度值 .....	159

表 4-21 油中接線端最大電場與絕緣油基準比較 .....	159
表 4-22 油中引線最大電場與絕緣油基準比較 .....	159
表 4-23 高壓套管分析案例 .....	160
表 4-24 正常油位時絕緣油與桶內空氣的電場強度值比較 .....	160
表 4-25 缺油時絕緣油與桶內空氣的電場強度值比較 .....	161
表 4-26 改變熔絲距離電場強度與絕緣油基準比較 .....	163
表 4-27 改變避雷器和熔絲距離電場強度與絕緣油基準比較 .....	164
表 4-28 ANSI C37.41-2008 Table 7 所訂之遮斷開關啟斷試驗參數 .....	173
表 4-29 IEEE Std. C37.06 之 TRV 規定 .....	176
表 4-30 IEC62271-100 之 TRV 規定 .....	176
表 4-31 由表 4-28 參數所計算之 TRV 參數 .....	177
表 4-32 IEEE Std. C37.41-2008 之油浸式驅弧型熔絲啟斷試驗參數 .....	178
表 4-33 依據 IEC 60282-2 Table 6 所訂之遮斷開關啟斷試驗參數 .....	179
表 4-34 IEEE Std. C37.010-1999 油斷路器組件溫度限制及載流因數 .....	181
表 4-35 屋內設備之衝擊電壓及交流耐壓 .....	184
表 4-36 啟斷能力測試參數 .....	186
表 4-37 無線電干擾電壓 .....	187
表 4-38 台電公司 2006 年至 2010 年密封型變壓器故障統計表 .....	197
表 4-39 避雷器之額定與對應之 MCOV .....	201
表 4-40 避雷器額定絕緣耐受電壓 .....	201
表 4-41 油浸式設備 BIL 與 BSL、CWW、FOW 之關係 .....	202
表 4-42 避雷器額定雷擊脈衝電流 .....	203
表 4-43 設備建議保護裕度(IEEE Std. C62.22-2009) .....	205
表 4-44 廠家實測放電電壓-時間特性試驗(試樣編號#01、#02、#03) .....	206
表 4-45 廠家放電電壓-電流測試結果(試樣編號#01、#02、#03) .....	206
表 4-46 額定電壓 9kV 絕緣耐壓試驗 .....	207
表 4-47 廠家脈衝電壓測試結果 .....	207
表 4-48 台電 C002 規定-放電電壓電流 .....	207
表 4-49 避雷器前波(波頭)與放電電壓-電流保護特性 .....	208
表 4-50 避雷器額定波形 $4 \times 10 \mu s$ 最小電流峰值 .....	209
表 4-51 高電流-短時間試驗(試樣編號#04、#05、#06) .....	209

表 4-52 電阻性電流分量值降低數據(試樣編號#04、#05、#06) .....	209
表 4-53 低電流-長時間試驗最小電流值 .....	210
表 4-54 低電流-長時間試驗(試樣編號#07、#08、#09) .....	211
表 4-55 電阻性電流分量值降低數據(試樣編號#07、#08、#09) .....	211
表 4-56 試驗前、後之 10kA 放電電壓變化值不超過測量值的 $\pm 10\%$ .....	211
表 4-57 無線電干擾電壓試驗結果 .....	212
表 4-58 暫態過電壓試驗(0.01~0.1 秒) .....	214
表 4-59 暫態過電壓試驗(0.01~0.1 秒)後施加恢復電壓電阻性電流分量 值 .....	214
表 4-60 暫態過電壓試驗(0.11~1.0 秒) .....	214
表 4-61 暫態過電壓試驗(0.11~1.0 秒)後施加恢復電壓電阻性電流分量 值 .....	215
表 4-62 暫態過電壓試驗(10.1~100 秒) .....	215
表 4-63 暫態過電壓試驗(10.1~100 秒)後施加恢復電壓電阻性電流分量 值 .....	215
表 4-64 暫態過電壓試驗(101~1000 秒) .....	216
表 4-65 暫態過電壓試驗(101~1000 秒)後施加恢復電壓電阻性電流分量 值 .....	216
表 4-66 暫態過電壓試驗(1001~10000 秒) .....	216
表 4-67 暫態過電壓試驗(1001~10000 秒)後施加恢復電壓電阻性電流分量 值 .....	217
表 4-68 責務電壓試驗數據(環境溫度：23℃) .....	220
表 4-69 配電系統 11.4kV 電源資料 .....	221
表 4-70 變壓器(6.9kV/240V)資料 .....	222
表 4-71 避雷器之電壓-電流特性曲線設定值(CP 廠家) .....	223
表 4-72 避雷器之電壓-電流特性曲線設定值(JK 廠家) .....	223
表 4-73 負載等效阻抗資料 .....	225
表 4-74 雷電流注入電源端一次側分析(CP 廠家) .....	226
表 4-75 雷電流注入電源端一次側分析(JK 廠家) .....	228
表 4-76 避雷器裝設於電源端一次側雷擊突波 .....	230
表 4-77 避雷器裝設於限流熔絲負載端雷擊突波 .....	232

表 6-1 案例一變電所與主幹線/分歧線線路相關資料 .....	266
表 6-2 案例一變電所保護設備設定參數/分歧線保護設備-熔絲鏈開關型式 .....	266
表 6-3 案例一密封型桿上變壓器容量 .....	267
表 6-4 案例一各線段阻抗標么值 .....	268
表 6-5 案例一各故障點之故障電流 .....	269
表 6-6 案例二變電所與主幹線/分歧線線路相關資料 .....	273
表 6-7 案例二變電所保護設備設定參數/分歧線保護設備-熔絲鏈開關型式 .....	274
表 6-8 案例二密封型桿上變壓器容量 .....	274
表 6-9 案例二各線段阻抗標么值 .....	275
表 6-10 案例二各故障點之故障電流 .....	275
表 6-11 案例三變電所與主幹線/分歧線線路相關資料 .....	278
表 6-12 案例三變電所保護設備設定參數/分歧線保護設備-熔絲鏈開關型式 .....	279
表 6-13 案例三密封型桿上變壓器容量 .....	279
表 6-14 案例三各線段阻抗標么值 .....	280
表 6-15 案例三各故障點之故障電流 .....	280
表 6-16 案例四變電所與主幹線/分歧線線路相關資料 .....	284
表 6-17 案例四變電所保護設備設定參數/分歧線保護設備-熔絲鏈開關型式 .....	284
表 6-18 案例四密封型桿上變壓器容量 .....	285
表 6-19 案例四各線段阻抗標么值 .....	285
表 6-20 案例四各故障點之故障電流 .....	286
表 6-21 案例五變電所與主幹線/分歧線線路相關資料 .....	290
表 6-22 案例五變電所保護設備設定參數/分歧線保護設備-熔絲鏈開關型式 .....	290
表 6-23 案例五密封型桿上變壓器容量 .....	291
表 6-24 案例五各線段阻抗標么值 .....	291
表 6-25 案例五各故障點之故障電流 .....	292
表 7-1 綜合建議 C035(99-07)材料規範條文 .....	299

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景

台電公司業務處為供電低壓用戶，架空線路上會裝設桿上變壓器(分為普通型、改良型、密封型)，地下線路會裝設亭置式變壓器或浸水式變壓器，以上通稱為配電變壓器。配電變壓器從材料規範、製造、品質管制、出廠試驗、驗收、交貨、儲存、施工及維護等各方面均應嚴格管控，使故障率降至最低點。

台電配電系統於民國 99 年發生數起較嚴重之密封型桿上變壓器事故，因此，期藉由本計畫之執行，建立密封型桿上變壓器材料規範及製程管理程序，提高變壓器品質以降低故障率，以及改善變壓器保護裝置效能並研提故障指示器配置之建議事項，提升供電品質及防範事故再發生。研究內容包括：由桿上變壓器之設計面、製程面、檢驗面探討提昇變壓器品質之方法，針對密封型桿上變壓器結構及其附屬配件，研議製造廠商在設計組件配置、進料管制、製程之自主管理，台電公司在中間檢查及出廠試驗等管制程序及應用技術之建議事項與執行要點，並綜合評估、檢討及驗證製程管制方案之成效；以及，研議密封型桿上變壓器、饋線配件規範、各式保護裝置之啟閉特性、被保護區域、上、下游間之饋線整體保護協調計算。

與本計畫相關之重要項目簡述如下：

### 一、密封型桿上變壓器之結構

變壓器的基本結構部件是鐵心和繞組，由他們組成變壓器的器身。為了改善散熱條件，大、中容量變壓器的器身浸入盛滿變壓器油的封閉油箱中，各繞組與外電路的連接則經絕緣套管引出。為了使變壓器安全可靠地運行，還設有儲油櫃、氣體繼電器和安全器道等附件；然而一般桿上型變壓器因容量不大，不像電力變壓器需要儲油櫃等附件，桿上變壓器外觀如圖 1-1。

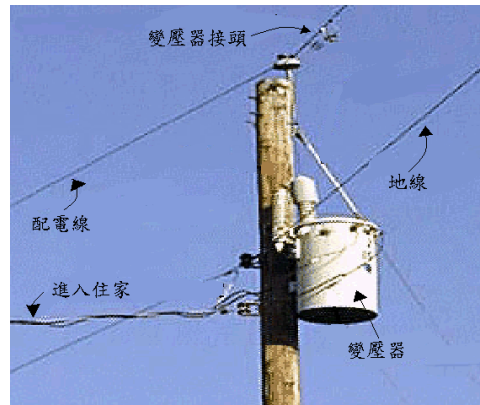


圖 1-1 桿上變壓器外觀

- (一) 鐵心：鐵心作為變壓器的磁路；又作為變壓器的機械骨架。為了提高導磁性能、減少交變磁通在鐵心中引起的損耗，變壓器的鐵心都由矽鋼片疊裝而成。大容量變壓器多採用高磁導率、低損耗的冷軋矽鋼片。矽鋼片是含有高達 0.8%~4.8% 矽的電工矽鋼，經熱、冷軋製成。一般厚度在 1mm 以下，故稱薄板。廣義而言，矽鋼片屬板材類，由於它的特殊用途而獨立一分支。電工用矽鋼薄板具有優良的電磁性能，是電力、電訊和儀錶工業中不可缺少的重要磁性材料。
- (二) 繞組：繞組是變壓器的電路部分，用來產生磁路傳輸電能，一般分為高壓繞組和低壓繞組。接在電源上，從電源吸收電能產生磁路的繞組稱為一次繞組；與負載連接，給負載輸送電能的繞組稱為二次繞組。繞組一般是用絕緣的銅線或鋁線繞製而成。高壓繞組的匝數多、導線橫截面小；低壓繞組的匝數少、導線橫截面大，可承載較高的電流密度。為了保證變壓器能夠安全可靠的運行以及有足夠的使用壽命，對繞組的電氣性能、耐熱性能和機械強度都有一定的要求。
- (三) 油箱：油箱就是油浸式變壓器的外殼。變壓器在運行中繞組和鐵心會產生熱量，為了迅速將熱量散發到周圍空氣中，可採用冷卻岐管增加散熱面積的方法，提高散熱效能。
- (四) 變壓器油：變壓器油是一種礦物油，具有很好的絕緣與散熱性能。變壓器油的兩個作用點在變壓器繞組與繞組之間、繞組與鐵心及箱體之間起絕緣作用，可提高繞組的絕緣強度。因為變壓器油的絕緣性能比空氣好，變壓器油受熱後產生對流，對變壓器鐵心和繞組起

散熱作用；由於油受熱後的對流作用，可以將繞組及鐵心的熱量帶到油箱壁，再由油箱壁輻射逸散到空氣中。對變壓器油的要求是：介質強度高、著火點高、黏度小、水分和雜質含量盡可能少。

(五) 避雷器：避雷器作為配電變壓器的初級保護，為防止雷擊過電壓進入配電變壓器造成變壓器損壞，和室內設備因雷電壓過高造成損壞，因此藉由避雷器閥元件與大地導通，將雷擊能量釋放至大地。

## 二、變壓器常見的故障性質與其不良案例

表 1-1 為常見的變壓器故障性質與其不良案例。

表 1-1 變壓器常見的故障性質與其不良案例

故障性質	不良案例
電弧放電 (高能量放電)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 線圈短路、接地事故等造成高能量放電。</li> <li>● 過電壓油中閃絡。</li> <li>● 低壓迴路和接地電位的短路。</li> <li>● 在主磁路旁的導體(如鐵心締緊螺栓)產生循環電流回路。</li> </ul>
火花放電 (中能量放電)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 浮動電極等，如靜電環的外部，線圈導體間，導體接續外部等發生的電弧放電。</li> <li>● 絕緣材料、支持木之接著劑及線圈間隔片等發生閃絡。</li> <li>● 分接頭切換器接點間的放電。</li> </ul>
部分放電 (低能量放電)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 絕緣油注油不良之氣泡引起部分放電。</li> <li>● 絕緣紙乾燥不良含水量太高所產生的放電。</li> <li>● 油流放電。</li> </ul>
過熱(高)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 外殼、鐵心過大的循環電流。</li> <li>● 鐵心之矽鋼片層間短路。</li> <li>● 線圈的局部過熱。</li> <li>● NLTC 之端子接觸不良。</li> </ul>
過熱(中)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 匯流排間的接線部，分接頭選擇開關端子，套管導體和電纜接續部等所發生之接續不良缺陷。</li> <li>● 線圈導體絕緣破損。</li> </ul>
過熱(低)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 過負載或線圈內油道阻塞。</li> <li>● 鐵心漏磁磁通升高締緊金屬的渦電流。</li> </ul>

### 三、變壓器發生損壞事故之流程

由於變壓器內部平時均裝載著大量的絕緣油，其成分大多為石油精煉的礦物油或合成油，當變壓器發生故障時，內部所產生的電弧能量，絕大部份會傳遞給絕緣油，此時部份絕緣油因受熱分解而產生氫氣、乙炔、乙烯等可燃性氣體，這些高溫可燃性氣體亦會吸收電弧能量而體積繼續膨脹，因受變壓器外殼所限制，使得變壓器內部壓力急速升高。當高溫氣體來不及由釋壓裝置宣洩，使得內部壓力超過外殼所能承受之壓力時，將造成外殼爆裂，而這些高溫的可燃性氣體與空氣接觸，隨即成為巨大火球，此一火災爆裂型態稱之為沸騰液體膨脹蒸氣爆裂(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)。變壓器發生損壞事故流程如圖1-2所示。

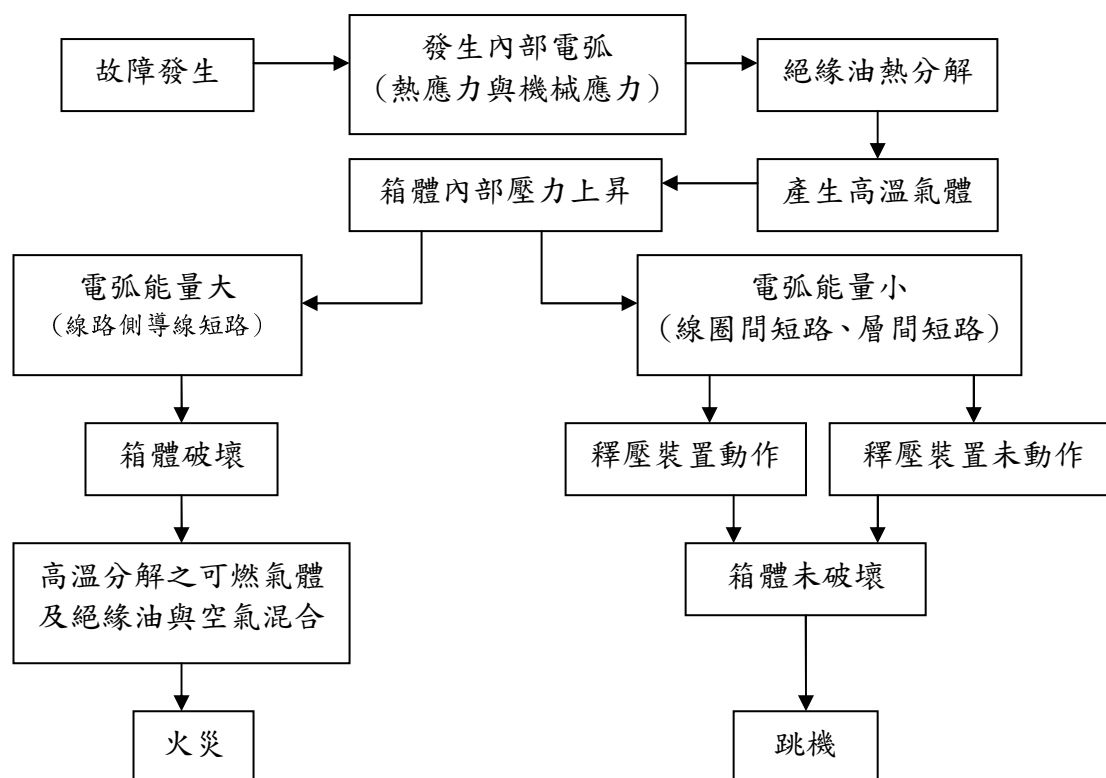


圖 1-2 變壓器發生損壞事故流程

### 四、台電公司密封型桿上變壓器 C035 材料標準(2007 年 7 月編印)

本規範適用於三相四線式11.4/6.6kV多重接地之架空配電線路，屋外桿上裝置之密封型桿上變壓器。額定頻率為60 Hz，公稱電壓為6.9 kV，分接頭電壓為7.2、6.9、6.6、6.3 kV (採外部切換方式)，額定二次電壓為240/120V，額定輸出容量為25、50、100kVA等三種。[1]

規範中同時敘述鐵心、線圈、接線、極性、外殼、一次套管井、二次套管組、壓力釋放裝置、一次分接頭切換器、絕緣油、保護設備等各元件之材料、構造與特性。

定型試驗為標準中的重點，包括負載特性、絕緣油特性、過載保護等14項。標準中分別列出詳細之試驗準則，規範廠商自行品管試驗報告項目。在附錄中，列出比價、台電驗收方式、罰款、及保固內容。

## 五、線路故障指示器(Fault Indicator)

裝置於線路上，用以顯示線路電壓、電流是否過載情形，本計畫將檢討裝設地點、材料，及其對人員施工維護之工安影響因素。

## 六、保護電驛系統

保護電驛系統是由一個包括比壓器、比流器、保護電驛及斷路器四大部分組成之系統，簡單示意如圖1-3所示。

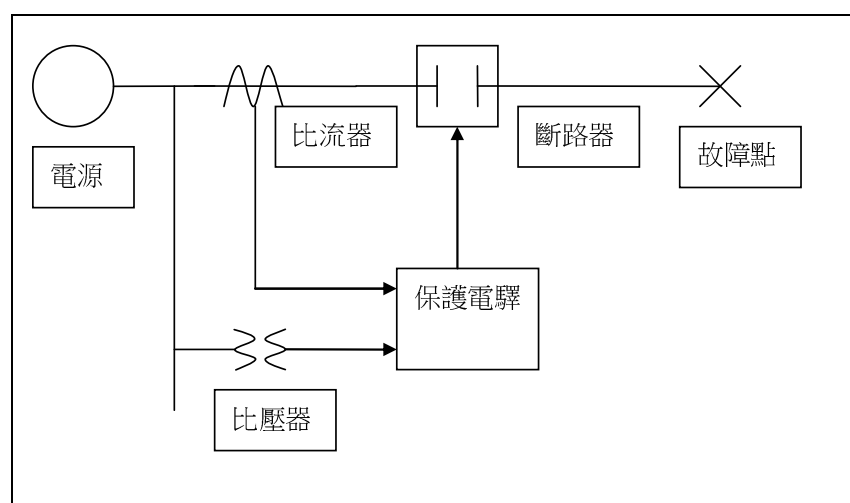


圖 1-3 保護電驛系統示意圖

### (一) 過電流保護電驛之基本原理：

當電力網路系統發生故障時，其故障點週遭區域的相關電壓、電流會出現極大的變化，當故障點愈近電源，則出現的故障電流就愈大；反之，離故障點愈遠，則出現的故障電流就愈小；過電流保護電驛即是利用此一現象完成輸配電路的保護。過電流保護電驛依其動作時間，分為延時過電流保護電驛、瞬時過電流保護電驛；亦可依故障電流方向決定動作與否，分為方向性過電流保護電驛、非方向性過電流保護電驛。

通常延時過電流保護電驛是感應圓盤型，應用基本機電原理的電磁感應設計，如同瓦時計一樣，利用磁通量的變化來改變原盤力矩，使過電流保護電驛動作；而瞬時過電流保護電驛是感應圓筒型。電流保護電驛動作時間曲線之方程式如式(1-1)所示：

$$t(I) = A \times TM / (I^P - 1) \quad (1-1)$$

其中  $t(I)$  為過電流保護電驛在電流  $I$  時的反應時間； $TM$  為時間標置(time dial)值； $P$  和  $A$  為常數值，依不同型式有不同值：Normal inverse 時  $A=0.14$ ,  $P=0.02$ ，Very inverse 時  $A=13.5$ ,  $P=1$ ；Extremely inverse 時  $A=80$ ,  $P=2$ 。

延時過電流保護電驛的基本設定為電流分接頭(tap)和時間標置(time dial)，當故障電流超過保護電驛的 tap 值時，保護電驛的感應圓盤開始轉動，若故障電流持續時間超過時間標置值，則保護電驛會因為可動接點接觸到固定接點而輸出斷路器跳脫訊號。

瞬時過電流保護電驛的基本設定為決定近距離最大故障電流值，因為其動作速度未經刻意延時，平均在 1.5 cycles 以內，通常為重度電流故障情況下，為了避免延時過電流保護電驛因受保護協調的影響，跳脫過慢所採取的保護措施。

## (二) 保護協調(Protective Coordination)

保護區間的用意，即在於將電力災害影響範圍限縮在一處，防止災害持續擴大，避免影響其他用戶。

當配電系統發生事故時，最接近故障點之保護電驛為主保護電驛(Main protection relay)，而其他相關電驛為後衛保護電驛(Back-up protection relay)。根據 IEEE 對保護協調之後衛保護系統之定義為：「它是一套與主保護系統分開並行而獨立運作的保護系統，其任務為當主保護系統失靈(如：電驛故障、斷路器失靈等)或暫時無法提供保護時(如：電驛檢測而暫時閉鎖等)，有能力擔任電力系統保護功能之系統」。

在本計畫中，將針對二次變電所饋線電源側、主幹線分段(隔離)開關、分歧線熔絲鏈開關、密封型桿上變壓器之遮斷開關、全域型限流熔絲，以及密封型桿上變壓器二次側電路，檢討及計算饋線上、下游之保護協調關係。

## 1.2 研究目的

本研究期能達成下列的研究目的：

- 一、建立更完整之密封型桿上變壓器 C035 材料規範及製程管理程序，以降低故障率。包括：
  - (一) 絕緣油、絕緣紙規範
  - (二) 繞組短路、層間短路之檢測方法
  - (三) 鐵心磁通密度、渦流損檢測法
  - (四) 高低壓套管位置之規範及檢測方法
  - (五) 其他附屬配件於工廠及現場執行部分放電試驗檢測規範
  - (六) 變壓器製造之中間檢查及出廠試驗規範
- 二、進行桿上變壓器附屬配件結構之模擬及評估，以探討放置位置對電場分佈之影響，並分析斷路器內置開關、熔絲、避雷器等設備動作特性與性能。
- 三、改善變壓器保護裝置之效能，並研提變壓器故障指示器裝設方式、地點、材料之建議事項，提升供電品質。
- 四、檢討及計算饋線上、下游之保護協調關係。

## 1.3 研究內容

本計畫的研究內容如下(參考附錄一甘梯圖)：

- 一、蒐集國內外密封型桿上變壓器標準與文獻，檢討密封型桿上變壓器故障類型、數量，分析肇因並統計故障率。
- 二、檢討台電公司 C035 材料規範完整性，並提出增(修)定材料規範的建議事項。
  - (一) 擬定箱體氣密及入油規範。
  - (二) 擬定絕緣紙材質規範及管制方案。
  - (三) 探討密封型桿上變壓器一、二次側繞組短路及繞組層(匝)間 短路之檢測試驗方法及準則。
  - (四) 研擬鐵心磁通密度、渦流損於工廠試驗之檢測方法。
  - (五) 依據現行高低壓套管裝置規格及變壓器油面高度，探討變壓器套管沿面距離與閃絡關聯性，並依饋線保護結構，檢討套管故障檢測靈敏度，據以提出套管弱點之規範建議事項及檢測方法。

(六) 探討密封型桿上變壓器高壓套管井等附屬配件耐候性，及於工廠及現場執行部分放電試驗檢測方法及其準則。

(七) 研議變壓器中間檢查之項目、執行時機、要點及成效評估。

三、探討密封型桿上變壓器附屬配件結構、開關設備動作特性及保護協調。

(一) 以有限元素模擬軟體依均勻及非均勻場分析檢討高壓套管井、遮斷開關、全域型限流熔絲、避雷器等帶電體之最小間距及其適當配置處所(如置於桶內或其他處所)，並檢討釋壓裝置出口排放位置等改善建議事項。

(二) 依斷路器標準文獻檢討密封型桿上變壓器內置遮斷開關試驗報告之啟閉特性及絕緣油溫昇對啟閉性能之影響。

(三) 全域型熔絲之啟斷特性、保護區域、協調及改善建議事項。

(四) 避雷器動作特性及保護區域、協調及改善建議事項。

四、探討適用於密封型桿上變壓器之故障指示器型式，檢討裝設方式及地點(如：桿上變壓器、架空幹線、分歧線或接地線)，指示器材料(如：耐候性、安全性、使用壽命、維護週期、成本)及其對人員施工維護之工安影響因素。

五、檢討計算饋線上、下游之保護協調關係，檢討範圍含二次變電所饋線電源側、主幹線分段(隔離)開關、分歧線熔絲鏈開關、密封型桿上變壓器之遮斷開關、全域型限流熔絲，以及密封型桿上變壓器二次側電路。

## 第二章 密封型桿上變壓器故障探討

### 2.1 密封型桿上變壓器故障統計

依台電公司提供之各區處民國 95~100 年桿上變壓器故障統計表[2]，屬密封型變壓器故障部分(共 1828 件)予以統計分析如表 2-1。

表 2-1 密封型變壓器故障統計表

項次	故障可能原因	件數	佔比
1	線圈燒損	616	33.70%
2	線圈層間短路或絕緣不良	448	24.51%
3	二次接線端子不良	158	8.64%
4	限流熔絲故障	151	8.26%
5	遮斷開關故障	97	5.31%
6	一次斷線	72	3.94%
7	製造不良	68	3.72%
8	漏油	57	3.12%
9	自然劣化	44	2.41%
10	一次套管井劣化	24	1.31%
11	電壓分接頭故障	13	0.71%
12	避雷器故障	5	0.27%
13	絕緣油劣化	3	0.16%
14	外殼鏽蝕	3	0.16%
15	釋壓閥不良	2	0.11%
16	其他	67	3.67%
	合計	1828	100%

密封型桿上變壓器係由鐵心、繞組、限流熔絲、遮斷開關、避雷器、肘型端頭、套管插頭、套管井、一次分接頭切換器、二次套管組、絕緣油、外殼及相關鐵件組裝而成。其故障原因很多，且有相互牽聯的情形，一般而言，大多係因其絕緣物劣化，致使絕緣耐壓強度不足而引起。

密封型桿上變壓器絕緣物之劣化可概分為繞組的絕緣劣化及絕緣油劣化兩項。

### 一、繞組絕緣劣化

桿上變壓器經長期運轉，其絕緣材質因受熱會逐漸老化，並導致絕緣降低，所以變壓器之老化與溫度有極大之關係。繞組銅損產生之熱量，加上鐵心鐵損產生之熱量是為變壓器主要之熱源，為使變壓器維持於正常之運轉溫度，內部需有散熱措施。桿上變壓器之繞組於設計上，會將絕緣紙折成溝型之空隙作為油道，以供絕緣油循環流動於繞組內部，達到散熱之效，俾抑制變壓器之溫昇。只要變壓器之使用維持在規定周圍溫度最高 40℃ 以下，一日平均溫度 35℃ 以下，溫昇 65℃ 以下運轉，其絕緣材質應不致急速劣化，甚至可耐用二、三十年；但在裝置地點，其環境很難掌控，往往會發生許多不可預料之異常情形而引發事故。

繞組的絕緣劣化，大致有下列等原因[3-4]：

- (一) 長期超載運轉，致溫昇過大而使絕緣劣化。絕緣紙在長時間低溫的加熱下，會產生一氧化碳(CO)及二氧化碳(CO<sub>2</sub>)氣體；在高溫的加熱下，則除了一氧化碳及二氧化碳外，尚會產生氫(H<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、乙烷(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)、乙烯(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)、乙炔(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)等可燃性氣體，而使絕緣劣化。
- (二) 承受雷擊等衝擊波電壓，閃絡而使絕緣劣化。
- (三) 製造不良，如鐵心絕緣接地不良，加壓後發弧而逐漸受損。
- (四) 變壓器絕緣油如含有水分，因為絕緣紙的吸水能力比絕緣油的吸水能力強得多，絕緣紙吸收油中的水分後，會使紙絕緣劣化，因而耐壓值降低，介質損升高。
- (五) 使用之材料材質不良或繞組以外之組件材質不良，而使繞組絕緣劣化。
- (六) 通過故障電流，繞組因機電能量大而受損破壞。
- (七) 變壓器內部引線不良。

### 二、絕緣油劣化

絕緣油劣化的主要因素為水分、氧化及雜質三種，分別說明如下。

#### (一) 油中水分：

油中水分來源有二，一為油與空氣中之氧起氧化作用所產生；一

為由外部直接進入者，如水滴之進入及空氣中之濕氣凝結而成。水在油中之狀態有三種，即懸浮狀態，游離狀態及溶解狀態；其中懸浮之水分對油之絕緣耐壓影響最大，因劣化油所含水分不易沉澱，故劣化油一旦含水分，則對耐壓強度有極大之影響。

其次是溶解狀態之水分，絕緣油中能溶解少量之水分；在 25℃ 時為百萬分之 70，75℃ 時為百萬分之 360，這些溶解水對於油的絕緣耐力沒有多大害處。但如果油中含氧量大時，油的溶解水之能力就會增加，當溶解水的數量增加時，油的耐壓強度就會大大地減低。

第三是游離水，即沉在油底下的水及油中的小水點，這些水分常隨油的流動而各處循環。油吸收這些水分而成為溶解水的能力不大，因為油的溶解水之百萬分率在某種溫度下能溶解之量皆係一定的；但這些流動的小水點在變壓器外殼內流動後，遇到其他絕緣物時，如紙質、紗布等，會被這些絕緣物吸收，尤其是水分被變壓器繞組之絕緣紙吸收時，其絕緣強度就會漸漸劣化。

## (二) 油的氧化：

變壓器在高負荷運轉中，溫度很高，加上絕緣油中含有少量水分，與空氣接觸，遇有適當之觸媒劑(銅即為一種良好的觸媒劑)，會使絕緣油發生化學變化而劣化。絕緣油在比較低溫時，熱分解的主要氣體生成物為甲烷( $\text{CH}_4$ )，但在高溫時，尚會產生氫( $\text{H}_2$ )。若絕緣油中有發生電弧，生成的氣體則有氫( $\text{H}_2$ )、乙炔( $\text{C}_2\text{H}_2$ )、乙烯( $\text{C}_2\text{H}_4$ )、甲烷( $\text{CH}_4$ )等；若是部分放電所引起時，則主要之生成氣體為氫( $\text{H}_2$ )及乙炔( $\text{C}_2\text{H}_2$ )。以上皆為可燃性氣體，會使絕緣油因而劣化。

變壓器雖然有外殼、套管井及二次套管等予以密封，然絕緣油中仍含有少量之水分及空氣，絕緣油與空氣長期接觸，會發生氧化作用，且此氧化作用，隨油溫之升高而劇烈增加；溫度每增高 10℃，氧化作用即增加一倍。油氧化後，生成油垢(sludge)，其為一種瀝青狀物質，初期溶解於油內，但飽和後沉澱而成為固體狀。油垢會幫助絕緣物吸收水分，阻礙油道之油流，降低冷卻效果，進而降低絕緣強度。

## (三) 油中的雜質：

此處之雜質專指油中不溶解的固體物而言，其來源不一，有由絕緣材料本身脫落者，有經氧化及碳化作用所生者，更有因工作時不小

心由外部侵入者。最普通之雜質有矽、飛灰、氧化鐵、金屬粉末、賽璐珞(celluloid)纖維、泥土、亞麻、紗等；這些雜質與水分互相作用常會產生不良後果。

## 2.2 密封型桿上變壓器故障肇因分析

茲針對表 2-1 變壓器故障統計表所列故障類型、數量，分析其肇因，檢討如下。

### 一、線圈繞損 616 件，佔比 33.70%

參考台電業務處提供之油浸式桿上變壓器事故調查檢討表，線圈燒損大致可歸納為下列原因：

- (一) 變壓器內部受潮
- (二) 絕緣老化或不良
- (三) 長期過載運轉
- (四) 線圈繞製不良
- (五) 絕緣油內有雜物

本研究團隊曾於民國 101 年 3 月 14 日拜訪台電北南區處檢修課(工作會議與參訪紀錄如附錄二)，經任抽 8 具送檢之密封型桿上變壓器(同成 100kVA，民國 92 年 5 月製；峻鼎 25kVA 二台，均為 91 年 11 月製造；永恆 25kVA，87 年 3 月製造；同成 25kVA，89 年 3 月製造；新五洲 2kKVA，91 年 6 月製造；長興 25kVA，87 年 4 月製造；益志(容量及製造日期遺漏登記))，打開頂蓋觀察結果，發現絕緣油大部分均有程度不同之變黑情形，研判變壓器經長期運轉，尤其是高(超)負載高溫運轉，加上如果有滲水情形，極易加速劣化而引起故障。依據美國 GE 公司配電系統技術講義(Power Distribution Systems Course) [5]提示，大多數配電變壓器之故障係起因於匝間絕緣不良之故障(turn-to-turn failure)；一開始係屬高阻抗故障，其故障電流很小，再持續演變即成為低阻抗大故障電流之故障。因此，對絕緣劣化問題應加強防範，除加強箱體氣密措施，以防絕緣油因滲水而劣化，甚而聯帶使得繞組絕緣隨之劣化外，防止變壓器高溫運轉亦為一件很重要的課題。

台電公司為了提高配電變壓器之利用率，大都冀望將變壓器於尖峰負載期間，保持接近滿載或短時間超載之情形下運轉，但是用戶負載之變化

很複雜，尤其新增設案件或用戶負載之成長，如未能適時配合辦理變壓器容量變更或負載分割等措施，極有可能使變壓器陷於長期高(超)負載的狀態下，形成高溫運轉而使變壓器絕緣劣化。應盡量避免變壓器長期高(超)負載運轉，以減少變壓器之事故。

## 二、線圈層間短路或絕緣不良 448 件，佔比 24.51%

本項故障之原因與上項線圈燒損之故障原因相同，本項故障應屬線圈燒損之前期故障(高阻抗低故障電流階段)，有關防範對策與上項故障之對策相同(檢討負載管理制度)。

## 三、二次接線端子不良(含被覆橡膠及襯墊不良) 158 件，佔比 8.64%

本研究團隊於台電台北南區處檢修課發現有因二次套管組之絕緣防水被覆橡膠及襯墊老化破裂，導致變壓器漏油及滲水。因為密封型桿上變壓器使用至今時間不長，此類故障係因其材料材質不良所致，有待改善，將於變壓器箱體之氣密部分一併檢討。

## 四、限流熔絲故障 151 件，佔比 8.26%

限流熔絲熔斷係正常之保護動作，因裝設在變壓器內之絕緣油中，事故處理時，無法於事故現場予以更換，必須予以拆回送檢，所以被列入變壓器故障件數中。由於統計表僅扼要註明限流熔絲故障，尚無法檢討係屬外部故障或內部故障，以及是否屬正常之保護。

目前不論何種原因引起之熔絲熔斷事故均需吊換變壓器，將事故變壓器送至檢修單位檢修；對於外線工作隊維護人員而言，確實有工作負擔上之困擾。

此外，如果故障發生於限流熔絲與套管井之間的引接線，或肘型端頭、套管接頭及套管井三者之組合體，其裝設位置均位於全域型限流熔絲之電源側，處在其保護區域之外。因此，變壓器由配電線路之分歧線引接供電者，會引起分歧線保護裝置之動作而停電；變壓器由配電線路之幹線引接供電者，則會引起饋線斷路器之動作而停電。無論分歧線或饋線之停電，以今日台電用戶對連續不停供電之品質要求，較大範圍之停電均屬不當。

為改善以上之缺陷，目前市面已有將限流熔絲與可切肘型端頭合併組

裝成一體之附熔絲之可切肘型端頭(Fused Load break Elbow Connector)製品[6]，可將原裝置於變壓器內部相同規格之全域型限流熔絲移裝而包封於附熔絲可切肘型端頭之內部，等於將原有全域型限流熔絲改裝於變壓器殼體之外部，熔絲可以隨時更換，所以事故處理時，經檢驗確認現場更換熔絲即可恢復供電之案件，在現場更換熔絲即可，不必吊換變壓器；如此，可減輕相當程度之維修工作負擔，並可擴大限流熔絲之保護區域，提高供電可靠性。

經檢討，採用附熔絲之可切肘型端頭之益處如下：

- (一) 除可保留原有之保護功能外，尚可擴大限流熔絲之保護區域，減少停電範圍，提高供電可靠性。
- (二) 減輕維護運轉工作之負擔，部分變壓器事故在現場經檢驗確認更換限流熔絲即可恢復供電。
- (三) 限流熔絲從變壓器內部移裝到外部後，內部空間變大，方便內部零組件之裝設。
- (四) 裝在變壓器外部之限流熔絲為外部不帶電裝置(Deadfront Contruction)，且熔絲熔斷時不會發生巨響，不致干擾鄰居用戶。
- (五) 附熔絲可以切肘型端頭之施工與傳統之肘型端頭之施工，差異不大，尚屬簡便。
- (六) 具有兩個電壓測試點可裝置 LED 故障指示器，有熔絲熔斷顯示功能，可輔助事故處理之判斷。

密封型桿上變壓器平均現價 25kVA 每具 38,850 元，50kVA 每具 49,245 元，100kVA 每具 77,595 元。如果將其傳統型之肘型端頭及油中全域型限流熔絲改裝為附熔絲之可切型肘型端頭之裝置方式，依廠家價目表之價格比較結果，改裝前後相關組配件總價之比例約為 1:2，即 25kVA 變壓器約需增加 2,675 元，價格約需增加 6.89%；50kVA 變壓器約需增加 2,875 元，價格約需增加 5.84%；100kVA 變壓器約需增加 3,375 元，價格約需增加 4.35%。如果大量採購，其價差應可縮小。

## 五、遮斷開關故障 97 件，佔比 5.31%

高壓遮斷開關係屬一種過電流保護裝置，可保護配電變壓器之損壞性過載(Damaging overloads)以及二次側系統之故障(Secondary faults)，而且可

兼作變壓器投入或啟開之開關。該開關係將各部結構組裝成一整合體之裝置，不需使用繁雜之連接或調整，使得安裝及操作均可達到快速而便捷之功效。就變壓器之保護裝置而言，可達安全及有效之經濟運轉，如其品質可靠，確屬一種理想之裝置。

本項遮斷開關係屬一種保護裝置，本應在事故發生時，保護受其保護之設備，民國 95 年至 99 年間卻有 97 件無法在事故中發揮功能，可能有其設計上或製造上之問題，宜再與製造廠家共同檢討改善。經趨訪廠家結果，少有台電公司之不良反映，另據民國 100 年台電公司密封型桿上變壓器故障統計表亦無此項事故紀錄，可見遮斷開關之運用已漸入佳境。

#### 六、一次斷線 72 件，佔比 3.94%

在台電北南區處檢修課現場發現，早期製造之變壓器其限流熔絲至套管井間之引線係採用裸銅線連接，因絕緣不良，易發生閃絡而斷線；後經加套紙套管於裸銅線上予以改善，仍未臻理想。例如本研究團隊曾拜訪美國 COOPER 公司之台灣中壢工廠，以及參訪及傑克電機公司(參考附錄二)，發現其限流熔絲樣品所附裝之引線，發現其限流熔絲之引線，均有變壓器專用之引線。

本研究團隊已取得變壓器引線之樣品，但無法取得其依據之規範。經參考相關資料，變壓器引線之規範可歸納如下：

- (一) 本引線適用於油浸式變壓器或步級式電壓調整器。
- (二) 銅絞線應為軟銅線，其絕緣材料應為高品質之聚氯乙烯(PVC)絕緣材質，可適合於高溫變壓器油中之運轉使用，且不得潛存對變壓器油之特性有不良影響或會使變壓器油產生油垢之化學填加物。變壓器引線未浸入變壓器油或冷却液內之電壓額定為 600 伏特，溫度額定為 105°C。(附註：溫度額定符合材規 035 線圈溫昇 65°C 加最高周溫 40°C 等於 105°C 之規定。)
- (三) 導線之電阻係數應符合 ASTM B3-01 (2007)之規定[7]。
- (四) 導線絕緣之介電強度於浸入變壓器油中時，應符合 ASTM D149-09 之規定[8]，可耐受商用頻率 60Hz，最低電壓 22kV/1 分鐘。
- (五) 將引線式樣與變壓油試樣封入試驗容器內，加熱至 130°C，經 1,000 小時之加熱老化試驗後，應符合 ASTM D149-09 之規定，可耐受商

用頻率 60Hz，最低電壓 22kV/1 分鐘。另將引線彎曲成 180°，6 英吋半徑之轉彎時，以肉眼觀察不得有顯現龜裂之現象。

(六) 導線絕緣之耐油特性應符合 UL1581 class43 之規定。

因此建議參考引用具有耐油、耐壓、耐溫等性能之專用引線。

七、製造不良 68 件，佔比 3.72%

此項故障係屬廠家之管理問題，建議加強規範規定之各項試驗及中間檢查。

八、漏油 57 件，佔比 3.12%

此項故障與前列第三項故障相互關連，將於變壓器箱體之氣密部分一併檢討。

九、自然劣化 44 件，佔比 2.41%

密封型桿上變壓器使用至今，時間不長，會發生自然劣化之故障，應屬材質不良所致。因此，應加強規範規定之各項有關試驗。

十、一次套管井劣化 24 件，佔比 1.31%

一次套管井接線端帶電體沿表面放電為造成一次套管井故障原因之一。將於後續箱體氣密部分一併檢討。

十一、電壓分接頭故障 13 件，佔比 0.71%

故障統計表註明部分故障係為耐油墊圈漏油所致，有關墊圈材質之改善將於變壓器箱體之氣密部分一併檢討。其他部分則為接續不良或品質不良所致，應加強監造。

十二、避雷器故障 5 件，佔比 0.27%

依材規 C035 4.3 圖 1 變壓器內部接線圖所示[1]，如圖 2-1，避雷器之電源引線引接至全域型限流熔絲之負載端，即限流熔絲變成避雷器引線之一部分，此種接線方式於避雷器放電時，有可能使限流熔絲同時熔斷，或使熔絲受到損傷，而影響其特性及功能。惟此種接線方式遇避雷器本身發

生故障時，限流熔絲能保護部分避雷器之故障，可避免引起避雷器上游線路保護設備或變電所饋線斷路器之跳脫，造成大規模的停電。

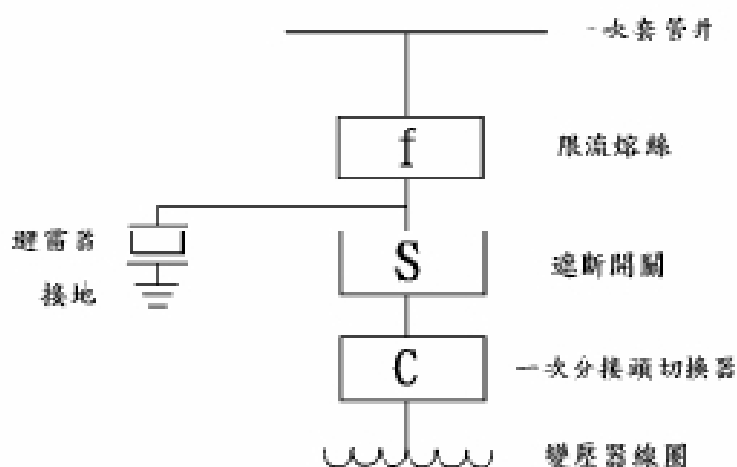


圖 2-1 材規 C035 圖 1 變壓器內部接線圖

依一般避雷器裝置原則，避雷器之引線(Lead wire)應儘量予以縮短。密封型桿上變壓器從一次側之套管井至避雷器電源端之電氣連接，中間要經過數個接頭，雷擊波由肘型端頭進入變壓器時，因反射現象，在肘型端頭處之電壓約會上升至兩倍，但繼續前進至變壓器內部之電壓會衰減；雷擊波進行中，每遇一個接頭，其繼續前進雷擊波之電壓即會遞減，抵達避雷器電源端之雷擊電壓可能已大減，影響避雷器之避雷效果。除此之外，於變壓器外殼內之侷限空間，勉強裝入避雷器、限流熔絲、遮斷開關等組件，導致接線錯縱複雜，組配件間相互緊靠，可能併發不良影響；如遇避雷器品質不良時，非但不能發揮過電壓保護作用，反而有引發故障之虞，影響運轉維護工作。因此，變壓器內部組件宜儘量予以簡化，建議採用外部不帶電(Dead Front)之避雷器裝設於變壓器外殼體外，或將油浸式避雷器改接至變壓器內部套管井接點，以提升避雷效果。

### 十三、絕緣油劣化 3 件，佔比 0.16%

絕緣油劣化主要係因水分、氧化及雜質等因素所起。故箱體氣密組件之改進及防止變壓器高(超)負載高溫運轉是兩項重點工作。

### 十四、外殼銹蝕 3 件，佔比 0.16%

密封型桿上變壓器之外殼係使用不銹鋼材質製成，一般而言，可適合裝用於鹽害地區；本項鏽蝕之詳情，台電故障統計表未註明。依經驗，暴露於大氣環境之不銹鋼變壓器經風吹雨打，附著於其表面之灰塵，堆積後有時會形成類似生鏽之外表；如予刮除後，不銹鋼本身仍屬完好，應不影響變壓器之運轉。

#### 十五、釋壓閥不良 2 件，佔比 0.11%

據區處檢修人員之敘述，係搬運途中，可能因碰撞致拉環連同帽蓋一起脫落，需予更換；非屬材質問題。

#### 十六、其他 67 件，佔比 3.67%

油量不足 1 件，桶身破 1 件，保固連絡廠商修理 2 件，颱風災害 3 件，塩害 1 件，地震 1 件，車禍 4 件，電桿倒地 2 件，未註明原因 52 件。其中油量不足、桶破裂、保固連絡廠商修理等三項共 4 件，係與廠商品管有關，宜再加強輔導。

茲再以民國 100 年度密封型桿上變壓器故障統計資料，依其故障類型，出廠年份，製造廠牌分別統計分析如下(表 2-2)，此統計分析資料可供輔導廠商之參考。

表 2-2 民國 100 年密封型桿上變壓器廠牌別故障件數統計表

序號	廠牌	件數	佔比
01	三江	63	11.29%
02	永恒	60	10.75%
03	大同	35	6.27%
04	同成	31	5.56%
05	伸昌	27	4.84%
06	日光美	27	4.84%
07	益志	23	4.12%
08	三宏	20	3.58%
09	長興	19	3.41%
10	士林	18	3.23%
11	亞力	17	3.05%
12	科德瑞	16	2.87%
13	華城	16	2.87%
14	秀森	16	2.87%
15	新剛	16	2.87%
16	峻鼎	13	2.33%
17	茂成	12	2.15%
18	啟明	12	2.15%
19	新五洲	8	1.43%
20	正忠	8	1.43%
21	其他	101	18.10%
	合計	558	100%

註：其他含佔比小於 1.00%以及廠牌不明者。

表 2-2-01 民國 100 年三江密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
8901	限流熔絲熔斷	1	8808	線圈燒損	1	8809	線圈燒損	3
9002	限流熔絲熔斷	1	8812	限流熔絲熔斷	1	8810	線圈燒損	1
9108	限流熔絲熔斷	1	8812	線圈燒損	2	8810	層間短路	2
9408	漏油	1	9308	線圈燒損	1	8810	分接頭不良	1
9603	線圈燒損	1	9410	限流熔絲熔斷	1	8810	其他(原因不明)	1
9605	線圈絕緣劣化	1	9505	分接頭燒損	1	8912	線圈絕緣劣化	1
9607	線圈燒損	1	9507	限流熔絲熔斷	2	8912	線圈燒損	2
9608	線圈絕緣劣化	1	9507	絕緣劣化	1	9003	線圈燒損	1
9608	線圈燒損	1	9511	線圈燒損	1	9009	線圈燒損	1
9608	分接頭不良	1	9511	限流熔絲熔斷	1	9511	限流熔絲熔斷	1
9610	線圈燒損	1	9511	漏油	1	9612	漏油	1
9610	其他	1	9511	絕緣劣化	1	9903	分接頭不良	1
9704	限流熔絲熔斷	1	9603	線圈燒損	1	9907	限流熔絲熔斷	1
9706	限流熔絲熔斷	1	9607	線圈燒損	1	不詳	線圈燒損	1
9711	限流熔絲熔斷	1	9607	其他(原因不明)	1	合計		18
9711	線圈層間短路	1	9609	限流熔絲熔斷	1			
9711	分接頭不良	1	9612	限流熔絲熔斷	1			
9711	其他	1	9706	線圈燒損	1			
9801	其他(原因不明)	1	9707	線圈燒損	1			
9805	線圈層間短路	1	9801	限流熔絲熔斷	1			
不詳	線圈燒損	1	9902	限流熔絲熔斷	1			
合計		21	不詳	其他(品質不良)	1			
			合計		24			

表 2-2-02 民國 100 年永恒密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
8705	漏油	1	8511	其他(原因不明)	1	8809	絕緣劣化、層間短路	2
8809	限流熔絲熔斷	1	9007	絕緣劣化	1	8810	線圈燒損	1
8809	線圈燒損	1	9205	漏油	1	8911	漏油	1
8811	限流熔絲熔斷	1	9403	線圈燒損	1	8912	線圈燒損	1
9109	限流熔絲熔斷	2	9602	限流熔絲熔斷	1	9012	線圈燒損(50KVA或100KVA不確定)	1
9111	線圈燒損	1	9602	線圈燒損	1	9701	其他	1
9206	限流熔絲熔斷	1	合計		6	9706	線圈燒損	1
9208	層間短路	2				9707	其他(原因不明)	1
9210	線圈燒損	1				9712	限流熔絲熔斷	1
9303	層間短路	1				9805	線圈燒損	2
9410	線圈燒損	1				9808	線圈燒損	1
9410	層間短路	1				9808	限流熔絲熔斷	1
9504	線圈燒損	2				合計		14
9505	限流熔絲熔斷	1						
9505	線圈燒損	1						
9506	線圈絕緣劣化	1						
9506	其他(原因不明)	1						
9508	線圈燒損	2						
9701	絕緣劣化	1						
9701	線圈燒損	1						
9702	線圈燒損	2						
9706	線圈燒損	1						
9810	漏油	1						
9811	線圈燒損	1						
9901	線圈燒損	1						
9902	層間短路	3						
9904	線圈燒損	1						
9904	絕緣劣化	1						
9906	絕緣劣化	1						
9908	限流熔絲熔斷	1						
9908	其他(原因不明)	1						
不詳	線圈燒損	2						
合計		40						

表 2-2-03 民國 100 年大同密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
8604	線圈燒損	1	8703	其他(品質不良)	1	8801	線圈燒損	1
8807	線圈燒損	1	8710	其他(塩害)	1	8808	線圈燒損	3
8808	限流熔絲熔斷	1	8802	線圈燒損	3	8903	限流熔絲熔斷	1
9106	層間短路	1	8806	線圈燒損	7	9107	層間短路	1
9508	線圈燒損	1	8806	限流熔絲熔斷	1	9308	線圈燒損	1
合計		5	8808	線圈燒損	1	9706	線圈燒損	1
			8808	絕緣劣化	1	不詳	漏油	1
			8808	其他	1	合計		9
			8810	限流熔絲熔斷	2			
			8810	線圈燒損	1			
			9201	層間短路	1			
			不詳	絕緣劣化	1			
			合計		21			

表 2-2-04 民國 100 年同成密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
8907	限流熔絲熔斷	1	8808	線圈燒損	2	9008	線圈燒損	2
8907	其他	1	8808	層間短路	1	9008	層間短路	1
8907	其他(品質不良)	1	8811	線圈燒損	3	9009	線圈燒損	1
9004	線圈燒損	1	8812	線圈燒損	1	9306	限流熔絲熔斷	1
9008	線圈燒損	1	8905	線圈燒損	1	9307	限流熔絲熔斷	1
9105	其他(原因不明)	1	9011	絕緣劣化	1	9308	層間短路	1
9108	限流熔絲熔斷	1	9101	線圈燒損	1	9311	線圈燒損	1
合計		7	9304	線圈燒損	1	9410	其他(原因不明)	1
			9306	絕緣劣化	1	合計		9
			9309	層間短路	1			
			9311	其他	1			
			9404	限流熔絲熔斷	1			
			合計		15			

表 2-2-05 民國 100 年伸昌密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
8511	限流熔絲熔斷	1	8005	層間短路	1	9910	限流熔絲熔斷	1
8805	限流熔絲熔斷	1	8801	線圈燒損	1	合計		1
8805	線圈燒損	3	8802	限流熔絲熔斷	1			
8805	漏油	1	8804	絕緣劣化	1			
8805	絕緣劣化	1	8808	限流熔絲熔斷	1			
8805	其他(品質不良)	1	9204	層間短路	1			
8808	線圈燒損	1	9304	層間短路	1			
8808	絕緣劣化或層間短路	2	9507	限流熔絲熔斷	1			
9007	其他	1	合計		8			
9008	層間短路	2						
9008	限流熔絲熔斷	1						
9008	其他(品質不良)	1						
9012	限流熔絲熔斷	1						
不詳	線圈燒損	1						
合計		18						

表 2-2-06 民國 100 年日光美密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
8704	限流熔絲熔斷	1	8802	線圈燒損	2	8808	限流熔絲熔斷	1
8808	層間短路	1	8802	絕緣劣化	1	8812	線圈燒損	3
9009	絕緣劣化	1	8802	限流熔絲熔斷	1	8812	層間短路	2
合計		3	8807	線圈燒損	2	8812	限流熔絲熔斷	1
			8807	限流熔絲熔斷	6	合計		7
			8807	層間短路	2			
			9010	線圈燒損	2			
			不詳	線圈燒損	1			
			合計		17			

表 2-2-07 民國 100 年益志密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
9111	層間短路	1	9809	線圈燒損	1			
9606	線圈燒損	1	9811	線圈燒損	1			
9910	線圈燒損	2	9901	線圈燒損	1			
9910	限流熔絲熔斷	1	9906	線圈燒損	1			
9912	線圈燒損	1	9906	層間短路	1			
10002	限流熔絲熔斷	1	9908	限流熔絲熔斷	1			
10002	其他	1	9910	線圈燒損	2			
10005	絕緣劣化	1	9910	分接頭不良	1			
不詳	線圈燒損	3	9911	限流熔絲熔斷	1			
合計		12	10004	線圈燒損	1			
			合計		11			

表 2-2-08 民國 100 年三宏密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
8706	線圈燒損	1	8704	其他	1	8808	限流熔絲熔斷	1
不詳	線圈燒損	1	8704	線圈燒損	2	9411	漏油	1
合計		2	8705	層間短路	1	合計		2
			8902	絕緣劣化	1			
			9008	其他(原因不明或品質不良)	2			
			9009	限流熔絲熔斷	1			
			9009	層間短路	2			
			9101	限流熔絲熔斷	1			
			9101	線圈燒損	1			
			9102	其他	2			
			9304	限流熔絲熔斷	1			
			9304	層間短路	1			
			合計		16			

表 2-2-09 民國 100 年長興密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
8810	限流熔絲熔斷	1	8905	線圈燒損	1	8705	自然劣化	1
8812	限流熔絲熔斷	1	8910	線圈燒損	1	8808	限流熔絲熔斷	1
9010	線圈燒損	1	合計		2	8811	線圈燒損	2
9011	層間短路	1				9008	限流熔絲熔斷	1
9708	限流熔絲熔斷	1				9008	絕緣劣化	1
9903	分接頭不良燒損	1				9011	線圈燒損	3
合計		6				9012	線圈燒損	1
						9012	漏油	1
						合計		11

表 2-2-10 民國 100 年士林密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
7909	漏油(套管破裂)	1	9002	線圈燒損	1	8201	層間短路	1
8709	漏油(其他)	1	9310	絕緣劣化	1	9306	線圈燒損	1
8801	限流熔絲熔斷	1	合計		2	合計		2
8803	絕緣劣化	4						
8808	線圈燒損	2						
8809	限流熔絲熔斷	1						
8809	線圈燒損	2						
8809	層間短路	1						
8811	限流熔絲熔斷	1						
合計		14						

表 2-2-11 民國 100 年亞力密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
8706	線圈燒損	2	8809	線圈燒損	1	8808	線圈燒損	1
8706	其他(原因不明)	1	8809	其他	1	合計		1
8709	線圈燒損	2	8811	線圈燒損	3			
8803	其他(原因不明)	1	9008	限流熔絲熔斷	1			
合計		6	9012	限流熔絲熔斷	1			
			9012	絕緣劣化	1			
			9012	線圈燒損	1			
			9102	層間短路	1			
			合計		10			

表 2-2-12 民國 100 年科德瑞密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
9104	限流熔絲熔斷	1	9201	其他	1	9007	限流熔絲熔斷	3
9106	線圈燒損	1	9404	漏油	1	9008	絕緣劣化	1
9108	線圈燒損	2	合計		2	9009	自然劣化	1
9203	絕緣劣化	1				9207	線圈燒損	1
9210	層間短路	1				9208	層間短路	1
合計		6				9208	端子不良(破裂)	1
						合計		8

表 2-2-13 民國 100 年華城密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
8710	限流熔絲熔斷	1	8606	其他(原因不明)	1	8905	限流熔絲熔斷	1
9207	線圈燒損	1	8803	層間短路	2	8905	線圈燒損	2
合計		2	8806	自然劣化	1	8905	絕緣劣化	1
			9009	層間短路	1	8911	線圈燒損	1
			9009	線圈燒損	1	合計		5
			9011	線圈燒損	1			
			9011	漏油	1			
			9210	層間短路	1			
			合計		9			

表 2-2-14 民國 100 年秀森密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
8804	限流熔絲熔斷	1	9008	層間短路	1	9111	線圈燒損	1
9008	其他(原因不明)	1	9008	二次端子不良	1	9207	限流熔絲熔斷	1
9201	限流熔絲熔斷	1	合計		2	9207	線圈燒損	1
9201	線圈燒損	2				9211	限流熔絲熔斷	1
9210	線圈燒損	1				9212	限流熔絲熔斷	1
合計		6				9212	漏油	1
						9212	線圈燒損	1
						9311	分接頭不良	1
						合計		8

表 2-2-15 民國 100 年新剛密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
8903	限流熔絲熔斷	1	8801	層間短路	1	8305	漏油	1
8905	絕緣劣化	1	8804	限流熔絲熔斷	1	9206	限流熔絲熔斷	1
8907	分接頭不良	1	8805	限流熔絲熔斷	1	合計		2
8907	層間短路	1	9106	其他	2			
8908	絕緣劣化	1	9212	層間短路	1			
9201	線圈燒損	1	9805	線圈燒損	1			
9308	其他	1	合計		7			
合計		7						

表 2-2-16 民國 100 年峻鼎密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
9009	線圈燒損	1	9008	限流熔絲熔斷	1			0
901?	線圈燒損	1	9009	其他	3			
9111	線圈燒損	1	9011	絕緣劣化	1			
9201	層間短路	1	9011	漏油	1			
9209	絕緣劣化	1	9101	線圈燒損	1			
合計		5	9101	其他	1			
			合計		8			

表 2-2-17 民國 100 年茂成密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
		0			0	9007	層間短路	1
						9009	絕緣劣化	1
						9009	線圈燒損	2
						9009	層間短路	1
						9010	線圈燒損	1
						9010	限流熔絲熔斷	1
						9104	絕緣劣化	1
						9104	漏油	1
						9106	限流熔絲熔斷	1
						不詳	線圈燒損	2
						合計		12

表 2-2-18 民國 100 年啟明密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
8805	線圈燒損	1	8809	線圈燒損	1			0
8805	層間短路	1	8810	限流熔絲熔斷	1			
8810	限流熔絲熔斷	1	8810	其他	1			
8904	限流熔絲熔斷	1	8910	限流熔絲熔斷	1			
9002	線圈燒損	1	不詳	其他	1			
9002	層間短路	1	合計		5			
9002	其他(不明原因)	1						
合計		7						

表 2-2-19 民國 100 年新五洲密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
9012	線圈燒損	1			0	9007	其他	1
9110	層間短路	1				9009	線圈燒損	2
9111	線圈燒損	1				9204	絕緣劣化	1
合計		3				9208	線圈燒損	1
						合計		5

表 2-2-20 民國 100 年正忠密封型桿上變壓器故障分佈狀況

25kVA 變壓器			50kVA 變壓器			100kVA 變壓器		
製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數	製造日期	故障原因	件數
			8712	層間短路	1			
			8903	限流熔絲熔斷	1			
			8909	線圈燒損	1			
			8912	線圈燒損	1			
			9103	絕緣劣化	1			
			9110	線圈燒損	1			
			9302	層間短路	1			
			9303	層間短路	1			
			合計		8			

## 2.3 本章結論

總體而言，油浸式變壓器之固體絕緣材料大多採用紙絕緣等纖維材料，液體絕緣之絕緣油則採用絕緣性能及散熱性能優良之礦物油，此等絕緣物受到高熱時，便會因高溫、汙染而分解產生氣體，而使絕緣劣化。除此之外，大氣中的水分及含氧物質進入變壓器也是導致絕緣劣化的重要因素。因此，抑制高溫運轉，及防止濕氣或其他含氧物質的入侵是為防止變壓器故障之重點工作。

至於限流熔絲故障與一次斷線之主要原因為限流熔絲至套管井間之引線係採用(加套紙套管)裸銅線連接，絕緣不良。限流熔絲樣品所附裝之引線，建議參考引用具有耐油、耐壓、耐溫等性能之專用引線。另可考慮採用附裝熔絲之可切負載型肘型端頭(The Fused Loadbreak Elbow Connector)裝設於變壓器外殼體外，並將全域型限流熔絲包封於肘型端頭內部，以保護整個變壓器及其二次系統之故障，且具有兩個電壓測試點，有熔絲熔斷顯示功能，可輔助事故處理之判斷。

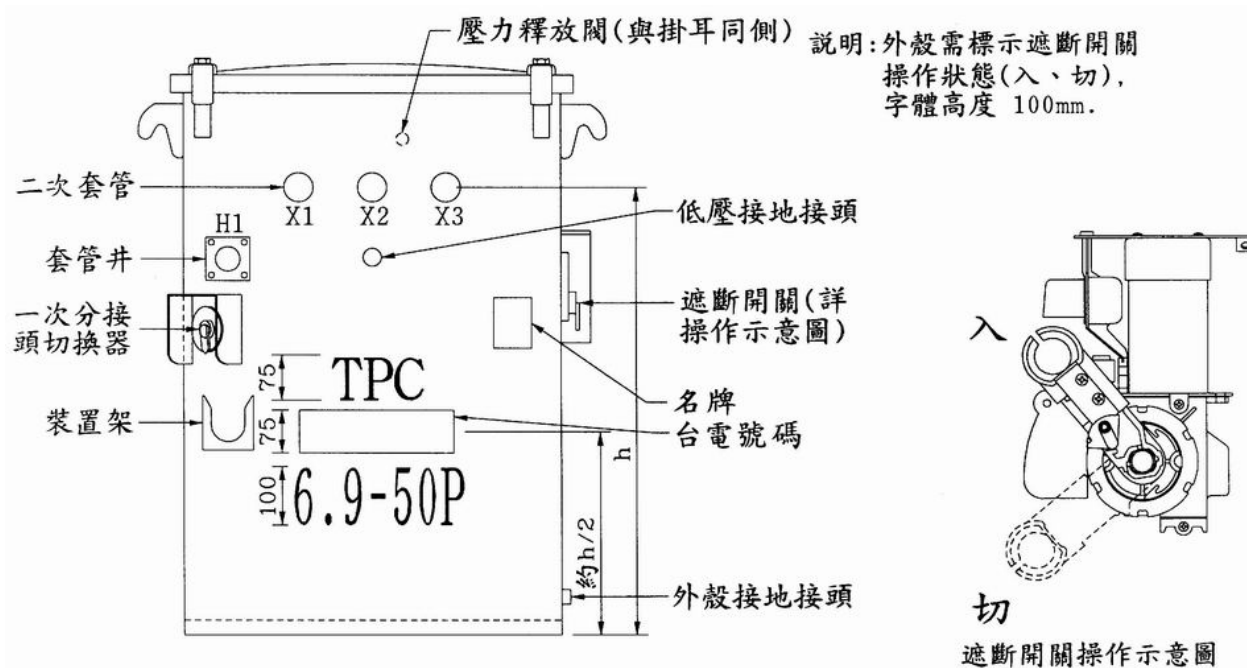
由於變壓器經長期之正常運轉後，其絕緣紙及絕緣油會自然劣化，尤其架空裝置之變壓器，經年累月曝露於氣候劇烈變化之環境下，其劣化情形更為嚴重，故尚應依台電規定之維護週期施行巡檢、點檢、及吊檢等維護工作，以確保變壓器之正常運轉，避免故障。

### 第三章 C035 材料規範探討

#### 3.1 擬定材規有關變壓器箱體氣密及入油規範

##### 一、確保箱體氣密部分：

目前使用之密封型桿上變壓器材規編號為 C035 (2007 年 07 月版) [1]。為確保箱體的氣密性，首應從構造面來考量，就變壓器外殼之主體結構，參考圖 3-1 (材規 C035 圖 5 變壓器外殼正視圖)，蓋底採用為圓形或近似圓形，外殼主體不加散熱器等前提下，其外殼各部分(含吊耳及掛耳)及所使用之鐵配件(如螺栓、墊圈等)其材質均使用不銹鋼材質(ANSI 304 或 SUS 304)，特性須符合 CNS 8499 標準，變壓器蓋上不另裝置手孔，使主體結構單純化；就減少氣密弱點方面已相當完備。至於外殼之主體、蓋及底各部分均達一定以上之厚度，厚度容許差則比照 CNS 3013 之規定辦理。而變壓器主體係以一整塊不銹鋼板焊接而成。蓋與外殼主體則有 25 公厘以上之疊合尺寸。不銹鋼外殼各部分焊接，係以鈍氣電弧熔接(氬氣焊)或電阻熔接方式處理；因此在整體結構方面亦屬週全。



防潮部分，使用符合 CNS 3550 CII-610 種類之防潮耐油襯墊或更好材質整張裁製，使變壓器外殼各部分能確保氣密防潮且不漏油，襯墊厚度在 6 公厘以上；但對耐油襯墊，未詳訂規範細節，則有待斟酌改善，至於改善方法則須符合材規 Y065 (100-11)改良套管型桿上變壓器之第 4.5.5 節襯墊規範並依試樣別，加列襯墊試驗方法及合格標準，詳如後述表 3-1 [9]。

塗裝部分，外殼在塗裝前不能有污垢、油脂及水份等情形；塗裝方式又分底漆、內部塗裝及外部塗裝等三部分。底漆係在外殼內外部先塗上 9-15 $\mu$ m 厚之防銹處理劑(Wash Primer)，塗裝時之相對濕度不高於 80%。至於內部塗裝，是在底漆處理後 2 小時內，再塗以厚 40 $\mu$ m 以上之白色耐候性環氧樹脂(EPOXY)漆。而外部塗裝，係經底漆處理後之外殼表面，再塗以 30  $\mu$ m 之耐候性 POLY-URETHANE 或 ACRYLIC 表面漆，其顏色為藍灰色。經分析結果，在塗裝部分，亦屬嚴謹，而無須更動。

一次套管井部分，套管井固定於變壓器上，須完全密接，至於套管井與變壓器箱體間密接觸應使用之襯墊材質及襯墊造形等則有加以改善之必要，以防水份侵入或絕緣油滲出，且應能完全氣密；其改善方法，襯墊如為圓形，可採用具同心圓形紋路者，以增加其密合程度。交貨時須以護套套住，其構造、尺寸及試驗標準須符合 ANSI/IEEE 386 [10]之標準；但因密封型桿上變壓器正常使用時，係固定吊掛於電桿上，因天然災害，如遇嚴重之颱風或地震，可能造成嚴重傾斜，使桿變內部油面亦受影響。為防止套管井在桶內側因缺油而降底絕緣性能，初步考慮在套管井內側可加裝固定之(向上)絕緣封套，如圖 3-2 套管井絕緣封套，及圖 3-3 套管井裝妥(向上)絕緣封套後。於正常使用時封套內亦充滿絕緣油；遇桿變傾斜時，套管井內側全部仍可充滿絕緣油，而不致降低絕緣性能。



圖 3-2 套管井絕緣封套



圖 3-3 套管井裝妥絕緣封套後

二次套管組部分，含二次套管、導電棒及二次端子組，組合後之套管組須具有絕緣及防水功能。二次套管組之絕緣防水套管組，其導體被覆及套管，採用耐熱及耐老化性優良之橡膠或更佳之材質。二次套管組組合後，依序須經外觀檢查、冷熱試驗、老化試驗後合格後再作密閉試驗；密閉試驗是將套管組浸入 2.5 公尺以上深水中，經 120 小時後，無水份滲透現象。因此在二次套管組部分，在氣密方面，亦考量週全；但從以往變壓器事故案例發現，亦有少數製造廠家之成品，在安裝於電桿上後，因導體被覆橡膠品質欠佳，經日曬雨淋後逐漸劣化，導致龜裂使銅導體外露，如圖 3-4 (變壓器內之繞組已燒損，絕緣油已劣化變色)，及圖 3-5 (變壓器內之一次、二次繞組皆正常，絕緣油未劣化)。如圖 3-4，較嚴重者則使外部水氣沿套管與箱體間裝置之襯墊因老化破損後侵入，水氣因絕緣油外洩後進入變壓器箱體內部，因箱體內水分含量的增加而導致絕緣油逐漸劣化(劣化原因也可能因油中可燃性氣體的增加或含氧物質的增加造成油質的熱分解或變質)；另一方面也使變壓器內絕緣油外洩沿著箱體外側流出，致內部油面下降，如圖 3-6，可清楚看出油漬在外殼上，不僅使低壓二次側套管銅接頭露出油面，嚴重者更使高壓一次側套管井連同帶電引線亦露出油面，如圖 3-7。

絕緣油劣化至某一程度後，使一次側套管井帶電部位之引線沿套管井表面對地產生內部閃絡造成事故。絕緣油的劣化，加上長期間的過負載，使變壓器長期在高溫或溫度上升過大情況下運轉，也會使一、二次線圈繞組絕緣物(含絕緣紙的脆化、熱劣化或紙質的變質)逐漸劣化而造成層間短路的故事。此種層間短路事故常使絕緣油呈褐色(如圖 3-4)，此部分缺失則應從導體被覆橡膠及襯墊材質兩方面加以改善。有關導體被覆及防水套管，須採用耐熱、耐臭氧性及耐老化性優良之主成份為三元乙丙橡膠(EPDM)材質製成。至於襯墊之改善則須符合表 3-1 內容所列之規範。

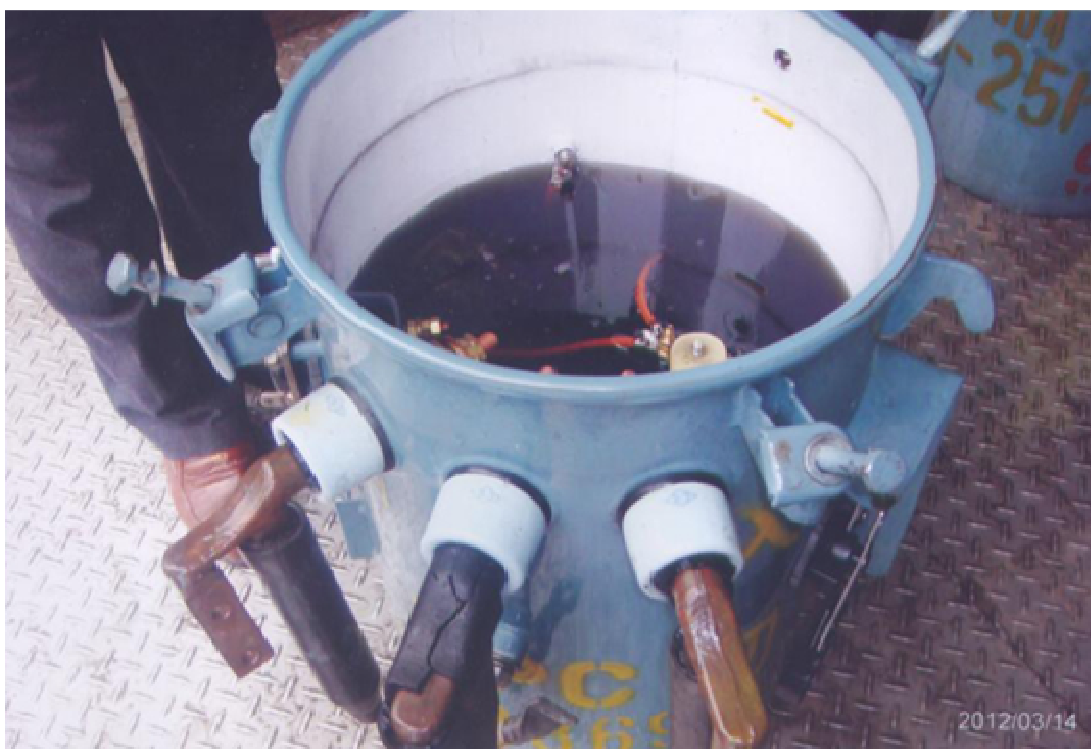


圖 3-4 二次套管橡膠被覆嚴重龜裂脫落，銅導體外露，變壓器一、二次繞組燒損，絕緣油劣化變色。



圖 3-5 變壓器一、二次繞組正常，絕緣油未劣化，但二次套管橡膠被覆有龜裂脫落情形。



圖 3-6 變壓器絕緣油由二次套管外洩，沿箱體外側流出，油漬清楚可見。



圖 3-7 變壓器漏油後，桶內油面下降，二次套管(含銅接頭)及一次套管井(含引線)均露出油面。

壓力釋放裝置部分，每具密封型桿上變壓器依材規 C035 (96-07)規範均須於掛耳側高於 140°C 油面線上方裝設一只自動壓力釋放閥(或相同功能之壓力釋放裝置，如圖 3-4，黃色標準油面之上方孔位，此孔為壓力釋放出氣孔)；當變壓器殼內壓力超過規定值 9~11 PSI 時，能自動釋放部分氣體，使內部保持正常之壓力，至於壓力釋放閥裝置位置，則宜考量油氣外洩時以不傷及底下之行人及車輛等為原則，且須考量人員在桿上操作釋放閥之方便性。壓力釋放閥須符合疲勞試驗前、疲勞試驗後之標準規定，以確保釋放壓力( $10 \pm 1$  psi)及關閉壓力( $7 \pm 2$  psi)之動作特性。釋壓閥於變壓器殼內壓力達釋放壓力時能自動啟開釋放部分氣體，且在達關閉壓力時自動恢復關閉，此可防止絕緣油外洩或外部濕氣之侵入，因此，亦無需改變釋壓閥結構及性能，但如能在變壓器外殼上之釋壓閥上方加裝防雨罩或半蓋板裝置(如一次分接頭切換器)，且不妨礙桿上作業人員安裝變壓器，則對釋壓閥有多一層防水侵蝕的保護功能。

一次分接頭切換器部分，切換器之把手置於變壓器外殼並加保護罩，可由外部操作，並須依材規編號 C035 (96-07)表 6 作 10 項試驗，最後一項為密閉試驗(依材規編號 C035 (96-07)表 6 圖 9 所示裝置，自外部加壓 30 PSI，經一小時後，不得有漏氣現象)，由原製造廠提出圖面及試驗報告供台電公司審查認可。此部分亦屬嚴謹，規範方面亦無需更改。

保護設備部分，其過電流保護方式，係採用一次遮斷開關串聯全域型限流熔絲，其遮斷開關之操作器須裝置於變壓器外殼並加保護罩，以避免碰撞損壞，開關不能因操作而搖動，且不得漏油。在氣密方面，亦屬正常。

密封型桿上變壓器在符合上述構造條件下達到完全氣密標準，須通過油密試驗：變壓器通以額定電流，使溫昇達穩定狀態後(或緊接溫昇試驗之後)加 7 psi 壓力於變壓器桶內，經一小時而無任何處發生漏氣及漏油現象。

本研究案，對變壓器箱體氣密部分規範整體加以檢討；另對密封型桿上變壓器組配間組裝時使用之襯墊，在已往採購材規內，並未特別對襯墊加以規範，僅在「防潮」一節中，註明襯墊須符合 CNS 3550 CII-610 種類之防潮耐油襯墊或更好材質者。本研究案建議加以規範，明訂變壓器各組件所使用之襯墊，須符合 CNS 3550 CII-610 種類之防潮耐油襯墊，使變壓器外殼確能防潮且不漏油，襯墊厚度須在 6mm 以上，並注意安裝之施作過程及使用適當之施工工具，且在定型試驗中要求提出襯墊試驗報告。為使

組裝後之箱體能達密封要求，本研究係參照 CNS3550 工業用橡膠墊料，並依材規 Y065 (100-11)改良套管型桿上變壓器[9]之第 4.5.5 節襯墊規範並考慮依試樣別，加列襯墊試驗方法及合格標準，詳如表 3-1 [9]。

依表 3-1 內容，試驗種類分襯墊特性試驗及襯墊材質試驗兩大類，並依項次別、試驗項目、試樣及試驗方法及合格標準判定試驗結果。

綜上所述，為確保變壓器箱體氣密，須考慮到：

- (一) 箱體(外殼)構造。
- (二) 箱體金屬材質。
- (三) 防潮及內外部塗裝。
- (四) 與氣密有關使用之配件構造及配件材質。
- (五) 襯墊之材質、造形(改善接觸面造形以增加密合度)及特性。

表 3-1 襯墊試驗項目、試驗方法及合格標準

試驗種類	項次	試驗項目		試驗	試驗方法及合格標準
襯墊特性試驗	1	硬度試驗		B	依照 CNS 3555 規定之 A 型 durometer 及其相關方法試驗，其硬度須為 $60 \pm 5\text{Hs}$ 。
	2	拉力試驗		B	依照 CNS 3553 規定之方法並採啞鈴狀 3 號形試片試驗，其抗拉強度須達 $100\text{kgf/cm}^2$ 以上，伸長率須達 200% 以上。
	3	耐油試驗	1 號試驗油 $150^\circ\text{C} \times 70$ 小時	B	依照 CNS 3562 規定之方法試驗，試驗結果，其特性須符合下列規定： (1)抗拉強度變化率：-20% 以內。 (2)伸長率變化率：-30% 以內。 (3)硬度最大變化量：-5 至 $10\text{Hs}$ 。 (4)體積變化率：-3 至 +5%。
			3 號試驗油 $150^\circ\text{C} \times 70$ 小時	B	依照 CNS 3562 規定之方法試驗，試驗結果，其特性須符合下列規定： (1)抗拉強度變化率：-30% 以內。 (2)伸長率變化率：-20% 以內。 (3)硬度最大變化量：-10Hs。 (4)體積變化率：0 至 +20%。
	4	老化試驗		B	依照 CNS 3556 規定之方法試驗，其中老化溫度為 $175 \pm 2^\circ\text{C}$ ，老化時間為 70 小時，試驗結果，其特性須符合下列規定： (1)抗拉強度變化率：-30% 以內。 (2)伸長率變化率：-50% 以內。 (3)硬度最大變化量：0 至 +10Hs。
	5	壓縮永久變形試驗		B	依照 CNS 3560 規定之方法試驗，其中試驗溫度為 $150 \pm 2^\circ\text{C}$ ，時間為 70 小時，試驗結果，其壓縮永久變形率須在 60% 以下。
襯墊材質試驗	6	傅立葉轉換紅外線光譜分析		A 及 B	試樣經適當處理後，以衰減式全反射-傅立葉轉換紅外線光譜分析儀 (Attenuated Total Reflectance-Fourier Transform Infrared Spectrometer) 測得其頻譜圖形，試驗結果，同組件之 A 試樣與 B 試樣之頻譜波形主要波峰須相近。

資料來源：台電業務處材料標準：Y065 (100-11)「改良套管型桿上變壓器」表 12。

## 二、入油規範部分：

目前密封型桿上變壓器使用之絕緣油，須符合台電公司材規 I002 特性之新油；灌注時需用真空灌油法，其灌入量在常溫時(25°C)須達到標準油面線以上。灌入變壓器後絕緣油之試驗項目通常包括下列各項：

- (一) 外觀
- (二) 顏色
- (三) 比重 15°C/15°C
- (四) 閃點°C
- (五) 流動點°C
- (六) 黏度 40°C，cst/0°C，cst
- (七) 界面張力 Dynes/cm，25°C
- (八) 中和價 mg KOH/g
- (九) 腐蝕硫
- (十) 無機氯化物及硫酸鹽
- (十一) 含水量 ppm
- (十二) 苯胺點°C
- (十三) 氧化安定性試驗、油泥% by mass、總酸價 mg KOH/g
- (十四) 電介質強度 kV
- (十五) 介質功率因數 90°C、40~60Hz
- (十六) 電阻係數 50°C  $\Omega$ -cm

為確保變壓器性能，仍建議絕緣油採用符合台電公司材規 I002 特性之新油；灌注時需使用真空灌油法，灌入量在常溫時(25°C)須達到標準油位線以上。灌入變壓器之絕緣油，品質應由廠商嚴格控制；而絕緣油試驗項目及品質則建議依表 3-2 絕緣油試驗項目及標準辦理[9]。

依表 3-2 與已往採購材規 C035 (99-07)表 7 比較，在流動點、黏度、電介質強度等項目，規範均較為嚴謹，並加列抗氧化劑一項，以確保變壓器絕緣油性能。

表 3-2 絕緣油試驗項目及標準

特性試驗項目	灌入設備後規範值	試驗標準	試驗方法
1. 外觀	澄清無沉澱物	IEC 60296 或 ASTM D 1524	必抽試
2. 顏色	0.5 以下	ASTM D 1500	必抽試
3. 比重 15°C/15°C	0.91 以下	ASTM D 4052 或 ASTM D 1298	得抽試
4. 閃點 °C	145 以上	ASTM D 92	必抽試
5. 流動點 °C	-30 以下	ASTM D 97 或 ASTM D 5950	得抽試
6.1 黏度 100°C , cSt	3.0 以下	ASTM D 445	得抽試
6.2 黏度 40°C , cSt	12.0 以下	ASTM D 445	得抽試
6.3 黏度 0°C , cSt	76.0 以下	ASTM D 445	得抽試
7. 界面 dynes/cm , 25°C	40 以上	ASTM D 971	必抽試
8. 中和價 mg KOH/g	0.03 以下	ASTM D 974	得抽試
9. 腐蝕硫	無	ASTM D 1275 B 法	得抽試
10. 抗氧化劑 %(質量比)	0.08 以下	ASTM D 2668 或 ASTM D 4768	得抽試
11. 含水量 ppm	35 以下	ASTM D 1533	必抽試
12. 氧化安定性試驗 72 小時： 油泥 %(質量比) 總酸價 mg KOH/g 164 小時： 油泥 %(質量比) 總酸價 mg KOH/g	0.15 以下 0.5 以下 0.3 以下 0.6 以下	ASTM D 2440	得抽試
13. 電介質強度 kV (VDE 電 極，2±0.03mm 間隙)	35 以上	ASTM D 1816	必抽試
14. 功率因素 100°C ， 60Hz , %	0.30 以下	ASTM D 924	必抽試
15. 多氯聯苯	未測出(註 1)	ASTM D 4059 或 NIEA T601.30B	得抽試
16. 2-糠醛含量 µg/L	5 以下	ASTM D 5837	得抽試
17. 電阻係數 50°C Ω-cm	1.0×10 <sup>14</sup> 以上	ASTM D 1169	必抽試

註 1：多氯聯苯偵測極限不得高於 2 ppmw。

資料來源：台電業務處材料標準：Y065 (100-11)「改良套管型桿上變壓器」表 7。

至於標準油位線，每具密封型桿上變壓器內側須明顯壓出常溫(25℃)時之標準油位線(如圖 3-4、圖 3-7、及圖 3-8 之內側黃色標線)，且至少須高過變壓器之鐵心、線圈及高壓側各帶電金屬部位(壓力釋放閥除外，如圖 3-4 及 3-7，應在標準油位線之上方空氣部位)，如圖 3-8，油面高度應達標準油位線。

本研究案，對絕緣油試驗項目、灌入設備後規範值、試驗標準及試驗方法均予探討並加以規範，另油位線標示之規範對最低油位線及 140℃ 最高油位線以不同顏色加以標示。

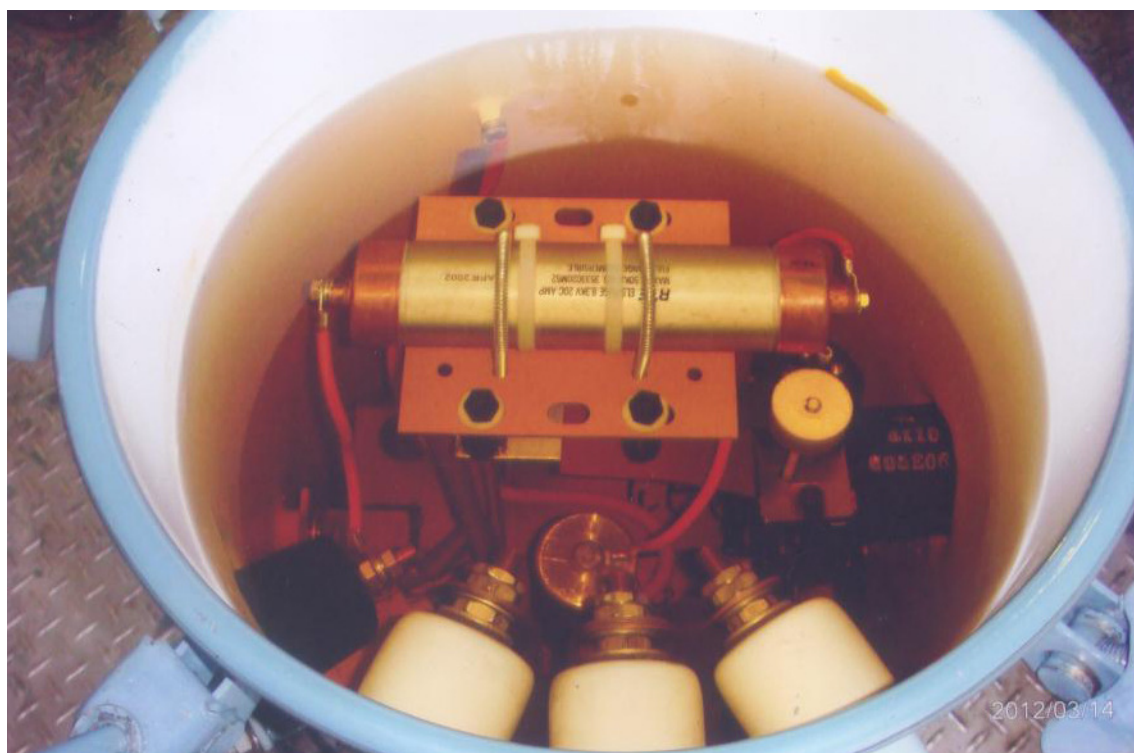


圖 3-8 變壓器桶內油面高度達到標準油面線。

## 3.2 擬定材規有關絕緣紙材質規範及管制方案

### 一、絕緣紙材質規範部分

目前在台電密封型桿上變壓器材規內並未針對絕緣紙部分另予詳細規範，只在「特性及試驗」一節及中間檢查範圍部分簡略帶過；在設計圖面部分，規定需包含在須由廠商提供的項目，該項目為「絕緣材料之規格及特性(包括套管井至限流熔絲間引線之絕緣材料)」，亦即以特性試驗的結果加以判定，例如單獨對絕緣紙作「耐電壓試驗」及對組裝後的變壓器成品作「感應電壓試驗」。通常透過感應電壓試驗，即可確認變壓器繞組之匝間

及層間的絕緣強度是否良好；如經感應電壓試驗不合格，則初步判定繞組可能有局部層間短路，再進一步檢討是否為絕緣材料所造成或其他原因，如製程上或其他材料不良所導致。

在分析絕緣材料方面，絕緣紙佔重要的角色。絕緣紙在 CNS 2898 絕緣薄紙所訂的材料與加工方法內，有註明薄紙須用良質三桠或馬尼拉麻紙漿為主要成份製成，結構優良；清漆滲透性良好，且具柔軟性，厚度均勻，並外觀無皺紋、塵垢、撕裂、污斑等缺點，及不含有害電氣絕緣之物質。

通常在絕緣材料之規格及特性裡，絕緣紙或絕緣壓紙板，是較常使用的材料，其特徵為：無皺紋、厚度均勻、表面平、機械強度高、具有強韌性及電的絕緣性能。因此，以往由製造廠商提供的規範資料通常包括下列項目：

- (一) 品名(如鑽石紙、呂宋紙、壓紙板---)
- (二) 代號(通常以英文標示)
- (三) 製造廠家
- (四) 厚度(通常以 mm 表示)：配電變壓壓器常用的厚度有 0.13mm、0.25mm、及 0.38mm 三種。
- (五) 密度( $\text{g/mm}^3$ )或重量：配合前述三種厚度，其規格分別為 80、160 及 230lbs/3000sq. ft 三種。
- (六) 含水量(%)：通常為 4~7%。
- (七) 抗拉強度(kgf/mm)，分縱向及橫向兩部分：
  - 1. 縱向：配合前述三種厚度，分別為 80、150、及 200lbs/inch 三種。
  - 2. 橫向：配合前述三種厚度，分別為 25、50、及 80lbs/inch 三種。
- (八) 絕緣強度(kV/mm)：CNS 2898 係以「絕緣破壞強度」標示，絕緣破壞強度=絕緣破壞電壓/試片厚度，以平均值判定；但亦有規範最低值者，以兩部分均合格作為判定合格標準。另亦有在乾燥及絕緣油中試驗兩類別，配合前述三種規格，在乾燥時分別為 1.3、2.1、及 2.9kV；在絕緣油中則分別為 8.5、12.6、及 20kV。

絕緣紙驗收時，須注意絕緣紙之試驗法，依 CNS 6041 規定，取樣時，若為筒卷時，至少要去除最初之 4 層，其餘部份取全寬紙數層，若為平板絕緣紙，從一疊紙之上面或底面約 1 公分處取一張或相連數張，由這些部

份取出所需之試料。取樣時或取樣後，須注意不得損傷其物理或化學特性，尤其於測試水分(必要時)時，取樣後須立即放入密封容器內保存。

試驗條件，如無特別指定時，依 CNS 2395 規定，試驗場所之標準情況應將試料置於室內溫度  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，相對濕度  $65\pm 2\%$  之標準狀態室內，並能充分的接觸空氣，對已到達平衡狀態之試料由相同標準狀態之室內施行。如在施行試驗之室內無法成為標準狀態時，可放置於相對濕度  $65\pm 2\%$  之密閉容器中施行前處置，然後在溫度  $20\pm 15^{\circ}\text{C}$  相對濕度  $65\pm 20\%$  之室內儘速施行試驗，但此時必須記錄試驗時之溫度與濕度。

線圈層間用絕緣紙，一般都採用鑽石紙，其耐溫等級為  $120^{\circ}\text{C}$ ，氮含量在  $1.5\%\sim 2.0\%$ ，須適用於線圈溫升為  $65^{\circ}\text{C}$  之油浸式變壓器中。

至於絕緣紙之使用，在變壓器一、二次繞組(線圈)及鐵心於組立時，在製程之作業流程上，雖未明文規定如何防止毛邊處理不當而可能導致完成後之成品，產生尖端局部放電等不良情形；但在正常作業流程中，會考慮防止類似情形之發生，如在製程中使用「倒角機」對繞組用導體等對尖銳之金屬毛邊加以平滑處理。

有關變壓器繞組之組立係採常溫作業，其配合使用之絕緣紙應注意表面清潔度及不可有破損、折痕、污損等情形。完成半成品之繞組乾燥係採熱風乾燥  $100^{\circ}\text{C}$  48 小時，或採用真空乾燥處理，前後約 13 小時(前 6 小時由常溫逐漸升溫至  $800^{\circ}\text{C}$ ，以  $800^{\circ}\text{C}$  持續穩定 3 小時後開始逐漸降溫，並於 4 小時恢復至常溫)，以達成繞組組立後之半成品乾燥。乾燥後於常溫量測其絕緣電阻，管制在 4,000M 歐姆以上(以 1,000V 高阻計量測)，繞組乾燥後 6 小時內置入變壓器桶內並注油。

## 二、絕緣紙之管制方案

目前台電公司對油浸變壓器用絕緣紙材質之管制，係以變壓器製造廠在提出設計圖面送台電公司審查技術報告時，一併內附絕緣紙規格及特性表，變壓器製造廠應同時在送絕緣紙規格及特性表時一併檢附絕緣紙製造廠之單一品名絕緣紙逐項檢驗報告及附上絕緣紙樣品(必要時)，經台電公司授權單位認可核章後，始可依約開始製造。

因此，變壓器製造廠對絕緣紙的進料管控甚為重要，絕緣紙製造廠對絕緣紙進料前之包裝，須以不致引起污損、傷害、吸濕且適於輸送之方法

施行，並須有明顯之標示：包括名稱、種類、尺度(厚度 x 寬)、淨重、製造廠名稱或商標、製造年月或簡稱、製造號碼或捲筒號碼。變壓器製造廠在購料驗收時，應檢查其外觀及量測厚度及相關尺寸，並針對前述物理及電氣特性作抽樣試驗，合格後，始可進料。對驗收合格後絕緣紙的存放，應以塑膠袋密封包裝後，採常溫定位妥適保存。

### 3.3 探討密封型桿上變壓器一、二次側繞組短路及繞組層(匝)間短路之檢測試驗方法及準則

#### 一、現行材規

現行台電 C035「密封型桿上變壓器」材料標準，對變壓器線圈繞組之材料及構造、特性及試驗等相關規範有第 4.2 節(線圈)，4.3 節(接線)，5.2(9) 節(一、二次線圈材質及乾燥法)，5.3 節(定型試驗)(7)(依次實施絕緣電阻試驗、瞬時短路試驗、負載特性試驗、溫升試驗、油密試驗、衝擊電壓試驗、耐電壓試驗、感應電壓及負載特性試驗等各項試驗。)，5.5 節(變壓比試驗)(匝比試驗)，5.7 節(耐電壓試驗)，5.8 節(感應電壓試驗)，5.9 節(衝擊電壓試驗)，5.11 節(負載特性，包括電壓調整率、激磁電流、無負載損、負載損測定)，5.13 節(溫昇試驗)，5.16 節(瞬時短路試驗)。

#### 二、試驗內容

依 C035「密封型桿上變壓器」規範探討變壓器一、二次側繞組短路及繞組層(匝)間短路之檢測試驗方法及準則[1]，可引用 CNS599 C3003 [11]，IEEE C57.12.00 [12]，IEEE C57.12.90 [13]，IEEE C57.12.91 [14]等相關標準實施以下各項試驗。

- (一)「匝比試驗」(變壓比試驗)：以確認是否符合設計或規範要求，及檢驗變壓器內部結線是否良好，線圈匝數是否足夠正確。
- (二)「繞組之電阻測定」：以檢驗線圈電阻是否符合設計值，各線圈層間、匝間有無短路情形。
- (三)「開路試驗」(無負載電流及無負載損測定)：以測定變壓器在無負載，額定電壓及 110%額定電壓，額定頻率時變壓器之「激磁電流」及「無負載損」是否符合規範要求。
- (四)「耐電壓試驗」：以檢驗變壓器內部各繞組間及對大地間之絕緣是否

良好，絕緣強度是否符合規範要求。

- (五) 「感應電壓試驗」：以檢驗確認變壓器線圈內部匝間、區分間、層間絕緣及對大地間之絕緣強度是否符合規範要求，以及各帶電端是否有產生局部放電，其量測值是否符合規範要求。
- (六) 「衝擊電壓試驗」：以測試變壓器內部各繞組之層間、匝間，耐電位振動之過壓能力，及對大地間之絕緣強度是否符合規範要求。
- (七) 「溫昇試驗」：以測試變壓器全負載狀態下，頂部油溫、線圈平均溫度，檢驗是否符合絕緣材料之耐熱特性。
- (八) 「絕緣電阻試驗」：以檢驗一、二次側繞組間及一、二次繞組對地之絕緣電阻是否符合規範要求。

依上述各項(一)至(八)之測定或試驗目的，可採用之檢測試驗方法及準則如下。

(一) 匝比試驗：

使用變壓器匝比測定器(TTR)，將 TTR 測試線連接至被試變壓器的一次側與二次側端子，分別測定出每相、每一分接頭之電壓比值。以出廠值為基準，變壓比誤差應在 $\pm 0.5\%$ 以內。

(二) 繞組之電阻測定：

1. 對額定電壓分接頭，最高及最低電壓分接頭之各繞組分別加以測定電阻，並記錄測定時之繞組溫度。進行溫昇試驗時，亦需測定供試分接頭之繞組電阻。
2. 以低電阻測定器、電流表、電壓表，應用直流壓降法，施加直流電流於被測繞組之兩端，量測每一繞組及每分接頭，最高及最低電壓分接頭之各繞組電阻，並記錄測定時之繞組溫度。

(三) 開路試驗(無負載電流及無負載損測定)：

1. 無負載損及無負載電流是在一繞組加額定電壓及頻率，而另一繞組開放之情況下測定。開路試驗之儀器(電壓表、電流表、頻率表、瓦特表)接線，電壓表接於負載側，電流表接於電源側，瓦特表接在中間(瓦特表之電壓線圈近於負載側，電流線圈近於電源側)。(可參考 CNS 599.C3003 5.2 儀器之接法[11]或 IEEE Std C57.12.90, 8.2.1 Figure 12.13 [13])
2. 無負載損及無負載電流測定，不限定由高壓或低壓側試驗，但一般

都由低壓側繞組測定，即由低壓側施加電壓，高壓側開路，在額定電壓和額定頻率讀取各電儀表值，同時記錄無負載電流(A)及無負載損(W)後，切離開供驗變壓器，再讀取測試用儀器之損失，先前讀取之損失值，減去此儀器損失值，可得真正之無負載損。

#### (四) 耐電壓試驗：

1. 絕緣耐壓試驗項目，包括交流電壓試驗(加壓試驗及感應電壓試驗)及衝擊電壓試驗。絕緣耐壓試驗之順序為：先衝擊電壓試驗，後交流電壓試驗。原則上，絕緣耐壓試驗應在溫昇試驗後立刻施行之；不作溫昇試驗者，可以在常溫作絕緣耐壓試驗。施行絕緣耐壓試驗之前，宜測試變壓器絕緣電阻，以確認是否適於耐壓試驗。

#### 2. 耐電壓試驗步驟：

- (1) 變壓器之各個線圈均須按表 3-3 之規定值加 60Hz 近似正弦波有效電壓，進行試驗 1 分鐘而不發生任何異狀，試驗時未加壓之線圈、鐵心、外殼等均須予以接地。

表 3-3 耐電壓試驗及衝擊電壓試驗標準

變壓器線圈 相電壓(V)	基準衝擊 絕緣強度 (kV)	耐電壓試驗值 (kV)	衝擊電壓試驗		
			全波電壓	截斷波電壓	
			波峰值 (kV)	波峰值 (kV)	最短閃絡時間 ( $\mu$ S)
6900	95	34	95	110	1.8
240/120	30	10	30	36	1.0

- (2) 將各別線圈端子短接在一起，以低頻耐壓器產生之高電壓施加於高壓側線圈時，低壓側線圈則短路接地，施加於低壓側線圈時，則高壓側線圈短路接地。
- (3) 試驗開始時，首先施加四分之一以下之試驗電壓，然後在 15 秒鐘以內緩慢增高至全試驗電壓，保持全試驗電壓值 1 分鐘，維持 1 分鐘無異狀，然後將電壓緩慢降低，在 5 秒鐘以內降至初加電壓值，然後切斷電源。

#### (五) 感應電壓試驗：

1. 以適用感應電壓試驗之電壓錶、頻率錶及有關測試器與設備等施行

感應電壓試驗。

2. 感應電壓試驗將試驗設備輸出線接於被測試變壓器之二次側；底板及接地點接地，一次側開路。試驗電壓從全電壓值之四分之一或更低處開始施加，然後 15 秒內逐漸增加至全電壓值(C035 規範為 24kV)，在保持規定的持續時間後，於 15 秒內逐漸降低至極大值之四分之一或初加電壓值，然後切斷電源。
3. 試驗電壓頻率為額定頻率之 2 倍以下時，感應電壓試驗之加壓時間為 60 秒。試驗電壓頻率高於 2 倍額定頻率時，依下列計算式決定加壓時間；但最低不得少於 15 秒。

$$\text{試驗時間(秒)}=120 \times \text{額定頻率}/\text{試驗頻率}$$

4. 感應電壓試驗中，電源側電路上需要一點接地。

(六) 衝擊電壓試驗：

1. 變壓器耐電壓及衝擊電壓試驗標準如表 3-3 規定。
2. 衝擊電壓應為負極性，波形須為  $1.2 \times 50 \mu S$
3. 每一衝擊電壓試驗須包括先施行降壓全波(表 3-3 全波值之 50~70%)試驗一次，再施行截斷波試驗兩次，然後施行全波試驗一次。

(七) 溫昇試驗：

1. 變壓器溫昇試驗有實際負載法、負載回授法、短路法等方法，其中以短路法所需試驗設備和消費電力最少，試驗又方便。一般溫昇試驗，大都採用此法。
2. 首先對變壓器繞組施加額定頻率之全負載損電流(無負載損+85°C 銅損)，並經長時間連續運轉，至變壓器平均油溫達穩定狀態時(持續 3 小時之油溫升變化不超出 2.5% 或 1°C，取較高者)，將全負載電流降至額定頻率之額定電流，再連續運轉 1 小時後，啟斷試驗電源。
3. 在啟斷電源後 5 分鐘內，以電阻法測定繞組電阻，並計算繞組平均溫升。
4. 變壓器繞組之實際平均溫升=啟斷點之繞組平均溫升+(全負載損電流時之平均油溫升－額定電流時之平均油溫升)。
5. 測得之變壓器繞組平均溫升不得超過 65°C，用溫度計法測得之最高油溫升不得超過 60°C；上述溫升之對應周圍溫度，係假定最高值為 40°C，其 24 小時之平均不超過 30°C。

(八) 絕緣電阻試驗：

以 DC 1000V 絕緣電阻計測得之主絕緣電阻(S-P&E)不得低於 2,000MΩ (參考溫度 20℃)。

### 3.4 研擬鐵心磁通密度與渦流損於工廠試驗之檢測方法

鐵心和繞組是變壓器的心臟。當變壓器在運轉送電後，由於繞組產生的磁通會經由鐵心的交鏈而產生磁路。在磁路形成的同時，大量的磁通流過鐵心，因為矽鋼板(片)(鐵心)之材質特性，會產生磁滯損及渦流損，亦是統稱的鐵損(無載損)。變壓器電磁感應原理如本節附件 3-4-1。

鐵心磁通密度(通常以符號 B 表示)為均勻磁化矽鋼板(片)單位截面積之磁通量，其單位為泰斯拉(Tesla, T)，1 泰斯拉=10<sup>4</sup> 高斯(Gauss, G)。鐵損表示受正弦波磁通磁化時，耗損於矽鋼板(片)內之電能。

依 CNS 7214 C3117 (2010 年 11 月 18 日修訂)之「電磁鋼片及鋼帶試驗法」[15]，鐵心磁通密度及鐵損試驗的量測設備須使用 25cm Epstein 試驗器 (25cm Epstein 試驗器規範，詳參 CNS 7214 C3117 附錄 A (A.2)，如本節附件 3-4-2)。

使用 25cm Epstein 試驗器作交流磁化特性試驗及鐵損試驗之測定電路及測定方法，與求出磁通密度及鐵損之計算說明如下：

- (1) 磁性電路：將試片(試樣)依圖 3-9 的交互重疊法插入試驗器內，構成正方形磁路；正方形的相對邊應採用同一切斷方向的試片(試樣)。同一切斷方向之試片，分別等分為二，共有 4 組，逐片交互重疊的方式插入 Epstein 試驗框中，以累積成為正方形磁路，使相對之邊分別為同一切斷方向之試片，形成內部每邊為  $220_{-0}^{+1}$  mm 之正方形磁路。

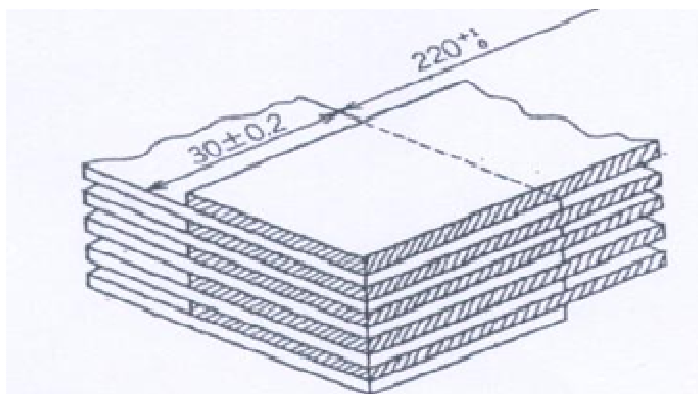


圖 3-9 試片之端邊累積方法(以試片長度為 280mm 為例)

- (2) 交流磁化特性量測：於頻率維持在規定值下，以符合第一方法之電路如圖 3-10，或第二方法之電路如圖 3-11，量測磁化特性。

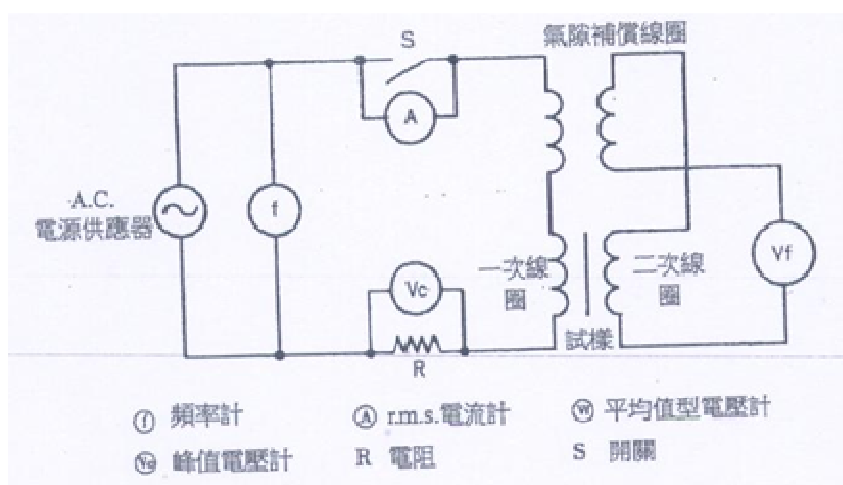


圖 3-10 以第一方法量測之電路( $V_f$  為平均值型電壓計)

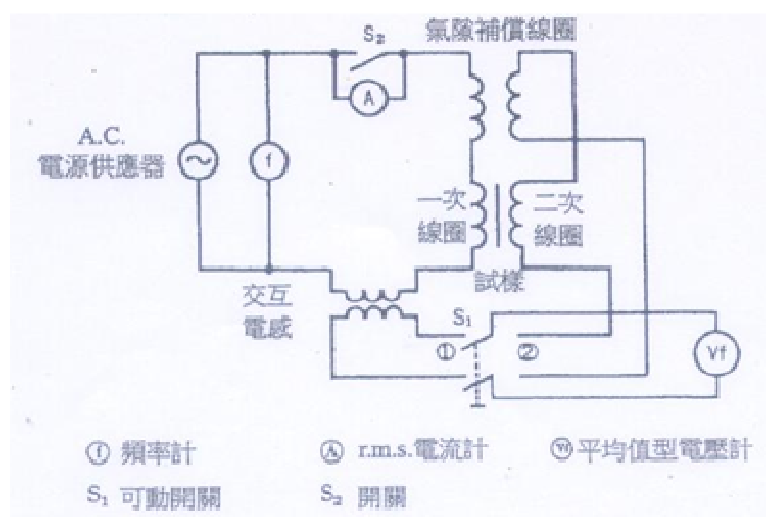


圖 3-11 以第二方法量測之電路( $V_f$  為平均值型電壓計)

- (3) 計算磁通密度：

- (3a) 應用第一方法量測時，以交流電將試片去磁，關閉開關  $S$  且調整電源供應器而使峰值電壓計之讀值  $E_c$  達預定的磁場強度。從平均值型電壓計求得的電壓值  $E_f$ ，以式(3-1)計算磁通密度之最大值。

$$B_m = \frac{E_f}{4.44fN_2A} \quad (3-1)$$

式中  $B_m$ ：磁通密度之最大值(T)

$E_f$ ：二次線圈之感應電壓所引起的平均值型電壓計讀值(V)

$f$ ：頻率(Hz)

$N_2$ ：二次線圈之匝數

$A$ ：試片(試樣)(鐵心)之截面積( $m^2$ )

(3b) 應用第二方法量測時，以交流電將試樣去磁，關閉 S2 開關，旋轉可動開關 S1 到位置 1 之後調整電源供應器電壓使平均值型電壓計之讀值  $E_f$  達預定之磁場強度。以式(3-1)計算磁通密度之最大值  $B_m$ 。

(4) 鐵損量測：依圖 3-12 量測鐵損之電路，關閉 S2，以交流電將試片去磁，關閉 S1 和 S3 且開啟 S2。調整電壓電源，使平均值型電壓計之讀值達到預定之磁通密度最大值  $B_m$ ；以式(3-2)計算平均值型電壓計之讀值  $E_f$ ，以式(3-3)計算鐵損值  $W$ 。

$$E_f = 4.44 f N_2 B_m A \quad (3-2)$$

$$W = P - \frac{E^2}{R} \quad (3-3a)$$

$$W_S = W / m \quad (3-3b)$$

式中，

$W$ =鐵損計算值(W)。

$E$ =二次線圈之感應電壓所引起之 rms 電壓計讀值(V)。

$P$ =瓦特計讀值(W)。

$R$ =rms 電壓計、平均值型電壓計、及瓦特計內電壓線圈之加總電阻( $\Omega$ )。

$W_S$ =每公斤鐵損(W/kg)。

$m$ =式樣之有效質量(kg)。

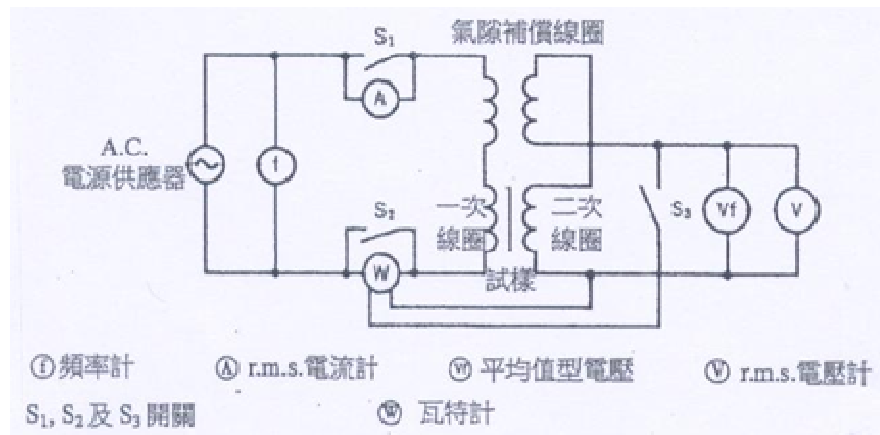


圖 3-12 量測鐵損之電路( $V_f$  為平均值型電壓計)

矽鋼板每公斤的鐵損( $W/kg$ )與磁通密度(Tesla)值，可由矽鋼板製造廠的型錄獲知，(如附圖 3-13 之 30ZH100, 0.3mm 矽鋼板 Core Loss 圖例)，矽鋼板製造廠家所發行型錄的( $W/kg$ )與(Tesla)數值，係矽鋼板原材料所具備的特性。工廠於矽鋼板進料時，可用「直讀式鐵損測試器」(Direct Reading Iron Loss Tester，如圖 3-14)檢測其鐵損值，再由矽鋼板製造廠家所發行型錄的( $W/kg$ )與(Tesla)曲線圖，由鐵損( $W/kg$ )值，求出  $B_m$  (Tesla)。

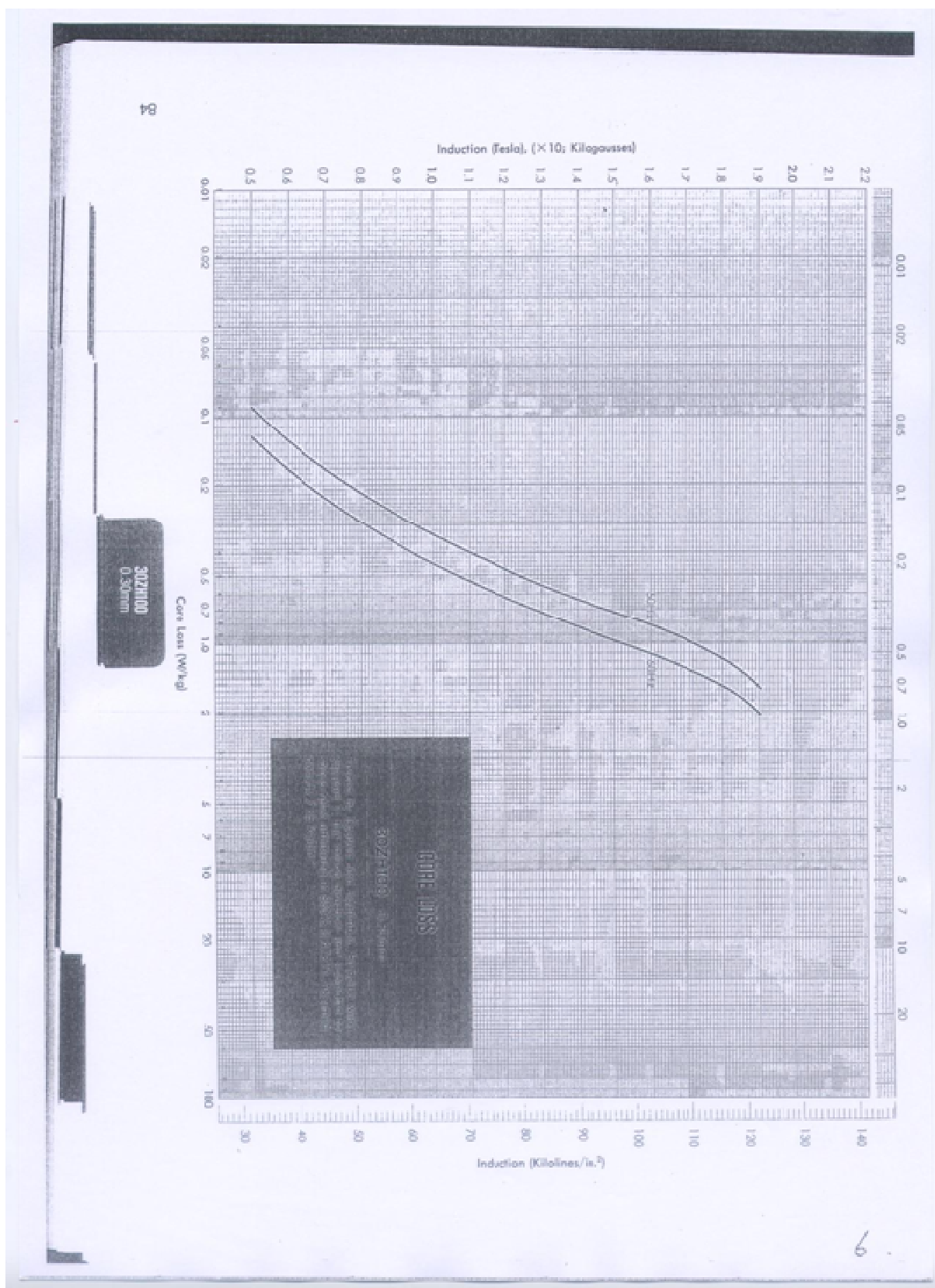


圖 3-13 30ZH100, 0.3mm 矽鋼板 Core Loss 圖例

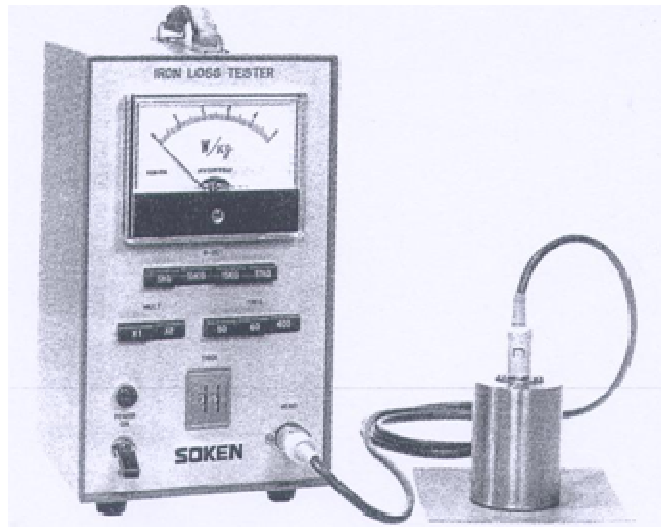


圖 3-14 直讀式鐵損測試器(Direct Reading Iron Loss Tester)

以「直讀式鐵損測試器」之檢測方法為：依矽鋼板量測厚度調整「直讀式鐵損測試器」厚度數字後，先以標準試片校正，再實際量測矽鋼板做試測，以「測試頭」測試樣品三點取平均為該試品之鐵損值。某變壓器工廠使用 25cm Epstein 試驗器作磁化特性試驗及鐵損試驗如本節附件 3-4-3。

變壓器無負載損(鐵損)可依 CNS599 C3003 第五節「無負載電流及無載損測定(開路試驗)」[11]或 IEEE Std C57.12.90-2010 第 8.2 節「No-load loss test」[13]測試其無載損失，再依磁滯損與渦流損所佔之比例，算出其渦流損。

變壓器鐵損(無負載損)測定即開路試驗，其儀器之接法如圖 3-15 所示。圖上使用兩種電壓計，及有效值電壓計及平均值電壓計兩種，其主要目的是要將測定值校正為正弦波時之正確值。若電源波形為正弦波，可以不用平均值電壓計，如電源波形為非正弦波，所測得之無負載損，須校正為正弦波情況下之無負載損。

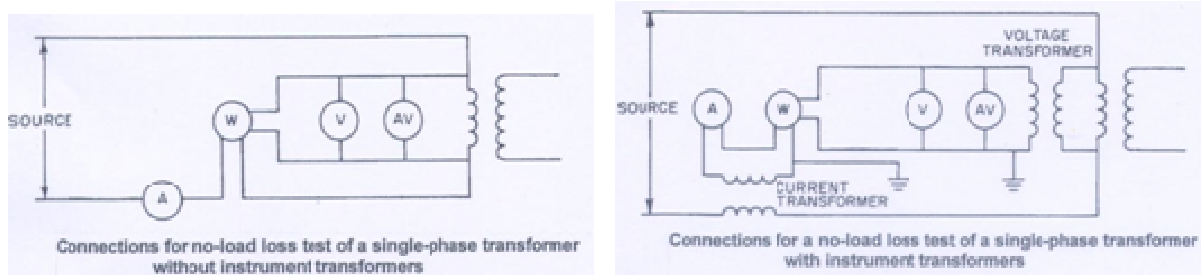


圖 3-15a 無負載損測定接線圖(IEEE std 「無載損測定」接線圖)

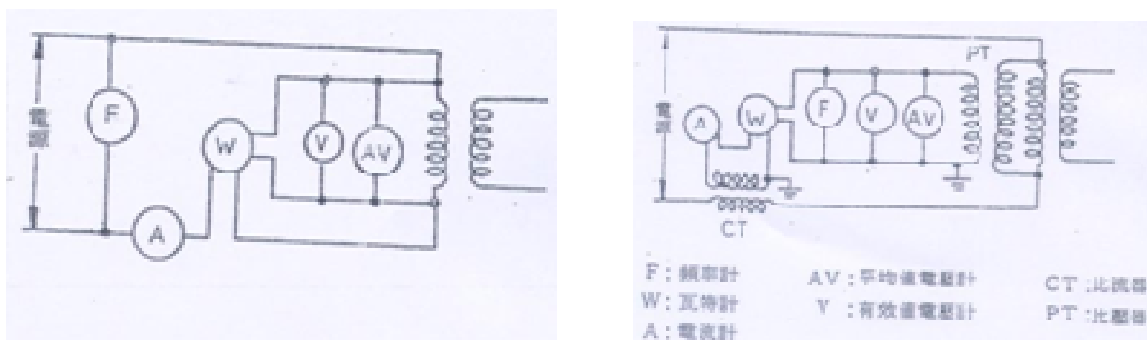


圖 3-15b 無負載損測定接線圖(CNS「無載損測定」接線圖)

一般變壓器之無負載損，大多由磁滯損及渦流損所構成，磁滯損與平均電壓值有關，渦流損則與有效電壓值有關。若以平均值電壓計為基準施加額定電壓，以測定無負載損時，所測得之磁滯損與正弦波額定電壓情況下相同，但渦流損因與有效電壓值之平方成比例，所以需要再乘以校正係數  $K$ ：[16-18]

$$K = (\text{有效值電壓計之讀值} / \text{平均值電壓計之讀值})^2$$

$$= (\text{有效值電壓計之讀值} / \text{額定電壓})^2$$

以正弦波為基準之無載損  $P$  為：

$$P = \text{測定損失} / [\text{磁滯損} + K \times (\text{渦流損})]$$

變壓器的無負載損(鐵損)包括磁滯損與渦流損兩部分之公式分別如下。

$$\text{磁滯損 } W_h = K_h \cdot f \cdot B_m^n \quad (\text{W/kg})$$

$$\text{渦流損 } W_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot t^2 \quad (\text{W/kg})$$

$$\text{無負載損(鐵損) } W_i = W_h + W_e \quad (\text{W/kg})$$

式中， $K_h, K_e$ ：常數

$f$ ：電源頻率(Hz)

$n$ ：Steinmetz 係數

(冷軋矽鋼板(片)  $n \doteq 1.6$ ；熱軋矽鋼板(片)  $n \doteq 2.5 \sim 3.5$ )

$B_m$ ：鐵心最大磁通密度(Tesla)

$t$ ：矽鋼片厚度，一般為 0.23~0.35mm。

在常用磁通密度的範圍內，矽鋼板(片)的磁滯損與渦流損的構成比例大約如表 3-4。

表 3-4 磁滯損與渦流損的結構比例

鐵心材料	$W_h$ (磁滯損)	$W_e$ (渦流損)
方向性矽鋼板(片)	0.5	0.5
熱軋延矽鋼板(片)	0.7	0.3

總合以上參考資料，就鐵心磁通密度、渦流損於工廠試驗之檢測方法，研擬如下：

1. 矽鋼板(片)進料檢驗，可應用「直示式鐵損測定器」作鐵損試驗，量測矽鋼板(片)之鐵損值，再由供應廠商提供之材質型錄資料：(W/kg)與(Tesla)曲線圖之鐵損 Core loss (W/kg)值，求出磁通密度  $B_m$  (Tesla) 值，以供矽鋼板(片)進料檢驗判定之依據。
2. 鐵心疊積後，或半成品，可使用 25cm Epstein 試驗器作交流磁化特性及鐵損量測，並計算求出磁通密度值及鐵損值，亦可由廠家提供的 (W/kg)與(Tesla)型錄資料中，求出磁通密度或鐵損值。
3. 變壓器鐵損(無負載損)測定(開路試驗)。使用頻率計、瓦特計、電流計、電壓計(平均值及有效值兩種電壓計)、比流器、比壓器等依「開路試驗」電路圖接線作試驗。一般由低壓側繞組測定，加額定電壓和額度頻率，高壓側開路，讀取各電儀表值，取得無負載損(W)值，亦即鐵損值，再依磁滯損與渦流損構成鐵損之比例，求出渦流損。

#### 附件 3-4-1：變壓器電磁感應原理

變壓器應用電磁感應原理，可藉由電路之一側輸入電能，經電磁感應傳輸作用後，可將轉換後的電能，由電路另一側輸出，因而可應用其電磁轉換功能，令電能可相互傳輸於系統各電壓階層中；變壓器電磁能量在轉換過程中，並未改變系統頻率，亦為靜止電氣裝置代表。

##### A.1 鐵磁性質

有關鐵磁性材料如鐵、鈷、鎳等之性質，係建立於磁域(magnetic domain)觀念中。磁域是一個很小的區域，在該區域內，所有的磁偶極都排列的非常整齊一致；但其相鄰區域內的磁偶級排列方向均不相同，以致未經極化處理的材料，處於非磁化的狀態中。當磁性材料至於外磁場內時，所有的

磁偶極傾向於沿著磁場排列。變壓器應用繞組結構，將載有電流的線圈纏繞在鐵心上，亦即可將磁性材料放進外磁場中。磁性材料中，可能有部分磁域排列方向，已與外磁場方向一致，令這些磁域傾向於逐漸增大其尺寸，而使鄰近磁域消失；因而磁域的成長僅會改變其邊界；然而邊界的移動，卻是與材料的顆粒結構(grain structure)有關，因部分磁域之磁偶極，傾向於移動到外加磁場方向上，因而提高了材料中的磁通密度。

線圈中的電流，建立了磁性材料中的  $H$  場，此在外加的  $H$  場，在媒質內創造了  $B$  場。當媒質內的  $B$  場是微弱的，那麼磁域壁的移動即為一可逆過程。當繼續增加通過線圈之電流，以增加  $H$  場時，媒質內的  $B$  場亦一併增強，一旦排列於  $B$  場方向上的磁偶極越來越多時， $B$  場就會愈來愈強。若是量化磁性材料內的  $B$  場，可觀察到  $B$  場先是緩慢地增加，然後快速地增加，鄰近膝部點後， $B$  場的增加速率將逐漸減緩，終至趨於平坦；平坦區域表示：磁性材料內所有的磁偶極已經排列在  $B$  場方向上；鐵磁性材料之磁化(滯)特性，如圖 A341-1 所示。

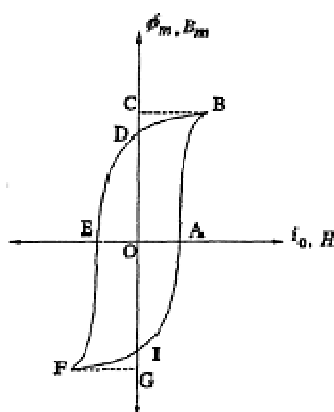


圖 A341-1 磁性材料的磁化特性

若開始降低現圈中的電流，以降低  $H$  場時，可觀察到  $B$  場減少的速率並不會很快，此種不可逆性稱為磁滯(hysteresis)。當  $H$  場減少至零時，材料內仍存在有部份量的磁通密度，稱之為剩磁或殘存磁通密度(residual or remanent flux density)  $B_r$ 。若材料的剩磁越高，該材料適合作為永久磁鐵用途，亦即具有較高的殘存磁通密度之磁性材料，稱之為硬磁(hard magnetic)材料。

當流過線圈電流極性反轉時，可觀察到當  $H$  場在反方向上到達某一值時，磁通密度將遞減變化至零，此時  $H$  場之值稱為矯頑力(coercive force)

Hc。經由 H 場在兩個方向上作先增後減之時變後，即可浮點描繪出磁滯迴圈(hysteresis loop)；磁滯迴圈的面積，可用以決定每一週波循環過程中的能量損耗，即磁滯損(hysteresis loss)；亦即在每一循環過程中，需要能量將磁域排列在一個方向上，然後將其重新排列在相反方向上；變壓器、交流感應電動機等設備，磁性材料的磁滯效應愈低愈好，此種材料稱之為軟磁(soft magnetic)材料。

磁路是維繫變壓器連續運轉的重要元件，矽鋼片組成之鐵心及載有磁通之線圈兩者共同組成磁路。電能經一次側線圈激磁，於鐵心上建立磁通，即可由鐵心磁路將電能自一次側線圈轉換至二次側負載。依變壓器運轉性質，考慮適當的鐵心結構設計，可將磁通控制於鐵心中。依下列考慮方向，選擇適當規格之矽鋼片材料，有助於改善鐵心性能：(1)鐵心磁通屬低磁阻路徑，有助於降低激磁電流及其雜散損失；(2)於鋼片中添加 4~5%之矽元素，可增加材料的電阻率及導磁係數，並降低矽鋼片厚度及其渦流損失，同時可有效縮減磁滯迴圈面積，一併降低磁滯損失；(3)在鐵心整體損失可被降低情況下，亦有助於減緩鐵心之老化速率。在鋼材中添加矽元素，對鋼材可產生不利裝配製程之脆化性質，因而需特別管制鐵心堆疊製程，以維繫矽鋼片既有性質。電力變壓器為降低鐵心渦流損，通常採用之矽鋼片厚度範圍在 0.23~0.35 mm 之間；而小型配電變壓器，矽鋼片厚度可增加至 0.5 mm；因此電力變壓器需要較長鐵心堆疊組裝時間，此係對變壓器製程的不利因素。

鐵心堆疊之矽鋼片表面間，存在數伏特大小的渦電壓(eddy voltage)，為改善其耐壓性能，可於矽鋼片表面鍍上由玻璃及酯組成的無機物，其厚度約在 0.002~0.003 mm。矽鋼片的溫升限制條件與居禮溫度有關；一般情況下，鐵心容許溫升可達 800°C，但是考慮變壓器其他組件，如壓縮紙板為 A 級絕緣/105°C，鐵心遞緊螺栓為 B 級絕緣 130°C 規格，因而運轉溫度需限制於附屬配件之規格，故變壓器需避免持續運轉於過電壓及低頻率之過激磁狀態下，以避免絕緣材料加速老化，損及其既有性能及壽命。

## A.2 磁路理論

變壓器磁路係由在線圈中流動的激磁電流( $I_m$ )在鐵心中產生磁場所構成，依電流流入線圈方向，應用右手定則即可定義磁場依順時針方向產生磁通( $\phi$ )；激磁電流、磁通、線圈匝數( $N_m$ )、感應電壓( $E$ )及磁通鏈( $\lambda$ )等參數，

如圖 A341-2 所示；安培定律係說明磁場強度( $H$ )、單位長度與激磁電流間的關係，以激磁電流、線圈匝數與磁場強度、磁路長度( $l$ )的等式如式(A341-1)所示；變壓器開路試驗可提供激磁電流參數，線圈匝數及磁路平均長度可臚列於變壓器送審技術資料中。

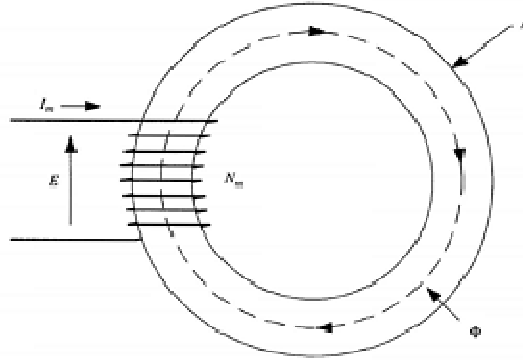


圖 A341-2 環型鐵心磁路示意圖

$$I_m N_m = Hl \quad (\text{A341-1})$$

變壓器依設計所採用的鐵心材料，可依廠家提供之鐵心材料參數表，取得材料之導磁率( $\mu$ )、最大磁通密度( $B$ )參數，可由導磁率及磁場強度的乘積，導出磁通密度值；

$$B = \mu H \quad (\text{A341-2})$$

磁通密度及鐵心截面積( $A$ )係決定磁通( $\phi$ )參數，表示如下：

$$\phi = BA \quad (\text{A341-3})$$

法拉第定律應用於變壓器中，匝數及磁通對時間的變化量決定線圈之感應電壓，表示如下：

$$E = N_m \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{A341-4})$$

將式(A341-1)~式(A341-3)帶入式(A341-4)，重新整理上式，可呈現出感應電壓與線圈匝數、鐵心截面積、導磁率及激磁電流對時間的變化等參數有關：

$$E = N_m \frac{d(BA)}{dt} = AN_m \frac{d(\mu H)}{dt} = \mu AN_m \frac{d}{dt} \left( \frac{I_m N_m}{l} \right) = \frac{\mu AN_m^2}{l} \frac{dI_m}{dt} \quad (\text{A341-5})$$

繞組之感應電壓亦為線圈電感( $L$ )與激磁電流對時間變化的函數：

$$E = L \frac{dI_m}{dt} \quad (\text{A341-6})$$

將式(A341-6)帶入式(A341-5)中，依鐵心導磁率、截面積、匝數及磁路平均長度等參數，可導出線圈電感：

$$L = \frac{\mu AN_m^2}{l} \quad (\text{A341-7})$$

利用線圈電感與激磁電流參數，即可計算出在線圈中的儲能值如式(A341-8)；計算感應電壓、磁通量等所需參數，臚列如表 A341-1：

$$\text{Energy} = \frac{LI_m^2}{2} \quad (\text{A341-8})$$

表 A341-1 變壓器磁通計算及量測參數一覽表

設計參數	鐵心磁路平均長度 線圈匝數 最大磁通密度 導磁率 鐵心截面積 鐵心重量
計算參數	磁場強度 磁場密度 磁通 飽和磁通密度 線圈電感
量測參數	激磁電流 感應電壓 膝部電壓 鐵損及雜散損失

### A.3 磁場強度、磁通密度相關參數分析計算之解說

#### 一、磁場強度計算

依據右手定則、法拉第電磁感應原理及鐵心磁路參數，有助於執行磁路分析計算，圖 A341-3 顯示線圈捲繞方向、鐵心結構及其尺寸，當線圈在時變交流電流激磁下，於鐵心中的磁通( $\phi_m$ )，依反時針方向變化；假設鐵心

尺寸、磁化電流( $I_m$ 之 rms 值)、匝數( $N_m$ , Turn (T))如下：

$$w=3 \text{ in.} \cdot h=w \cdot a=1 \text{ in.} \cdot b=1.5a \cdot I_m=2 \text{ A} \cdot N_m=20 \text{ T} \cdot f=60 \text{ Hz} \cdot \omega=2\pi f$$

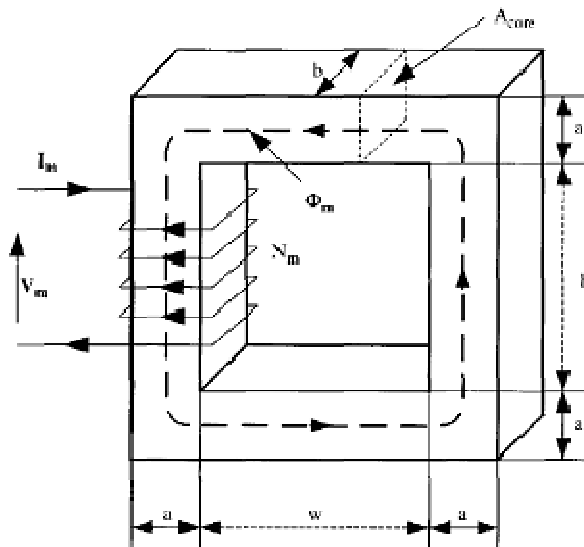


圖 A341-3 鐵心磁路結構及參數

若  $\phi_m$  磁路完全限制於鐵心中，而磁路平均長度( $l$ )計算如下：

$$l_m = 2(w + a) + 2(h + a) = 40.64 \text{ cm}$$

鐵心截面積( $A$ )為：

$$A_{core} = a \cdot b = 9.677 \text{ cm}^2$$

由 AC 電流所產生之磁場，係均勻分布於鐵心橫斷面上，應用安培定率計算磁場強度( $H$ )如下：

$$H_m = \frac{I_m N_m}{l_m} \quad (\text{A341-9})$$

將激磁電流、線圈匝數、磁路長度等參數帶入式(A341-9)，即可求得磁場強度之數值解；

$$H_m = \frac{I_m N_m}{l_m} = 98.425 (\text{AT} / \text{m}) = 1.237 (\text{oersted})$$

磁路單位長度  $m$  及  $in$  之安匝比例與厄斯特單位(oersted unit)換算公式如下：

$$1 \text{ AT/m} = 0.254 \text{ AT/in} = 0.012568 \text{ oersted}$$

$$1 \text{ oersted} = 79.577 \text{ AT/m}$$

## 二、磁通密度計算

變壓器以設計參數選定矽鋼片鐵心材料，其材料之磁場性質，可依磁場強度-相對導磁係數及磁場強度-磁通密度特性曲線予以說明，磁場特性曲線，如圖 A341-4 所示：圖中磁場強度( $H$ )為厄斯特單位，而磁通密度( $B$ )可依曲線繪出，或是由磁場強度與材料導磁係數的乘積求得；材料之相對導磁係數( $\mu_r$ )，可由其導磁係數( $\mu$ )及真空導磁係數( $\mu_0$ )的比例關係導出；

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (\text{A341-10})$$

式中空氣或真空導磁係數為：

$$\mu = 4\pi \times 10^{-7} (H/m)$$

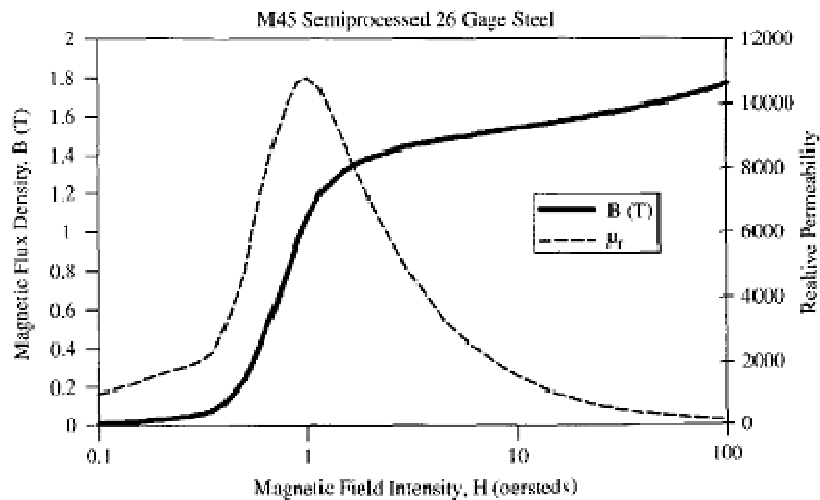


圖 A341-4 M45 係鋼片之 B-H-相對導磁率特性曲線圖

應用圖 A341-4 之磁場強度、相對導磁係數曲線，可繪出磁通密度近似值；而磁通密度藉由相對導磁係數( $\mu_r$ )、真空導磁係數( $\mu_0$ )及磁場強度( $H$ )參數，計算磁場密度之數值解如下：

$$B_m = \mu_r \mu_0 H_m \quad (\text{A341-11})$$

$$B_m = 10^4 \cdot 4\pi \times 10^{-7} \cdot 1.237 \cdot 79.577 = 1.237 (\text{Tesla})$$

重新整理式(A341-9)~式(A341-11)，可將磁場強度轉換為激磁電流、匝數與磁路長度之計算參數式(A341-12)所示，其磁通密度之數值解，亦等於 1.237 Tesla。

$$B_m = \mu_r \mu_0 \frac{I_m N_m}{l_m} \quad (\text{A341-12})$$

### 三、磁通(magnetic flux)

若磁通密度均勻的分佈於鐵心上，則於鐵心截面積上產生之磁通為：

$$\phi_m = B_m A_{core} = \mu_r \mu_0 \frac{A_{core} N_m}{l_m} I_m \quad (\text{A341-13})$$

$$\phi_m = 1.237 \times 9.677 / 10^4 = 0.001197 \text{ (Wb)} = 1.197 \text{ (mWb)}$$

若激磁電流依正弦曲線隨時間變化，則激磁電流之瞬時方程式表示如下：

$$I_{mag}(t) = \sqrt{2} I_{rms} \cos(\omega t) \quad (\text{A341-14})$$

將激磁電流瞬時方程式帶入式(A341-13)，可獲得磁通瞬時值方程式：

$$\begin{aligned} \phi_{mag}(t) &= \mu_r \mu_0 \frac{A_{core} N_m}{l_m} I_{mag}(t) \\ &= \mu_r \mu_0 \frac{A_{core} N_m}{l_m} \sqrt{2} I_{rms} \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (\text{A341-15})$$

$$\begin{aligned} &= \phi_{max} \cos(\omega t) = \sqrt{2} \phi_{rms} \cos(\omega t) \\ \phi_{max} &= \sqrt{2} \mu_r \mu_0 \frac{A_{core} N_m}{l_m} I_{rms} \end{aligned} \quad (\text{A341-16})$$

$\phi_{max}$  為磁通量最大值。

#### A.4 感應電壓

依據法拉第定律磁通之變化率等於感應電壓對時間的變化率，以  $d\phi = e dt$  表示之；變壓器線圈於磁通作用下，可於每一匝線圈上產生感應電壓，亦即感應電壓與線圈匝數、磁通變化率有關，表示如下：

$$E_{ind}(t) = N_m \frac{d}{dt} \phi_{mag}(t) \quad (\text{A341-17})$$

依磁通對時間之變化率及微分後，感應電壓方程式表示如下：

$$E_{ind}(t) = N_m \frac{d}{dt} \phi_{max} \cos(\omega t) = -N_m \phi_{max} \omega \sin(\omega t) \quad (\text{A341-18})$$

感應電壓知均方根值，表示如下：

$$E_{rms} = \frac{N_m \phi_{max} \omega}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_m \phi_{max} \quad (\text{A341-19})$$

### A.5 線圈電感

感應電壓計算公式，可藉由線圈電感及電流對時間的微分關係求得；

$$E_{ind}(t) = L_{ind} \frac{d}{dt} I_{mag}(t) \quad (A341-20)$$

比較式(A341-17)與式(A341-20)可得線圈電感計算式：

$$L_{ind} = \frac{N_m \phi_{mag}(t)}{I_{mag}(t)} = \frac{N_m \phi_{max} \cos(\omega t)}{I_{max} \cos(\omega t)} = \frac{N_m \phi_{rms}}{I_{rms}} \quad (A341-21)$$

變壓器繞組電感與線圈、鐵心的幾何形狀、材質有關，因此變壓器繞組電感將材料之導磁率、鐵心截面積、匝數、磁路長度、激磁電流等相關係數之關係整理如下：

$$L_{ind} = \frac{N_m [\mu_r \mu_0 \frac{A_{core} N_m}{I_{rms}}] I_{rms}}{I_{rms}} = \mu_r \mu_0 \frac{A_{core} N_m^2}{I_{rms}} \quad (A341-22)$$

### A.6 磁化曲線

依磁通密度及磁場強度兩者之對應性質，可描繪出磁化曲線；由磁場強度及磁通密度組成之磁化曲線，具有非線性性質；因而依曲線之比例關係，將其區分為下列三個區域：

1. 線性區域：材料導磁率維持在一常數值。
2. 膝部區域：材料的導磁率進入飽和。
3. 飽和區域。

變壓器、感應電動機等設備，常採用矽鋼片作為鐵心材料，亦即在鋼材中添加 4~5% 矽元素所形成之一種合金鋼。由材料之磁場強度、磁通密度及相對導磁係數，可描繪出材料之線性區域、膝部曲域及飽和區域之曲線，如圖 A341-5 所示；磁場強度及磁通密度曲線可衍伸出與相對導磁率的關係，亦即在 B-H 曲線之線性區域中，相對導磁率極高，其斜率極為陡峭，可維繫變壓器既有之運轉性能；鐵心進入飽和區域時，材質之導磁率急遽降低，線圈電感及感應電壓亦因而驟然降低，導致變壓器失去每一週波既有高效率的儲能、釋能之能量轉換性能。

變壓器運轉點之鐵心磁通密度設計考慮因素，包含規格、材料價格、低損失值、低磁化伏-安值等與運轉性能相關之事項。矽鋼片材料可採熱軋及冷軋兩種軋鋼製程方式生產矽鋼片，依晶粒排列方向，可區分為方向性、

非方向性矽鋼片，及高磁通密度、低磁化伏-安之雷射矽鋼片等。例如冷軋方向性矽鋼片之飽和磁通密度約可達 2.0 Tesla，而變壓器運轉可接受的峰值磁通密度限制值及其過激磁運轉狀態，係由使用者規範。依矽鋼片 B-H 曲線斜率顯示：磁通密度抵達 1.9 Tesla 後，可令鐵心快速進入飽和區域，亦即激磁電流將不再與磁通密度呈現線性增量之關係；因此將此一運轉點稱為 B-H 曲線之膝部點。

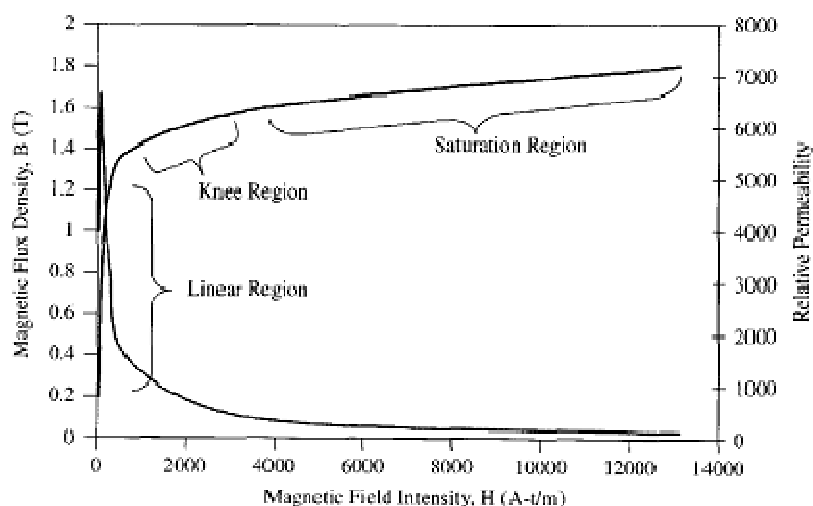


圖 A341-5 線性、膝部及飽和區域之磁化曲線

系統發生過電壓或/及低頻率之供電條件下，易引起變壓器過激磁，而激磁電流或磁場強度與磁通密度增量脫離線性比例關係，並進入飽和區域即為變壓器過激磁特徵。變壓器於過激磁運轉狀態下，可藉由膝部點磁通密度、過電壓或低頻率之百分比  $\alpha\%$ ，依  $\{1.9/(1+\alpha/100)\}$  公式計算變壓器磁通密度運轉點之限制值；例如於 110 % 過電壓、過激磁之連續運轉條件下，指定限制其磁通密度為 1.73 Tesla  $\{=1.9/(1+0.1)\}$ ；若變壓器於額定電壓 105 % 情況下受電，變壓器磁通密度限制值為 1.8 Tesla；變壓器在此過激情況下之連續運轉性能，將受限於鐵心溫升達到限制值為止，此一限制值係為避免溫升產生絕緣紙加速老化之影響。

#### A.7 結語

磁路是維繫變壓器連續運轉的重要元件，矽鋼片組成之鐵心及載有磁通之線圈兩者共同組成磁路。電能經一次側線圈激磁，於鐵心上建立磁通，即可由鐵心磁路將電能自一次側線圈轉換至二次側負載。

一般情況下，鐵心容許溫升可達 800°C，但是考慮變壓器其他組件，如壓縮紙板為 A 級絕緣/105°C，鐵心遞緊螺栓為 B 級絕緣 130°C 規格，因而

運轉溫度需限制於附屬配件之規格，故變壓器需避免持續運轉於過電壓及低頻率之過激磁狀態下，以避免絕緣材料加速老化，損及其既有性能及壽命。

藉由變壓器線圈及鐵心設計參數，如鐵心磁路平均長度、線圈匝數、最大磁通密度、矽鋼片之導磁率、鐵心截面積、鐵心重量等；即可藉由激磁電流計算磁場強度、磁場密度、磁通量、飽和磁通密度、及線圈電感值等；變壓器試驗可得到量測參數如下：激磁電流、感應電壓、B-H 曲線之膝部電壓、鐵損、銅損及雜散損失等。

變壓器鐵心磁路運轉點，是由系統供電電壓決定，變壓器製造廠選用之矽鋼片廠型規格，已決定其飽和磁通密度最大值，藉由本章節中介紹知電磁計算過程，即可評估桿上變壓器製造廠磁路設計之優缺點及對材料規範的符合性。

### **附件 3-4-2：交流磁性試驗設備規範**

#### **A.1 交流磁性試驗之電源供應器規範**

交流磁性試驗之電源供應器須有低輸出阻抗且可維持二次電壓測試器之波形係數在  $1.11 \pm 0.1\%$  以內。為符合此需求，可使用可感應電壓波形之負迴路控制的電子式電源供應器。

#### **A.2 商用頻率用 25cm Epstein 試驗器規範**

##### **A.2.1 線圈：**

25cm Epstein 試驗框之線圈由一次線圈及二次線圈所組成，一次線圈用於激磁，二次線圈用於測定感應電壓。

二次線圈繞於一次線圈內側。一、二次線圈均由 4 個線圈數，每線圈 175 匝之線圈串聯接成，總數均為 700 匝。

試驗框之規範如表 A342-1 所示，試驗框之範例如圖 A342-1 所示。

##### **A.2.2 氣隙補償線圈**

氣隙補償線圈須符合試驗器且其規範宜符合表 A342-2 所示。

##### **A.2.3 瓦特計**

使用精確度在  $\pm 0.5\%$  以內之低功率因數只是型瓦特計，電壓迴路之內電阻須為每伏特  $50\Omega$  以上。純電阻成分至少須為電抗成分的 5000 倍以上。

表 A342-1 商用頻率用 25cm Epstein 試驗框規範

項目		規範
線圈捲框	內部面	宜為寬度 32mm，長度 6mm
	材質	非磁性之絕緣體
	長度	每一線圈長度至少 190mm
一次線圈		以 4 個線框，每個線框以 175 圈均勻繞製
二次線圈		以 4 個線框，在一次線圈內均勻繞成 175 圈 1 層
組裝位置		以 4 個線圈為成正方形磁路各邊之方式組裝

備考：一次線圈及二次線圈之電阻及電感須分別符合下列規定。

$$\frac{R_1}{N_1^2} \leq 1.25 \times 10^{-6} \Omega$$

$$\frac{R_2}{N_2^2} \leq 5.0 \times 10^{-6} \Omega$$

$$\frac{L_1}{N_1^2} \leq 2.5 \times 10^{-9} H$$

$$\frac{L_2}{N_2^2} \leq 2.5 \times 10^{-9} H$$

式中，

$R_1$ ：一次線圈之電阻( $\Omega$ )

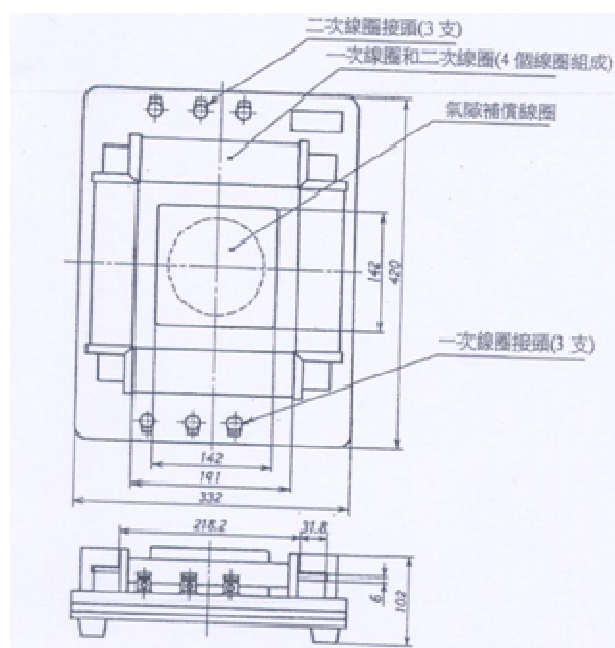
$L_1$ ：一次線圈之電感(H)

$N_1$ ：一次線圈之匝數

$R_2$ ：二次線圈之電阻( $\Omega$ )

$L_2$ ：二次線圈之電感(H)

$N_2$ ：二次線圈之匝數



單位：mm

圖 A342-1 商用頻率用 25cm Epstein 試驗器例

表 A342-2 氣隙補償線圈之規範

項目		規範
管狀捲框	尺度	直徑 55mm*長度 25mm
	凸緣板尺度	120mm*120mm
	材質	非磁性絕緣體
一次線圈		激磁所需之圈數(約 40 圈)
二次線圈		當無試片於試驗器中，其可抵銷二次感應電壓之圈數，須纏繞於一次線圈上。
組裝位置		以軸垂直試驗框面之方式，放置於正方形試驗框之中央。

#### A.2.4 r.m.s 電壓計

須使用使用精確度在 $\pm 0.5\%$ 以內之 r.m.s 電壓計。

#### A.2.5 平均值型電壓計

須使用精確度在 $\pm 0.5\%$ 以內之平均值型電壓計。每伏特之內電阻不可小於  $1000\Omega$ 。通常，平均值型電壓計使用刻度為平均值之 1.111 倍。

#### A.2.6 r.m.s 電流計

對於視在功率試驗，須使用低電阻且精確度在 $\pm 0.5\%$ 以內之 r.m.s 電流計，對於其他試驗，精確度須在 $\pm 1.0\%$ 以內。

#### A.2.7 峰值電壓計

須使用精確度在 $\pm 2.5\%$ 以內之峰值電壓計。

#### A.2.8 電阻器

須使用不超過  $1\Omega$  無電感型且精確度在 $\pm 1.0\%$ 以內之電阻器。

#### A.2.9 頻率計

須使用精確度在 $\pm 0.1\%$ 以內之頻率計。

#### A.2.10 互感器

在交流磁化特性試驗中，與平均值型電壓計組合在一起之互感器是用來決定對應於峰值磁通密度之峰值激磁電流。當磁場強度  $H$  從校正互感器的二次感應電壓  $E_{th}$  和互感器之互感係數  $M$  (coefficient of mutual induction) 中求得， $M$  值之準確度須備校正到 $\pm 0.5\%$ 以內。互感器依所測定磁場強度  $H$  之大小，使用 1A 型或 10A 型，其規範宜如圖 A342-2 及表 A342-3 所示。

備考：由於指針型頻率表使用於不同額定電壓時誤差增大，因此宜使用附有分接頭(tap)之變壓器，使其保持在容許電壓範圍內。

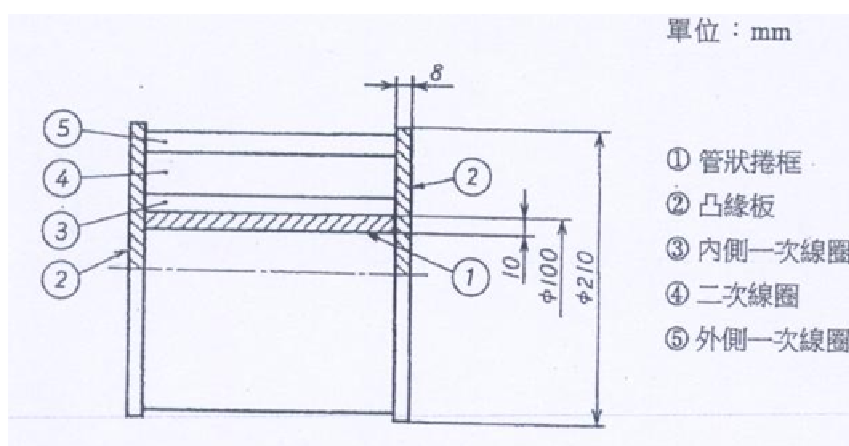


圖 A342-2 互感器

表 A342-3 互感 器之規範

項目	1A 型	10A 型
管狀捲框①	外徑 100mm，內徑 80mm 長度 120mm	外徑 100mm，內徑 80mm 長度 40mm
凸緣板②	厚度 8mm，直徑 210mm	厚度 8mm，直徑 210mm
內側一次線圈 ③	將 CNS5749 之 4 號平角銅 線(2.4*3.5) mm 施予絕緣使 用之。30 圈*4 層。	將 CNS5749 之 4 號平角銅 線(3*4) mm 施予絕緣使用 之。8 圈*2 層。
二次線圈④	0.4mm 絕緣銅線 8640 圈	0.4mm 絕緣銅線 3200 圈
外側一次線圈 ⑤	將 CNS5749 之 4 號平角銅 線(2.4*3.5) mm 施予絕緣使 用之。30 圈*4 層。	將 CNS5749 之 4 號平角銅 線(3*4) mm 施予絕緣使用 之。8 圈*2 層。
電氣特性	一次電感：約 5MH 一次電阻：約 0.24Ω 二次電感：約 7.4H 二次電阻：約 660Ω 互感：約 180MH 一次、二次線圈間之絕緣電 阻：100MΩ 以上	一次電感：約 0.4MH 一次電阻：約 0.04Ω 二次電感：約 1.7H 二次電阻：約 230Ω 互感：約 13MH 一次、二次線圈間之絕緣電 阻：100MΩ 以上

參考：於交流磁化特性試驗，互感 器之一次側與平均值型電流計串聯，以正弦波之電流通過該電路，求得由此電流( $=I_c/\sqrt{2}$ )求得之  $I_c$  與二次側連結的平均值型電壓計之讀值  $E_{th}$  的關係圖。之後，以圖示方式，由  $E_{th}$  與互感 器一次側電流之關係曲線，求出磁場強度  $H$  之情況下，不需檢定  $M$  之值。

### 附件 3-4-3：商用週率交流磁化特性試驗及鐵損試驗(使用 25cm Epstein 試驗器)

某變壓器工廠使用 25cm Epstein 試驗器作磁化特性試驗及鐵損試驗之說明如下。

1. 試料：試驗片為長方形，寬 30mm，長 280~320mm。
2. 測定用具：25cm Epstein 試驗器，依圖 A343-1 的方式接線。

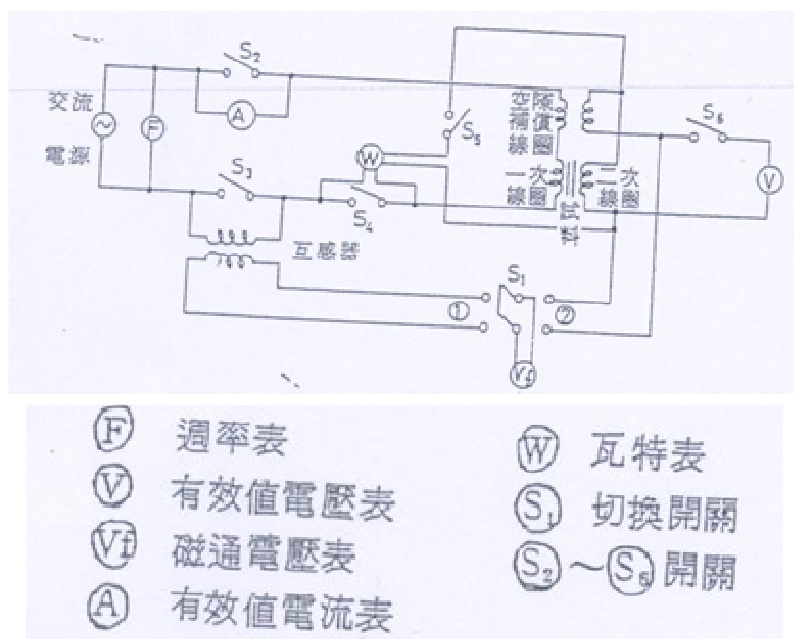


圖 A343-1 25cm Epstein 試驗器測定電路

### 3. 測定方法：

#### (1) 磁路：

將試料依圖 A343-2 的交互重疊法插入試驗器內，構成正方形磁路。正方形的相對邊應採用同一切斷方向的試料(註)。

(註)試料的剪法：如為無方向性矽鋼片，則試料半數為縱方向，另半數維橫方向，各分開為兩堆(等分)，共四堆。如為方向性矽鋼片，則試料全數為 延方向，等分為四堆疊基成正方形。

#### (2) 交流磁化特性：

將試料去磁後，打開(open)圖 A343-1 的 S2，S3，S5，S6，關閉 S4，把 S1 投入①側。調整電源電壓，使磁通電壓表的讀數  $E_m$  等於預先所定的磁化力相當的值(此時週率應保持規定值)。磁化力的波峯值以式(A343-1)決定之。

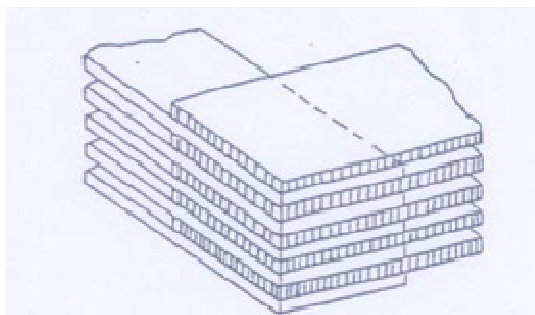


圖 A343-2 試驗片邊端重疊法(適用於 280mm 長的試驗片)

$$H = \frac{N_1 I_C}{l_1} = 745 I_C = \frac{E_{fh}}{0.00596 f M} \quad (\text{A343-1})$$

式中：

$H$ ：磁化力波峯值(A/m)

$N_1$ ：一次線圈匝數=700

$I_C$ ：激磁電流波峯值(A)

$l_1$ ：有效磁路長(m)=0.94

$E_{fh}$ ：互感器二次感應電壓的磁通電壓表讀數(V)

$f$ ：週率(Hz)

$M$ ：互感器的互感係數(H)

其次，保持此狀態而把 S1 投向②側，求出磁通電壓表讀數  $E_f$ ，求磁通密度。  
磁通密度的波峰值以式(A343-2)決定：

$$B = \frac{E_f}{4.44 f N_2 A} \quad (\text{A343-2})$$

式中：

$B$ ：磁通密度波峯值(Wb/m<sup>2</sup>)

$N_2$ ：二次線圈匝數=700

$E_f$ ：二次線圈感應電壓的磁通電壓表讀數(V)

$A$ ：試料的剖面積(m<sup>2</sup>)= $m/4lD$

$m$ ：試料的質量(kg)

$l$ ：試料的長度(m)

$D$ ：試料的密度(kg/m<sup>3</sup>)

(3) 鐵損：

圖 A343-1 中，關閉 S2，S3，S5，S6，打開(open) S4，把 S1 投入②側。  
調整電源電壓，使磁通電壓表的讀數  $E_f$  等於預先所定的磁通密度波峯值相當的值(此時週率應保持規定值)。磁通電壓表的讀數  $E_f$  以式(A343-3)決定：

$$E_f = 4.44 f N_2 B A \quad (\text{A343-3})$$

其次，保持此狀態，讀出瓦特表讀數  $P$  與有效值電壓表讀數  $E$ ，然後求鐵損。鐵損以式(A343-4)決定：

$$W_c = \frac{W_i}{h + (E/E_f)^2 e} = \frac{P - (E^2/R)}{h + (E/E_f)^2 e} \quad (\text{A343-4})$$

$$W = \frac{W_c}{m_1}$$

式中：

$W$ ：鐵損(W/kg)

$W_c$ ：試料的鐵損，換算於正弦波時之值(W)

$W_i$ ：試料的鐵損(W)

$P$ ：瓦特表的讀數(W)

$E$ ：二次線圈感應電壓的有效值電壓表讀數(V)

$E_f$ ：二次線圈感應電壓的磁通電壓表讀數(V)

$R$ ：有效值電壓表，磁通電壓表及瓦特表電壓線圈的合成電阻( $\Omega$ )

$h, e$ ：波形為非正弦波時的補正係數。

$$m_1：試料的有效質量(\text{kg})；m_1 = \frac{m \bullet l_1}{4l}$$

$m$ ：試料的質量(kg)

$l$ ：試料的長度(m)

$l_1$ ：有效磁路長度(m)=0.94

### 3.5 依據現行套管井裝置規格及變壓器油面高度，探討變壓器套管井沿面距離與閃絡關聯性。

現行密封型桿上變壓器一次套管井規格，其構造、尺寸及試驗標準須符合 ANSI/IEEE 386 之標準[10]。套管井之額定電壓為 15.2kV (相對地)，額定電流為 200A，每具變壓器備有一只裝置架，以供裝置雙通插頭及隔離插頭等。套管井押鐵之厚度在 6 公厘以上，押鐵表面不予塗裝。一次套管井特性須能通過 60Hz 乾燥耐電壓 1 分鐘 40kV (有效值)及衝擊乾燥耐電壓波峰值 1.2x50μsec 125kV 之試驗。

至於變壓器桶內的正常油面高度，應使套管井全部沒入絕緣油中，套管井並無任何部位露出油面上之空氣中，變壓器桶內之各主要組件及相關配件裝妥後，注入絕緣油時應注意油面之高度，須達到桶內正常的黃色標線；除壓力釋放裝置外，各主、配件均全部在絕緣油中。

以往密封型桿上變壓器發生事故後，變壓器內部一次套管井沿面曾發現有放電痕跡，限流熔絲筒電源側導體有熔毀，桶壁有電弧熔蝕現象；由於一次套管井接線端帶電體沿表面放電，或限流熔絲筒電源側導體對桶壁有電弧熔蝕碳化現象，因而導致絕緣油劣化，引發大量電弧造成絕緣油高溫氣化，而使內部高溫之油氣大量噴出桶外。

經探討分析其原因，大致分類如下：

- (一) 現行 C035「密封型桿上變壓器」材料標準第 4.7.5 節，對二次套管組之導體被覆及套管材質，未明確規範，各變壓器廠家採用之被覆材質(橡膠或其他)品質不一，裝置運轉後，有些變壓器二次套管組之導體橡膠絕緣防水被覆部分經日曬雨淋，而發生脆化龜裂現象(如圖 3-4 所示)；如該防水被覆層與二次套管、導電體與箱體襯墊間密合度欠佳，外部雨水或濕氣從脆化龜裂處之間隙侵入變壓器桶內絕緣油中，導致絕緣油逐漸劣化，劣化之絕緣油及運轉時產生的高溫度，尤其在重載期間高溫，再加上油中濕氣或其他含氧物質，導致變壓器內部各類絕緣物的逐漸劣化而造成變壓器故障，如繞組層間短路，高壓側帶電部位對外殼(接地)的閃絡。
- (二) 由於影響變壓器壽命的主要因素是其本身在運轉時所持續產生的溫度，變壓器內部雖未侵入水氣，但變壓器內的固體絕緣材料多是由纖維材料製成，如絕緣紙、絕緣紙板等，絕緣油則使用有機含量的礦物油；當過載的變壓器內部發生局部過熱時，這些絕緣物及絕緣油便會因高溫的分解而發生各類氣體，這些氣體含有可燃性氣體而導致絕緣物質的加速劣化，因此絕緣紙、絕緣油等，因高溫而導致絕緣物的劣化，也是造成變壓器故障主要原因之一。

至於變壓器的發熱來源如下：

1. 鐵心：導因磁滯損及渦流損，即所謂的鐵損，因鐵損而發熱。
2. 繞組：變壓器主要的發熱來源，繞組通過電流而發熱。

3. 外殼與鐵製配件：由於密封型桿變外殼之主體及所使用之鐵配件，其材質均使用不銹鋼材質，故此部分所產生之熱源可不予考慮，而僅受裝置場所週溫(外氣溫度)影響。
- (三) 當變壓器外部二次側發生嚴重短路或接地事故時；但裝置於變壓器內之保護熔絲未在特性規範時限內動作熔斷，隔離故障電源。
- (四) 裝於變壓器內之避雷器，未能於變壓器遭受外在雷擊或因系統本身產生之異常高電壓時適時動作，快速地將此異常電壓及電流導入大地。
- (五) 因搬運、施工安裝等未依規範辦理，使正常構造，如套管等受外力影響者。
- (六) 其他因變壓器本身在設計、製造(含材質及製程如鐵心接地不良)或品管不良引起者。

目前台電公司材料規範所訂的變壓器桶內的油面高度，只規定灌注絕緣油時，需用真空灌油法，灌入量在常溫時(25°C)須達標準油面線以上。經研討結果，密封型桿上變壓器建議比照改良套管型桿上變壓器(材規 Y065 (100-11)) [9]油位線之規定，加列下列四項：

1. 變壓器內側須明顯壓出最低油位、25°C 標準油位及 140°C 最高油位線，並分別於壓出之油面線上塗以紅色(最低油位線及 140°C 最高油位線)及黃色(標準油位線)標示，各油位線寬度以不大於 4mm 為原則，其位置須經台電公司審查認可。
2. 最低油位線：高度須超過變壓器之鐵心、線圈、高壓側各帶電組件及其他須採油絕緣之部位，以避免絕緣油量過少時，帶電體露出油面，造成絕緣不良現象。
3. 標準油位線：室溫(25°C)時變壓器絕緣油須達到之最低油位，此時之油量，須保證當油溫降至 0°C 時，絕緣油面不低於最低油位線。
4. 最高油位線：變壓器絕緣油達 140°C 時不得超過之最高油位，此時絕緣油不得由壓力釋放裝置溢出箱體外。

一次套管井之規格，如前所述，既能通過套管特性試驗(含 60Hz 乾燥交流耐壓 1 分鐘 40kV，及衝擊耐電壓 125kV 1.2x50μsec)，基本上並不是變壓器內部組件的弱點所在，經初步檢討似無須作更動。至於目前國內各密封型桿上變壓器變壓器製造廠使用之一次套管井，其規格依台電

公司材規 C035 (96-07)規定，一次套管井應固定於變壓器上，並應完全密接，以防止水份侵入或絕緣油滲出，交貨時應以護套套住，以防灰塵雜物進入，同時其構造、尺寸及試驗標準須符合 ANSI/IEEE 386 之標準 [10]。並應符合下列規定：

1. 額定電壓：15.2kV (相對地)、額定電流：200A。
2. 每具變壓器應備有一只裝置架，以供裝置雙通插頭及隔離插頭等用。
3. 套管井押鐵之厚度應在 6 公厘以上，押鐵表面不得塗裝。
4. 套管井須能在外部更換。

從上述規範中可瞭解，台電公司材規 C035 (96-07)對套管井之材質並未明確規範；但就過去國內各製造廠交貨分折，常用之材質有環氧樹脂(Epoxy Resin)，或熱塑型橡膠 HTN 材質等，因此在往後新訂規範時有必要加以明確列入規範內。同時比照改良型桿上變壓器材規 Y065 (100-11)規範，對一次套管井之構造、尺寸及特性至少應通過下列各項 ANSI/IEEE 386 規定之試驗標準：

1. 構造尺寸檢查。
2. 電暈試驗(Corona voltage level test)。
3. 交流耐壓試驗(AC withstand voltage test)。
4. 直流耐壓試驗(DC withstand voltage test)。
5. 衝擊電壓試驗(Impulse withstand voltage test)。
6. 短時間電流試驗(Short- time current test)。
7. 循環電流試驗(Current cycling test)。
8. 加速密封老化試驗(Accelerated sealing life test)。

此外，將套管井之押鐵材質改用 SUS 304 不鏽鋼，厚度仍維持在 6 公厘以上，押鐵表面不得塗裝。

一次套管井的電氣特性，套管除能通過規範所訂的特性試驗(含 60Hz 乾燥交流耐壓 1 分鐘 40kV，及衝擊乾燥耐電壓  $1.2 \times 50 \mu \text{ sec}$  125kV)外，需亦能符合 ANSI/IEEE 386 試驗標準，其條件是把一次套管井放置在油中，而施作各項相關電氣特性試驗，變壓器內之絕緣油須維持正常的油面高度。

由於近年來常有漏油事件發生，台電公司在油入式變壓器驗收試驗中加列一次套管井耐電壓試驗，將變壓器絕緣油之油面降低到一次套管井之

下緣，使高壓套管井未浸泡於絕緣油中，並將限流熔絲負載端之引線拆離並絕緣，由高壓套管井施加 40kV 60 赫正弦波有效值 1 分鐘，不得發生任何異狀。為通過此項試驗，目前市面上一次套管井供應商大都另外加裝絕緣封套(罩)來增加一次套管井的沿面距離。目前國內一次套管井供應商使用套管井的規格及特性，分述如下(廠商以英文代號表示)：

1. A 廠家的產品：如不加絕緣封套(罩)，而直接置於空氣中測試，約能耐受 32kV/1min. 的電壓強度，量測出之沿面距離長度約 62 毫米(mm)，此只是用來估算每一毫米能耐受的電壓強度。若按此計算，一次套管井之沿面距離長度至少需 78 毫米(mm)，方能在空氣中耐受 40kV/1min.。若不以現在採用的加裝絕緣封套(罩)方式，其一次套管井必需加長或變寬來增加 16 毫米(mm)的沿面距離，如此將會影響變壓器的設計及尺寸。
2. B 廠家的產品：依 IEEE 386 標準之套管井之沿面距離，以實際運轉之變壓器，如因變壓器油面下降以致套管井內部裸露，而套管井表面可能因油垢、導電雜質造成沿面距離不足，而發生閃絡。且因變壓器內部空間裕度不高，較不容易一再增加套管井沿面距離，而採用下列方式加以克服：

(1) 一次套管井末端附裝絕緣油容器(絕緣封套)：

一次套管井接線端裝置有一開口朝上之矽橡膠絕緣套管，包覆引接線之帶電體，變壓器注入絕緣油時，絕緣油隨即填滿套管；當變壓器絕緣油喪失後，套管內部仍將充滿絕緣油，提供一次引接線高壓帶電體良好的絕緣，可防止因缺油所造成的沿面絕緣距離不足而產生的電壓閃絡事故。

(2) 利用油面偵測跳脫裝置：

當變壓器絕緣油下降時，藉由油面偵測跳脫裝置，偵測油面若低於最低運轉油面時，造成變壓器內部高壓帶電體、套管井等沿面不足情形，立即啟斷電源，可將故障變壓器切離系統，保護人員與設備安全。

台電公司台北南區營業處檢修單位曾對套管井進行故障檢測靈敏度試驗，將現行套管井(引線)置於油面之上(空氣中)，加壓至 31kV (30.3kV/1min) 即發生閃絡，試驗斷路器跳脫。再將套管井(引線)置於絕緣油中，加壓至 40kV，1min 均無異狀。

綜上所述，為達到一次套管井單獨就能通過 60 赫乾燥耐電壓 1 分鐘(有效值) 40kV (指在空氣中，非絕緣油中)，如不附裝絕緣封套(罩)，則勢必要增加套管沿面距離(增加 16 毫米(mm)的沿面距離到 78 毫米(mm))，如此不僅增加變壓器的尺寸，在重量上及形體上亦相對增加，在運搬及安裝上也增加困難度。為使變壓器能正常運轉，根本方法就是要使變壓器內之絕緣油維持正常的油面高度，並防止密封型桿上變壓器漏油，才是解決之道；因此，以一次套管井末端附裝絕緣油容器(絕緣封套)，防止因缺油所造成的沿面絕緣距離不足為可行之建議。

### **3.6 密封型桿上變壓器高壓套管井耐候性及部分放電檢測方法與準則**

台電公司業務處供電低壓用戶之配電變壓器，包括架空線路上裝設之桿上變壓器(分為普通型、改良型、密封型)，與地下線路裝設之亭置式變壓器或浸水式變壓器。配電變壓器從材料規範、製造、品質管制、出廠試驗、驗收、交貨、儲存、施工及維護等各方面均應嚴格管控，使故障率降至最低點。因在民國 99 年 10 月間，某區處曾發生密封型桿上變壓器故障停電，且造成變壓器內之熱油噴出至外面，依台電公司業務處調查報告[19]，係因高壓(一次)套管井劣化，產生高溫沿表面放電導致絕緣油劣化及高溫氣化，使熱油氣大量噴出。本節探討分析高壓套管井耐候性及其材料規範，並希望在製造廠及現場於潛在不良特性之高壓管套井未引起事故停電前，能以部分放電檢測器檢查變壓器有否不良引起部分放電，事先在出廠前及現場能發現不良變壓器，避免安裝不良變壓器以及發生故障引起停電。

#### **3.6.1 密封型桿上變壓器高壓套管井耐候性及其材料規範 C035 增修訂之探討分析及建議**

##### **一、高壓套管井之構造及組裝：**

台電公司配電線路之桿上變壓器，其高壓側早期係使用瓷質套管，稱為普通型桿上變壓器，且裝置在變壓器外殼頂蓋上面。高壓瓷質套管一端接於變壓器內部線圈引線，另一端經熔絲鏈開關引接於高壓架空線；因其帶電體外露未絕緣，未能配合高壓架空裸線改為被覆線之需要，所以台電公司業務處參考亭置式變壓器使用高壓套管井之方式，自行研究將高壓磁

質套管改為高壓套管井，再另連接套管插頭，形成為橡膠質高壓套管。

高壓套管井係用押鐵及襯墊固定於變壓器，在外殼側邊開口裝設，再由現場施工人員將其與套管插頭、肘型端頭及高壓電纜作電氣性連接組裝，即高壓套管井連接於變壓器內部之限流熔絲，再連接於遮斷開關與一次分接頭切換器，再連接於線圈引線，另一端高壓電纜連接於高壓架空被覆線，此種組裝方式，形成密封型桿上變壓器外部組件不露出帶電體，至民國 100 年底現場已裝設約二十七萬七千多具。

高壓套管井依現行規格為 15.2kV 200A，採用模鑄一體成型製造，其圓筒中心配裝導體，導體兩端供引接變壓器外部之套管插頭及變壓器內部引接，即作為套管插頭與變壓器外殼內部間之介面，高壓套管井尺寸為 109mm，直徑 90mm。高壓套管井為密封型桿上變壓器之重要組件，因此其需具有耐候性等特性。

## 二、密封型桿上變壓器高壓套管井之故障概況

依台電公司業務處提供之最近 5 年間密封型桿上變壓器故障統計表[2]，其高壓套管井之故障共有 9 個區處提出，計 24 件，其故障情形分別為套管井裂化、套管井損壞、套管井不良導致產生漏油、著火、外殼變形、分接頭損壞、限流熔絲筒損壞等，其製造廠家共計 12 家，其中 2 製造廠家發生高壓套管井故障件數最多各有 5 件，合計佔 41.6%。

高壓套管井故障而引起變壓器內部絕緣破壞之原因，依業務處所提事故報告[19]，係因高壓套管井劣化不良，產生高溫並持續累積，沿其表面放電傳輸至限流熔絲筒、桶內壁及絕緣油，使油持續溫升，噴油至地上。經再探討，其故障分析未提及其外面可分離型連接接頭系統(含套管插頭、肘型端頭、高壓電纜)有否施工不良，因其故障熱源除高壓套管井外，另還有其電源側之連接接頭系統。

依美國西雅圖市電力公司所提亭置式變壓器事故報告[20]指出在高壓電纜與肘型端頭間之導體連接點、肘型端頭與套管插頭間之導體連接點、套管插頭與套管井間之導體連接點，因連接未緊密有空隙或間隙或彎曲，造成接觸不良、電阻過大，會引起過熱累積產生高溫，高溫傳輸至變壓器外殼及內部組件，並發生局部放電累積能量，而使絕緣破壞引起故障停電。所以建議參考美國西雅圖市電力公司之作法，密封型桿上變壓器如有發生

故障事故，在檢查及測試時，先以 X 光檢測器，檢查三個連接接頭間之導體連接有否施工不良，再檢查及測試變壓器內部各組件有否絕緣不良或破壞。另亦須定期以紅外線測溫器或紅外線熱顯影像儀器量測有否異常溫度，同時可檢測一次套管井有否異常溫度。

### 三、美國 IEEE386 高壓配電系統可分離型絕緣連接接頭系統標準之簡介

依密封型桿上變壓器材料規範 C035 (96-07) 4.6.1 節高壓(一次)套管井之構造、尺寸及試驗標準應符合 ANSI/IEEE386 [10]之標準，但材料規範規定之設計圖面、品質管制及中間檢查並未完全述明該標準相關事項，為利探討需要，將該標準有關套管井 200A 重點部分說明如下：

#### (一) 電壓額定

1. 最大電壓額定：15.2kV ( $\Phi$ -G)
2. 基本絕緣位準(Basic Insulation Level, BIL)：125kV
3. 交流耐電壓：40kV/1 分鐘
4. 直流耐電壓：78kV/15 分鐘
5. 部分放電熄滅電壓>19kV、放電量<3pC

#### (二) 電流額定

1. 連續電流額定：200A
2. 故障投入電流額定：對稱電流 10kA，時間 0.17 秒
3. 瞬間電流額定：對稱電流/時間，10kA/0.17 秒，3.5kA/3 秒

#### (三) 遮蔽層

連接接頭組件應具有電氣感應遮蔽層，建議規定遮蔽層應連接於外部接地線。

#### (四) 完全的互換性

不同製造廠之肘型端頭及套管插頭符合本標準者，應視為可互換。

#### (五) 出廠試驗

高壓套管井製造後，每一產品均應依下列試驗項目予以試驗：

1. 部分放電試驗
2. 交流耐電壓試驗、全波衝擊耐電壓試驗

#### (六) 定型試驗

依 IEEE386-2006 [10]規定，可分離型絕緣連接接頭系統之定型試驗項

目共計 15 項，其中與高壓套管井有關的定型試驗項目有 7 項如下：

1. 部分放電試驗
2. 交流耐電壓試驗
3. 直流耐電壓試驗
4. 衝擊耐電壓試驗
5. 短時間電流試驗
6. 循環電流老化試驗
7. 加速密封老化試驗

#### **四、高壓套管井耐候性及其材料規範 C035 增修訂之探討分析及建議**

高壓套管井使用於密封型桿上變壓器作為一次側連續引接套管插頭、肘型端頭及高壓電纜，形成電氣性連接於高壓架空被覆線，因其係在現場長久供電使用中，其可能會受到電場應力、熱應力、機械應力及外界環境等因素影響，難免會影響其絕緣材質的變化；而且高壓套管井係裝在變壓器外殼側邊，一端露出鐵殼外面，另一端在鐵殼內部，因其中心導體與鐵殼間之間隔絕緣，係靠高壓套管井絕緣厚度，萬一其絕緣劣化，可能會引起部分放電或短路接地，所以高壓套管井應具有耐候性及優良的絕緣特性，且其內部不能有空隙或間隙或雜質，以避免絕緣體內發生局部放電，而使鐵殼內累積放電能量，引起相關組件損壞。因此須從高壓套管井材料規範探討分析其規定之完整性及適用性，目前可參考 IEEE386-2006 可分離型絕緣連接接頭系統，改良型桿上變壓器(材規 Y065)及亭置式變壓器(材規 C001) [21]等材料規範，探討現行密封型桿上變壓器材料規範之缺失並提出建議，有關材料規範高壓套管井部分之增修訂建議說明如下。

##### **(一) 一次(高壓)套管井**

1. 現行材料規範 4.6.1：一次套管井應固定於變壓器上，並應完全密接，以防水分浸入或絕緣油滲出，交貨時應以護套套住，且其構造、尺寸及試驗標準應符合 IEEE386-2006 之標準。

經檢討其規定不完整，如高壓套管井材質、固定方式及密接性等未規定，經參考改良型桿上變壓器(Y065)及亭置式變壓器(C001)材料規範，並將內容分開規定，建議增修訂如下：

材料規範 4.6.1：一次套管井須為環氧樹脂(Epoxy Resin)或更佳之材質，其油中端若加裝絕緣套須為耐油、耐熱及絕緣良好之橡膠材質，且用押鐵及襯墊完全密接於變壓器外殼上，以防止水份浸入或絕緣油滲出，並須能由外部更換。交貨時應以護套套住，以防灰塵雜物進入。(原訂定之構造、尺寸及試驗標準應符合 IEEE 386-2006 之標準，改列入材規 4.6.2)。

2. 現行材料規範 4.6.2：額定電壓 15.2kV (相對地)，額定電流 200A。

經檢討高壓套管井連接之套管插頭，兩者尺寸之配合未規定，且未將 IEEE386-2006 試驗項目列出，經參考 IEEE386-2006 及材料規範(Y065 及 C001)規定，建議增修訂如下：

材料規範 4.6.2：一次套管井額定電壓為 15.2kV 相對地)，額定電流為 200A，其構造、尺寸、試驗項目、方法及標準應符合 IEEE386-2006 標準。套管井應可適合配裝本公司材料規範 A008「預鑄型高壓電纜接頭及配件」[22]之 200A 套管插頭。

一次套管井之特性試驗須依 IEEE386-2006 標準，其試驗項目適用於套管井者如下：

- (1) 部分放電試驗
- (2) 交流耐電壓試驗
- (3) 直流耐電壓試驗
- (4) 衝擊耐電壓試驗
- (5) 短時間電流試驗
- (6) 循環電流老化試驗
- (7) 加速密封老化試驗
- (8) 構造及尺寸檢查

3. 現行材料規範 4.6.4：套管井押鐵厚度應為 6 公厘以上，押鐵表面不得塗裝。

經檢討需再補強，參考材料規範(Y065 及 C001)，建議增修訂如下：  
材料規範 4.6.4：套管井押鐵厚度應為 6 公厘以上之 SUS304 不鏽鋼製成，押鐵表面及螺栓、螺帽接觸處不得塗裝。

4. 現行材料規範 4.6.5：套管井須能外部更換

經檢討建議宜併入材規 4.6.1 節。

## (二) 設計圖面

現行材料規範 5.2 設計圖面：設計圖至少應包含下列各項，其中一項為(4)一次套管井裝置圖(含組立)。

經檢討規定不完整，參考材料規範 C001，建議增修訂如下：

材料規範 5.2 (4) 一次套管井之規格、特性試驗、廠牌型號及裝配組立圖。

## (三) 定型試驗

現行材料規範 5.3.1 定型試驗應實施項目，未列入一次套管井特性試驗。

經檢討套管井為密封型桿上變壓器之重要組件，須將其特性試驗列入定型試驗項目中，參考材料規範 C001，建議增修訂如下：

材料規範 5.3.1：定型試驗應實施項目如下：

(1)~(15)不變，增加(16)一次套管井特性試驗。註：2.(11)~(15)改為(11)~(16)。

## (四) 耐電壓試驗

現行材料規範 5.7.2：將變壓器內絕緣油抽出，直至油面低於套管井下緣，使高壓套管井未浸泡於絕緣油中，將限流熔絲負載端之引線拆離，由高壓套管井施加 24kV，60 赫近似正弦波有效電壓一分鐘，高壓套管井及高壓套管井至限流熔絲間之接線不得發生任何異狀。

經檢討，依材規 5.10 表 9 耐電壓試驗為 40kV，一分鐘，另 IEEE386-2006，材規 Y065 與 C001 亦規定為 40kV，一分鐘，因此材規 5.7.2 規定為 24kV，一分鐘，不符合 IEEE386-2006 規定。有關材規 5.7.1 與 5.7.2，參考材規 C001 之規定，建議增修訂如下：

材料規範 5.7.1：繞組耐電壓：除高壓側線圈...均須予以接地。

材料規範 5.7.2：套管井耐電壓：將變壓器內絕緣油抽出，直至油面低於套管井下緣，使高壓套管井未浸泡於絕緣油中，將限流熔絲負載端之引線拆離，由高壓套管井施加 40kV，60 赫近似正弦波有效電壓，一分鐘，高壓套管井及高壓套管井至限流熔絲間之接線不得發生任何異

狀。

#### (五) 套管井特性

現行材料規範 5.10 套管特性：變壓器一次套管井特性須符合表 9 之規定值，即耐電壓試驗(乾燥，一分鐘)為 40kV，衝擊耐電壓試驗為乾燥 125kV。

經參考 IEEE386-2006 規定，其出廠試驗須為部分放電試驗，交流耐電壓試驗或衝擊耐電壓試驗中選一項，另依材規 Y065 與 C001 之特性試驗須為部分放電、交流耐電壓、直流耐電壓、衝擊耐電壓、短時間電流、循環電流及加速密封老化等試驗，此規定符合 IEEE386-2006 之定型試驗，但材料規範 C035 未規定。

依材規 Y065 規定，套管井之出廠試驗(6.1.2(4))須為交流耐電壓試驗，套管井之驗收試驗(附錄 2.6(6))須為視需要抽試，套管井之定型試驗未規定；依材規 C001 規定，套管井之定型試驗(5.1.2(10))須為 4.6.2 節有 7 項試驗項目，套管井之出廠試驗(6.1(3))未規定，套管井之驗收試驗(附錄 3.6(4))須為交流耐電壓試驗，其他試驗項目為視需要抽試。

材料規範 C035 之規定，套管井之定型試驗(5.3.1(7))須為交流耐電壓試驗，套管井之出廠試驗須為交流耐電壓試驗，套管井之驗收試驗(附錄 2.6(2))須為視需要抽試。

經檢討材料規範 C035 之規定不完整，對套管井之出廠試驗及驗收試驗應再加強，因套管井為密封型桿上變壓器重要組件，建議增修訂如下：

1. 現行材料規範 6. 品質管制，6.3 廠商自行品管之出廠試驗報告至少應包括：(1)~(7)不變，但其中(4)至少抽一具依次實施溫昇、油密、衝擊電壓、耐電壓及感應電壓等試驗。

建議修正為：

(4)至少抽一具實施溫昇、油密、衝擊電壓、繞組與套管井耐電壓及感應電壓等試驗。

另增加：

(8)至少抽一具實施一次套管井之部分放電，交流耐電壓(材規 5.7.2 節)，短時間電流及加速密封老化等特性試驗。

有關增修訂之理由說明如下：

部分放電試驗、交流耐電壓試驗、短時間電流試驗及加速密封老化試驗，為 IEEE386-2006 之規定，而加速密封老化試驗可驗證一次套管井裝置不漏油，短時間電流試驗可驗證其耐大電流之能力，所以出廠試驗應實施此四項特性試驗。

2. 現行材料規範附錄驗收試驗之 2.6 節特性試驗(8)，其中之一次套管井，本公司得視需要予以抽試。

經檢討一次套管井之驗收試驗，不宜採取抽試，建議增修訂改為必須試驗。

因此建議驗收試驗之 2.6 節特性試驗(8)將其中之「一次套管井」刪除，另參考 IEEE386-2006，增加(9)隨機取樣一具實施一次套管井之部分放電試驗及交流耐電壓試驗。因部分放電試驗可驗證一次套管井最小放電量，交流耐電壓試驗可驗證其耐電壓絕緣能力。

3. 現行材料規範 5.10 套管特性：變壓器一次套管井之特性須符合表 9 之規定值，即交流耐電壓試驗為 40kV，一分鐘，衝擊耐電壓試驗為 125kV。

經檢討一次套管井之特性試驗僅兩項，不符合 IEEE386-2006 之規定；參考 IEEE386-2006，建議增修訂如下：

材料規範 5.10 套管特性：變壓器一次套管井及二次套管之特性試驗須分別符合表 3-5 與表 3-6 規定。

表 3-5 一次套管井之特性試驗項目及試驗標準值

試驗項目	試驗標準值
(1)部分放電試驗	19kV, 3pC 以下
(2)交流耐電壓試驗	空氣中，40kV rms, 60Hz, ,一分鐘
(3)直流耐電壓試驗	空氣中，78kV, 15 分鐘
(4)衝擊耐電壓試驗	125kV, 1.2*50 $\mu$ s, 全波，波峰值
(5)短時間電流試驗	對稱電流 10kA rms, 0.17 秒, X/R=6 (最小) 3.5kA rms, 3 秒, X/R=6(最小)
(6)循環電流老化試驗	依 IEEE386, 7.10.2.2 節規定
(7)加速密封老化試驗	依 IEEE386, 7.12 節規定

表 3-6 二次套管之特性試驗項目及試驗標準值(依原訂表 9)

試驗項目	試驗標準值
(1)交流耐電壓試驗	空氣中，10kV rms, 60Hz, 一分鐘
(2)交流耐電壓試驗	注水，6kV rms, 60Hz, 10 秒鐘
(3)衝擊耐電壓試驗	30kV, 1.25*50 $\mu$ S, 波峰值

### 3.6.2 在工廠及現場執行部分放電檢測方法及準則

#### 一、部分放電之概述

變壓器因受到電場、過熱、機械應力、環境及人為等因素影響，導致絕緣劣化，其因素形成係有很多要因及現象，使絕緣破壞而發生停電事故。而部分放電為絕緣劣化媒介之一，亦是絕緣破壞要因之一；因變壓器內部如產生部分放電，高壓電磁場通過絕緣體後，在最弱的電介質點會產生微小部分放電，如未發現，放電量會持續增加，並有累積性劣化或裂痕，且在內部擴散，導致相關絕緣體劣化、短路或斷線，最終會使絕緣破壞而停電。

變壓器發生部分放電之原因彙總如下：

- (1) 絕緣物有氣隙、氣孔、龜裂、表面汙染或吸濕等現象。
- (2) 絕緣物受到過熱、過載、短路機械應力或異常電壓等現象。
- (3) 絕緣油有過熱、氣泡、吸濕或水分侵入等現象。
- (4) 鐵心接地不良或表面漏磁過大等現象。
- (5) 帶電體與外殼間或不同相繞組間之間距不足。
- (6) 施工不良，如變壓器之分離式絕緣連接接頭系統，各組件導體間之連接不緊密有間隙或彎曲，形成電氣性接觸不良，接觸電阻增加引起過熱。

由以上分析，變壓器故障應事先預防，不能等待其故障發生；預防措施應訂定嚴格的材料規範，依設計手冊設計，依施工準則施工，及實施不停電之部分放電檢測及 X 光檢測等，以避免變壓器發生故障停電。

#### 二、部分放電檢測方法

變壓器如有部分放電，會有閃光、化學反應、機械壓力波、電氣暫態訊號及熱反應等現象，其所發生的訊號需傳輸至絕緣物表面或外殼，才可量測部分放電，其中僅電氣暫態訊號及機械壓力波較易量測部分放電。因

部分放電時，會造成電壓及電流之暫態變化，暫態電壓變化需搭配電容式感測器耦合，暫態電流需搭配電感式感測器耦合始可量測[23]；另外一種現象係變壓器如有部分放電，會有脈衝現象，在絕緣體內有機械壓力波，即稱為聲音放射，它不會受到高電壓及電訊干擾，可將音波傳播出去，以供量測其音波大小。

部分放電檢測方法，大致上分為標準法、電場電容感測法、磁場電感感測法、超高頻(Ultra High Frequency, UHF)感測法、超音波檢測法及無線電波頻率干擾(Radio Frequency Interference, RFI)檢測法(亦稱為無線電干擾電壓(Radio Interference Voltage, RIV)檢測法)[24-25]等。茲依在工廠檢測及現場檢測別，分別說明如下。

#### (一) 工廠檢測部分放電

在工廠檢測時，通常係依 IEC60270 部分放電量測標準法[26]作業，在工廠實驗室量測時，停電下，在變壓器高壓側與外殼接地線間搭配串聯連接耦合電容器及量測阻抗，另將部分放電檢測器以電纜連接至量測阻抗，耦合電容器係與被測變壓器並聯；變壓器接外部電源，當變壓器有部分放電時，耦合電容器會補償電荷至放電位置。有關標準法量測之優缺點說明如下：

##### 1. 優點

- (1). 有標準的試驗設備
- (2). 有標準的校正程序
- (3). 高靈敏度
- (4). 雜訊干擾較少
- (5). 可量測放電起始電壓及熄滅電壓
- (6). 部分放電定位較容易

##### 2. 缺點

- (1). 需停電將相關搭配組件連接於高壓側與接地線間
- (2). 需由外部電源量測
- (3). 現場量測要停電，對用戶不利
- (4). 雜訊控制力較差
- (5). 在停電下量測結果與實際在運轉狀況不一致

## (二) 現場檢測部分放電

### 1. 電場電容感測法

當變壓器有部分放電時，可利用電場電容感測器耦合放電訊號，以量測暫態電壓之變化。在現場量測時不需停電，以部分放電檢測器搭配兩個電場電容感測器靠近變壓器量測內部放電，並可定位放電位置；如兩個電容感測器取得相同的信號，其輸出值為零，則需移動部分放電檢測器之位置，使其信號達到放電發生源在兩個電容感測器間中間值，電場電容感測器在變壓器不同位置會有不同的結果。

電場電容感測法適用於部分放電故障點與電容感測器間無金屬遮蔽體，如環氧樹脂絕緣變壓器，高壓電纜終端接頭及中間接續之部分放電量測；油浸式變壓器，因其外殼為金屬接地層，不易得到放電訊號。

有關電場電容感測法之優缺點說明如下：

#### A. 優點

- a. 為非接觸式量測，但需靠近變壓器
- b. 可在活電中量測
- c. 不需連接於變壓器高壓側
- d. 不需耦合電容器連接於變壓器高壓側
- e. 可快速掃描變壓器周圍

#### B. 缺點

- a. 不能透過電氣遮蔽體，金屬屏蔽量測
- b. 靈敏度不高(為改善靈敏度，可使用較大的感測器及探頭直接接地)
- c. 無方向性，會受到雜訊源之影響

### 2. 磁場電感感測法

當變壓器有部分放電時，會有暫態脈衝電流，在導線及接地線會產生磁場，利用磁場電感感測器感應磁場變化，並耦合放電訊號，以量測暫態脈衝電流之變化。在現場量測時不需停電，以部分放電檢測器搭配磁場電感感測器，再連接於變壓器外殼接地線，可量測變壓器內部放電，電感感測器為磁場感測及電感感測。電感感測法對乾式變壓器、比壓器、比流器量測結果較靈敏；對油浸式變壓器，其部分放電可透過金屬外殼路徑傳輸，且其金屬外殼連接於被接地線，亦可適用。

有關磁場電感感測法之優缺點說明如下：

A. 優點

- a. 可在活電中量測
- b. 不需連接於變壓器高壓端
- c. 不需外接耦合電容器
- d. 可快速掃描變壓器
- e. 高靈敏度

B. 缺點

- a. 未有方向性及選擇性
- b. 易受雜訊干擾
- c. 在活電下，訊號可能被背景雜訊覆蓋

3. 超高頻感測法

部分放電之頻譜通常可達數 GHz，而超過數百 MHz 稱為超高頻(Ultra High Frequency, UHF)，電視台都使用此頻帶；以此頻帶做為部分放電偵測有較多優點，許多雜訊源，如無線電台，半導體開關或在空氣中之電暈有較低的頻譜，不影響量測。超高頻在固態或油浸式絕緣物中，會快速變為稀薄，可正確指出部分放電位置。

超高頻感測器之耦合與電磁場耦合原理相同，係量測暫態電流之磁場變化。量測時，將部分放電檢測器搭配接觸式超高頻感測器，再將其引接電纜探頭貼上被測物表面；亦可另搭配高頻比流器，以量測被測物內部放電量及放電位置，其量測頻帶為 300MHz~3GHz。為能取得正確的放電位置，大型電力變壓器需使用四個超高頻感測器在變壓器不同位置檢測；小型變壓器可使用一個超高頻感測器。超高頻感測器在國內已開發正使用中。

有關超高頻感測器之優缺點說明如下：

A. 優點

- a. 可在活電下量測
- b. 不需連接於變壓器高壓側
- c. 不需電容耦合
- d. 可消除雜訊

- e. 可選擇量測頻帶，改善信號與雜訊比
- f. 可指出在遮蔽層絕緣體內之部分放電故障點

#### B. 缺點

- a. 有時候需另搭配特別的感測器
- b. 需靠近固態或油浸式絕緣物之部分放電發生點檢測(在數拾毫米內)
- c. 有時候受到許多設備之電源、短距離信號變弱、UHF 信號短波長度或校正連接強度等影響，未能完全顯示部分放電故障點之實際狀況。

### 4. 超音波感測法

變壓器內如有部分放電，會有脈衝現象，在絕緣物中會有機械壓力波，稱為聲音放射，可利用超音波感測器量測由部分放電所產生的機械壓力波(超音波)訊號。量測時，將部分放電檢測器搭配超音波轉換器，再搭配超音波感測器，然後將超音波感測器貼在變壓器表面或靠近一次套管位置，以接收部分放電之超音波，適用於油浸式變壓器之部分放電檢測。

有關超音波感測法之優劣點說明如下：

#### A. 優點

- a. 可在活電下檢側
- b. 不需連接至變壓器高壓側
- c. 不受到高壓電、電訊干擾及外界環境影響
- d. 可透過變壓器鋼外殼執行部分放電量測
- e. 可定位部分放電故障點

#### B. 缺點

- a. 內部繞組、套管組及絕緣油如有氣化，量測較困難
- b. 未能實施校正，因電氣設備與聲波間並無關係
- c. 大型電力變壓器需多具感測器，多點量測，以利比較分析訊號及放電定位。

有關變壓器內部分放電檢測，最好結合電氣法與超音波法共同檢測，會有較好及較正確的檢測結果。

## 5. 無線電干擾電壓感測法

無線電干擾電壓(RIV)感測法；依美國 IEEE C57.12.90 油浸式變壓器試驗規則[13]提示，如購買者與製造廠協議妥，部分放電檢測得改由無線電干擾電壓(RIV)感測法實施檢測。當變壓器內有部分放電時，部分放電產生無線電波頻率干擾光譜，會放射出電磁場能量，且係低能量脈衝之間歇性活動；無線電波頻率干擾之變化係依部分放電之距離與頻率之比例而定，無線電波頻率干擾之信號放射，以高頂端與低平均點作為尖銳脈衝。電暈及表面放電之無線電波頻率干擾之頻譜為 250MHz 以下，係依被測物條件及環境因素而定，而內部放電之頻譜為 1,000MHz 以下。

量測時，直接使用無線電波頻率干擾檢測器，在現場不停電下，以非接觸式在被測物周圍巡迴檢測，檢測由部分放電產生的電磁場信號，且可在數秒內檢測部分放電量及定位部分放電故障點，其音頻輸出亦可使用耳機聽，且亦容易輸出無線電波頻率干擾(RFI)信號。無線電波頻率干擾(RFI)感測器為一整體檢測器，不另搭配其他感測器就可檢測，市面上已有現品可供選用。

有關無線電干擾電壓(RIV)感測法之特點說明如下：

- (1) 可在活電下，在變壓器或變電所設備周圍巡迴檢測
- (2) 為輕型、非接觸式、手提移動式檢測器
- (3) 使用 RIV 技術可確認及定位部分放電故障點
- (4) 可配合維護部門之狀態基準維護計畫進行維護作業
- (5) 可顯示放電頻譜並比較結果
- (6) 內附軟體可協助檢測者記錄結果及分析部分放電訊號
- (7) 可取得無線電波頻率光譜之電磁場能量
- (8) 可顯示由部分放電引起放射之無線電波頻率干擾波形
- (9) 量測頻率範圍為 50MHz~1000MHz
- (10) 量測單位為 V、mV、 $\mu$ V 線性狀

## 三、部分放電之試驗程序及相關事項

有關部分放電之試驗程序及相關事項，係依 IEC 60270 高壓試驗技術之部分放電量測[26]，IEEE C57.113 油浸式電力變壓器部分放電量測[27]之建

議方式及 IEEE C57.12.90 油浸式配電與電力變壓器試驗規則[13]；分別說明如下。

## (一) IEC 60270 高壓試驗技術之部分放電量測

### 1. 試驗程序之選擇

#### (1) 檢測部分放電起始及熄滅電壓

可先使用遠低於預期起始之電壓施加於被試物，再逐漸升壓至放電量達到或超過指定之最低值，此指定最低值之試驗電壓為部分放電起始電壓( $U_i$ )；然後將電壓升高至指定電壓值，再降低電壓至放電量小於相同的指定放電量，在此放電限度時之試驗電壓為部分放電熄滅電壓( $U_e$ )。但要注意，無論在任何情況，被試物在試驗時，施加電壓不得超過被試物之額定短時間電力頻率耐電壓值，因會損害被試物。另外，起始電壓會受到電壓上升之額定影響，熄滅電壓會受到所施加電壓之大小與時間及電壓降低之額定影響。此試驗係在製造廠實施。

#### (2) 以指定試驗電壓量測部分放電

##### A. 不經預先加壓量測

以指定電壓值量測指定之部分放電量，此電壓可能會遠高於預期部分放電起始電壓，即施加電壓從低值逐漸升至指定電壓，並維持該電壓於指定時間。施加電壓得隨時間而改變，在試驗時間終點，應予量測部分放電量，當電壓升高或降低，或整個試驗階段，得量測部分放電量，並記錄之。於指定電壓之終點，量測部分放電，再降低電壓並切開開關。

##### B. 經預先加壓量測

試驗時，試驗電壓從低於指定之部分放電試驗電壓值，再升壓至超過指定電壓，並維持此電壓於指定時間，然後再逐漸降壓至部分放電試驗電壓值，在此試驗電壓值，持續施加此電壓於指定時間，並在時間終點時，量測部分放電量。在試驗期間，量測每一時間周期或整個指定時間之部分放電量。

上述兩種加壓量測方式，由購買者或製造廠選定。

### (3). 部份放電試驗程序

試驗程序依下列程序一或程序二；於預先加壓執行後，將部分放電試驗電壓達到規定值，並在 30 秒內量測其對應之部分放電位準。量測之部分放電 pC 值，不得超過規定值。

程序一：在電力頻率耐電壓試驗後，將試驗電壓降低，並調整至所規定的部分放電試驗電壓值，再量測部分放電 pC 值。

程序二：部分放電試驗在感應電壓試驗後實施(不連續)，先加壓至感應電壓試驗電壓值之 80%，並維持至少 60 秒，然後在無啟斷條件下，降低試驗電壓至所規定的部分放電試驗電壓值。

如未特別指定，而由製造廠決定試驗程序，其所使用的試驗方法應在試驗報告上註明。

## 2. 量測準確度及靈敏度

部分放電量測時，因會受到各種因素影響其量測結果，對於相對地重複出現情況，且部分放電於高試驗電壓量測時，較其他量測會有較大的誤差；因此，實施部分放電之驗收試驗時，這此問題應列入考慮。另部分放電亦會受到背景雜訊之影響，所以背景雜訊應低至足以準確量測部分放電，通常為低於指定容許部分放電量之 50%。

## (二) IEEE C57.113 油浸式電力變壓器之部分放電量測

### 1. 試驗程序

部分放電試驗程序及交流試驗電壓，需依 IEEE C57.12.90 [13]、IEEE C57.12.00 [12]。部分放電試驗時，首先將交流試驗電壓升壓至變壓器額定電壓之 50%，且每 60 秒記錄每相量測值，能量的背景雜訊需配合評估真正的部份放電，平均能量的背景雜訊位準需不超過變壓器部分放電容許值；交流試驗電壓再升壓至一小時試驗值，並持續保持此電壓，查看有否部分放電問題；試驗電壓再升壓至要求值，並持續保持 7,200 週波(2 分鐘)；然後再將試驗電壓降至一小時試驗值，並接續保持 60 分鐘或以上(如有需要)；在 60 分鐘期間，每一套管端，每 60 秒之視在電荷量需予以評估，且每隔 5 分鐘再另評估之。此試驗係在製造廠實施。

### 2. 部分放電試驗電路

在感應電壓下之部分放電試驗，首先將部分放電檢測器及交流電壓表分別連接於耦合器，再將耦合器連接於高壓套管分接頭，單相電力變壓器之一次繞組係由二次繞組激磁，二次側試驗電壓電源依 IEEE C57.12.90 及 IEEE C57.12.00 規定。如有需要得搭配二次側濾波器，以降低交流電源之干擾。一次及二次側引接線需儘量使用較短者，使有最小的電感，才可降低電磁性雜訊之衝擊。試驗時搭配之耦合器，通常為量測阻抗及為信號過濾與過電壓保護之增加元件，應儘量靠近套管分接頭位置；部分放電脈衝耦合器為部分放電脈衝及交流試驗電壓之信號輸出，耦合器需連接於部分放電檢測器之引接電纜及交流電壓表。

### (三) IEEE C57.12.90 油浸式配電及電力變壓器試驗規則

#### 1. 變壓器內部分放電

油浸式變壓器內部分放電量測位置，應在變壓器繞組端子量測其放電量(pC)。如購買者與製造廠協議妥，得以無線電干擾電壓(RIV)量測取代部分放電試驗。

#### 2. 量測儀器

量測時，應使用部分放電檢測器，以量測變壓器內產生的部分放電，依 IEEE C57.113 [27]所指定的部分放電檢測器，可配置在變壓器套管端子旁，以量測部分放電。在試驗時可搭配套管端子之電壓分接頭與線路端子耦合或搭配適當的耦合電容器與套管併聯連接，其一般原則及電路參閱 IEEE std 454 [28]及 IEEE C57.113 [27]。為避免受到空氣中電暈影響，通常得使用外部遮蔽物，譬如在套管端子或被接地突出物可能會發生此種現象。在試驗時，亦得使用無線電波頻率抗流器或調和濾波器，以隔離變壓器及測試電路雜訊。

#### 3. 校正

試驗電路應依 IEEE C57.113 規定予以校正。

#### 4. 無線電干擾電壓(RIV)量測

##### (1) 內部放電

在量測變壓器內部放電時，應依在繞組之線路端子量測到所產生的無線電干擾電壓(RIV)值而定。

##### (2) 量測儀器

依 IEEE C63.2 [29]規定之無線電波雜訊及磁場強度儀表，應予使用以量測由任何內部部分放電所產生的無線電干擾電壓；量測時，應以 1MHZ 頻率為類似尖載基準，頻率從 0.85MHz 至 1.5MHz，得使用以區別區域性無線電台信號干擾。無線電波雜訊儀器應在量測時，透過套管電容分壓器與繞組電路端子耦合；另應搭配適當的器件，以補償在套管電容分壓器與儀表(引接電纜、轉接器)間由套管電容分壓器對地電容加上所有組件產生之電容分離效應，此器件應調整電容分離效應至最小，且將無線電干擾電壓信號，以最小的衰減量傳送至無線電波雜訊儀表。另亦可使用外部遮蔽物，以避免受到在套管端子或被接地突出物產生的空氣電暈影響。無線電波頻率抗流器或過濾器亦得使用，以隔離變壓器及測試電路雜訊。

#### 四、部分放電量測準則

油浸式變壓器量測部分放電量之標準值，各種標準協會或各公司所訂不一，茲說明如下：

##### (一) IEEE C57.12.00

對油浸式配電變壓器之出廠試驗，不要求量測配電變壓器之部分放電。

##### (二) IEEE C57.113 油浸式電力變壓器之部分放電量測

油浸式電力變壓器出廠試驗之部分放電試驗，如符合下列情況者，視為合格：

1. 在一小時試驗期間，量測之視在電荷量，不超過 IEEE C57.12.90 [13] 及 IEEE C57.19.00 [30]所規定之電荷量，以線間電壓為  $1.5U_m/\sqrt{3}$ ，試驗時間為 30 秒，視在電荷量小於 500pC。
2. 在一小時試驗期間，量測之視在電荷增加量，不超過 IEEE C57.12.11 [31]，IEEE C57.12.90 及 IEEE C57.19.00 所規定值。
3. 在一小時試驗期間，量測之視在電荷量，未顯示任何穩態上升趨勢，且在試驗最後 20 分鐘期間，未發現電荷量突然且持續上升。

量測結果之判定，需以每 5 分鐘量測值為基準；而由起重機或其他

周圍雜訊源引起之部分放電瞬間游離值不予記錄。試驗得予延長或重複，一直至獲得可接受之量測值；如未能符合允許值，不能立即退貨，需由製造廠及購買者再協商解決。

### (三) IEEE C57.12.90

本標準特別規定，如購買者與製造廠協議妥，得以無線電干擾電壓(RIV)量測取代部分放電試驗。

出廠試驗，量測無線電干擾電壓(RIV)，如符合下列規定，應視為可接受：

1. 無線電干擾電壓(或部分放電)不超過  $100\ \mu\text{V}$
2. 無線電干擾電壓(或部分放電)之增加量，在一小時內不超過  $30\ \mu\text{V}$

無線電干擾電壓(或部分放電)大小，宜在 5 分鐘內判定；而由搬運機或其它之周圍音源引起之 RIV 儀器瞬間跳離，則不予記錄。同樣地，試驗得再予延長或重複，直至獲得可接受之結果。但如未能符合可接受的試驗值，不得立即判定不合格，應由購買者與製造廠協商(或再進一步調查)。

### (四) 台電業務處所訂之配變電設備不停電預知劣化檢測實施原則[32]

依該檢測實施原則，既設變壓器量測部分放電不易判定是否異常，必須蒐集變壓器正常運轉背景值(含外在因素及歷史值)，並互相比較判定或依廠家建議標準值判定。

現場既設桿上變壓器維護試驗之部分放電量規定如下：

部分放電量(pC)如小於 50pC 為正常；50~150pC 為警報；大於 150pC 為異常。

### (五) CNS13390 C4468 [33]

樹脂型乾式變壓器出廠試驗之部分放電試驗，其放電量規定值為小於 50pC。

### (六) 日本 JISC4306-1999 [34]

配電變壓器出廠試驗，線間電壓為  $1.3U_m/\sqrt{3}$ ，試驗時間為 30 秒，放電量小於 50pC。

(七) IEEE 386-2006 [10]

套管井之出廠試驗，其最小電暈電壓為 19kV，放電量為 3pC 以下。

## 五、結論及建議

### (一) 一次套管井

1. 密封型桿上變壓器之一次套管井裂化，引起故障停電，除其絕緣品質不良及材規不完整等原因外，另有施工不良；因其與相關分離式連接組件之接續不緊密，有空隙或間隙或有彎曲，形成接觸不良而產生異常溫度，並累積熱量，使一次套管井絕緣不良，致發生沿面過熱有部分放電現象，導致變壓器故障。因此建議在施工後或桿變故障後，須以 X 光檢測器檢查有否施工不良；另一次套管井施工送電後，亦建議需定期以紅外線測溫器或紅外線熱顯影像儀器，量測一次套管井有否異常溫度，及有否超過台電公司之預知劣化檢測實施原則標準值。
2. 密封型桿上變壓器之一次套管井係依材規 C035 製造及試驗，其電壓額定、電流額定、遮蔽層、定型試驗及出場試驗係依 IEEE386-2006 標準訂定；另材規 Y065 (改良型桿上變壓器)及材規 C001 (亭置式變壓器)亦有訂定一次套管井之相關事項。經檢討一次套管井之材料規範不完整及有缺失，其需增修訂及建議分別說明如下：
  - (1) 材規 4.6.1 節，一次套管井之材質，加裝絕緣套及加裝襯墊等未規定；建議參考材規 Y065 及 C001 之規定予以增修訂，以避免廠家使用不良材質及防止漏油，有關材規 4.6.1 增修訂，詳如 3.6.1 節四之(一) 1 所述。
  - (2) 材規 4.6.2，經檢討一次套管井連接之套管插頭，兩者尺寸之配合未規定，且 IEEE386-2006 試驗項目未列出。建議參考材規 Y065 及 C001 之規定予以增修訂，且將 IEEE386-2006 標準之試驗項目列入，以增進及確認其絕緣特性，有關材規 4.6.2 增修訂，詳如 3.6.1 節四之(一) 2 所述。
  - (3) 材規 5.3.2，定型試驗項目，未列入一次套管井特性試驗，因一次套管井為變壓器內部與外部之介面，且為密封型桿上變壓器之重要組件，建議將 IEEE386-2006 標準之一次套管特性試驗列入定型試

驗內，以增進及確認其絕緣特性，有關材規 5.3.1 增修訂，詳如 3.6.1 節四之(三)所述。

- (4) 材規 5.10 一次套管井特性，僅規定耐電壓試驗及衝擊耐電壓試驗等兩項，經檢討未符合 IEEE386 標準(至少有 7 項)，材規 C001 亦規定 7 項試驗，建議材規 5.10 需增修訂，以增進及確認其絕緣特性，詳如 3.6.1 節四之(五)3 所述。
- (5) 材規 6.3 廠商之出廠報告，未列入一次套管井特性試驗，建議參考 IEEE386-2006 標準，將一次套管井特性試驗列入材規 6.3 之出廠報告，以增進及確認其絕緣特性，詳如 3.6.1 節四之(五)1 所述。
- (6) 材規之驗收試驗，對於一次套管井得視需要予以抽試，因一次套管井為密封型桿上變壓器重要組件，不宜採視需要抽試，建議改為必須試驗，且將材規附錄 2.6 特性試驗，增訂一次套管井需抽一具實施部分放電試驗及交流耐電壓試驗，因此兩項試驗為 IEEE386-2006 標準所規定之出廠試驗項目。

## (二) 部分放電檢測方法及準則

### 1. 部分放電檢測方法

- (1) 參考 IEEE C57.12.00 油浸式配電變壓器標準，部分放電試驗列於其他試驗項目中；在工廠之部分放電檢測方法，建議依 IEEE C57.12.00 或/及 IEC60270 標準實行，詳如 3.6.2 節三之(一)所述。
- (2) 現場部分放電檢測方法有電場電容感測法、磁場電感感測法、超高頻(UHF)感測法、超音波感測法及無線電干擾電壓感測法等，詳如 3.6.2 節三之(二)2 所述；各種感測法有其優劣點，現場實施密封型桿上變壓器部分放電檢測，得視現場需要選擇適用感測法。如要檢驗一次套管井之部分放電，建議採用超音波檢測法(或無線電干擾電壓感測法)，並將檢測儀器靠近一次套管井檢測。
- (3) 部分放電檢測之試驗程序，分別列出 IEC60270 標準之試驗程序、IEEE C57.113 油浸式電力變壓器部分放電量測之試驗程序、及 IEEE C57.12.90 油浸式配電及電力變壓器試驗規則。建議在工廠檢測部分放電，可依 IEC60270 標準之試驗程序；IEEE C57.113 標準之試驗程序適用於電力變壓器，僅供參考。

## 2. 部分放電量測準則

部分放電量測標準值(容許值)，分別列出 IEEE C57.113、IEEE C57.12.90 及台電公司業務處之配變電設備不停電預知劣化檢測實施原則之標準值等，詳如 3.6.2 節之四所述。IEEE C57.113 適用於電力變壓器，僅供參考。IEEE C57.12.90 係規定無線電干擾電壓標準值，如採用無線電干擾電壓感測法，可採用此標準值；台電公司規定之部分放電標準值，可適用於現場密封型桿上變壓器之部分放電檢測。IEEE 386-2006 一次套管井之部分放電標準值，可作為出廠試驗之依據。

## 3.7 研議變壓器中間檢查之項目，執行時機，要點及成效評估

密封型桿上變壓器從進料及製造過程中，實施產品品質管制及中間檢查是很重要的事項，品質管制由製造廠商負責處理，中間檢查由台電公司處理；如製造廠商對製品品質管制不佳，而台電公司業務處對於製品之品質管制及中間檢查未詳訂中間檢查執行相關事項，其製品會有瑕疵，交貨後裝設於現場，其耐用壽命會縮短，甚至會發生故障。因此製造各階段作業，製造廠商應嚴守製造技術標準及嚴格的品質檢驗，亦即製造廠商從進料至完成製品及出廠試驗，應依自訂的變壓器品質管理系統之各項規定落實執行，以確保具有高可靠性之變壓器。所以對於採購變壓器，應有嚴格的材料規範，其中有關中間檢查項目，亦需檢討改善，另執行時機及實施要點也要訂定，以利檢驗員執行。

### 一、中間檢查項目

密封型桿上變壓器製造之中間檢查，其檢查項目，從進料開始至完成製品之各階段(含製造廠商之品質管制)均可列入檢查；但因製程時間很長，台電公司相關單位人力亦難時常監控及檢查，即無法全部製程列入檢查。其實如製造廠商對製品有嚴格依 ISO-9001 品質管理系統執行，台電公司相關單位得不需中間檢查；但為瞭解製造廠商之自主管控能力是否良好，有需要至工廠檢查始可驗證，以增進產品之品質要求，使產品出廠後裝設於現場使用，可延長其壽命。因此材規 C035 (96-07) [1]亦有訂定品質管制及中間檢查之規定，每次採購均依規定執行；但材規所定的中間檢查相關事項是否符合需要，必須再檢討評估之。

依現行材規 C035 第 6.2 節中間檢查，其第 6.2.2 節所訂的中間檢查範圍為在中間檢查日期前之製造完成品或半成品、裝妥項目均列為中間檢查範圍，如構造尺寸、組合及接線、外殼材質與厚度、焊接、塗裝、心體固定、絕緣紙、及第 5.5 節~第 5.20 節各項特性試驗等。又依台電公司業務處九十九年度配電技術發展報告[35]之桿上變壓器中間檢查標準作業程序簡介，其中間檢查項目為構造尺寸、外殼材質與厚度、焊接、塗裝、線圈捲繞、鐵心疊積組裝、心體組立(含鐵心單點接地)、心體乾燥、心體入桶、各組件(含核對型號)組合及接線、真空注油等；此配電技術發展報告所述中間檢查項目較材規 C035 規定項目更為完整。

有關檢討密封型桿上變壓器製造之中間檢查項目，首先了解該型變壓器之製造結構及配件之組合，包括進料管制及試驗，主要分為：

- (1) 鐵心(含材質、組立、固定及熱處理)
- (2) 線圈(含材質、絕緣紙、捲繞、配置、組立、接線及熱處理)
- (3) 心體組合(含鐵心與線圈組立、夾件組立、固定、配結線及熱處理)
- (4) 外殼(含材質、組立、表面處理、焊接、塗裝及熱處理)
- (5) 保護設備組裝(含限流熔絲、遮斷開關及避雷器等入殼組裝)
- (6) 附屬配件組裝(含一次分接頭切換器、壓力釋放裝置、一次套管井、二次套管組合接線、襯墊、被覆、防水套)
- (7) 總組裝(含上述 6 部分構件之組立即配接線、絕緣油、注油方式、接地配裝、心體入殼、保護設備及附屬配件之組裝、固定及配接線)
- (8) 特性試驗

現行材規 C035 第 6.2 節規定之中間檢查項目及該型變壓器構造，經檢討中間檢查項目有些不完整；且製造廠之品質管理系統亦需列入中間檢查，以驗證有否執行。材規 C035 第 6.2 節修正建議如下：

1. 材規第 6.2.1 節增修訂為：「變壓器得標後，開始製造前 7 天，應提出製造計畫表、製造流程圖及 ISO 9001 品質管理系統之管制程序書及作業說明書一覽表送本公司採購(材料)單位及請購用料單位各乙份備查，本公司得隨時派員查驗，如未依規定提出上述資料而逕行製造者，本公司得拒絕驗收其產品」。
2. 材規第 6.2.2 節增修訂為「中間檢查範圍：製造廠依其自訂之製造計畫表及製造流程圖執行製造，其在本公司派員實施中間檢查前所完成製

品或半成品裝配項目及品質管理系統均列入中間檢查之項目。中間檢查項目為：

- (1) 製造廠之 ISO-9001 品質管理系統相關管制程序書及作業說明書(如進料檢驗管制程序、產品設計標準作業說明書、產品製程管制程序、產品製造規範作業說明書、產品各構件作業程序、檢驗設備校正管制程序、半成品及成品檢驗管制程序及不合格產品管制程序等，如製造廠欠缺上述資料，則請製造廠補訂)，及進料檢驗之查對(如進料憑證、供應廠商出廠檢驗報告、配件及零件自主進料檢驗報告)。
  - (2) 構造尺寸
  - (3) 鐵心(含材質、組立、固定及熱處理)
  - (4) 線圈(含材質、捲繞、絕緣紙及熱處理)
  - (5) 心體組合(含鐵心與線圈組立、固定、配結線及熱處理)
  - (6) 外殼(含材質、厚度、焊接及塗裝)
  - (7) 保護設備入殼組裝(含限流熔絲、遮斷開關及避雷器之規格、配線及與外殼間距)
  - (8) 附屬配件組裝(含一次套管井及二次套管組之材質、引接線與絕緣、襯墊、被覆及防水套)
  - (9) 總組合(含心體與保護設備入殼、配結線、絕緣油、真空注油方式、鐵心接地及外殼接地)
  - (10) 第 5.5 節至第 5.20 節各項特性試驗
3. 材規第 6.2.3 節及第 6.2.4 節不需增修訂。

## 二、中間檢查執行時機

密封型桿上變壓器中間檢查之執行時機，需選定最適當的時間執行，以掌握其製造過程之重要部位，及半成品或成品之品質；但要選擇執行時機，首先要了解其製造流程及設計圖，因各廠家製造流程可能不一，各型變壓器製造流程亦不一。現以密封型桿上變壓器製造流程種類之一為例，其製造流程圖如下[36-37]。

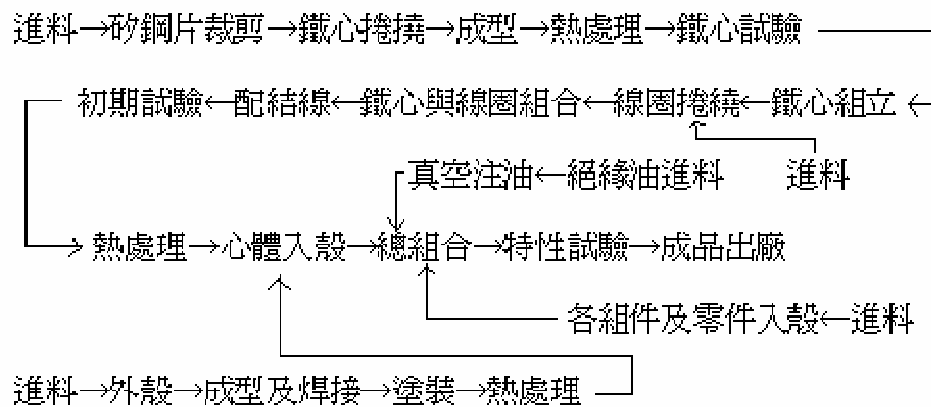


圖 3-16 密封型桿上變壓器製造流程種類之一

因此需依製造流程圖及需中間檢查項目，再依製造計畫表之時程，排定時間至工廠實施中間檢查。有關中間檢查，依製造過程別，其執行時機如下：

- (1) 矽鋼片進料及組立中及完成時
- (2) 線圈進料與組立中及完成時
- (3) 鐵心與線圈組合中及完成時
- (4) 外殼進料、製成、塗裝時
- (5) 心體入殼組立、配接線(未入油前)，得要求吊起檢查
- (6) 保護設備進料，入殼組裝中及完成時(未入油前)
- (7) 附屬配件與零件進料及組裝時(未入油前)
- (8) 絕緣油進料，真空注油時

### 三、變壓器製品中間檢查實施要點

密封型桿上變壓器製造時，執行製品中間檢查，其檢查流程、重點、及注意事項，需予文件化，有關密封型桿上變壓器製品中間檢查實施要點[35]，建議如下：

1. 變壓器製品中間檢查之依據：材規 C035 第 6.2 節(中間檢查範圍)，第 2 節(適用標準)及第 5.1.1 節(製造廠提送本公司審查認可之設計圖)。
2. 製品中間檢查之檢驗單位及工作分配
  - (1) 主驗(收料)單位：依排定中間檢查日期，主持中間檢查程序、通知會驗、協驗單位參加。查對相關度量衡之校正紀錄，特性試驗報告由試驗單位填寫。

(2) 會驗(用料)單位：會同中間檢查並共同參與抽樣及查對材規規定之資料文件。

(3) 協驗單位：

A. 綜合研究所：會同受委託器材中間檢查之特性試驗或部分抽樣樣品之試驗。

B. 電力修護處：會同處理中間檢查之構造檢查。

### 3. 製品中間檢查時程排定

預定中間檢查之日期，由請購(用料)單位，依製造廠之製造計畫表所列變壓器各構件之開始製造至完成時程，選定預定中間檢查日期，並將預訂中間檢查日期，提前送主驗(收料)單位，由其排定中間檢查日期，並通知會驗單位及協驗單位，共同執行中間檢查。

### 4. 製品中間檢查項目

#### (1) 進料檢驗之查對

A. 依材規 C035 之變壓器構造，查對重要構件及零配件，如矽鋼片、線圈導線、絕緣紙、限流熔絲、遮斷開關、避雷器、一次分接頭切換器、壓力釋放裝置、一次套管井、二次套管組、襯墊、被覆、防水套、絕緣油等之進料憑證、供應廠商之出廠檢驗報告、及製造廠各構件與零配件之自主進料檢驗報告等進料品質管理資料文件，有否依品質管制程序執行，如進料檢驗管制程序書；並與材規 C035 及相關國內外標準核對。

B. 依製造時程及製交數量，查對材料(進貨發票或進貨證明)之進貨日期及數量，並查對中間檢查日期前製造半成品或完成品所施作之出廠試驗檢測數值。

#### (2) 製品中間檢查項目及實施方式

製品中間檢查項目，依材規 C035 第 6.2 節中間檢查所示之項目(第 6.2.2 節)，建議增修訂其檢查項目為：

A. 構造尺寸

B. 鐵心(含材質、組立、固定及熱處理)

C. 線圈(含材質、捲繞、絕緣紙及熱處理)

D. 心體組合(含鐵心與線圈組立、固定、配結線及熱處理)

E. 外殼(含材質、厚度、焊接及塗裝)

- F. 保護設備入殼組裝(含限流熔絲、遮斷開關及避雷器之規格，配結線及與外殼間距)
- G. 附屬配件組裝(含一次套管井及二次套管組之材質、引接線與絕緣、襯墊、被覆及防水套)
- H. 總組合(含鐵心體與保護設備入殼、配結線、絕緣油、真空注油方式、鐵心接地及外殼接地)
- I. 材規 C035 第 5.5 節至第 5.20 節各項特性試驗
- J. 製造廠之 ISO-9001 品質管理系統相關管制程序書及作業說明書(如進料檢驗管制程序、產品設計標準作業說明書、產品製程管制程序、產品製造規範作業說明書、產品各構件作業程序、檢驗設備校正管制程序、半成品及成品檢驗管制程序、及不合格製品產品管制程序等)及進料檢驗之查對(如進料憑證、供應廠商出廠檢驗報告、主構件配件與零件自主進料檢驗報告)。

製造廠於變壓器注油前，應自行拍攝每具變壓器之內部構造及接線，並燒錄於光碟送本公司存查。另製造過程中，依材規 C035 須實施特性試驗者，需予以查對，如：

- A. 一次套管井之特性試驗(依 IEEE386 標準)報告之查對。
- B. 二次套管組組合後之外觀檢查及特性試驗(材規 C035 表 4)報告之查對。
- C. 壓力釋放裝置之特性試驗(材規 C035 表 5)報告之查對。
- D. 一次分接頭切換器之特性試驗(材規 C035 表 6)報告之查對。
- E. 絕緣油灌入殼內後之特性試驗(材規 C035 表 7)報告之查對。
- F. 絕緣油及絕緣紙來源證明(購買證件)文件之查對。

依材規 C035 及本要點規定之中間檢查特性試驗項目，需先核對檢測儀器設備之校正紀錄，如符合始可施作特性試驗。每次中間檢查之抽檢與抽試及不合格處理方式，依材規 C035 第 6.2.3 節及第 6.2.4 節規定處理。

## 5. 製品中間檢查執行結果

製品中間檢查完成後，由主驗(收料)單位填寫「中間檢查紀錄」，經參與檢查人員及製造廠代表人簽章後結案。

#### 四、中間檢查成效評估

密封型桿上變壓器在製造過程中，製造廠需利用專業知識及作業方法，將製造要項予以標準化及文件化，並應遵守製造品質標準，且能持續改善，以避免製造過程中之異常現象。製造廠對產品製造過程之監控量測，亦須規劃及執行半成品及完成品之檢驗，且具有 ISO-9001 品質管理自主檢查機制，依檢查標準逐項進行檢查工作。總而言之，製造廠須從各項組件進料至製品完成交貨期間，均應作最嚴格的品質檢驗。以上為製造廠自我要求的品質管理，台電公司收用料單位也必須派員至製造廠查驗其產品之品質管理要求有否做到，以達成中間檢查之成效；但要派員中間檢查，除材規要訂定嚴格中間檢查項目外，亦須另訂檢查時機及檢查執行要點，以作為現場中間檢查之依據。

為了解製造廠成品交貨後之使用故障狀況，依台電公司業務處統計 100 年度密封型桿上變壓器故障數量為 538 具，另依材規 C035 規定，交貨後須保固三年。而由故障變壓器中發現製交後未達三年就發生故障有 41 具，佔比 7.6%，數量不多，其中製造日期與故障日期之間，在一年內發生故障有 18 具，二年內有 17 具，三年內有 6 具；裝置日期與故障日期之間，在一年內發生故障有 30 具，二年內有 11 具。依業務處分析變壓器故障類別為燒損、絕緣破壞、分接頭不良、漏油、跳脫及其他原因；發生故障原因為雷害、絕緣劣化、品質不良、自然劣化、超載、原因不明及其他原因。

由以上資料得知，在製造過程中，相關保護設備品質不良，未能發揮作用斷電或絕緣材質不良引起絕緣破壞或高低壓側套管襯墊不良引起漏油等。所以製品不予中間檢查或有訂中間檢查未予嚴格執行，其產品交貨後，雖經驗收試驗，但驗收試驗僅為抽樣試驗，不能完全代表全部產品品質為良好者。如能將產品中間檢查嚴格執行，應可管控產品之品質，產品交貨後使用於現場配電線路，可延長其壽命(通常桿上變壓器之壽命約為 20 年)，並可避免故障事故而引起停電。因在製造過程中，執行中間檢查，可查對製品有否瑕疵或不良，如發現半成品或成品之樣品有瑕疵或不良，需進一步查明不良原因，甚至再全面盤查再要求製造廠將不良品移除，重新製交符合材規之產品。由以上之詳細說明與分析，可顯示中間檢查確有需要及具有成效。

## 五、結論及建議

1. 具有高可靠性之密封型桿上變壓器，在製造方面，除製造廠須有高設計品質及製造品質外，仍應建立監督查對機制，而此機制必須由製造廠與台電公司收用料單位分別建立及執行，雙方應依自訂的機制嚴格遵守，以確保產品之品質。
2. 密封型桿上變壓器製造從進料及製造過程中，實施產品品質管制及中間檢查是很重要的事項，所以台電公司收用料單位應依材規 C035 之中間檢查規定嚴格執行。另建議訂定製品中間檢查實施要點(詳如 3.6.7 節之四所述)，以利台電公司收用料單位據以執行，避免製造廠以不良品交貨。
3. 變壓器之中間檢查項目，應妥為訂定，力求完整性，即應從進料開始製完成製品之各階段作業均應列入檢查。現行材規 C035 第 6.2.2 節所定之中間檢查項目有些不完整；且製造廠之品質管理系統亦須列入中間檢查，以驗證有否執行，有關材規 C035 第 6.2.1 節及第 6.2.2 節(中間檢查範圍)，建議增修訂(詳如 3.6.7 節之二所示)
4. 建議製造廠應具有 ISO-9001 品質管理系統登錄證書，且應依 ISO-9001 品質管理系統之要求，從進料製造，完成品之流程，建立變壓器之進料、製造、品管、試驗、監督查對、及完成品等各項品質管理機制，如產品實現之規劃、產品之要求、產品設計之規劃、要求及審查、採購之管制及查證、產品放行方法及查證、產品製造之管制及審查、產品之核准方法及程序、產品之監控及量測、不符合產品之管制等，建立其對應之管制程序書及作業標準說明書。台電公司收用料單位執行中間檢查時，可查對製造廠有否執行。另製造廠亦應嚴格執行品質管理，於報驗時，需將自行品管之出廠試驗報告送台電公司用料單位及試驗單位備查。

## 3.8 本章結論

### 一、箱體氣密及入油規範

1. 為確保箱體的氣密性，在整體結構方面屬週全。
2. 對耐油襯墊，原未詳訂規範細節，建議明訂變壓器各組件所使用之襯

墊，須符合 CNS 3550 CII-610 種類之防潮耐油襯墊，加列襯墊試驗方法及合格標準，如表 3-1；並注意安裝之施作過程及使用適當之施工工具，且在定型試驗中要求提出襯墊試驗報告。

3. 為防止一次套管井在桶內側因缺油而降底絕緣性能，可考慮在套管井內側可加裝有開口(向上)之絕緣封套，於正常使用時封套內亦充滿絕緣油，遇桿變傾斜時，套管井內側全部仍可充滿絕緣油，而不致降低絕緣性能。
4. 無需改變釋壓閥結構及性能；但如能在變壓器外殼上之釋壓閥上方加裝防雨罩或半蓋板裝置(如一次分接頭切換器)，且不妨礙桿上作業人員安裝變壓器，則對釋壓閥有多一層防水侵蝕的保護功能。
5. 為確保變壓器性能，絕緣油仍採用符合本公司材規 I002 特性之新油，並使用真空灌油法，灌入量在常溫時(25°C)須達到標準油位線以上。
6. 絕緣油試驗項目及品質建議依表 3-1 (參考 Y065 (100-11)「改良套管型桿上變壓器」表 7)絕緣油試驗項目及標準辦理，此規範較為嚴謹，並加列抗氧化劑一項，以確保變壓器絕緣油性能。

## 二、絕緣紙材質規範及管制方案

1. 密封型桿上變壓器用絕緣紙材質規範，仍以目前透過絕緣紙絕緣強度(絕緣破壞強度)的方式來判定較為單純。
2. 變壓器製造廠對絕緣紙的進料管控甚為重要，絕緣紙製造廠對絕緣紙進料前之包裝，須以不致引起污損、傷害、吸濕且適於輸送之方法施行，並須有明顯之標示：包括名稱、種類、尺度(厚度 x 寬)、淨重、製造廠名稱或商標、製造年月、製造號碼。在購料驗收時，應檢查其外觀及量測厚度及相關尺寸，並針對前述物理及電氣特性作抽樣試驗，合格後，始可進料。對驗收合格後絕緣紙應妥適保存。

## 三、密封型桿上變壓器一、二次側繞組短路及繞組層(匝)間短路之檢測試驗方法及準則

可引用 CNS 599, IEEE C57.12.00, IEEE C57.12.90, IEEE C57.12.91 等相關標準與檢測試驗方法實施各項試驗：匝比試驗、繞組之電阻測定、開路試驗(無負載電流及無負載損測定)、耐電壓試驗、感應電壓試

驗、衝擊電壓試驗、溫昇試驗、絕緣電阻試驗。

#### 四、鐵心磁通密度，渦流損於工廠試驗之檢測方法

依 CNS 7214 C3117 (2010 年 11 月 18 日修訂)之「電磁鋼片及鋼帶試驗法」，鐵心磁通密度及鐵損試驗的量測設備須使用 25cm Epstein 試驗器。變壓器無負載損(鐵損)可依 CNS599 C3003 第五節「無負載電流及無載損測定(開路試驗)」或 IEEE Std. C57.12.90-2010 第 8.2 節「No-Load Loss Test」測試其無載損失，再依磁滯損與渦流損所佔之比例，算出其渦流損。

#### 五、套管井沿面距離與閃絡關聯性

1. 密封型桿上變壓器建議比照改良套管型桿上變壓器【材規 Y065 (100-11)】油位線之規定：變壓器內側須明顯壓出最低油位、25°C 標準油位及 140°C 最高油位線，並分別於壓出之油面線上塗以紅色(最低油位線及 140°C 最高油位線)及黃色(標準油位線)標示，各油位線寬度以不大於 4mm 為原則，其位置須經台電公司審查認可。
2. 變壓器套管井沿面距離與閃絡關聯性。為達到一次套管井單獨就能通過 60 赫乾燥耐電壓 1 分鐘(有效值) 40kV (指在空氣中，非絕緣油中)，如不附裝絕緣封套(罩)，則勢必要增加套管沿面距離(增加 16 毫米(mm)的沿面距離到 78 毫米(mm))，如此不僅增加變壓器的尺寸，在重量上及形體上亦相對增加，在運搬及安裝上也增加困難度。為使變壓器內之絕緣油維持正常的油面高度，並防止密封型桿上變壓器漏油，建議一次套管井末端附裝向上絕緣封套，防止因缺油所造成的沿面絕緣距離不足。

#### 六、密封型桿上變壓器高壓套管井耐候性及部分放電檢測方法與準則

(一) 密封型桿上變壓器高壓套管井耐候性及其材料規範 C035 增修訂之探討分析

##### 1. 一次(高壓)套管井

(1) 現行材料規範 4.6.1 不完整，如高壓套管井材質、固定方式及密接性等未規定，經參考改良型桿上變壓器(Y065)及亭置式變壓器

(C001)材料規範，並將內容分開規定，建議增修訂如下：

材料規範 4.6.1：一次套管井須為環氧樹脂(Epoxy Resin)或更佳之材質，其油中端若加裝絕緣套須為耐油、耐熱及絕緣良好之橡膠材質，且用押鐵及襯墊完全密接於變壓器外殼上，以防止水份浸入或絕緣油滲出，並須能由外部更換。交貨時應以護套套住，以防灰塵雜物進入。(原訂定之構造、尺寸及試驗標準應符合 IEEE 386 之標準，改列入材規 4.6.2)。

(2) 現行材料規範 4.6.2 高壓套管井連接之套管插頭，兩者尺寸之配合未規定，且未將 IEEE386 試驗項目列出，經參考 IEEE386 及材料規範(Y065 及 C001)規定，建議增修訂如下：

材料規範 4.6.2：一次套管井額定電壓為 15.2kV (相對地)，額定電流為 200A，其構造、尺寸、試驗項目、方法及標準應符合 IEEE386 標準。套管井應可適合配裝本公司材料規範 A008「預鑄型高壓電纜接頭及配件」之 200A 套管插頭。

(3) 現行材料規範 4.6.4 需再補強，參考材料規範(Y065 及 C001)，建議增修訂如下：

材料規範 4.6.4：套管井押鐵厚度應為 6 公厘以上之 SUS304 不鏽鋼製成，押鐵表面及螺栓、螺帽接觸處不得塗裝。

(4) 現行材料規範 4.6.5：套管井須能外部更換，建議併入材規 4.6.1 節(套管井須能外部更換)。

## 2. 設計圖面

(1) 現行材料規範 5.2 設計圖面規定不完整，參考材料規範 C001，建議增修訂如下：

材料規範 5.2 (4) 一次套管井之規格、特性試驗、廠牌型號及裝配組立圖。

## 3. 定型試驗

(1) 現行材料規範 5.3.2 定型試驗應實施項目未列入一次套管井特性試驗。參考材料規範 C001，建議增修訂如下：

材料規範 5.3.2：定型試驗應實施項目如下：

(1)~(14)不變，增加(15)一次套管井特性試驗。註：2.(11)~(14)改為(11)~(15)。

#### 4. 耐電壓試驗

- (1) 現行材料規範 5.7.2 耐電壓試驗規定為 24kV，一分鐘，不符合 IEEE386-2006 與材規 Y065 與 C001 為 40kV，一分鐘規定。有關材規 5.7.1 與 5.7.2，參考材規 C001 之規定，建議增修訂如下：

材料規範 5.7.1：繞組耐電壓：除高壓側線圈...均須予以接地。

材料規範 5.7.2：套管井耐電壓：將變壓器內絕緣油抽出，直至油面低於套管井下緣，使高壓套管井未浸泡於絕緣油中，將限流熔絲負載端之引線拆離，由高壓套管井施加 40kV，60 赫近似正弦波有效電壓，一分鐘，高壓套管井及高壓套管井至限流熔絲間之接線不得發生任何異狀。

#### 5. 套管井特性

- (1) 現行材料規範 6.3 規定不完整，對套管井之出廠試驗及驗收試驗應再加強，建議增修訂如下：

材料規範 6.3：廠商自行品管之出廠試驗報告至少應包括：(1)~(7)不變，但其中：

- (4) 至少抽一具實施溫昇、油密、衝擊電壓、繞組與套管井耐電壓及感應電壓等試驗。

另增加：

- (8) 至少抽一具實施一次套管井之電暈放電，交流耐電壓(材規 5.7.2 節)，短時間電流及加速密封老化等特性試驗。

- (2) 現行材料規範附錄驗收試驗之 2.6 節特性試驗(8)：其中之一次套管井，本公司得視需要予以抽試。一次套管井之驗收試驗，不宜採取抽試，建議增修訂改為必須試驗。因此建議驗收試驗之 2.6 節特性試驗(8)將其中之「一次套管井」刪除，另參考 IEEE386，增加(9)隨機取樣一具實施一次套管井之電暈(部分)放電試驗及交流耐電壓試驗。

- (3) 現行材料規範 5.10 一次套管井之特性試驗僅兩項，不符合 IEEE386 之規定，建議增修訂如下：

材料規範 5.10 套管特性：變壓器一次套管井及二次套管之特性試驗須符合表 3-5 (材規 5.10.1 一次套管井之特性試驗項目及試驗標準值)與表 3-6 (材規 5.10.2 二次套管之特性試驗項目及試驗標準值(依原訂))之規定。

## (二) 在工廠及現場執行部分放電檢測方法及準則

1. 建議一次套管井在施工後或桿變故障後，須以 X 光檢測器檢查有否施工不良；另一次套管井施工送電後，亦建議需定期以紅外線測溫器或紅外線熱顯影像儀器，量測一次套管井有否異常溫度，及有否超過台電公司之預知劣化檢測實施原則標準值。
2. 部分放電檢測方法及準則
  - (1) 參考 IEEE C57.12.00 油浸式配電變壓器標準，部分放電試驗列於其他試驗項目中；在工廠之部分放電檢測方法與程序，建議依 IEC60270 標準實行。
  - (2) 現場檢驗一次套管井之部分放電，建議採用超音波檢測法，並將檢測儀器靠近一次套管井檢測。
  - (3) 部分放電量測準則：台電公司規定之部分放電標準值，可適用於現場密封型桿上變壓器之部分放電檢測。IEEE 386 一次套管井之部分放電標準值，可作為出廠試驗之依據。

## 七、研議變壓器中間檢查之項目，執行時機，要點及成效評估

1. 在製造方面，除製造廠須有高設計品質及製造品質外，仍應建立監督查對機制，而此機制必須由製造廠與台電公司收用料單位分別建立及嚴格遵守執行。
2. 密封型桿上變壓器製造從進料及製造過程中，台電公司收用料單位應依材規 C035 之中間檢查規定嚴格執行，另建議訂定製品中間檢查實施要點。
3. 現行材規 C035 第 6.2.2 節所定之中間檢查項目有些不完整；且製造廠之品質管理系統亦須列入中間檢查，以驗證有否執行，有關材規 C035 第 6.2.1 節及第 6.2.2 節(中間檢查範圍)，建議增修訂(詳如 3.6.7 節之二所示)。
4. 建議製造廠應具有 ISO-9001 品質管理系統登錄證書，且應依 ISO-9001 品質管理系統之要求，從進料製造，完成品之流程，建立變壓器之進料、製造、品管、試驗、監督查對、及完成品等各項品質管理機制。

## 第四章 密封型桿上變壓器附屬配件結構、 開關設備動作特性及保護協調

本章主要研討：

(1) 以有限元素模擬軟體依均勻及非均勻場分析檢討高壓套管井、遮斷開關、全域型限流熔絲、避雷器等帶電體之最小間距及其適當配置處所(如置於桶內或其他處所)，並檢討釋壓裝置出口排放位置等改善建議事項。

(2) 依斷路器標準文獻檢討密封型桿上變壓器內置遮斷開關試驗報告之啟閉特性及絕緣油溫昇對啟閉性能之影響。

(3) 全域型熔絲之啟斷特性、保護區域、協調及改善建議事項。

(4) 避雷器動作特性及保護區域、協調及改善建議事項。

### 4.1 絕緣特性

#### 一、絕緣油絕緣特性[1,38-40]

絕緣油在使用中逐漸劣化，而使絕緣能力逐步降低，因此必須施行破壞電壓試驗判知油的劣化程度。目前我國的規定依照 CNS1327 C3025 [40] 規範，使用直徑 12.5mm 的球型電極，電極間隙取 2.5mm，在室溫下(攝氏 15-35 度)加上 60Hz 交流電壓，並以每秒 3kV 之試驗電壓增加率來量測絕緣破壞電壓。根據台電材規 C035(99-07)的規定，絕緣破壞電壓以有效值 30kV 以上為合格基準。亦即：

使用電極：直徑 12.5mm 的球型電極

電極間隙距離：電極間隙距離為 2.5mm

合格基準：有效值 30kV

根據台電材規絕緣油合格基準，將有效值 30kV 在間隙 2.5mm 轉換成 SI 單位(國際單位制)的電場強度值為為  $1.2 \times 10^7$  (V/m)，此為有效值。因此，在 60Hz 交流電壓運轉時，瞬間可忍受的最大電場強度約為  $1.697 \times 10^7$  (V/m)，為峰值。

#### 二、空氣絕緣特性[38,39]

##### (一)兩平行板電極(Parallel Plate Electrode)

兩平行板電極(以下簡稱兩平板)間理論上應該視為均勻電場，但電極邊

緣為尖端結構使得電場強度高於電極中央，Rogowski 於 1923 年將電極邊緣形狀修正為圓滑結構，消除電極邊緣的電場集中，因此稱為 Rogowski 電極，如圖 4-1 所示。且電極形狀必須滿足  $a=4.3L$ ,  $b=2.5L$ ,  $c=3L$ ,  $r=0.5L$  等關係，其中  $L$  為電極間隙。

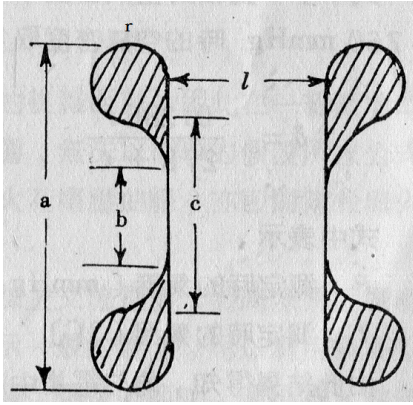


圖 4-1 Rogowski 電極

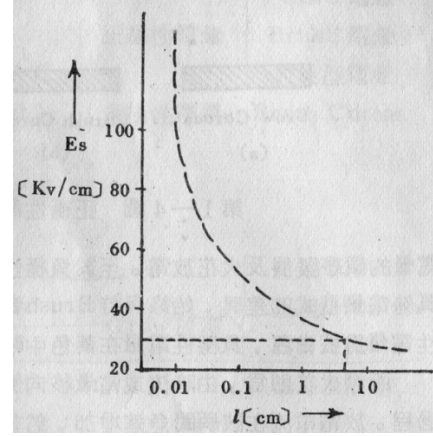


圖 4-2 火花電位梯度與間隙長的關係

消除邊緣尖端結構後，此時兩平板電極為完全均勻的電場，電場中各處的電力線相同且與電極呈垂直分布，等位面與電極平行成等間隔分布，發生火花的電位梯度(Potential Gradient)與間隙長的關係如圖 4-2 所示，所得曲線以實驗式表示為：

$$E_s = 24.05 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0.328}{\sqrt{\delta \cdot d}}\right) \quad (\text{kV/cm}) \quad (4-1)$$

其中， $\delta$  為相對空氣密度(Relative Air Density)，係將攝氏 20 度，760mmHg 時的空氣密度取為 1 的相對值(標準大氣壓下)，且可由下式求出：

$$\delta = \frac{0.386P}{273+t} \quad (4-2)$$

式中， $P$ ：測定時的氣壓(mmHg)； $t$ ：測定時的氣溫(攝氏)。因此，空氣中氣壓為 760mmHg，溫度為攝氏 20 度，間隙距離為 2cm 時，火花電壓的電位梯度約為 30(kV/cm)。

## (二)球間隙(Sphere Gap)

雖然兩平板可以獲得均勻電場，但要製成 Rogowski 電極並不容易，因此以球間隙代替，球間隙為高壓峰值的測定裝置，兩球之間最接近的點稱為火花點(sparking points)，兩球間發生火花瞬間前最大電場強度的位置，典型的球間隙配置方式分為垂直與水平排列兩種。標準的球間隙由兩個相同

直徑  $D$  的金屬圓球所組成，標準球直徑  $D$  為 2, 5, 6.25, 10, 12.5, 15, 25, 50, 75, 100, 150 與 200cm 等，兩球的間隙距離以  $S$  表示。球間隙並不是均勻電場，當球間隙距離  $S$  小於半徑  $0.5D$  時可視為均勻電場。

IEC60052 標準中[41]，在標準大氣壓下，標準球直徑  $D$  與間隙長  $S$  所對應的 50%破壞電壓峰值(kV)，用於正極性衝擊電壓與開關突波電壓。以球直徑 5cm 為例，間隙距離由 0.4cm 增加到 2.4cm 時所對應的電場強度值，如圖 4-3 所示，絕緣破壞的電場強度變化由 35.8 減少至 28.8 (kV/cm)，隨著間隙距離增加而減少。

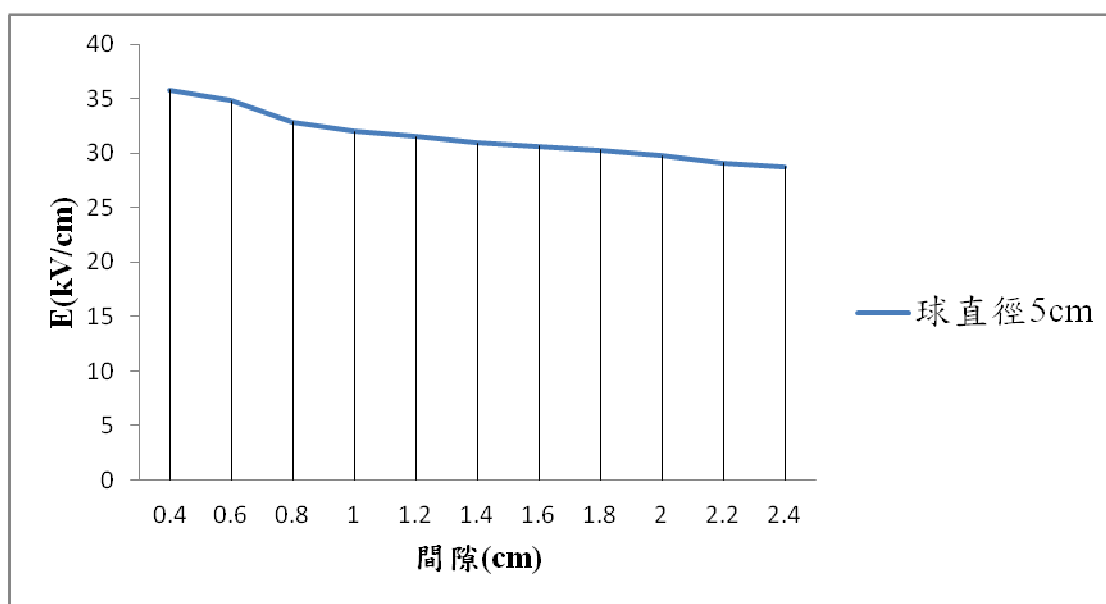


圖 4-3 電場強度與間隙長的關係

綜上可知，無論是兩平板或球間隙，隨著電極間隙的增加，發生絕緣破壞的電場強度則會變小。在均勻電場之下，通常空氣中的絕緣強度以  $3 \times 10^6$  (V/m) 為準[42,43]。

## 4.2 有限元素法與電場計算

### 一、有限元素法[44]

有限元素法就是將微分方程式連續系統近似為離散系統的一種數值分析方法。其步驟是：將解析問題之區域分割成網格(Mesh)如圖 4-4(a)，網格中的小區塊即所謂的元素(Element)，且由有限的節點(Node)所組成如圖 4-4(b)。微分方程式的變數在各元素中以多項式來近似，再將所有元素組合起來一起解之。目前使用有限元素法來解析問題通常包括三個基本模組

(Modules)：前處理 (Preprocessing)、場解析器 (Field solver)、後處理 (Postprocessing)。

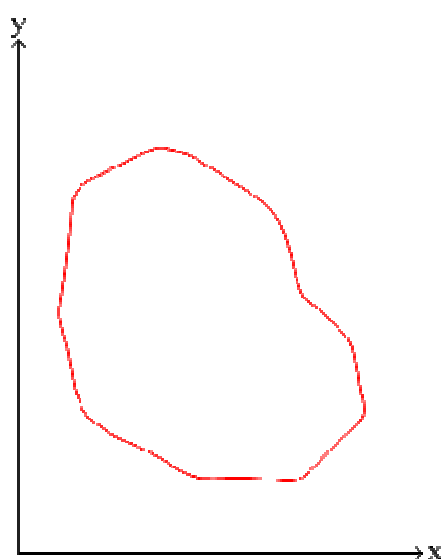


圖 4-4(a) 解析問題之區域

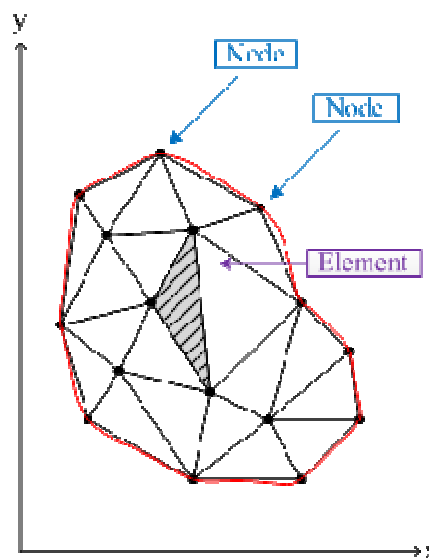


圖 4-4(b) 將求解區分割許多成小區塊

- (一) 前處理：建構問題之幾何模型後，輸入各材料之物理特性、電源、磁源，定義邊界條件及自動產生網格(Mesh generation)。
- (二) 場解析器：根據所定義的模型，求解有限元素方程式。
- (三) 後處理：求解後，將所得到各節點的變數值，整理成圖形來顯示，如等電位線、電場強度分布圖等。

## 二、使用軟體概述[45,46]

### (一) 使用軟體：

ANSOFT Maxwell v.12

### (二) 有限元素法求解過程：

有限元素法的求解過程說明如下，其流程圖如圖 4-5 所示。

- (1) 開始專案：新增任務，選擇模型為二維或三維模式。
- (2) 選擇求解器：包括靜電場、靜磁場、渦流場、直流電場、溫度分析等。
- (3) 繪製求解模型：繪製所求物體之幾何模型。
- (4) 設定材料：指定各種材料的類型與特性，例如相對介電係數。
- (5) 設定邊界條件與電源：設定模型的邊界條件與電源(電荷)、磁源(電流)。
- (6) 設定求解條件：Maxwell 軟體分為手動細分網格(Manual mesh)與適應分

析(Adaptive analysis)。手動細分網格前，系統生成粗略的網格，可將較大的三角元素細分為較小的元素，提高計算之精準度；而適應分析為自動生成網格，系統進行迭代求解，對最大誤差存在之區域進行網格細化，得到較高的網格密度，計算出更精準之解。

(7) 求解：利用計算機算出各變數的值。

(8) 後處理：將計算結果繪製成圖形來表示。如電場強度圖、等電位面等。

(9) 判斷是否滿足需求，是則結束運算；否則回到步驟(6)重新設定求解條件。

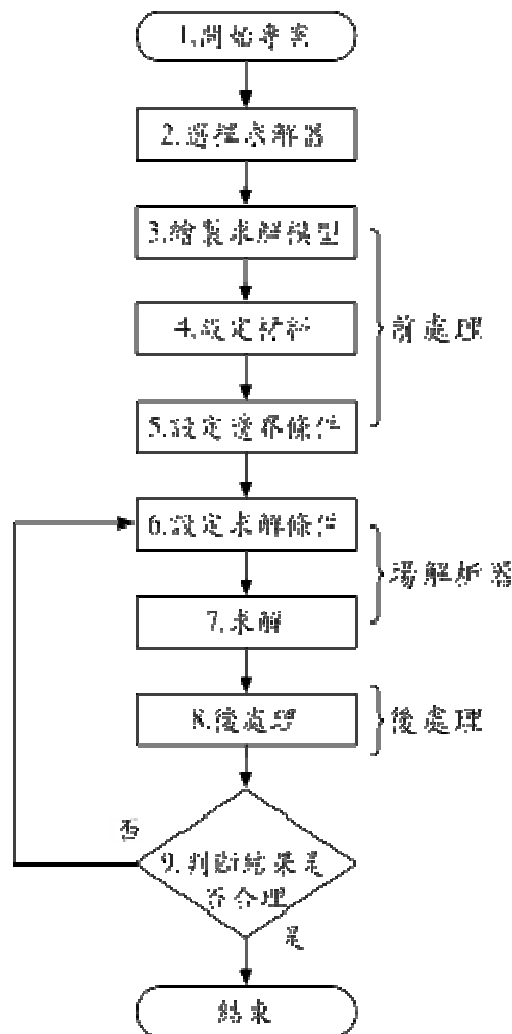


圖 4-5 有限元素法流程圖

### (三) 均勻電場：

均勻電場(Uniform Electric Field)，電場強度的大小和方向不隨位置而變的電場。例如：兩平行導電板(以下簡稱兩平板)間的單一絕緣材料，電場強

度為兩平板之間的電壓差除以兩平板之間的距離[47]。

$$E = \frac{V}{d} \quad (\text{V/m}) \quad (4-3)$$

於式(4-3)中，E 是電場強度(V/m)、V 為兩平板電壓差(V)、d 為距離(m)。

#### 案例 1. 單一介質

真空中，距離為 10mm，電壓差為 10V 之兩平板，如圖 4-6 所示。求此電場。

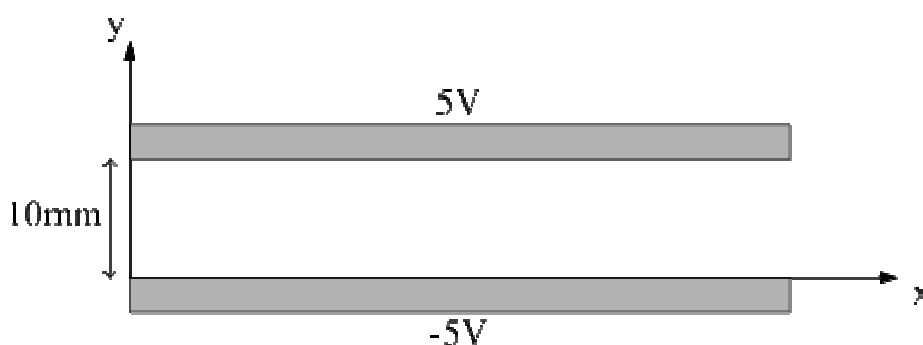


圖 4-6 二維空間中之兩平板

電場強度計算結果：

##### (1) 理論值

$$E = \frac{V}{d} = \frac{10}{0.01} = 1000 \quad (\text{V/m})$$

忽略兩平板的邊緣，則在平板內的電場是均勻的，故在此區間內的電場強度不隨著位置改變而改變。因此，由理論值計算出每一點的電場均為 1,000 (V/m)，方向為-y 軸方向。

##### (2) 有限元素法

軟體計算的結果，如圖 4-7 所示。顯示兩平板間的電場是均勻的；而兩平板邊緣則為不均勻的。同樣地，若將兩平板邊緣部分忽略，可視為均勻電場，兩平板中央沿+y 軸方向 0 至 10mm 所求出各點電場強度皆約為 1,000 (V/m)，如圖 4-8 所示。等電位面(Equipotential surface)與電場向量圖分布，則如圖 4-9 所示，彩色箭頭代表該點的電場大小，箭頭長度愈長代表電場愈強，而箭頭方向則代表該點的電場方向；封閉曲線為等電位面分布，圖中左上方為所對應的電壓值，單位為 V。忽略邊緣時，兩平板間電場的大小與方向皆相同，分別為 1,000 (V/m)與-y 軸方向。等電位面上各點的電位相同，且在任何位置都與電場方向呈直角。

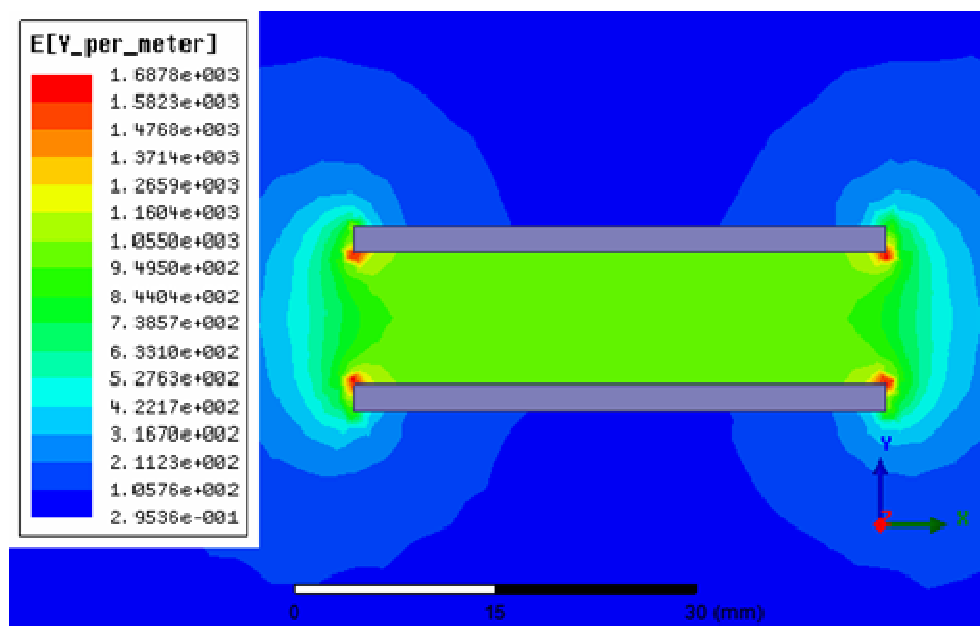


圖 4-7 兩平板間的電場大小分布

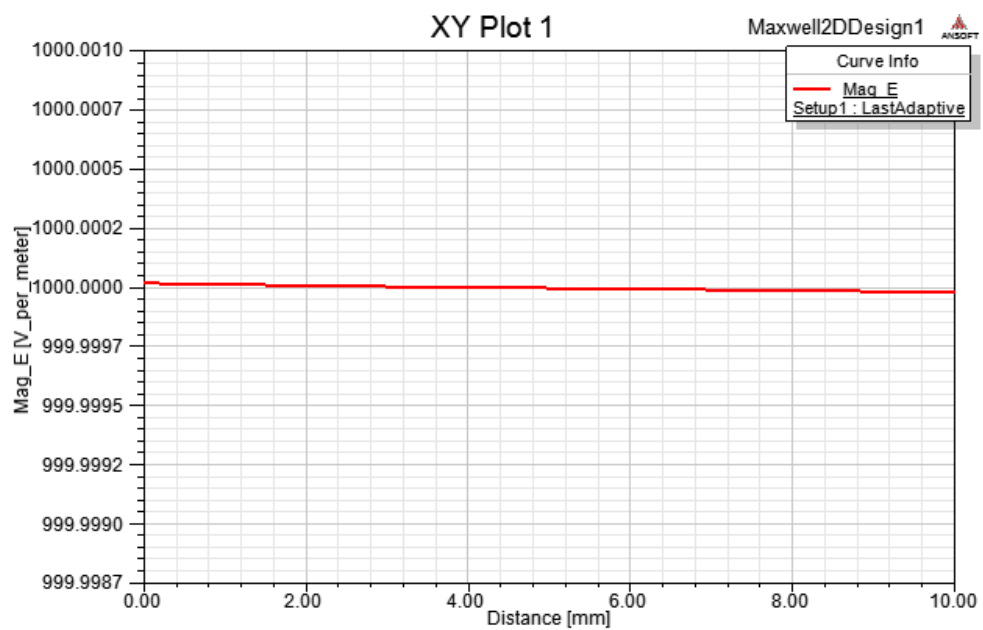


圖 4-8 沿+y 軸方向兩平板間的電場大小

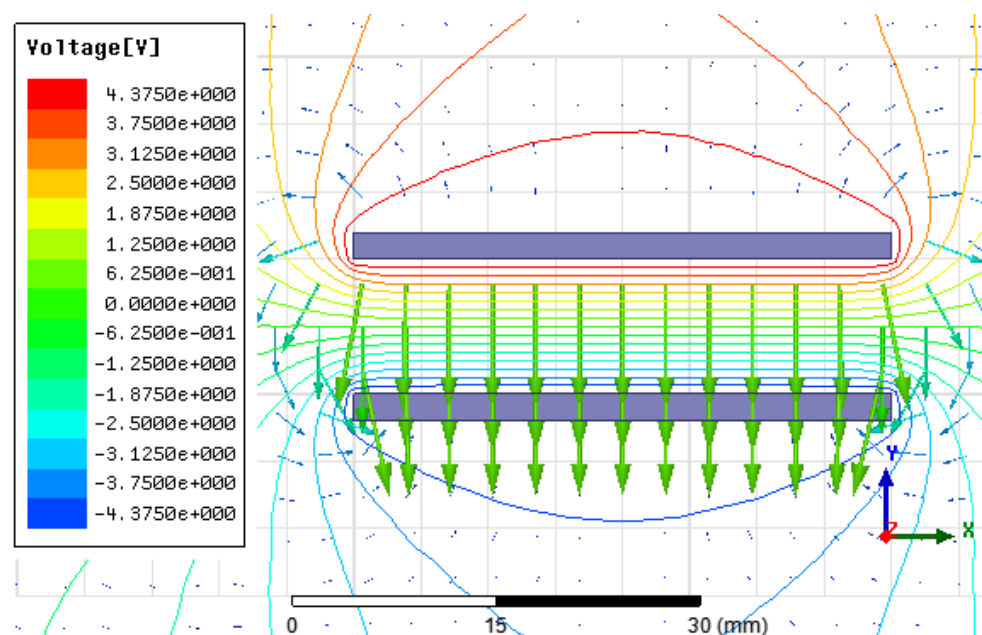


圖 4-9 兩平行間的等電位面與電場向量圖

## 案例 2. 複合介質

距離為 10mm，電壓差為 10V 之兩平板，中間由絕緣紙( $d_1=5\text{mm}$ )與絕緣油( $d_2=5\text{mm}$ )所構成的複合介質，如圖 4-10 所示。求此電場。其中絕緣紙相對介電係數(Relative permittivity,  $\epsilon_r$ )  $\epsilon_1=4.0$ ，絕緣油相對介電係數  $\epsilon_2=2.2$ ，而真空中  $\epsilon_0=1$ 。

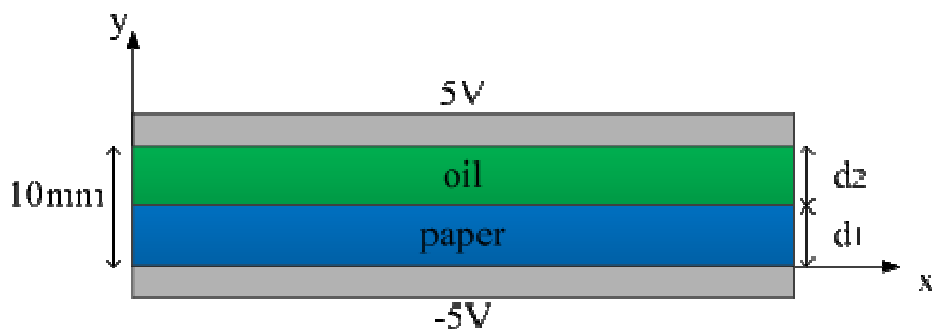


圖 4-10 兩平板間包含複合介質

電場強度計算結果：

(1) 理論值[48]

$$V = E_1 d_1 + E_2 d_2 = \frac{D}{\epsilon_1} d_1 + \frac{D}{\epsilon_2} d_2 \quad (4-4)$$

$$D = \frac{V}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2}} \quad (4-5)$$

因此，絕緣紙的電場大小為：

$$E_1 = \frac{D}{\epsilon_1} = \frac{\epsilon_2 V}{\epsilon_2 d_1 + \epsilon_1 d_2} = \frac{2.2 \times 10}{2.2 \times 0.005 + 4.0 \times 0.005} = 710 \quad (\text{V/m})$$

而絕緣油電場大小為：

$$E_2 = \frac{D}{\epsilon_2} = \frac{\epsilon_1 V}{\epsilon_2 d_1 + \epsilon_1 d_2} = \frac{4.0 \times 10}{2.2 \times 0.005 + 4.0 \times 0.005} = 1290 \quad (\text{V/m})$$

其中  $D = \epsilon_r E$ ， $D$  為電通量密度(Electric flux density)或電位移(Electric displacement)， $\epsilon_r$  為相對介電係數(Relative permittivity)， $d_1$  與  $d_2$  分別為絕緣紙與絕緣油的距離(mm)，單獨考慮絕緣紙或絕緣油時為均勻電場，且同樣忽略兩平板邊緣。

## (2) 有限元素法

電場強度分布如圖 4-11 所示。計算結果由圖 4-12 可看出，y 軸 0-5mm 處為絕緣紙的電場大小，其值為 710 (V/m)；而 y 軸 5-10mm 處則為絕緣油的電場大小，其值為 1,290 (V/m)。由此看出在均勻電場下，理論值與有限元素法的計算結果是相同的。

複合介質即將兩種以上的材料複合，分別選取具備不同性質的材料。電介質的電場強度與承受電壓(V)、材料相對介電係數( $\epsilon_r$ )、厚度(d)有關[48-50]。此條件中，兩者的厚度相同皆為 5mm，絕緣紙的相對介電係數為 4，所承受的電場大小為 710 (V/m)；而絕緣油的相對介電係數則為 2.2，承受電場大小為 1,290 (V/m)。承受的電場大小與相對介電係數成反比。

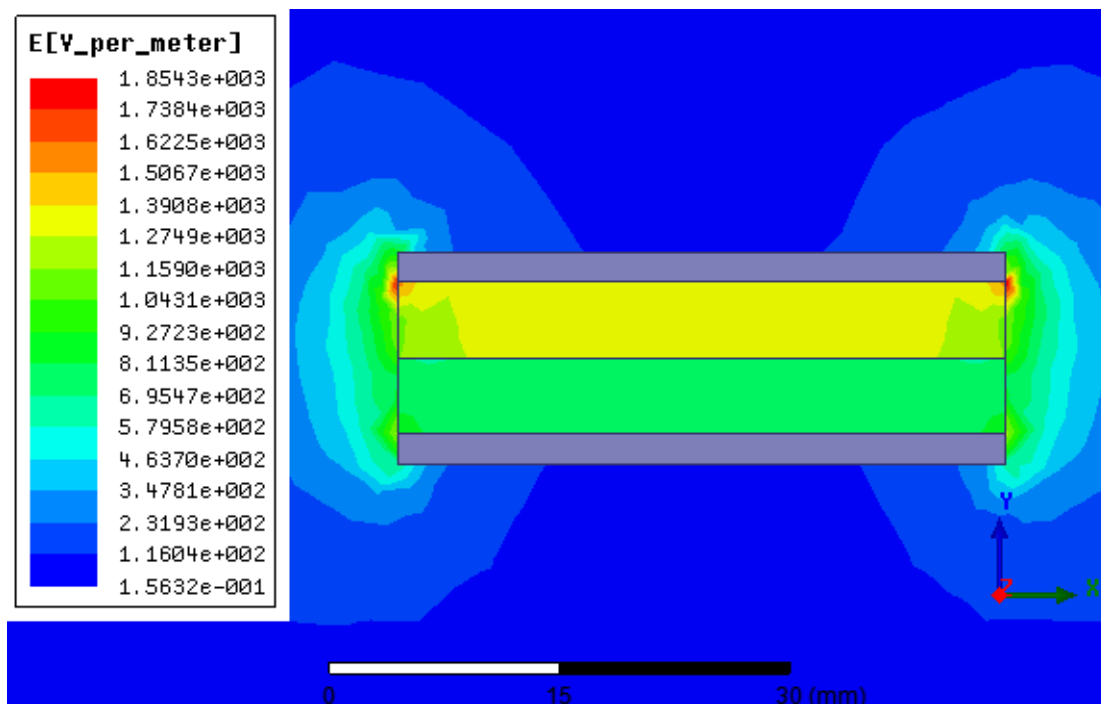


圖 4-11 兩平板間包含複合介質的電場大小分布

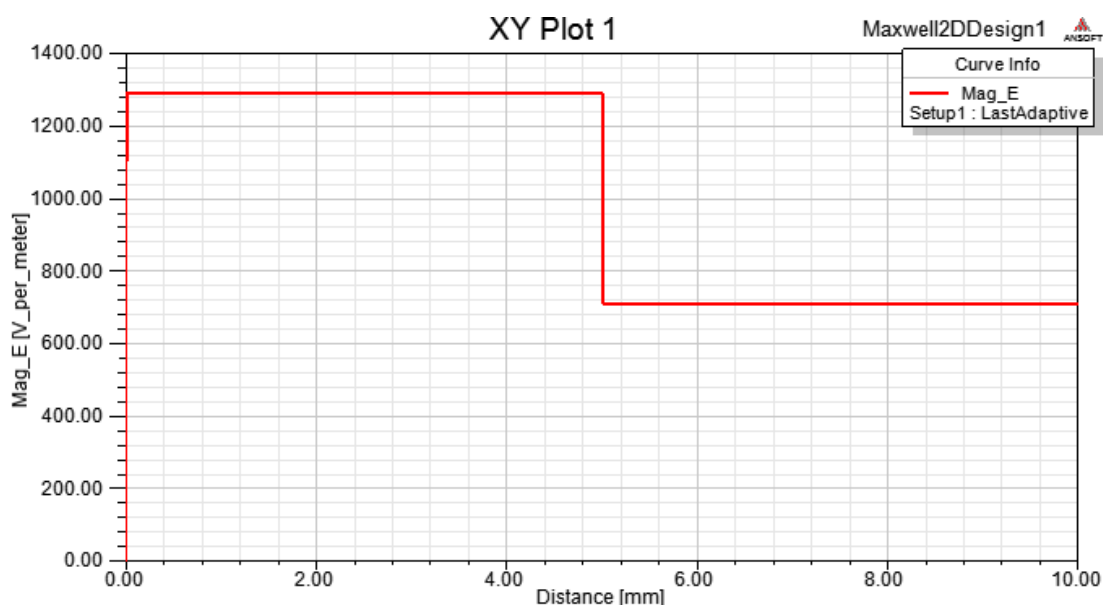


圖 4-12 沿+y 軸方向兩平板間的電場大小

#### (四) 不均勻電場

不均勻電場(Non-Uniform Electric Field)，電場強度的大小和方向隨著位置而變的電場。例如圓導體對平板結構，如圖 4-13 所示。圓導體上 P 點承受最大的電場強度，可由式(4-6)計算；而平板上的最大應力在 G 點，可用式(4-7)計算[47]。

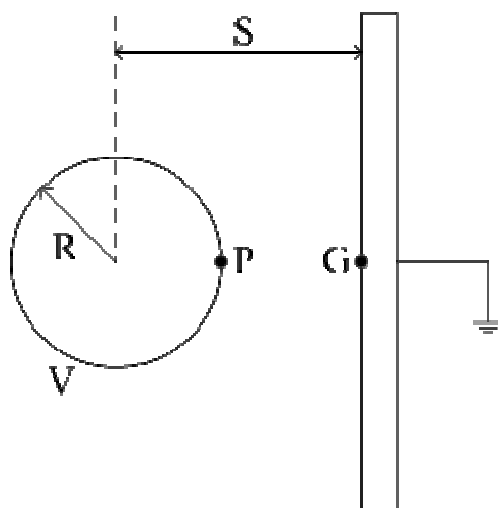


圖 4-13 圓導體對平板結構

$$E_P = \frac{V}{S-R} \times \frac{\sqrt{(S/R)^2 - 1}}{\ln[\sqrt{(S/R)^2 - 1} + (S/R)]} \quad (4-6)$$

$$E_G = \frac{V}{S-R} \times \frac{2 \times \sqrt{[(S/R) - 1]/[(S/R) + 1]}}{\ln[\sqrt{(S/R)^2 - 1} + (S/R)]} \quad (4-7)$$

其中，R 為圓導體半徑(mm)，S 為圓導體圓心與平板的距離(mm)，V 為圓導體的電壓(Volt)， $E_P$  與  $E_G$  分別為 P 與 G 點的電場大小。

### 案例 3.

真空中，圓導體對平板結構如圖 4-13，圓導體中心與平板的距離(S)為 7mm、圓導體的半徑(R)為 3mm、圓導體的電壓(V)為 5V，求 P 點與 G 點之電場。

電場強度計算結果：

#### (1) 文獻公式

由公式計算可得，圓導體表面 P 點與平板上 G 點的電場分別為：

$$E_P = 1,767 \text{ (V/m)}$$

$$E_G = 1,060 \text{ (V/m)}$$

#### (2) 有限元素法

計算結果同樣以圖形來表示，圖 4-14 為圓導體對平板結構的電場大小分布圖，電場聚集在兩者之間，也就是 P 與 G 點間。接著，檢視 P 與 G 點間(最短距離間)的電場大小。圓導體電場最大值在 P 點，於圖 4-15 中 x 軸的原點，其值為 1,752 (V/m)；而平板上的電場最大值則在 G 點，於圖 4-15 中 x 軸 4mm 處，其值為 1,068 (V/m)。

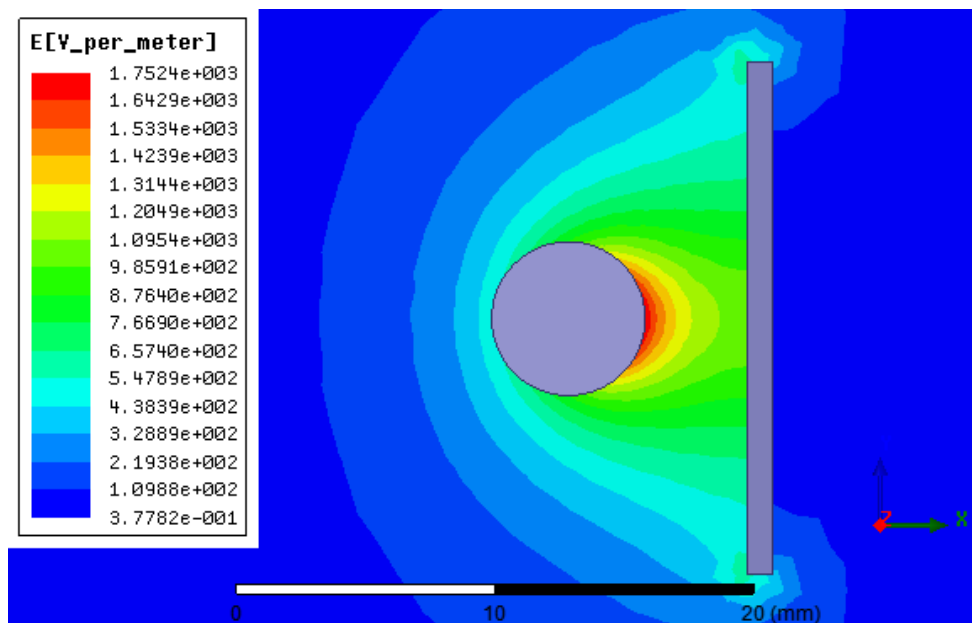


圖 4-14 圓導體對平板結構的電場大小分布

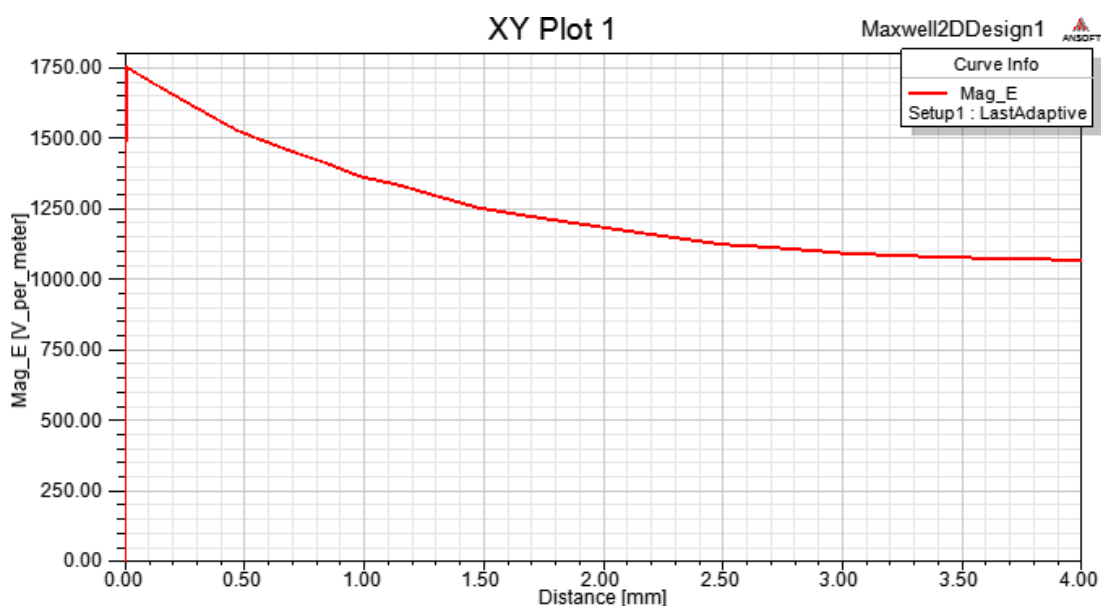


圖 4-15 P 點與 G 點間電場大小

圖 4-16 為圓導體對平板結構的等電位面與電場向量圖，圖中彩色箭頭代表該點的電場大小，箭頭長度愈長代表電場愈強，而箭頭方向則代表該點的電場方向；封閉曲線為等電位面分布，圖中左上方為所對應的電壓值，單位為 V。可以觀察到，等電位面上各點的電位相同，且在任何位置都與電場方向呈直角，但圓導體與平板間的等電位面並不均勻，隨著位置的改變電場強度有所變化。

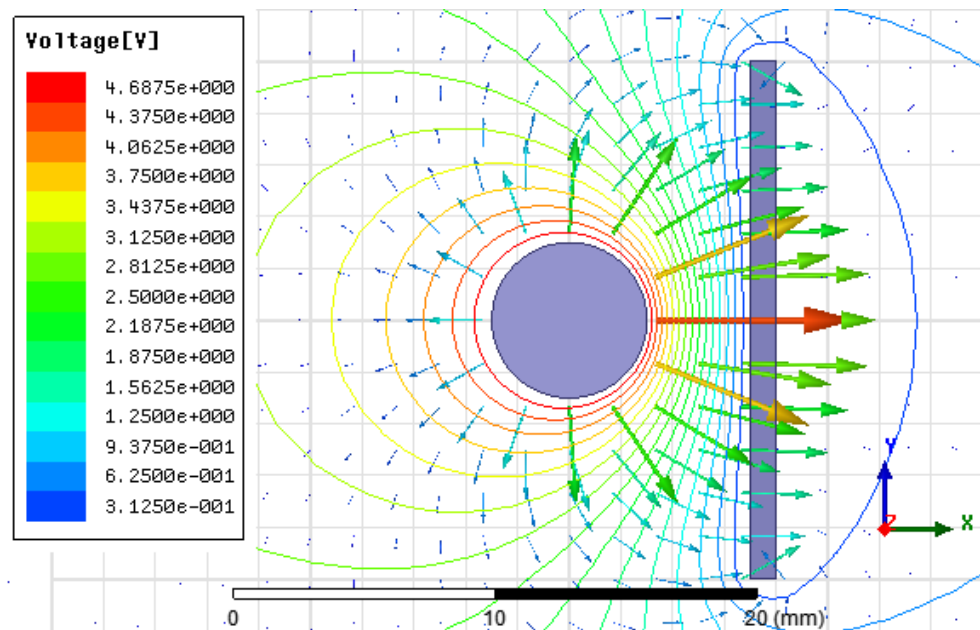


圖 4-16 圓導體對平板結構的等電位面與電場向量圖

將文獻公式[47]與有限元素法計算結果整理成表 4-1。由此可見，文獻公式與有限元素法計算結果差異不大，誤差皆在 1% 以內。除了以上簡單的例子外，有限元素法也可以用來解決複雜的問題，是個準確度很高的運算工具。

表 4-1 文獻公式與有限元素法之比較

方法	$E_P(\text{V/m})$	$E_G(\text{V/m})$
文獻公式	1767	1060
有限元素法	1752	1068
誤差%	0.8	0.7

最後，利用上例並考慮兩種條件：(1) 改變圓導體平板的距離( $S$ )，其餘條件不變，利用有限元素法計算  $E_P$  與  $E_G$  的電場大小。(2) 改變圓導體半徑( $R$ )，其餘條件也不變，同樣利用有限元素法計算  $E_P$  與  $E_G$  的電場大小，計算結果如表 4-2 與 4-3。

表 4-2 改變  $S$  時  $P$  與  $G$  點的  
電場大小

$S(\text{mm})$	$E_P(\text{V/m})$	$E_G(\text{V/m})$
8	1494	839
7	1752	1068
6	2164	1477
5	3016	2304

表 4-3 改變  $R$  時  $P$  與  $G$  點的  
電場大小

$R(\text{mm})$	$E_P(\text{V/m})$	$E_G(\text{V/m})$
5	2829	2366
4	2062	1513
3	1752	1068
2	1717	791

當圓導體半徑(R)不變，圓導體與平板的距離(S)變小時，代表圓導體會愈靠近平板，則 P 與 G 點的電場均會增加；反之，圓導體與平板的距離(S)不變，圓導體半徑(R)變小時，圓導體逐漸遠離平板，P 與 G 點的電場大小均會減少。

在不均勻電場的情況下，每一點的電場的大小與方向皆不相同。以本案例圓導體對平板結構而言，除了兩者之間的距離與電壓差外，還必須考慮圓導體半徑所造成的影響。更複雜的結構就得考慮的更多，故使用有限元素法且藉由電腦的計算是相當方便的。

### 4.3 附屬配件建立分析模型與分析

進行 Maxwell 的電場強度分析，首先須建立附屬配件之模型，設定相對介電係數  $\epsilon_r$  與電壓值，觀察電場強度的分布，最後判定是否於安全範圍內。模擬分析流程為：

- (1)建立模型：根據附屬配件的規格尺寸，並利用 Maxwell 建立附屬配件的模型。
- (2)設定參數：建立完 Maxwell 模型後，對每個構造設定相對介電係數  $\epsilon_r$  與電壓值。
- (3)觀察電場強度：模擬完成後，觀察電場強度分布圖。
- (4)是否於安全範圍內：本模擬的目的為觀察附屬配件的電場強度是否於安全範圍內，以免變壓器運轉時因電場強度過大而造成部分放電。
- (5)結果與討論：若電場強度超過安全的範圍，則增加電極間的距離，以降低電場強度，使於安全範圍內，並提出建議。

#### 4.3.1 系統架構與電磁場分布之分類

密封型桿上變壓器(100kVA)的系統架構，元件在變壓器桶內的配置，如圖 4-17 所示，左方為正視圖，右方為上視圖，包含各元件的間距，油位線高度等規格尺寸，單位為 mm。利用 Maxwell 建立的模型則如圖 4-18 與圖 4-19 所示，分別為三維圖、上視圖、前視圖與側視圖；各個元件的尺寸規格將在以下章節中說明。

分析前，先對電磁場之分布情形先加以分類，一般將它分為二維場、軸對稱(Axisymmetric)三維場及三維場等三種。以下介紹兩種簡化模式[44]：

(一) 三維簡化成二維

C 型鐵心上繞有線圈，如圖 4-20(a)所示。實質上這是三維問題，x-y-z 座標如圖上所示，但除了 z 軸兩端外，沿 z 軸之場變化幾乎一樣。因此，通常將此三維場簡化為二維場，即 x-y 平面上來分析。如圖 4-20(b)所示即為 x-y 平面之二維場。

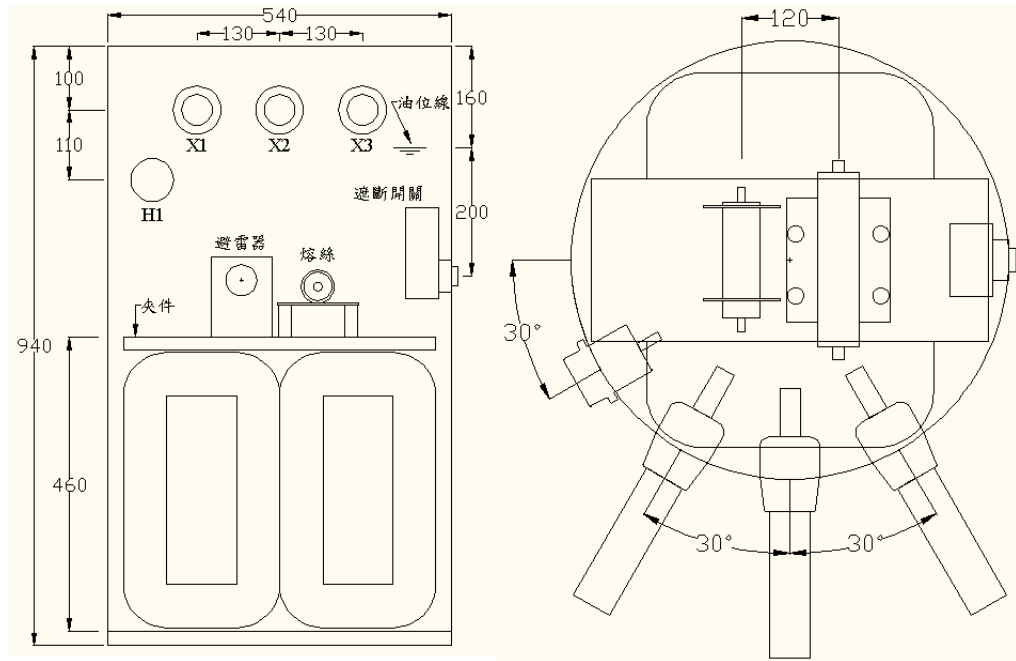


圖 4-17 密封型桿上變壓器之正視圖與前視圖

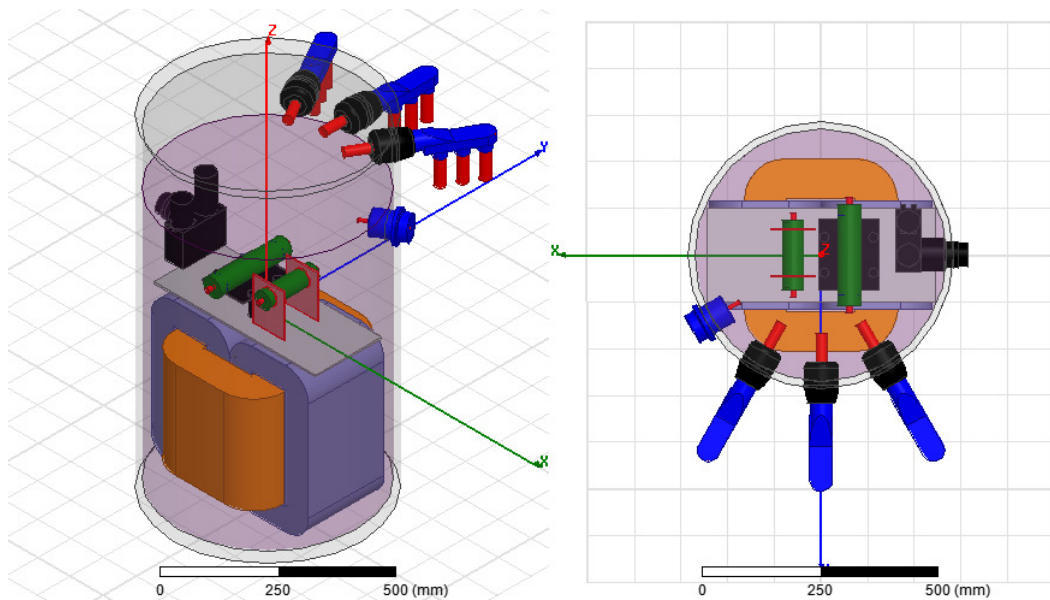


圖 4-18 軟體建模之三維圖與上視圖

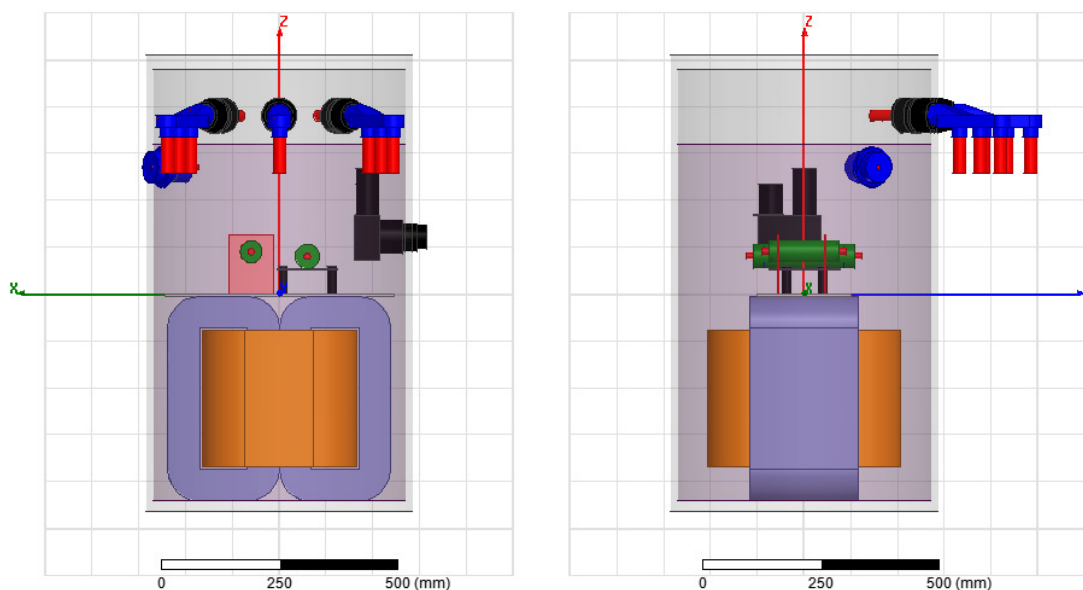


圖 4-19 軟體建模之正視圖與側視圖

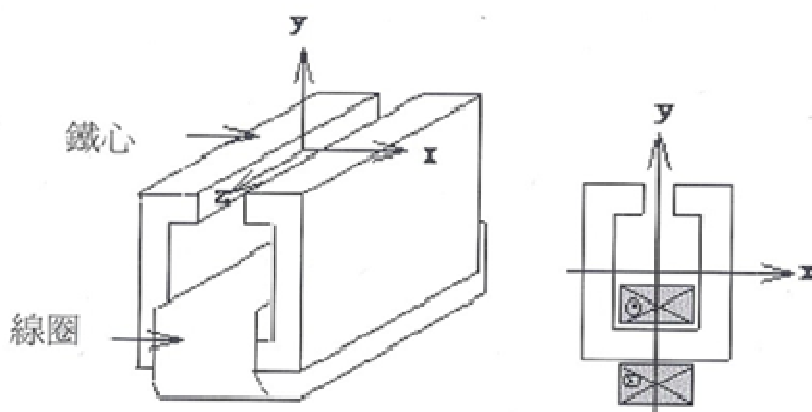


圖 4-20(a) C 型鐵心模型

圖 4-20(b) 二維場模型

## (二) 軸對稱三維簡化成二維

圓柱形繼電器，如圖 4-21(a)所示。鐵心及線圈均以  $z$  軸為中心成為軸對稱，如圖上所示可標示為圓柱座標  $r-\theta-z$  系統，但沿  $\theta$  軸之場變化幾乎一樣。因此，通常將此三維圓柱座標場簡化在  $r-z$  平面上來分析，如圖 4-21(b)所示。如此，不僅減少複雜度，更可節省運算時間。

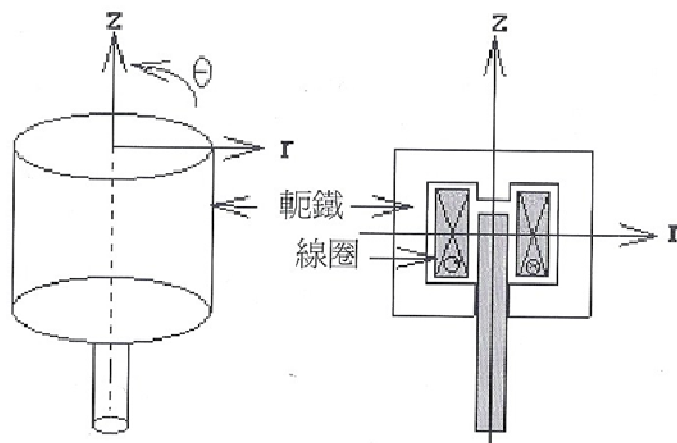


圖 4-21(a) 圓柱型繼鐵器模型      圖 4-21(b) r-z 平面模型

### 4.3.2 高壓套管電場分析

#### (一) 建立模型

如上一節所述，利用 Maxwell 建立高壓套管的模型，高壓套管以  $z$  軸為中心成為軸對稱，如圖 4-22(a)所示[51]，沿  $\theta$  軸的場變化幾乎一樣，故可將此軸對稱三維簡化成二維來分析；亦即，高壓套管以  $z$  軸為對稱時，可切成無限多個平面，任取一平面來做分析如圖 4-22(b)。高壓套管的尺寸規格如圖 4-23 所示，單位為 mm；高壓套管模型如圖 4-24 所示，其中包含變壓器桶壁、套管部分、套管中心之帶電體以及變壓器內的絕緣油，當中黑色為變壓器桶壁、藍色為高壓套管、紅色為套管中心之帶電體，紫色為絕緣油，正常運轉時變壓器內之絕緣油填滿高壓套管。

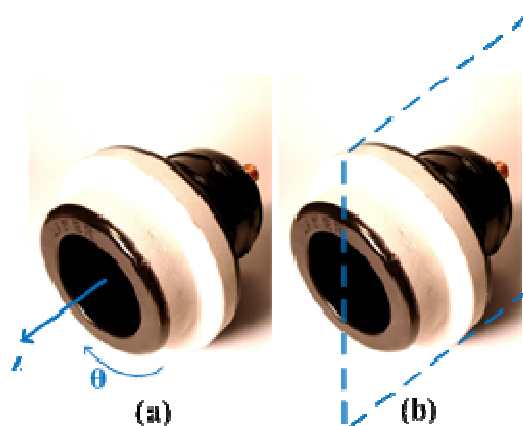


圖 4-22 套管以  $z$  軸成軸對稱

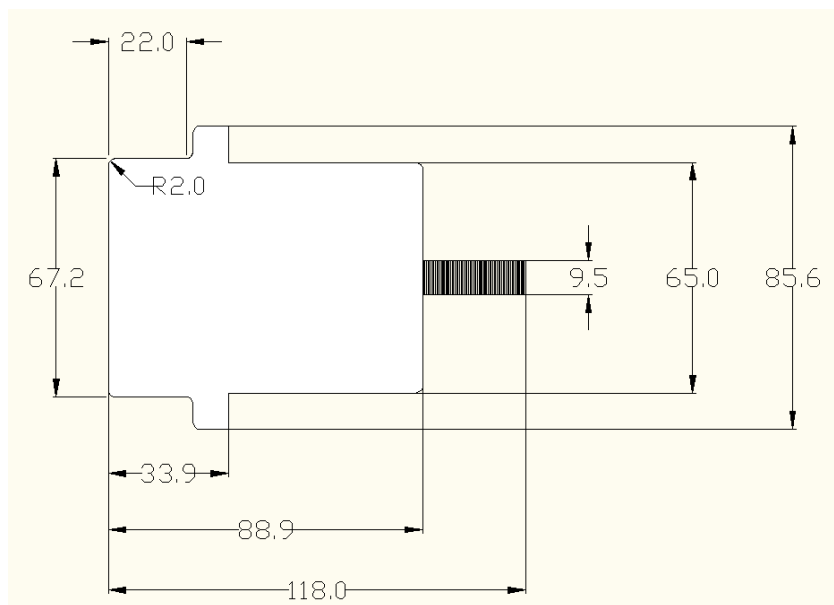


圖 4-23 高壓套管尺寸規格圖

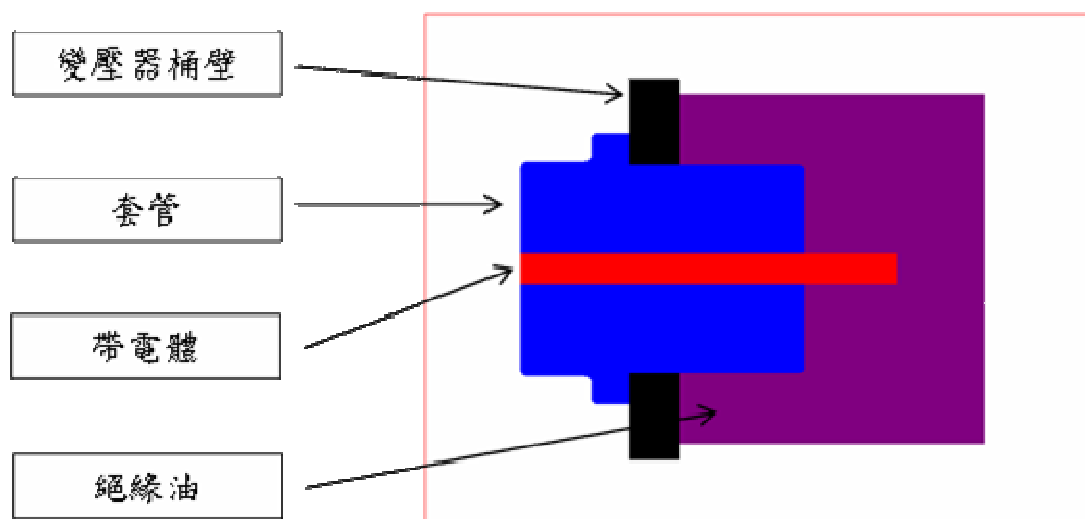


圖 4-24 高壓套管模型圖

高壓套管與各帶電體元件間的距離如表 4-4 所示。與高壓套管距離最近者為接地的變壓器外殼(70mm)，因此高壓套管的電場強度主要受到接地外殼的影響，但高壓套管為穿過外殼且固定的零件，與外殼的距離是固定的，在此觀察高壓套管帶電體與外殼間的電場強度變化。

表 4-4 高壓套管與各帶電體元件間的距離

名稱	二次套管	熔絲	避雷器	外殼	夾件
距離(mm)	135	298	208	70	245

## (二) 設定參數

建完 Maxwell 模型後，對各個構造設定相對介電係數  $\epsilon_r$  與電壓值，設定的參數與電源如表 4-5 所示，其中，套管材質為環氧樹脂(Epoxy Resin)，為 Maxwell 軟體內建之預設值，相對介電係數  $\epsilon_r$  為 3.6；而軟體中並無內建絕緣油的介電係數，因此絕緣油則參考文獻中資料[48-50]，相對介電係數  $\epsilon_r$  設為 2.2，油浸絕緣紙  $\epsilon_r$  為 3.6 [43]；變壓器桶壁為不鏽鋼，帶電體為銅， $\epsilon_r$  皆為 1。

電源部分高壓套管額定一次側電壓為 6900V(有效值)，假定電壓峰值時電場強度能低於安全範圍，則在其他電壓下也是安全的，所以高壓套管給定的瞬時電壓值為  $6900\sqrt{2}$  V(峰值)；而變壓器的桶壁接地，電壓設為 0V。

表 4-5 分析高壓套管時所用的參數與電源

顏色	名稱	材料	相對介電係數 $\epsilon_r$	電源
藍色	套管	環氧樹脂	3.6	
黑色	變壓器桶壁	不鏽鋼	1	V=0(接地)
紅色	帶電體	銅	1	V=6.9 $\sqrt{2}$ kV
紫色	絕緣油	油	2.2	
	引線絕緣物	絕緣紙	3.6	

## (三) 觀察電場強度模擬結果

### 1. 油中電場強度

油中電場強度模擬結果如圖 4-25 所示，油中最大電場強度發生於高壓套管接線端子末端，末端為圓筒導體且為裸露之電極，造成電場分布不均勻，容易使得電場聚集於此，電場強度為  $1.558 \times 10^6$  (V/m)。由如圖 4-19 所示等電位面圖可看出，在高壓套管接線末端等電位面較集中。

高壓套管表面的電場強度分布，如圖 4-27 所示。電場聚集處有兩個地方，一是聚集於接線端子與高壓套管接面，和高壓套管、桶壁與絕緣油之三接面，在這個部分電場強度最大值在高壓帶電體出線處，其值為  $7.334 \times 10^5$  (V/m)，明顯小於上述之高壓套管接線端子末端。高壓套管為一圓柱型絕緣體，電場強度的分布應呈現軸對稱分布，高壓引線會影響電場強度分布，但影響甚小，主要還是聚集於接線端子與高壓套管接面。

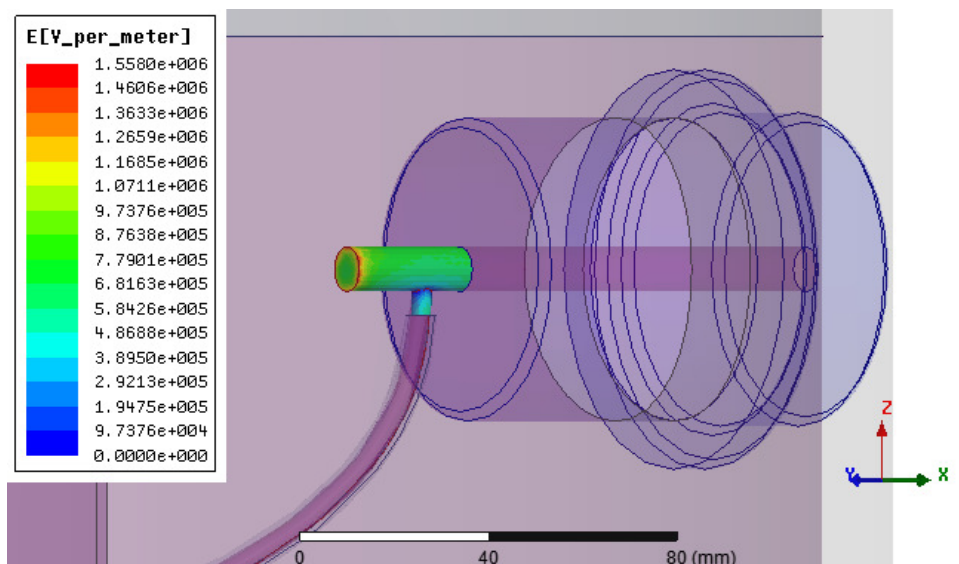


圖 4-25 高壓套管接線端子的電場強度分布

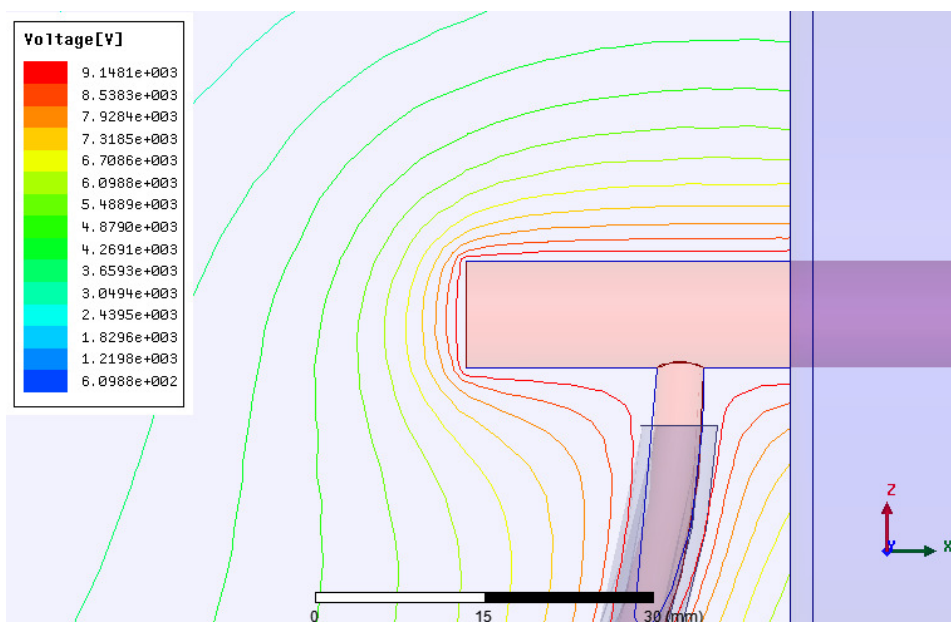


圖 4-26 高壓套管接線末端的等電位面圖

桶壁表面的電場強度分布，如圖 4-28 所示。油中最大電場強度發生於高壓套管與桶壁接面，其值為  $5.884 \times 10^5$  (V/m) 幾乎是呈現圓對稱分布，且桶壁內部的電場強度為零。

在變壓器中高壓引線外層需有絕緣物包覆，高壓引線絕緣物電場強度分布如圖 4-29 所示。電場強度最大值為  $8.174 \times 10^5$  (V/m)，絕緣物愈靠近桶壁時電場強度愈大。因此高壓引線與桶壁間的距離，會影響電場強度。

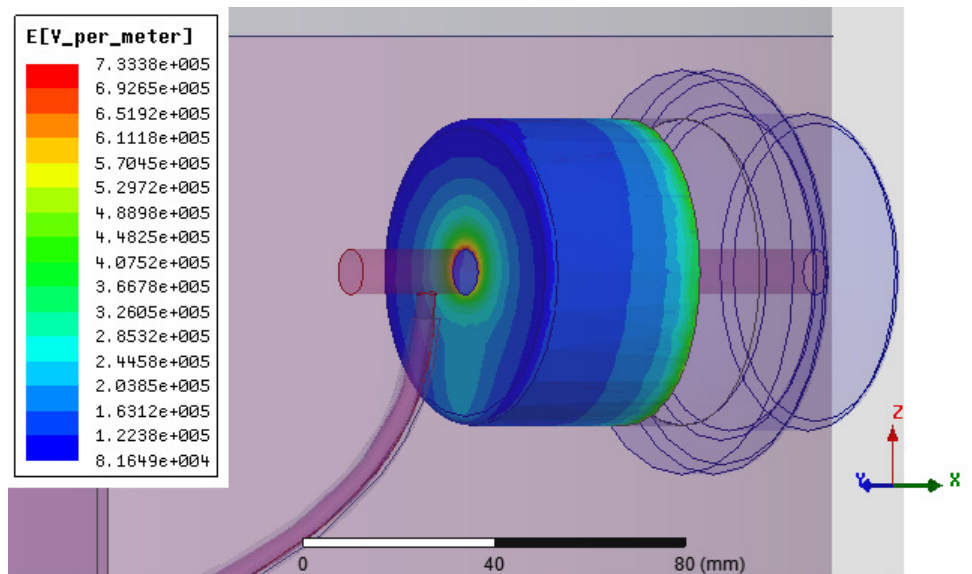


圖 4-27 高壓套管表面的電場強度分布

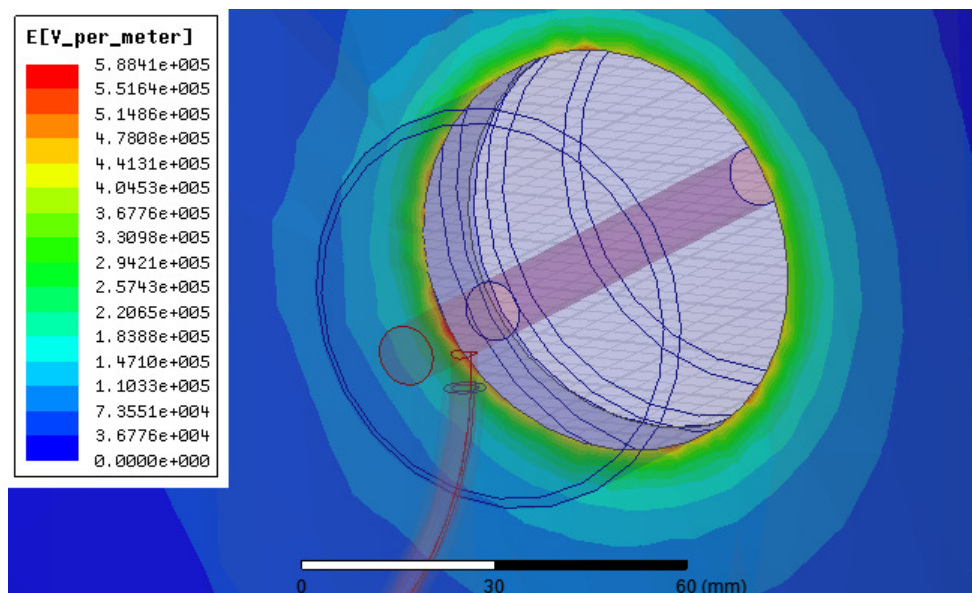


圖 4-28 桶壁表面的電場強度分布

## 2. 空氣中電場強度

### (1) 正常油位時

以上為絕緣油中的電場強度分布，接著討論變壓器桶內空氣中的電場強度分布。此時絕緣油填滿高壓套管，空氣中電場強度的分布，如圖 4-30 所示。在空氣與油接面有最大電場強度，其最大值為  $9.129 \times 10^4$  (V/m)，靠近桶壁往上逐漸遞減。

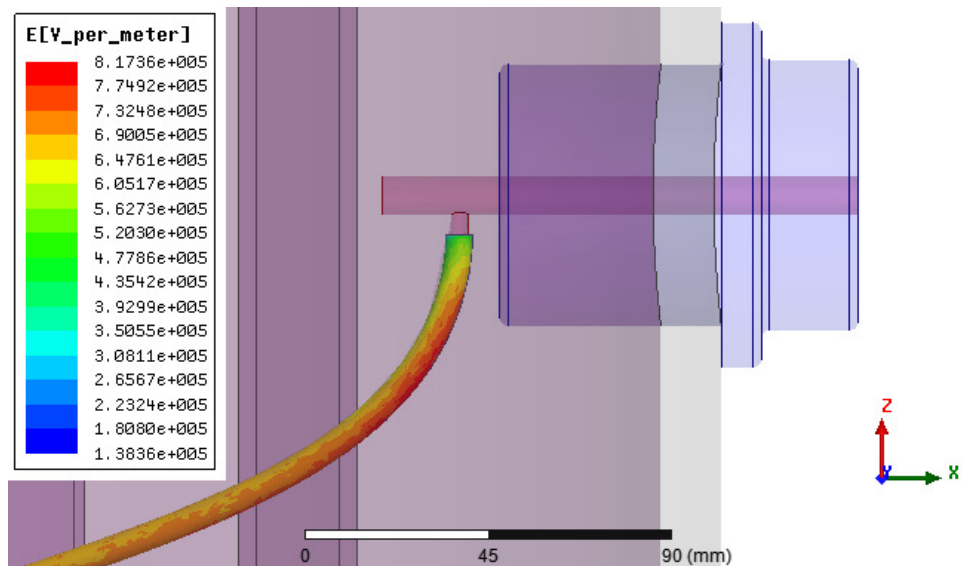


圖 4-29 高壓引線絕緣物的電場強度分布

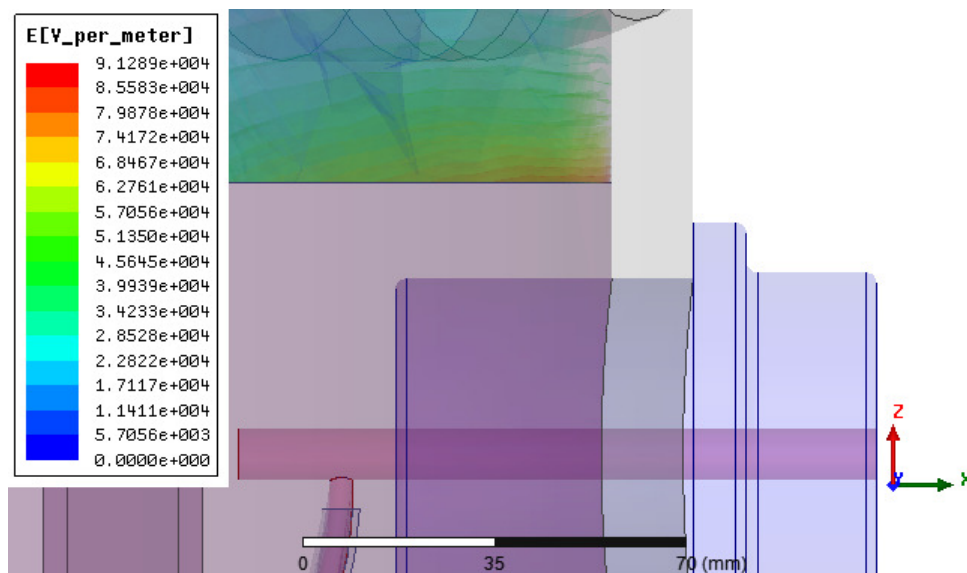


圖 4-30 變壓器桶內空氣中的電場強度分布

## (2) 缺油時

此時桶內絕緣油的油面降低到高壓套管下緣，高壓套管未浸泡於絕緣油中，接線端子暴露於空氣中；最大電場強度發生於接線端子末端，如圖 4-31 所示，其值為  $1.316 \times 10^6$  (V/m)。

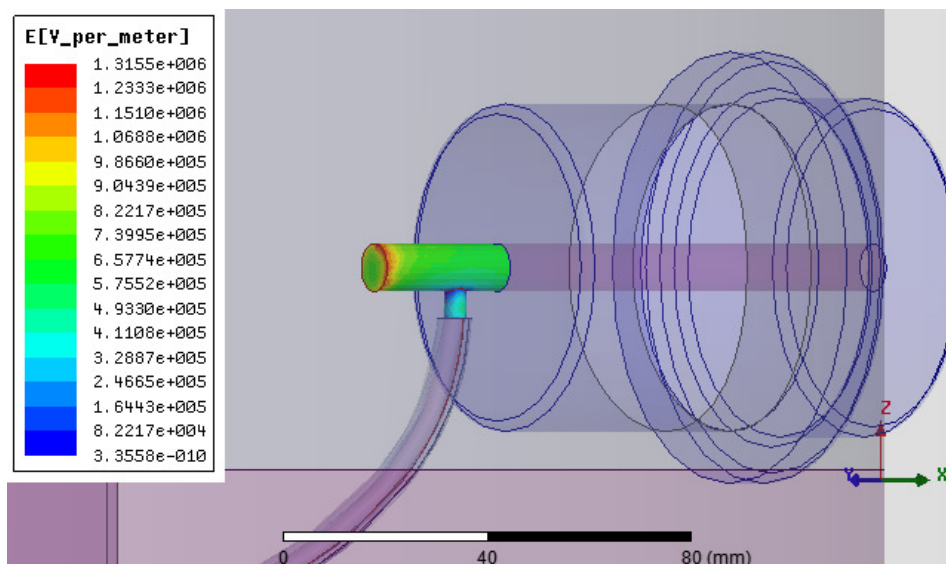


圖 4-31 缺油時變壓器桶內空氣中的電場強度分布

#### (四) 電場強度是否於安全範圍內

經模擬結果得知，油中最大電場強度發生於高壓套管接線端子末端，其值為  $1.558 \times 10^6$  (V/m)，於絕緣油安全範圍  $1.697 \times 10^7$  (V/m) 內 [1,38-40]，且約有 10 倍以上的安全裕度。

空氣中最大電場強度發生於空氣與絕緣油接面，其值為  $9.129 \times 10^4$  (V/m)，於空氣安全範圍  $3 \times 10^6$  (V/m) 內，且約有 33 倍的安全裕度。若發生缺油狀況時，接線端子末端有最大的電場強度，其值為  $1.316 \times 10^6$  (V/m)，空氣中的安全範圍為  $3 \times 10^6$  (V/m)，因此缺油時，安全裕度僅剩 2.3 倍；若異常高電壓時，接線端子末端可能會發生部分放電。

#### (五) 結果與討論

##### 1. 避免導體形成尖端

高壓套管為穿過桶壁的設備，等電位面分布會因導體間的形狀而有所改變，為不均勻的分布，使得等電位面集中接線端子末端，接線末端為圓筒導體電場聚集於此。

若將接線末端改成球型導體，其餘條件不變，如圖 4-32 所示，左方為原始之圓筒導體，右方則為球型導體，以觀察電場強度的變化。模擬結果如圖 4-33 所示。當球型導體半徑  $R$  為 5mm 時，油中最大電場強度仍發生於高壓套管接線端子末端，其值為  $1.445 \times 10^6$  (V/m)；等電位面圖如圖 4-34 所示，可以看出，使用球型導體時可以緩和接線末端的等電位面分布，從

原本聚集於圓筒尖端移至球型導體上，可以改善電場集中的現象，且電場大小隨著球型導體的半徑有所改變，如表 4-6 與圖 4-35 所示。隨著半徑變大時最大電場強度變小，使安全裕度提高。

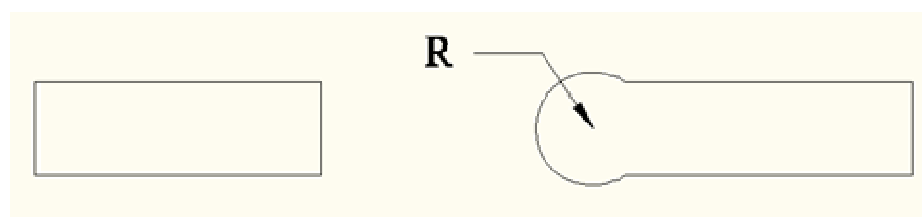


圖 4-32 將高壓套管接線末端改成球型之示意圖

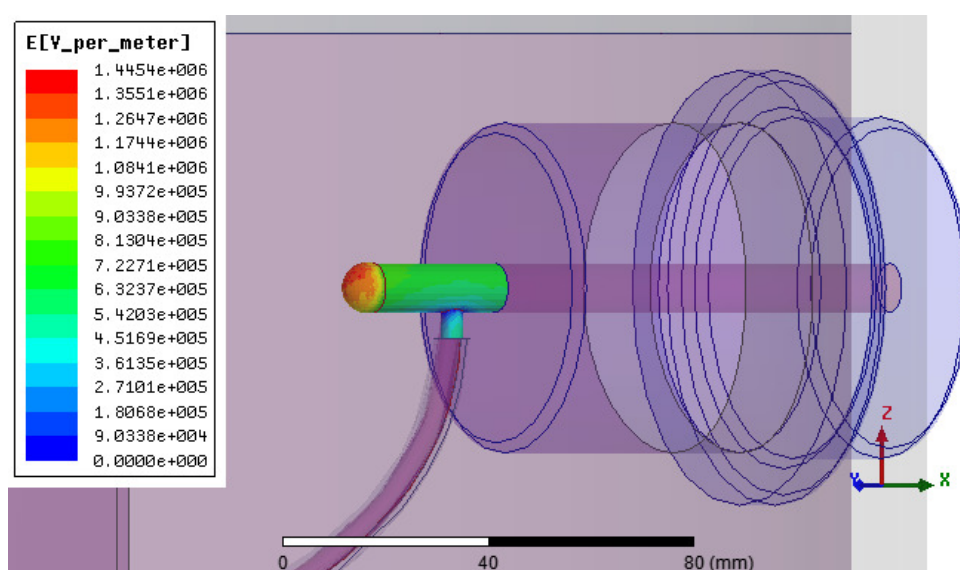


圖 4-33 接線末端為球型時電場強度分布

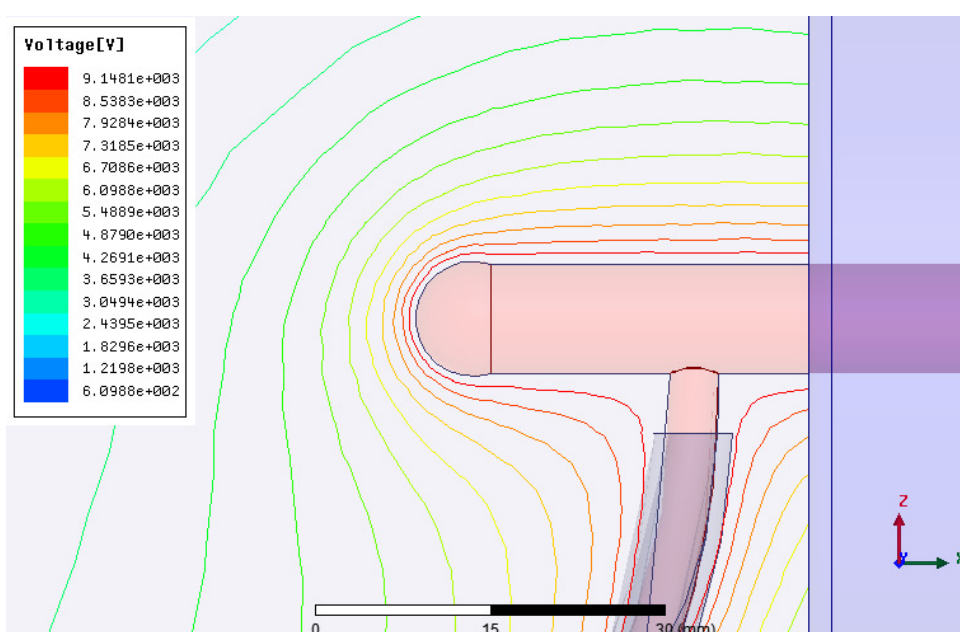


圖 4-34 接線末端為球型時之等電位面圖

表 4-6 改變球型導體半徑時油中最大電場強度變化

半徑 R(mm)	5	6	7	8	9	10
MaxE( $10^6$ V/m)	1.445	1.275	1.214	1.010	0.930	0.873

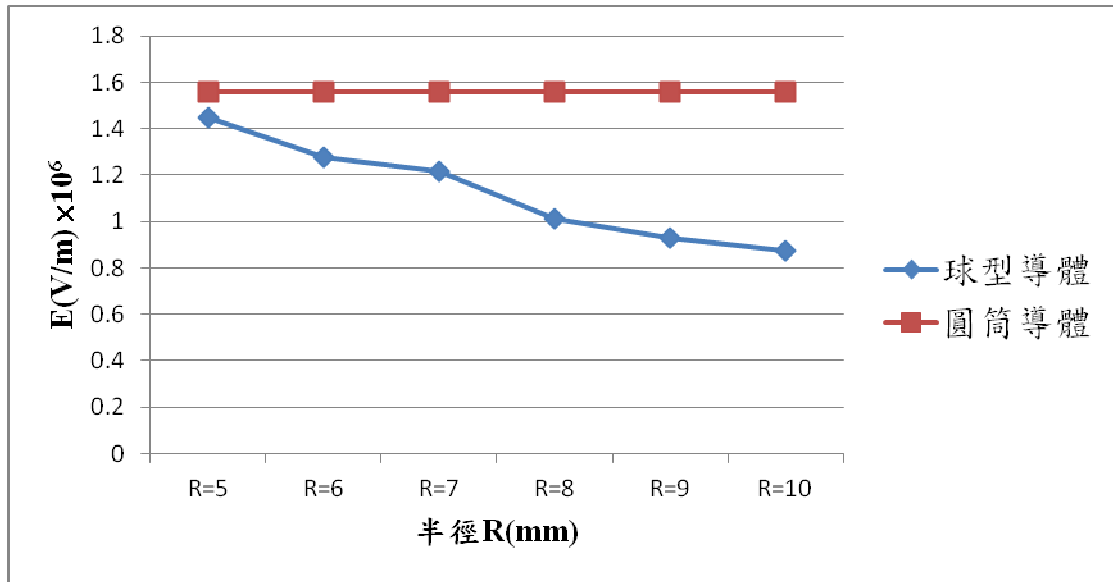


圖 4-35 球型導體半徑的改變與圓筒導體電場強度比較

## 2. 高壓引線與桶壁距離

高壓引線與桶壁間的距離，會影響電場強度的大小。此時只考慮高壓引線與桶壁，高壓引線線徑為 2.11mm，絕緣物厚度為 1.3mm。油中最大電場強度發生於絕緣物上(兩電極間最接近的距離)，如圖 4-36 所示。

調整包覆絕緣的引線中心點與接地桶壁間距離，可以了解電場強度的變化，如表 4-7 所示。愈靠近桶壁時電場強度愈大；相反地，愈遠離桶壁時電場強度愈小。若取安全裕度的 10 倍以上時(絕緣油安全範圍  $1.697 \times 10^7$  (V/m))，則包覆絕緣的高壓引線至少距接地桶壁 20mm 以上。

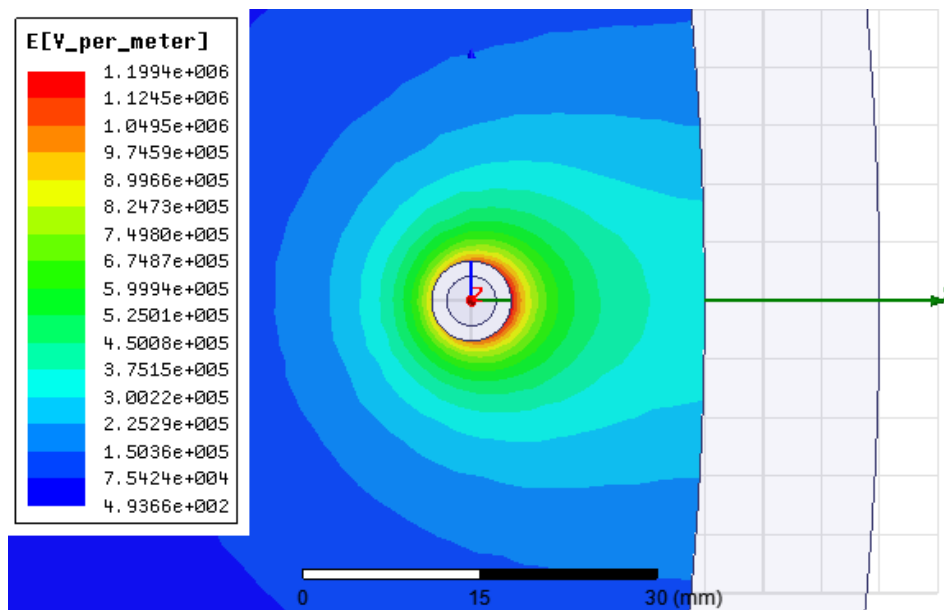


圖 4-36 油中高壓引線絕緣物電場強度分布

表 4-7 改變高壓引線中心與桶壁距離的電場強度變化

距離(mm)	10	20	30	40	50	60	70
MaxE ( $10^6$ V/m)	1.861	1.199	1.005	0.903	0.831	0.796	0.764

### 3. 加上絕緣罩

於高壓套管接線端加裝絕緣罩，如圖 4-37 所示，絕緣罩材質為橡膠，一般可分為天然橡膠、合成橡膠與再生橡膠等，為分子量非常大的聚合物，相對介電係數在 2.5-3 之間[43]，在此採用軟體預設  $\epsilon_r$  為 3，有開口朝下與開口朝上兩種。

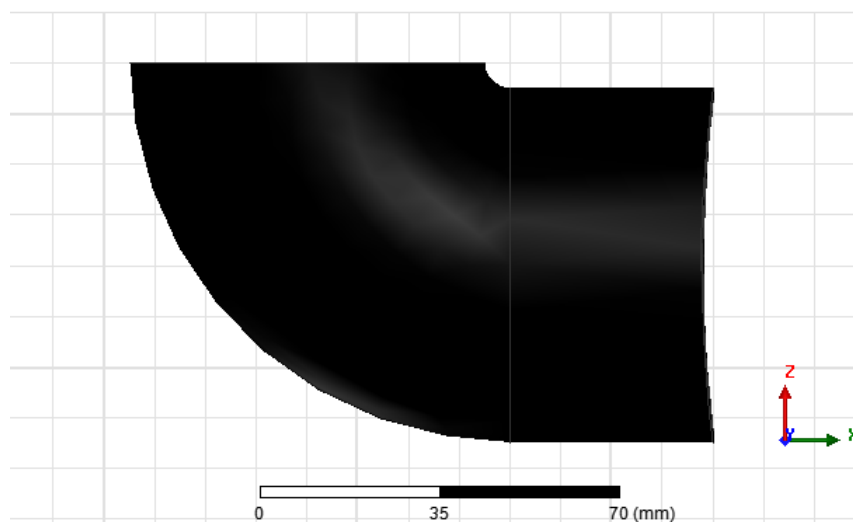


圖 4-37 高壓套管絕緣罩模型圖

(1) 開口朝下

A. 油中電場強度

於高壓套管接線端加裝開口朝下的絕緣罩，其餘條件不變，如圖 4-38 所示。此時電場強度最大值仍在高壓套管接線端子末端，其值為  $1.396 \times 10^6$  (V/m)，較無絕緣罩時小，低於安全範圍  $1.697 \times 10^7$  (V/m) 內。

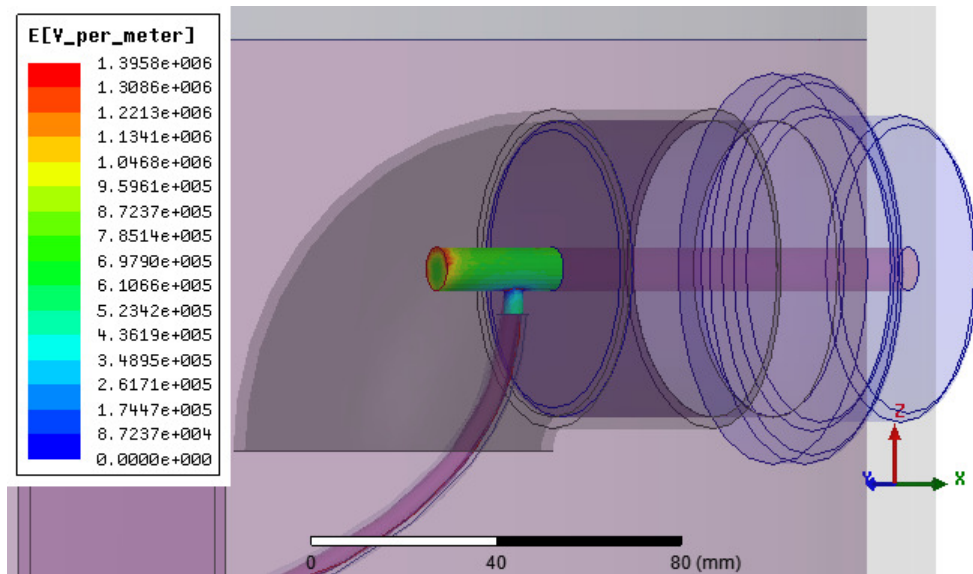


圖 4-38 加上絕緣罩高壓套管接線端子電場強度分布

B. 空氣中

(a) 正常油位時

最大電場強度發生於空氣與油接面，如圖 4-39 所示。其值為  $9.732 \times 10^4$  (V/m)，較無絕緣罩時高，但仍低於安全範圍  $3 \times 10^6$  (V/m) 內。

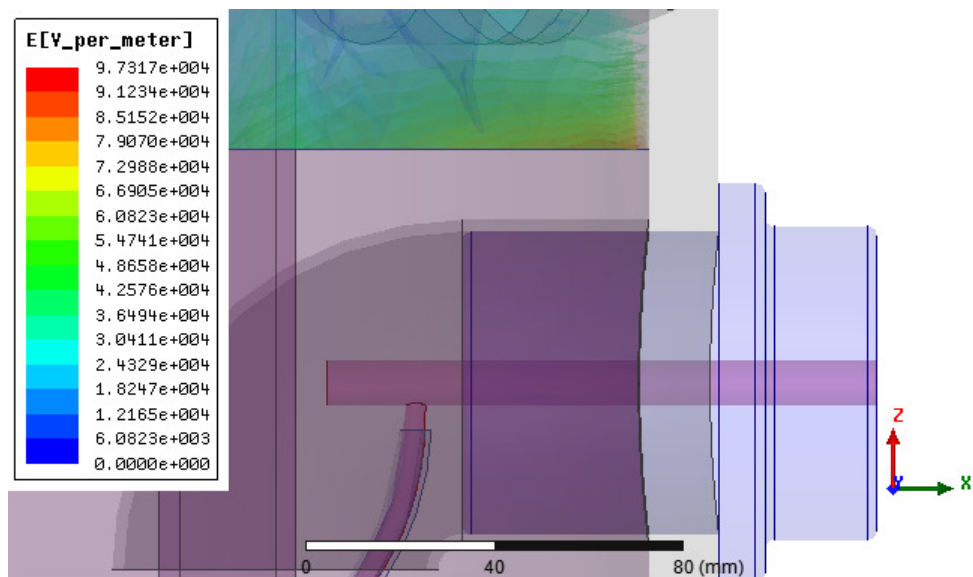


圖 4-39 加上絕緣罩變壓器桶內空氣中電場強度分布

### (b) 缺油時

此時桶內絕緣油的油面降低到高壓套管下緣，高壓套管未浸泡於絕緣油中，接線端子暴露於空氣，如圖 4-40 所示。最大電場強度發生於接線端子末端，其值為  $1.396 \times 10^6$  (V/m)，較無絕緣罩時來的高，同樣低於空氣安全範圍  $3 \times 10^6$  (V/m) 內。因此在加裝開口朝下之絕緣罩時，並不能減緩高壓套管接線端子末端的電場強度。

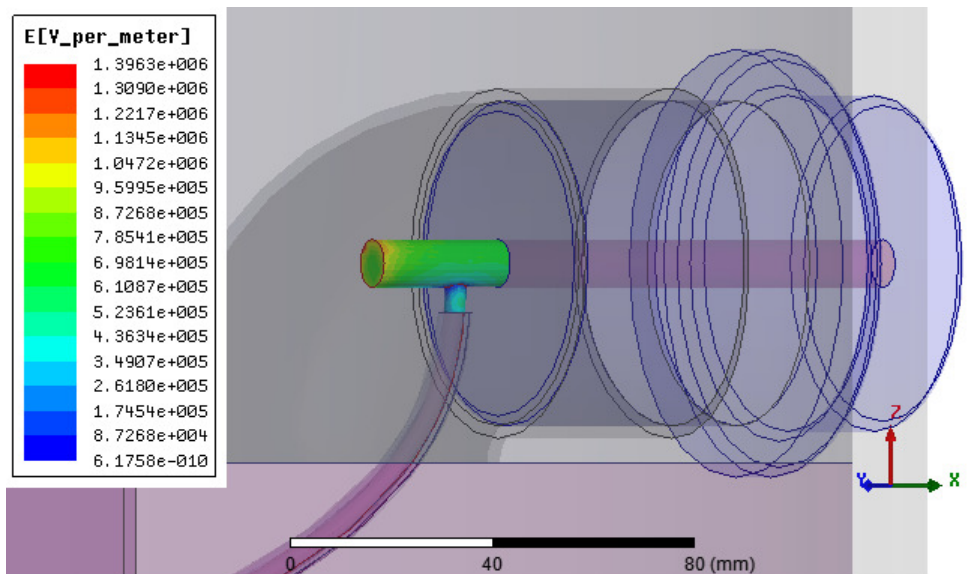


圖 4-40 加上絕緣罩缺油時變壓器桶內空氣中的電場強度分布

### (2) 開口朝上

#### A. 油中電場強度

#### (a) 正常油位時

於高壓套管接線端加裝開口朝上的絕緣罩，其餘條件不變，如圖 4-41 所示。此時電場強度最大值仍然發生於高壓套管接線端子末端，其值為  $1.451 \times 10^6$  (V/m)，同樣比無絕緣罩時來的小，且於絕緣油的安全範圍  $1.697 \times 10^7$  (V/m) 內，有 10 倍以上安全裕度。

#### (b) 缺油時

此時絕緣罩中充滿絕緣油，使高壓端子浸泡在油之中，最大電場強度發生於浸泡絕緣油中的接線末端，其值為  $1.352 \times 10^6$  (V/m)，如圖 4-42 所示。與無絕緣罩和開口朝下時相比，此時高壓接線端子在絕緣油中，有 10 倍以上的安全裕度。

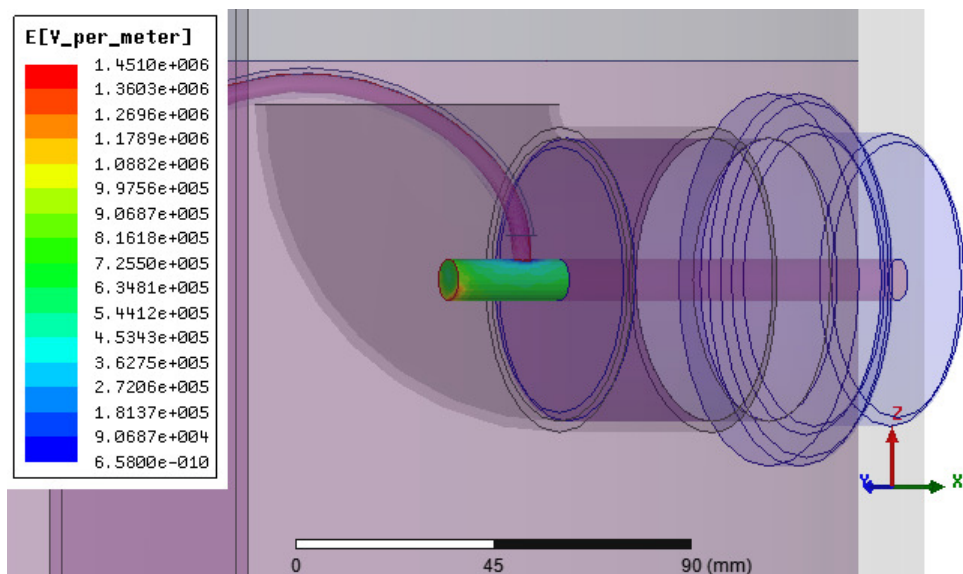


圖 4-41 加上絕緣罩高壓套管接線端子電場強度分布

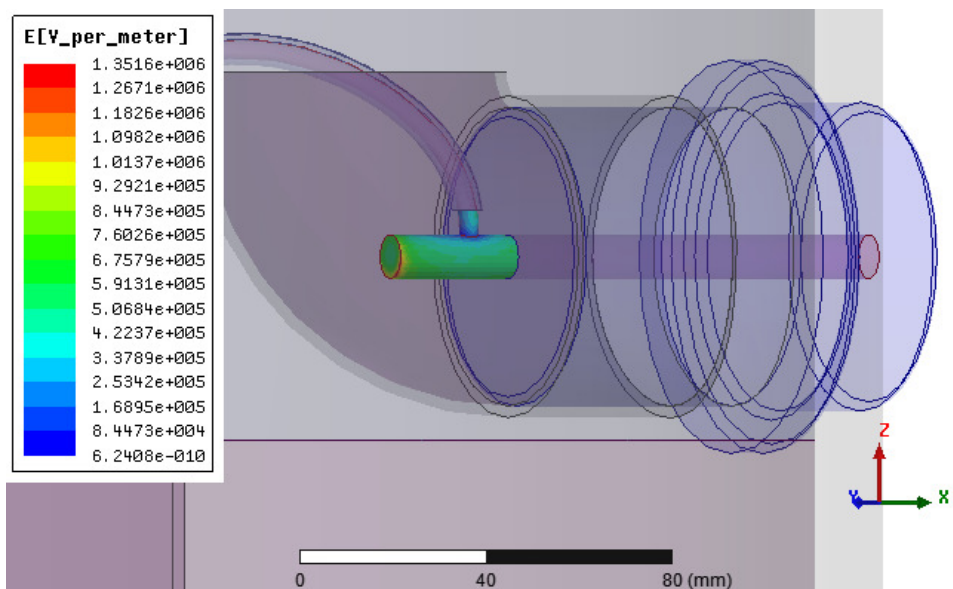


圖 4-42 加上絕緣罩缺油時變壓器桶內空氣中的電場強度分布

## B. 空氣中電場強度

正常油位時而絕緣罩開口朝上時空氣中的電場強度分布產生變化，如圖 4-43 所示。此時電場強度最大值同樣於空氣與絕緣油接面，但已經不像無絕緣罩以及開口朝下時聚集在桶壁處，因為絕緣罩開口朝上的關係，使得高壓引線路徑必須往上，雖然高壓引線還是在絕緣油之中但接近空氣，影響空氣中的電場強度分布，使得其最大值增為  $5.253 \times 10^5$  (V/m)。此時的安全裕度為 5.7 倍。因此高壓引線必須有絕緣油的保護，不能暴露於空氣中。

綜合以上分析，將結果整理成表 4-8。正常油位時，絕緣油中電場強度

最大值發生於接線端子末端，其值皆於安全範圍  $1.697 \times 10^7$  (V/m)內，如表 4-8(a)所示，有 10 倍以上的安全裕度，顯示裝設絕緣罩時可緩和油中電場強度；而空氣中電場強度最大值發生於桶內與絕緣油的接面，其值皆於安全範圍  $3 \times 10^6$  (V/m)內，但絕緣罩朝上裝設時，高壓引線路徑必須往上，雖然高壓引線在絕緣油中但靠近空氣，使桶內空氣中的最大電場強度明顯較無絕緣罩以及絕緣罩朝下時來的大。

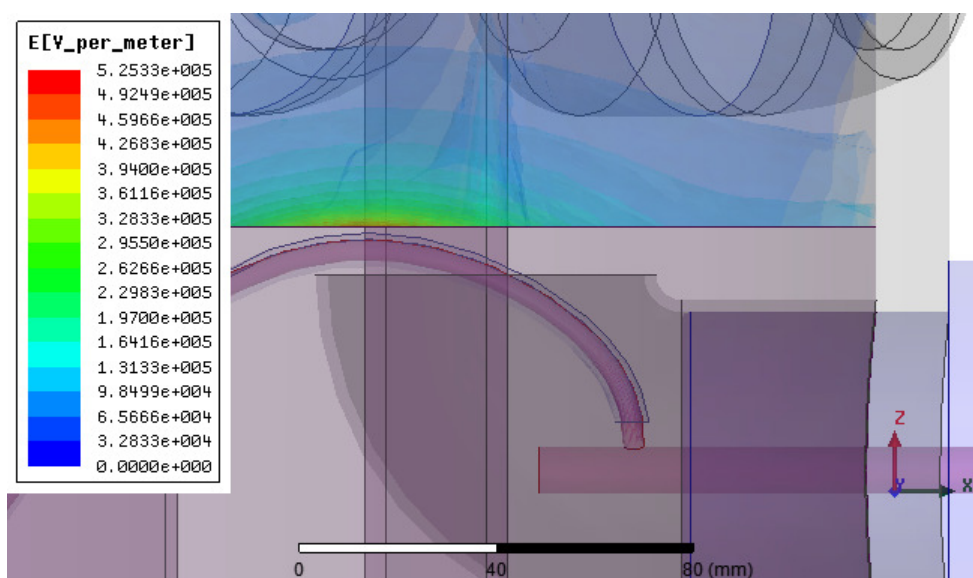


圖 4-43 加上絕緣罩變壓器桶內空氣中電場強度分布

表 4-8(a) 正常油位時絕緣油與桶內空氣的電場強度值

案例	無絕緣罩	絕緣罩朝下	絕緣罩朝上
絕緣油 $\text{MaxE}(10^6 \text{V/m})$	1.558	1.396	1.451
桶內空氣 $\text{MaxE}(10^6 \text{V/m})$	0.091	0.097	0.525

表 4-8(b) 缺油時絕緣油與桶內空氣的電場強度值

案例	無絕緣罩	絕緣罩朝下	絕緣罩朝上
桶內空氣 $\text{MaxE}(10^6 \text{V/m})$	1.316	1.396	1.352 (註)

註：接線端子於絕緣油中

缺油狀況時，在無裝設絕緣罩以及絕緣罩朝下的情況下，桶內絕緣油的油面降低到高壓套管下緣，高壓端子暴露在空氣中，空氣中電場強度最大值發生於接線端子末端，如表 4-8(b)所示，其值雖然於安全範圍  $3 \times 10^6$  (V/m)內，但安全裕度僅剩 2.2 倍左右，更可能因油垢或雜質造成沿面絕緣

距離不足，造成絕緣破壞；而絕緣罩朝上裝設時，不受缺油的影響，接線端子仍能浸泡在絕緣油中，油的絕緣性能比空氣好，安全裕度較無絕緣罩以及絕緣罩朝下時高。

#### 4. 電壓升高的影響

當發生異常電壓時，高壓套管與變壓器外殼間，絕緣油與空氣中的電場變化，其最大電場強度值如表 4-9 所示。由正常電壓峰值 6.9 kV 升至 30kV，絕緣油與空氣中的電場強度值與電壓成正比，顯然電壓升高電場強度變大。當高壓導體對地電壓差為 30kV 時，油中的安全裕度約為 3.5 倍；而空氣中的安全裕度約為 10.6 倍。

表 4-9 高壓套管電壓升高時油與空氣中電場強度值

電壓(kV)	$6.9\sqrt{2}$	15	20	25	30
油中 MaxE( $10^6$ )	1.558	2.515	3.323	4.148	4.811
空氣 MaxE( $10^5$ )	0.913	1.424	1.882	2.334	2.835

綜合以上分析，若要具備安全的絕緣，設計時應同時考量[52]：

- (一) 帶電體之間的貫穿破壞。
- (二) 絕緣物表面的沿面破壞。

#### 附件 4-3-2：高壓套管電場分析(二維分析)

##### 一、套管內部分

套管內的電場分布，呈現上下對稱，如圖 A432-1 所示，顯示電場集中於套管與桶壁接面處。至於徑向(Radial)方向的電場大小，如圖 A432-1 中 a 至 b 點間。由圖 A432-2 可知，套管與桶壁接面處(b 點)之電場大於套管中心(a 點)，b 點電場為  $3.348 \times 10^5$  (V/m)，而 a 點的電場則約為  $2.005 \times 10^5$  (V/m)，兩點相差 1.67 倍，故 b 點附近區域比 a 點容易發生絕緣破壞。

以上可得知，電壓不變的情況下，在電極的最短距離間容易造成電場的聚集；而遠離最短距離時，電場會逐漸變小。而且電場會局部集中在套管與桶壁接地處，因為桶壁附近的等電位面間隔較其他區域狹窄，會使得電場較集中，如圖 A432-3 所示。

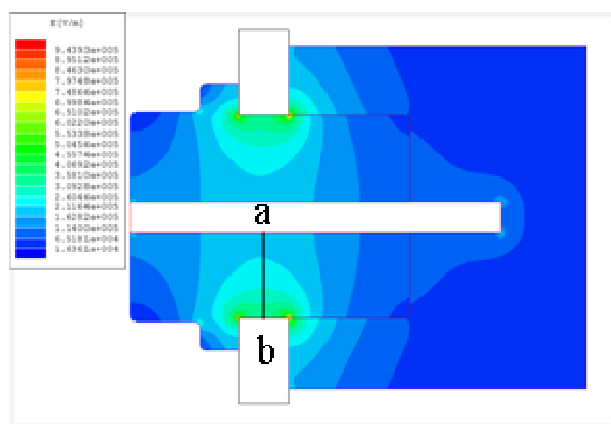


圖 A432-1 套管電場大小分布

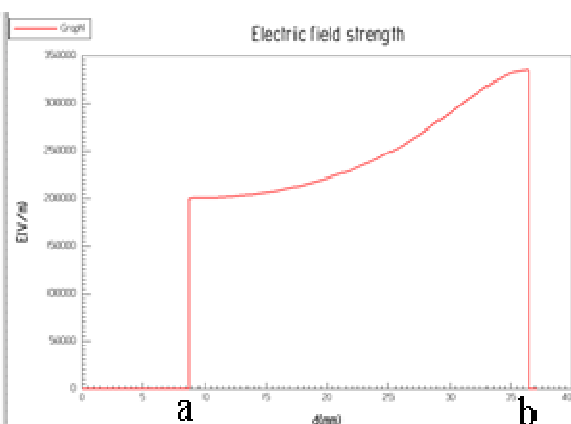


圖 A432-2 沿 a-b 之電場大小

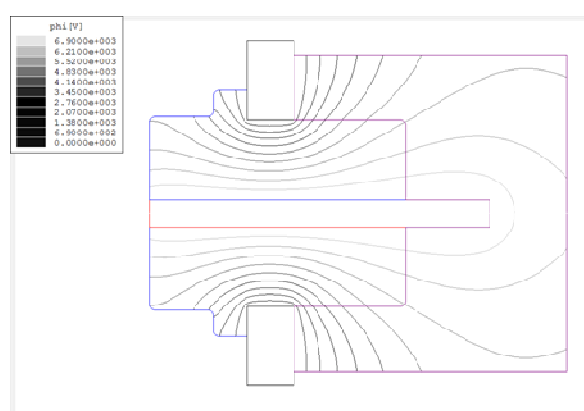


圖 A432-3 套管間等電位面分布

各種環氧樹脂的相對介電係數約為 3~7 [53]，絕緣油則為 2~2.5，將兩者的相對介電係數改變時，電場也會跟著改變。首先，使用  $\epsilon_r$  為 2 的絕緣油，逐漸增加環氧樹脂的  $\epsilon_r$  時，a 點(套管中心)的電場會逐漸變小，而 b 點(套管與桶壁接面處)的電場則會變大，接著將絕緣油  $\epsilon_r$  改為 2.5，環氧樹脂的  $\epsilon_r$  也為 3~7，此時，a 點電場慢慢變小，b 點電場變大。

當環氧樹脂的  $\epsilon_r$  固定，絕緣油  $\epsilon_r$  變大時，a 點電場會上升，b 點電場則下降。複合介質  $\epsilon_r$  的配置，將會改變介質中的電場大小，雖然幅度不大，但無論如何配置，b 點電場大小始終大於 a 點，詳細計算結果如表 A432-1。

## 二、絕緣油中部分

分析絕緣油中的電場分布，由圖 A432-4 所示。電場主要集中於套管與絕緣油的接面處，電場的最大值則在變壓器桶壁與套管接合處，電場大小為  $8.612 \times 10^5$  (V/m)，低於絕緣油容忍值  $1.2 \times 10^7$  (V/m)，此由台電密封型桿

上變壓器材料標準中-絕緣油絕緣破壞電壓(Dielectric breakdown voltage) 30kV/2.5mm 轉換而得[1]。短時間影響不大，但長時間放電之下可能會使絕緣油劣化。

表 A432-1 改變  $\varepsilon_r$  時 a 與 b 點的電場大小

環氧樹脂 $\varepsilon_r$	絕緣油 $\varepsilon_r$	a 點(V/m)	b 點(V/m)
3	2	$2.015 \times 10^5$	$3.329 \times 10^5$
4	2	$1.991 \times 10^5$	$3.375 \times 10^5$
5	2	$1.973 \times 10^5$	$3.409 \times 10^5$
6	2	$1.960 \times 10^5$	$3.435 \times 10^5$
7	2	$1.950 \times 10^5$	$3.454 \times 10^5$
3	2.5	$2.028 \times 10^5$	$3.302 \times 10^5$
4	2.5	$2.003 \times 10^5$	$3.349 \times 10^5$
5	2.5	$1.986 \times 10^5$	$3.383 \times 10^5$
6	2.5	$1.971 \times 10^5$	$3.410 \times 10^5$
7	2.5	$1.961 \times 10^5$	$3.431 \times 10^5$

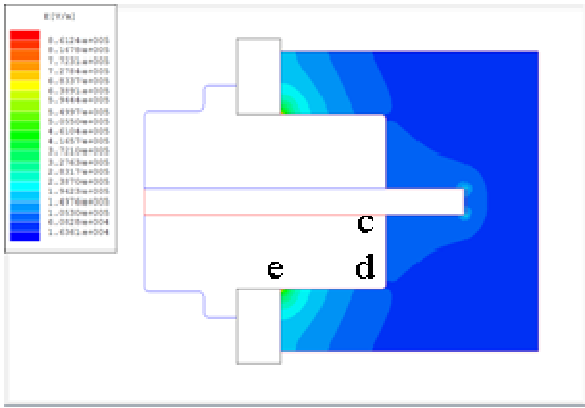


圖 A432-4 絕緣油中電場分析

接著調整環氧樹脂與絕緣油的  $\varepsilon_r$ ，觀察油中電場的變化。首先，將絕緣油的  $\varepsilon_r$  固定，環氧樹脂  $\varepsilon_r$  漸漸變大時，絕緣油中的電場會增加；而環氧樹脂的  $\varepsilon_r$  固定，絕緣油  $\varepsilon_r$  增大時，則電場會減少。將環氧樹脂  $\varepsilon_r$  設為 3，絕緣油設為 2.5 時，有最小的電場  $7.422 \times 10^5$  (V/m)。所以，若使電場最小化，可以參考此種方式。詳細電場大小如表 A432-2。

表 A432-2 改變  $\varepsilon_r$  時絕緣油中的電場最大值

環氧樹脂 $\varepsilon_r$	絕緣油 $\varepsilon_r$	E (V/m)	環氧樹脂 $\varepsilon_r$	絕緣油 $\varepsilon_r$	E (V/m)
3	2	$8.253 \times 10^5$	3	2.5	$7.422 \times 10^5$
4	2	$9.383 \times 10^5$	4	2.5	$8.545 \times 10^5$
5	2	$1.024 \times 10^6$	5	2.5	$9.419 \times 10^5$
6	2	$1.090 \times 10^6$	6	2.5	$1.108 \times 10^6$
7	2	$1.144 \times 10^6$	7	2.5	$1.069 \times 10^6$

### 三、套管表面

最後，探討套管表面的電場大小，由圖 A432-4 中套管表面 c-d-e 間，計算套管表面的電場強度，結果如圖 A432-5 所示，c-d 間變化不大，d 點於套管彎曲處變化較為崎嶇，而到接近桶壁 e 點時，電場大小則直線上升。套管表面存在有可觀的電場強度，若表面有油漬或其他汙染時，使絕緣能力下降，帶電體與桶壁間沿著套管表面，可能會發生放電現象。

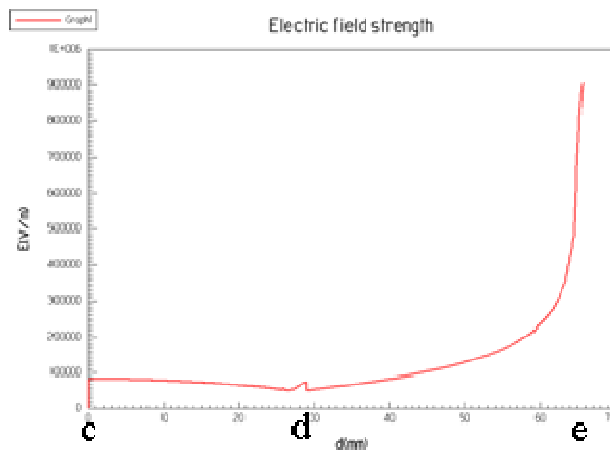


圖 A432-5 套管表面之電場分析

### 4.3.3 二次套管電場分析

#### (一) 建立模型

二次套管的尺寸規格如圖 4-44 所示。利用 Maxwell 建立高壓套管的模型，如圖 4-45 所示，當中黑色為二次套管、紅色為帶電體。與高壓套管裝設位置的距離：垂直距離為 110mm，水平弧長距離為  $540\pi/12$  (桶壁半徑為 270mm，高壓套管與二次套管裝設位置相差 30 度)。

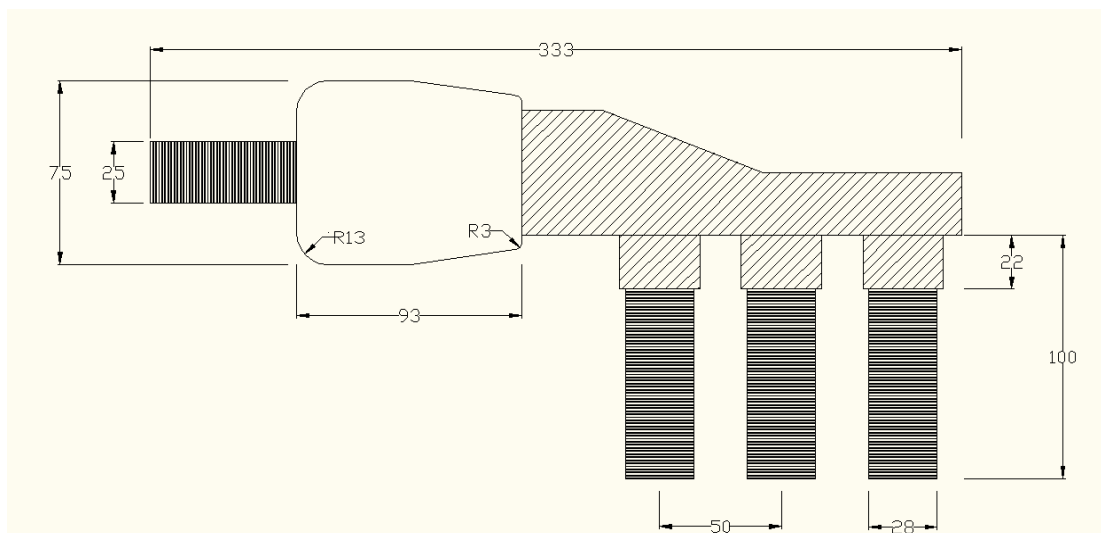


圖 4-44 二次套管尺寸規格圖

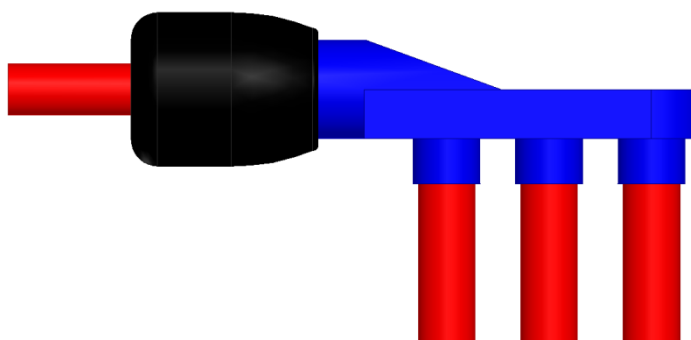


圖 4-45 二次套管模型圖

二次套管與各帶電體元件間的距離如表 4-10 所示，與二次套管最接近者為接地的變壓器外殼(102mm)，但兩者之間的電位差僅為 120V；而與高壓套管的距離為 135mm，但兩者之間的電壓差較大(6780V)，因此二次套管的電場強度主要受到高壓套管的影響。

表 4-10 二次套管與各帶電體元件間的距離

名稱	高壓套管	熔絲	避雷器	外殼	夾件
距離(mm)	135	302	297	102	360

## (二) 設定參數

建完 Maxwell 模型後，對各個構造設定相對介電係數  $\epsilon_r$  與電壓值，其參數如表 4-11 所示。二次套管的材質為瓷器， $\epsilon_r$  為軟體預設值 5.7，覆蓋在桶外的絕緣為橡膠  $\epsilon_r$  設為 3，帶電體為銅  $\epsilon_r$  設為 1。

電源額定二次側電壓為 120V (有效值)，假定電壓峰值時電場強度能低於安全範圍，則在其他電壓下也是安全的，所以二次套管給定的瞬時電壓值為  $120\sqrt{2}$  V (峰值)；而變壓器的桶壁接地，電壓設為 0V。

表 4-11 分析二次套管時所用的參數與電源

顏色	名稱	材料	相對介電係數 $\epsilon_r$	電源(V)
黑色	二次套管	瓷器	5.7	
紅色	帶電體	銅	3.6	$120\sqrt{2}$
藍色	絕緣層	橡膠	3	
	空氣	空氣	1.0006	
	桶壁	不鏽鋼	1	0

### (三) 觀察電場強度模擬結果

二次側引出線裸露之鋁片表面塗上絕緣層或覆蓋絕緣紙以絕緣，這裡只考量二次側帶電體。二次側引出線的電場強度分布模擬結果如圖 4-46 所示，電場強度最大值於帶電體末端，亦即最靠近高壓套管接線端子末端處，其值為  $3.997 \times 10^4$  (V/m)。由圖中可看出受到高壓套管的影響，電場分布沒有呈現圓對稱，雖然二次側引出線也為圓筒導體，但其為低壓側，電壓僅為 120V (有效值)，且距離高壓套管較遠，電場強度小於空氣與絕緣油接面。

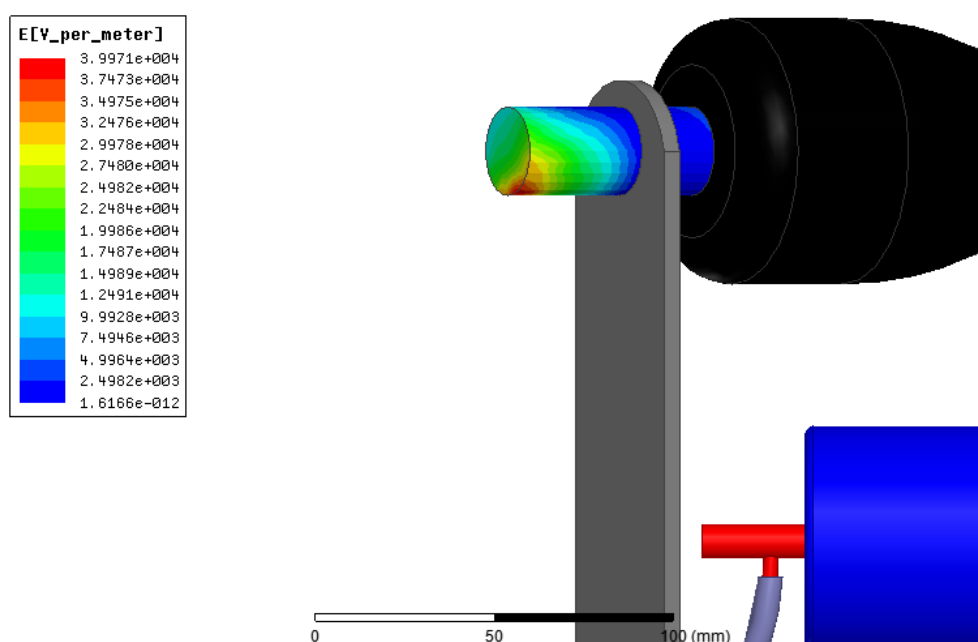


圖 4-46 二次側引出線電場強度分布

#### (四) 是否於安全範圍內

模擬結果最大電場強度值為  $3.997 \times 10^4$  (V/m)，於空氣安全範圍  $3 \times 10^6$  (V/m)內，有有 75 倍以上的安全裕度。

#### (五) 結果與討論

##### 1. 高壓套管於絕緣油中

高壓套管與二次套管間，是絕緣油與空氣所構成的複合介質，若兩極間的距離改變，電場強度將產生變化，以下兩種狀況說明。假設兩電極中心相距 50mm，電極半徑為 5mm，分別於上方的空氣與下方的絕緣油中，如圖 4-47 所示；雖然兩電極間距相同，但相對位置的改變使得電場強度產生變化。油位的高度會因溫度改變而改變，也將影響電場強度的分布，因此難以訂出高壓套管與二次套管間的最短距離。但出廠時必須通過台電材規 C035 (96-07)中規定的各項試驗。

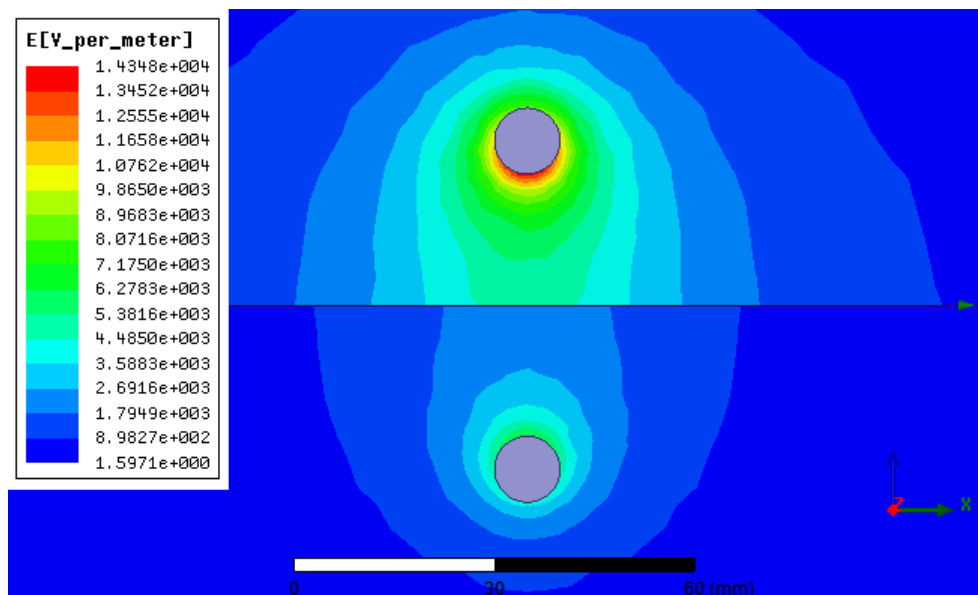


圖 4-47(a) 距離為 50mm 兩電極於上方的空氣中

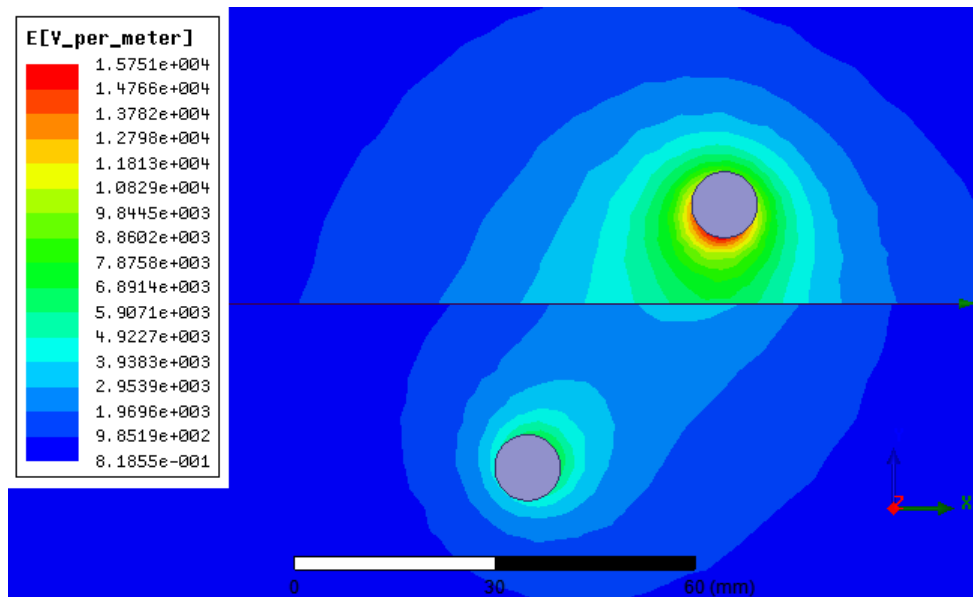


圖 4-47(b) 距離為 50mm 兩電極於下方的絕緣油中

## 2. 高壓套管於空氣中

若缺油狀況時，高壓套管與二次套管接暴露於同一介質空氣中，則不會有複合介質的問題，因此調整兩者帶電體之間的距離，觀察電場強度的變化。圖 4-48 為等電位面圖，高壓套管電場強度主要受到接地桶壁的影響，高壓套管與桶壁間的等電位面較密集；與二次套管間的等電位面較為疏散。帶電體中心距離 110mm 時二次套管帶電的電場強度分布如圖 4-49 所示。當兩者間的距離縮短時，則二次套管的最高電場強度變大，最高電場強度值如表 4-12 所示，其值皆於安全範圍內。

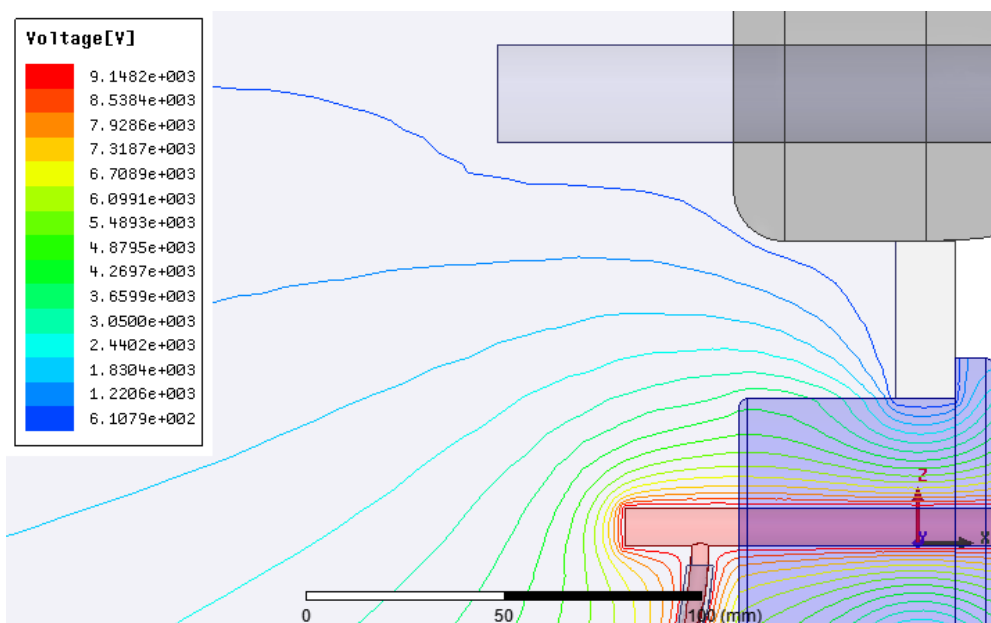


圖 4-48 高壓套管與二次套管間之等電位面圖

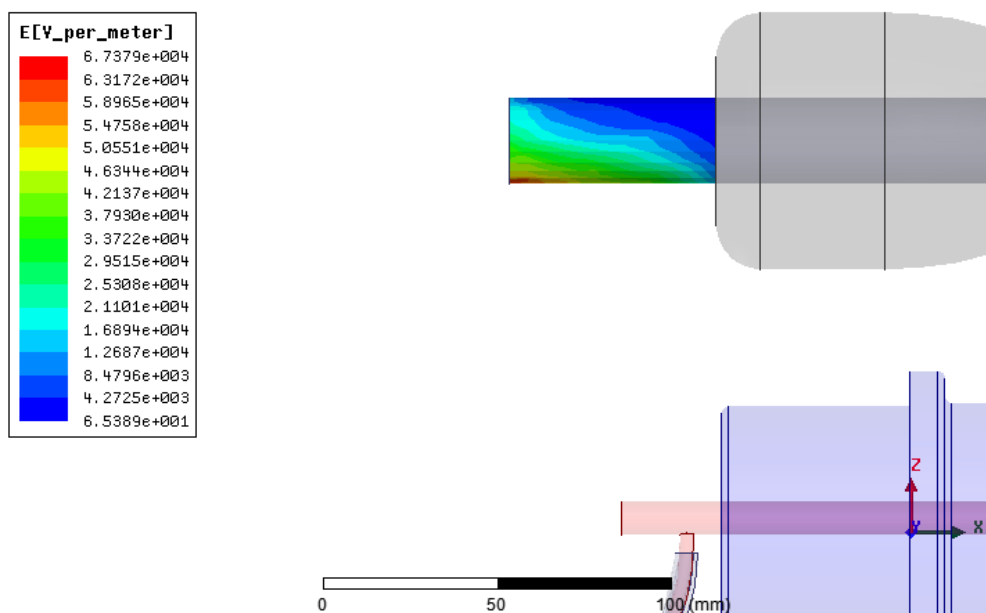


圖 4-49 二次套管之電場強度分布圖

表 4-12 二次套管與高壓套管間距離與電場強度的關係

距離(mm)	140	130	120	110	100	90	80
MaxE( $10^4$ V/m)	2.926	3.966	4.670	6.738	8.486	8.893	10.877

#### 4.3.4 全域型限流熔絲電場分析

##### (一) 建立模型

全域型限流熔絲(以下簡稱熔絲)依據保護設備型錄如圖 4-50(a) [51], 實際上熔絲為三維問題,  $x$ - $y$ - $z$  三維座標如圖 4-50(b)所示, 沿  $z$  軸的場變化幾乎一樣。

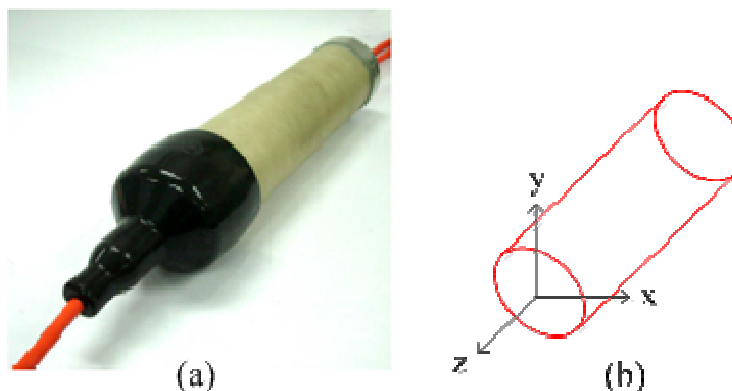


圖 4-50 熔絲與簡化圖

熔絲的尺寸規格如圖 4-51 與圖 4-52 所示，分別為熔絲上視圖與前視圖，單位為 mm。利用 Maxwell 建立高壓套管的模型，如圖 4-53 所示，當中紅色為帶電體，藍色為填充細砂，綠色為包覆之玻璃纖維管，黑色支撐架，紫色絕緣油以及灰色的夾件。此時帶電體中心距夾件 80mm。

熔絲與各帶電體元件間的距離如表 4-13 所示，與熔絲最接近者為接地的夾件(80mm)，因此熔絲的電場強度主要受到夾件的影響，將模擬分析熔絲帶電體與夾件間的電場強度變化。

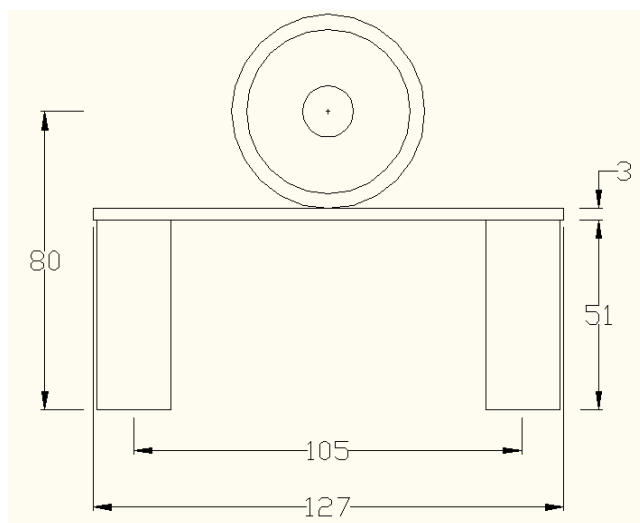


圖 4-51 熔絲尺寸規格(前視圖)

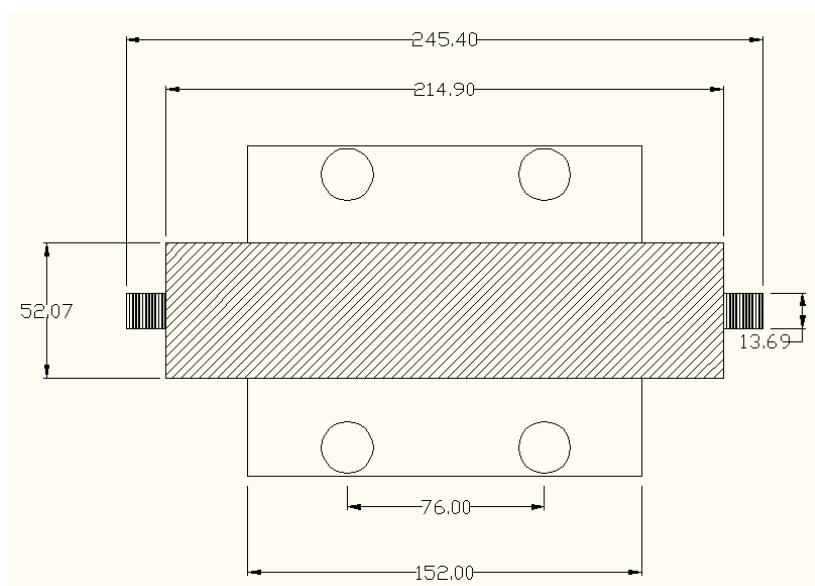


圖 4-52 熔絲尺寸規格(上視圖)

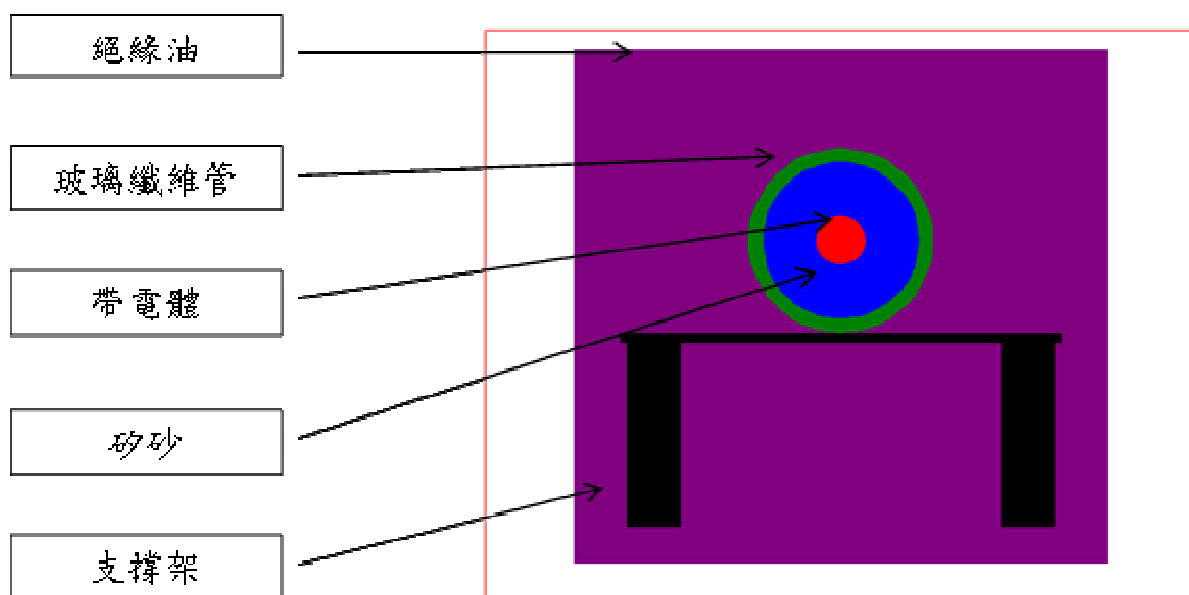


圖 4-53 熔絲模型圖

表 4-13 熔絲與各帶電體元件間的距離

名稱	高壓套管	二次套管	避雷器	外殼	夾件
距離(mm)	298	302	120	140	80

## (二) 設定參數

建完 Maxwell 模型後，對各個構造設定相對介電係數  $\epsilon_r$  與電壓值，其參數如表 4-14 所示。典型玻璃纖維的相對介電係數為 3.56~5.80 之間[53]，在此採用 Maxwell 軟體內建之預設值  $\epsilon_r$  為 4.4，矽砂( $\text{SiO}_2$ )內建  $\epsilon_r$  為 4，支撐架材料為橡膠內建  $\epsilon_r$  為 3，絕緣油  $\epsilon_r$  為 2.2，夾件為不鏽鋼  $\epsilon_r$  為 1。電源部分帶電體電壓為  $6900\sqrt{2}$  V (峰值)，夾件接地電壓為 0V。

表 4-14 分析熔絲時所用的參數與電源

顏色	名稱	材料	相對介電係數 $\epsilon_r$	電源(V)
紫色	絕緣油	礦物油	2.2	
綠色	玻璃纖維管	玻璃纖維	4.4	
紅色	帶電體	銅	1	$6900\sqrt{2}$
藍色	矽砂	二氧化矽	4	
黑色	支撐架	橡膠	3	
灰色	夾件	不鏽鋼	1	0

### (三) 觀察電場強度模擬結果

經模擬，結果如圖 4-54 所示。油中最大電場強度發生於熔絲接線端子末端，末端為圓筒導體且為裸露之電極，使得電場聚集於此，電場強度為  $1.243 \times 10^6$  (V/m)。

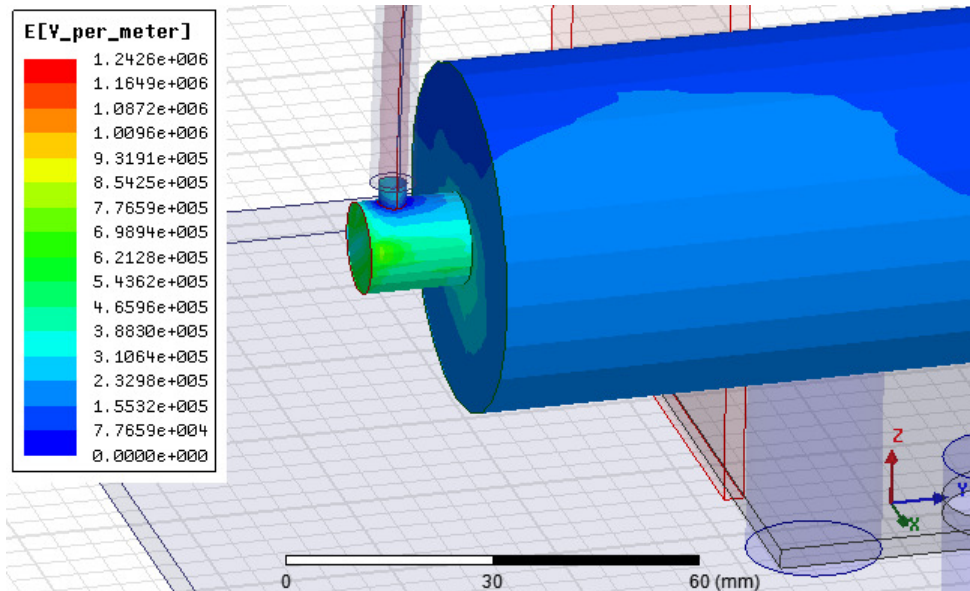


圖 4-54 熔絲電場強度分布

### (四) 是否於安全範圍內

經模擬結果得知，油中最大電場強度其值為  $1.243 \times 10^6$  (V/m)，於絕緣油安全範圍內  $1.697 \times 10^7$  (V/m)，有 13 倍以上安全裕度。

### (五) 結果與討論

#### 1. 調整電極間距離

熔絲置放於變壓器夾件的上方，彼此之間有支撐架固定熔絲，且須具備足夠的安全絕緣距離。

調整熔絲與夾件的距離，觀察電場強度的變化，電場強度如表 4-15 所示，其值皆小於安全範圍，將距離縮小至 30mm 時，也約有 10 倍以上安全裕度。而所需要的安全距離應該為多少，各製造廠家皆有不同標準。以熔絲的製造廠家為例，帶電體中心與接地夾件距離為 80mm，因此，若以 80mm 為安全絕緣的標準，在正常運轉情況下，熔絲與電位為零的帶電體(如夾件、桶壁、避雷器等)間的距離至少為 80mm。

表 4-15 熔絲電場強度與夾件距離的關係

距離(mm)	80	70	60	50	40	30
MaxE( $10^6$ V/m)	1.243	1.282	1.286	1.400	1.613	1.696

## 2. 電壓升高的影響

當發生異常電壓時，熔絲與夾件間的電場變化，其最大電場強度值如表 4-16 所示；由正常電壓峰值 6.9 kV 升至 30kV，油中的電場強度值與電壓成正比，雖著電壓升高電場強度變大。電壓為 30kV 時油中的安全裕度約為 4 倍。

表 4-16 熔絲電壓升高時油中電場強度值

電壓(kV)	$6.9\sqrt{2}$	15	20	25	30
油中 MaxE( $10^6$ )	1.243	1.918	2.730	3.380	4.234

### 附件 4-3-4：改變玻璃纖維管 $\epsilon_r$ 與絕緣油中電場變化

將支撐架設為導體時，則支撐架與夾件同為零電位，因此，電場將聚集於尖端中。改變玻璃纖維管  $\epsilon_r$ ，來觀察油中電場的變化，常見玻璃纖維管  $\epsilon_r$  為 3.56、4.53 與 5.80 三種[53]。首先，先固定絕緣油  $\epsilon_r$  為 2，逐漸增加環氧樹脂的  $\epsilon_r$  由 3.56~5.80，計算結果尖端電場會變大；而當玻璃纖維管  $\epsilon_r$  固定時，絕緣油  $\epsilon_r$  由 2 變至 2.5，則電場會變小。玻璃纖維管  $\epsilon_r$  設為 3.56，絕緣油設為 2.5 時，有最小的電場  $4.796 \times 10^5$  (V/m)。所以，絕緣油與玻璃纖維管  $\epsilon_r$  的匹配，會影響油中的電場強度；若要讓尖端電場最小時，可以參考此種方式。詳細的電場值如表 A434-1。

表 A434-1 改變  $\epsilon_r$  時絕緣油中的電場最大值

玻璃纖維管 $\epsilon_r$	絕緣油 $\epsilon_r$	E (V/m)
3.56	2	$6.407 \times 10^5$
4.53	2	$7.162 \times 10^5$
5.80	2	$8.086 \times 10^5$
3.56	2.5	$4.796 \times 10^5$
4.53	2.5	$5.304 \times 10^5$
5.80	2.5	$5.915 \times 10^5$

最後改用三維場來分析，圖形如圖 A434-1 所示。當中包含了 x-y、y-z、x-z 平面與三維圖，綠色為玻璃纖維管，藍色為矽砂，紅色為帶電體以及熔

絲下方的支撐架，其餘條件皆與二維場相同。

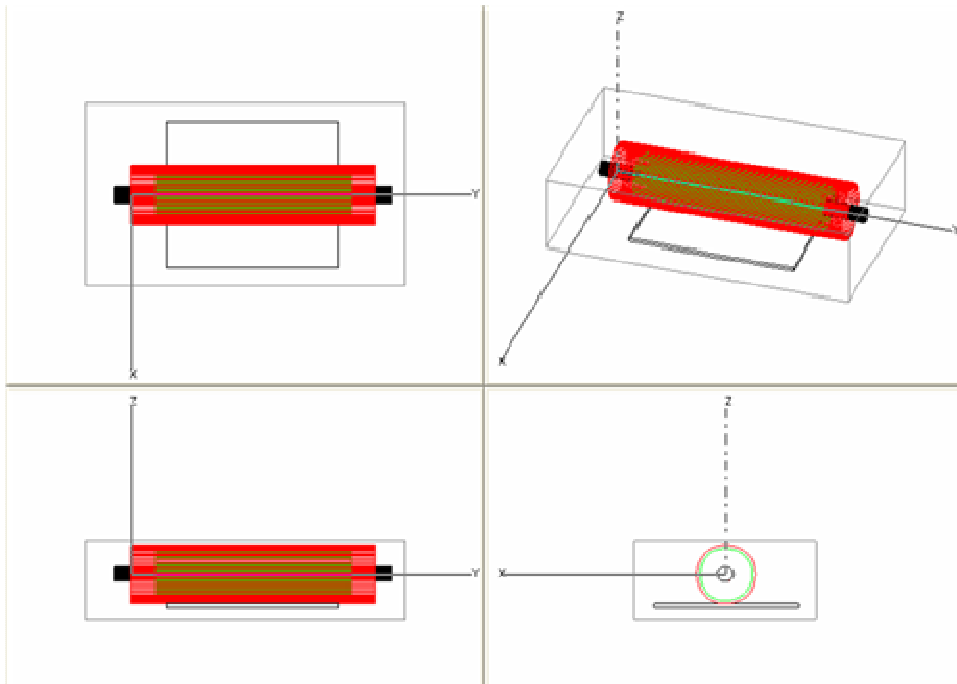


圖 A434-1 熔絲三維物理模型圖

以取其中某一平面的電場分布為例，分析結果如圖 A434-2，檢視 x-z 平面則如圖 A434-3，唯一不同的點是，電場大小比二維時大，約為  $6.397 \times 10^5$  (V/m)，多了一維空間較接近真實情況。但電場分布狀況相同，都是往尖端聚集。二維場電場大小與三維場雖有誤差，但電場分布結果是相同的。

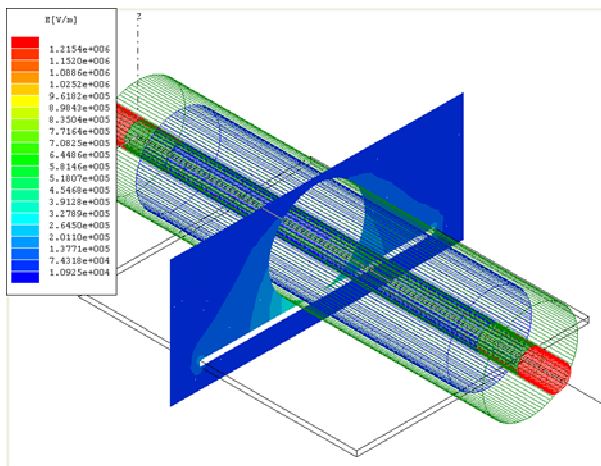


圖 A434-2 三維場電場大小分布圖

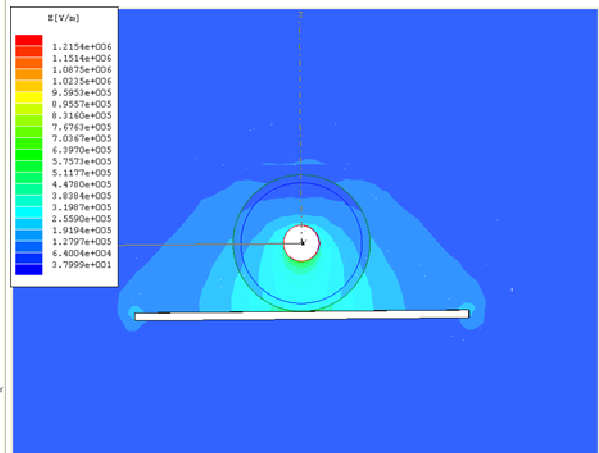


圖 A434-3 x-z 平面電場大小分布圖

三維的電場大小分布，由圖 A434-4 可看出，電場主要聚集在帶電體、熔絲與支撐架間，比二維場清楚許多，能更清楚檢視電場的分布。因此，支撐架應使用絕緣材料，使熔絲與夾件間有足夠的絕緣距離。

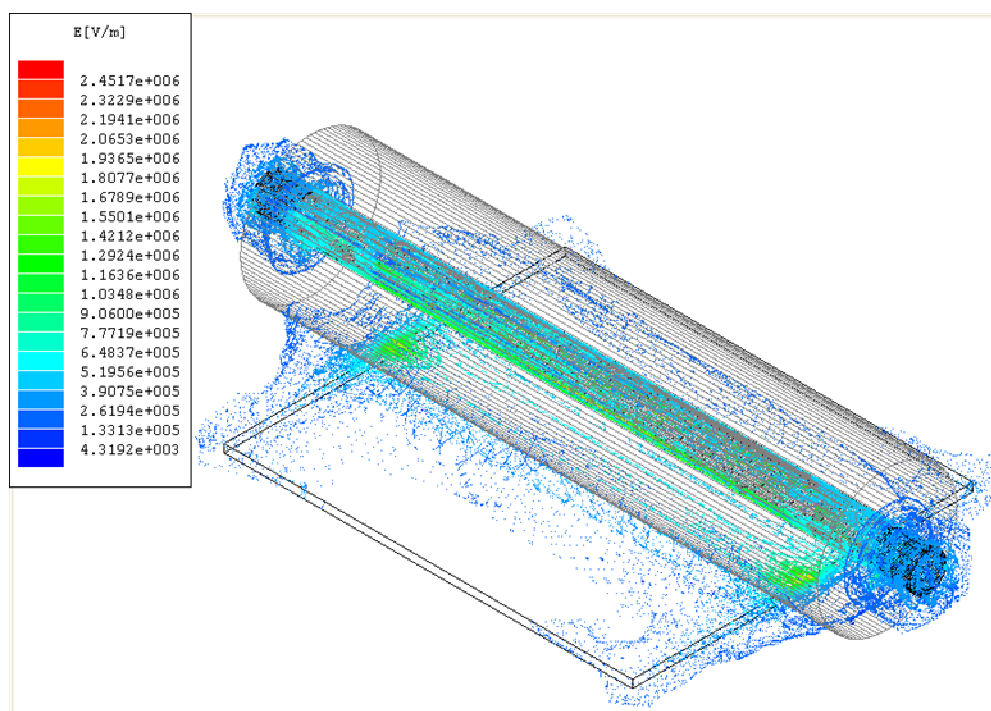


圖 A434-4 三維場熔絲的電場大小分布

### 4.3.5 氧化鋅避雷器電場分析

#### (一) 建立模型

避雷器的尺寸規格如圖 4-55 與圖 4-56 所示，分別為避雷器側視圖與正視圖，單位為 mm。利用 Maxwell 建立高壓套管的模型，如圖 4-57 所示。當中紅色為帶電體，藍色為氧化鋅電阻，綠色為包覆之玻璃纖維管，黑色支撐架以及紫色絕緣油。此時帶電體中心點與夾件相距 90mm，而熔絲與避雷器帶電體中心相距 120mm，如圖 4-58 所示。

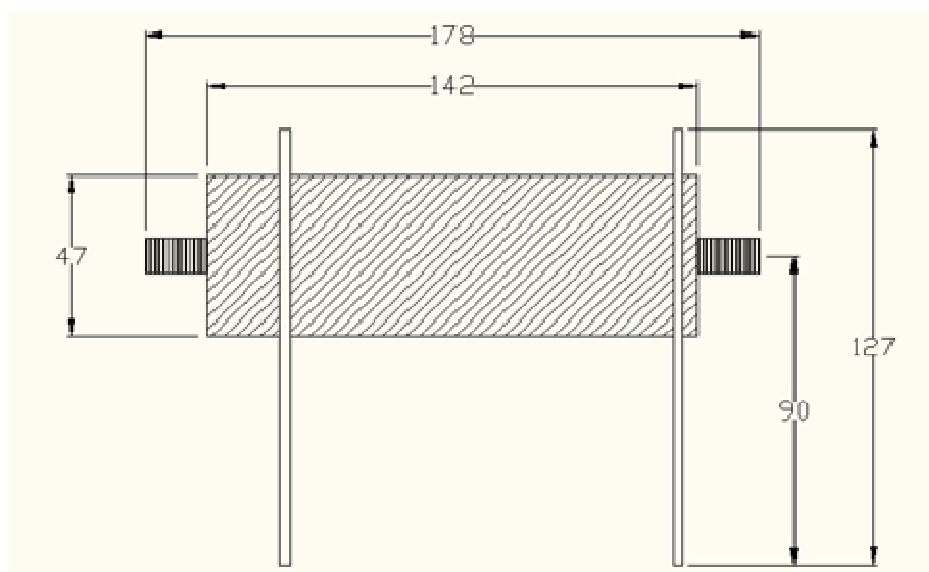


圖 4-55 避雷器尺寸規格(側視圖)

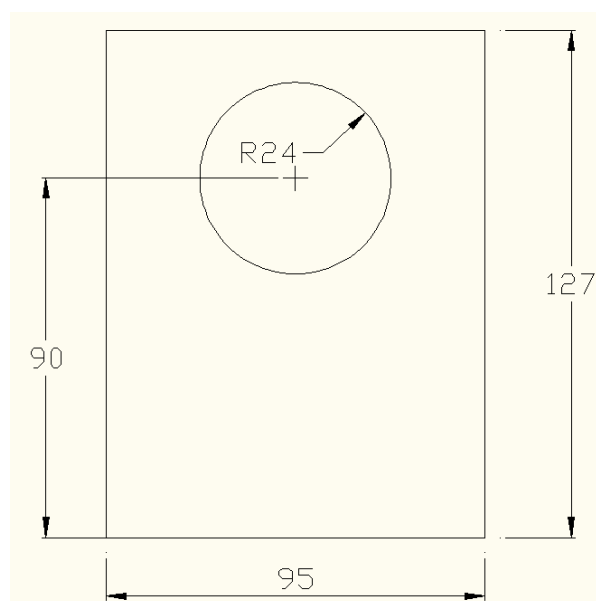


圖 4-56 避雷器尺寸規格(正視圖)

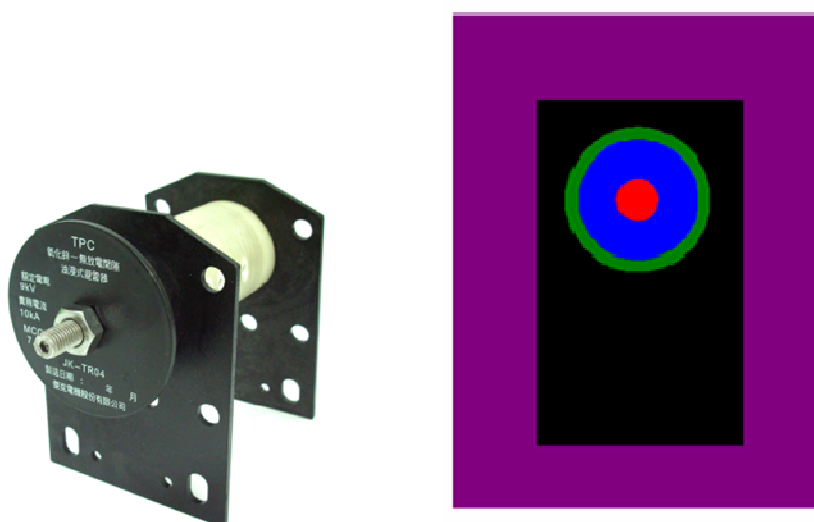


圖 4-57 避雷器與避雷器模型圖

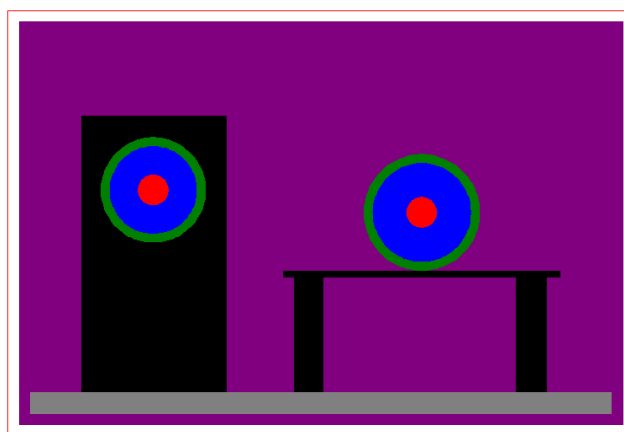


圖 4-58 避雷器與熔絲模型圖(中心相距 120mm)

避雷器與各帶電體元件間的距離如表 4-17 所示。與避雷器最接近者為接地的夾件(90mm)，但在正常運轉電壓下，避雷器是沒有動作的，與夾件間的電壓差為 0V；而與熔絲的距離為 120mm，但兩者之間的電壓差較大(6900V)。因此避雷器的電場強度主要受到熔絲的影響，將分析觀察熔絲帶電體與避雷器帶電體間的電場強度變化。

表 4-17 避雷器與各帶電體元件間距離

名稱	高壓套管	二次套管	熔絲	外殼	夾件
距離(mm)	208	297	120	175	90

## (二) 設定參數

建完 Maxwell 模型後，對各個構造設定相對介電係數  $\epsilon_r$  與電壓值，其參數如表 4-18 所示。玻璃纖維相對介電係數  $\epsilon_r$  為 4.4 與熔絲所使用的玻璃纖維相同，絕緣油  $\epsilon_r$  為 2.2，固定架之材質為橡膠  $\epsilon_r$  為 3，氧化鋅與銅的  $\epsilon_r$  皆為 1。

表 4-18 分析避雷器時所用的參數與電源

顏色	名稱	材料	相對介電係數 $\epsilon_r$	電源(V)
紫色	絕緣油	礦物油	2.2	
黑色	固定架	橡膠	3	
綠色	玻璃纖維管	玻璃纖維	4.4	
藍色	變阻體	氧化鋅	1	
紅色	帶電體	銅	1	0

避雷器中的氧化鋅為一變阻體，在正常運轉電壓下，氧化鋅電阻很大流過避雷器的電流極小，避雷器視為斷路，電壓為 0，電流主要流經熔絲。

## (三) 觀察電場強度模擬結果

將避雷器與熔絲一併分析，中心相距為 120mm 時，經模擬，結果如圖 4-59 所示。油中最大電場強度發生於避雷器接線端子與玻璃纖維接面，電場強度為  $1.456 \times 10^5$  (V/m)。

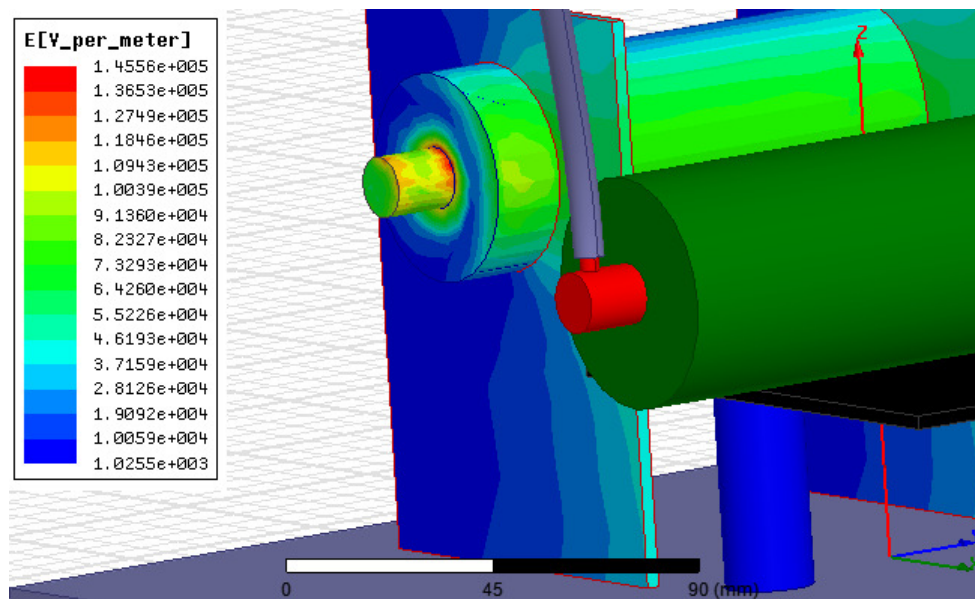


圖 4-59 避雷器電場強度分布

#### (四) 是否於安全範圍內

油中最大電場強度其值為  $1.456 \times 10^5$  (V/m)，於絕緣油安全範圍  $1.697 \times 10^7$  (V/m) 內，有相當大的安全裕度。

#### (五) 結果與討論

##### 1. 調整電極間距離

熔絲與避雷器水平放置，將兩者距離縮短，觀察電場強度的變化。電場強度如表 4-19 所示，其值皆於安全範圍  $1.697 \times 10^7$  (V/m) 內。且距離熔絲至少 80mm 以上。

表 4-19 避雷器電場強度與熔絲距離的關係

距離(mm)	120	110	100	90	80
MaxE ( $10^5$ V/m)	1.456	1.678	2.077	2.548	2.757

##### 2. 電壓升高的影響

當發生異常電壓時，避雷器與夾件間的電場變化，其最大電場強度值如表 4-20 所示。由正常電壓峰值 6.9 kV 升至 30kV，油中的電場強度值與電壓成正比，隨著電壓升高電場強度變大。電壓為 30kV 時油中的安全裕度約為 3.7 倍。

表 4-20 避雷器電壓升高時油中電場強度值

電壓(kV)	$6.9\sqrt{2}$	15	20	25	30
油中 MaxE( $10^6$ )	1.565	2.219	2.921	3.700	4.587

#### 4.3.6 綜合討論

以上的模擬分析，依照台電材規的合格基準[1]，在只針對絕緣油的情況下，新油的絕緣強度為 30kV/2.5mm 以上；而當附屬配件配置完成且絕緣油灌入變壓器桶內時，因附屬配件與空氣的影響，絕緣油的絕緣強度約降為 26kV/2.5mm，且在經過很長的時間運轉後，絕緣油的絕緣強度必會下降。提供幾種改善方式參考：

##### 一、高壓套管

##### 1. 接線末端改成球型導體

避免電極裸露處形成尖端，將高壓套管接線末端改成球型導體，最大電場強度的變化與新油的絕緣強度比較，如表 4-21 所示。優缺點如下

- (1) 使最大電場從圓筒尖端移至球型導體上，可改善電場集中的現象，緩和最大電場強度。
- (2) 成本提高。

表 4-21 油中接線端最大電場與絕緣油基準比較

半徑 R(mm)	5	6	7	8	9	10
MaxE( $10^6$ V/m)	1.445	1.275	1.214	1.010	0.930	0.873
絕緣油基準( $10^6$ V/m)	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97

##### 2. 高壓引線與桶壁距離

高壓引線與桶壁間的距離，影響電場強度的大小，高壓套管為穿過桶壁的裝置，連接高壓套管與熔絲間的引線為 6.9kV，與桶壁的接地零電位間的絕緣距離會影響電場強度，隨距離改變電場強度的變化與新油的絕緣強度比較如表 4-22 所示。

表 4-22 油中引線最大電場與絕緣油基準比較

距離(mm)	10	20	30	40	50	60	70
MaxE ( $10^6$ V/m)	1.861	1.199	1.005	0.903	0.831	0.796	0.764
絕緣油基準( $10^6$ V/m)	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97

### 3. 加上絕緣罩

高壓套管加上絕緣罩之分析案例如表 4-23 所示。

表 4-23 高壓套管分析案例

案例	1	2	3	4	5	6
絕緣罩	無	無	下	下	上	上
絕緣油狀況	正常	缺油	正常	缺油	正常	缺油

其中，

正常：絕緣油的油面高於高壓套管，高壓套管浸泡於絕緣油中。

缺油：絕緣油的油面低於高壓套管，高壓套管未浸泡於絕緣油中。

無：無裝設絕緣罩。

下：裝設開口朝下絕緣罩

上：裝設開口朝上絕緣罩

油中電場強度基準： $1.697 \times 10^7$  (V/m)

空氣電場強度基準： $3 \times 10^6$  (V/m)

分析結果：

- (1) 正常油位時，裝設絕緣罩可以緩和油中電場強度，在絕緣罩向上時，高壓引線必須往上，使桶內空氣中電場強度大於其他兩者，與新油、空氣中的絕緣強度比較，如表 4-25 所示。
- (2) 缺油時，絕緣罩向上裝設不受缺油的影響，高壓套管接線端仍浸泡在絕緣油中，絕緣性能較好優於其他兩者，與新油、空氣中的的絕緣強度比較，如表 4-26 所示。

表 4-25 正常油位時絕緣油與桶內空氣的電場強度值比較

案例	無絕緣罩	絕緣罩朝下	絕緣罩朝上
絕緣油 $\text{MaxE}(10^6 \text{V/m})$	1.558	1.396	1.451
絕緣油基準( $10^6 \text{V/m}$ )	16.97	16.97	16.97
桶內空氣 $\text{MaxE}(10^6 \text{V/m})$	0.091	0.097	0.525
空氣基準( $10^6 \text{V/m}$ )	3	3	3

表 4-26 缺油時絕緣油與桶內空氣的電場強度值比較

案例	無絕緣罩	絕緣罩朝下	絕緣罩朝上
桶內空氣 $\text{MaxE}(10^6\text{V/m})$	1.316	1.396	1.352 (註)
基準( $10^6\text{V/m}$ )	3	3	16.97(註)

註：此時的接線端於絕緣油中

說明如下：

案例 1：無裝設絕緣罩、正常油位

油中最大電場強度(圖 4-25)：高壓套管接線端子末端  $E=1.558 \times 10^6 \text{ (V/m)}$

空氣最大電場強度(圖 4-30)：空氣與油接面  $E=9.129 \times 10^4 \text{ (V/m)}$

案例 2：無裝設絕緣罩、缺油

空氣最大電場強度(圖 4-31)：高壓套管接線端子末端  $E=1.316 \times 10^6 \text{ (V/m)}$

案例 3：裝設開口朝下絕緣罩、正常油位

油中最大電場強度(圖 4-38)：高壓套管接線端子末端  $E=1.396 \times 10^6 \text{ (V/m)}$

空氣最大電場強度(圖 4-39)：空氣與油接面  $E=9.732 \times 10^4 \text{ (V/m)}$

案例 4：裝設開口朝下絕緣罩、缺油

空氣最大電場強度(圖 4-40)：高壓套管接線端子末端  $E=1.396 \times 10^6 \text{ (V/m)}$

案例 5：裝設開口朝上絕緣罩、正常油位

油中最大電場強度(圖 4-41)：高壓套管接線端子末端  $E=1.451 \times 10^6 \text{ (V/m)}$

空氣最大電場強度(圖 4-43)：空氣與油接面  $E=5.253 \times 10^5 \text{ (V/m)}$

案例 6：裝設開口朝上絕緣罩、缺油

油中最大電場強度(圖 4-42)：高壓套管接線端子末端  $E=1.352 \times 10^6 \text{ (V/m)}$

(1) 比較無裝設絕緣罩與裝設開口朝下絕緣罩

正常(案例 1 與 3)：

油中最大電場強度發生於高壓套管接線端子末端。

電場強度：無絕緣>開口朝下絕緣罩。

空氣最大電場強度發生於空氣與油接面。

電場強度：開口朝下絕緣罩>無絕緣。

裝設後：油中電場強度變小，安全裕度由 10.9 倍提升至 12.2 倍；空氣中電場強度變大，安全裕度由 32.9 倍降低至 30.8 倍。

缺油(案例 2 與 4)：

空氣最大電場強度發生於高壓套管接線端子末端。

電場強度：開口朝下絕緣罩>無絕緣。

裝設後：空氣中電場強度變大，安全裕由 2.3 降低至 2.2 倍。高壓套管接線端子末端皆暴露於空氣中。

(2) 比較無裝設絕緣罩與裝設開口朝上絕緣罩

正常(案例 1 與 5)：

油中最大電場強度發生於高壓套管接線端子末端。

電場強度：無絕緣>開口朝上絕緣罩。

空氣最大電場強度發生於空氣與油接面。

電場強度：開口朝上絕緣罩>無絕緣。

裝設後：油中電場強度變小，安全裕度由 10.9 倍提升至 11.7 倍；空氣中電場強度變大，安全裕度由 32.9 倍降低至 5.7 倍，因受到高壓引線路徑朝上的影響。

缺油(案例 2 與 6)：

案例 2：空氣最大電場強度發生於高壓套管接線端子末端。

案例 6：油中最大電場強度發生於高壓套管接線端子末端。

電場強度：開口朝上絕緣罩>無絕緣。

值得注意的是缺油狀況，因開口朝上絕緣罩的影響，高壓套管接線末端浸泡於油中，受到絕緣油的保護，而油中絕緣性能較空氣中佳。因此：無裝設時，高壓套管接線端子末端暴露於空氣中，安全裕度 2.3 倍。裝設時，高壓套管接線端子末端浸泡於油中，安全裕度 12.6 倍。

## 二、全域型限流熔絲

熔絲置放於變壓器夾件的上方，彼此之間有支撐架固定熔絲，且須具備足夠的安全絕緣距離；在不改變結構的情況下，調整熔絲與夾件的距離，觀察電場強度的變化，電場強度如表 4-26 所示，所應該需要的安全距離各製造廠家皆有不同標準。以熔絲的製造廠家為例，帶電體中心與接地夾件距離為 80mm，因此，若以 80mm 為安全絕緣的標準，在正常運轉情況下，熔絲與電位為零的帶電體(如夾件、桶壁、避雷器等)間的距離至少為 80mm。

表 4-26 改變熔絲距離電場強度與絕緣油基準比較

距離(mm)	80	70	60	50	40	30
MaxE( $10^6$ V/m)	1.243	1.282	1.286	1.400	1.613	1.696
絕緣油基準( $10^6$ V/m)	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97

熔絲帶電體與接地帶電體的距離，正視圖與上視圖分別如圖 4-60 與圖 4-61 所示。最靠近者為接地夾件，其餘接地導體如變壓器外殼、避雷器等，若距離能大於熔絲帶電體與夾件間的距離，則對熔絲周圍電場影響較小。因變壓器外殼為圓筒結構，建議熔絲兩端與桶壁間的距離相等，避免造成兩端電場強度不一。

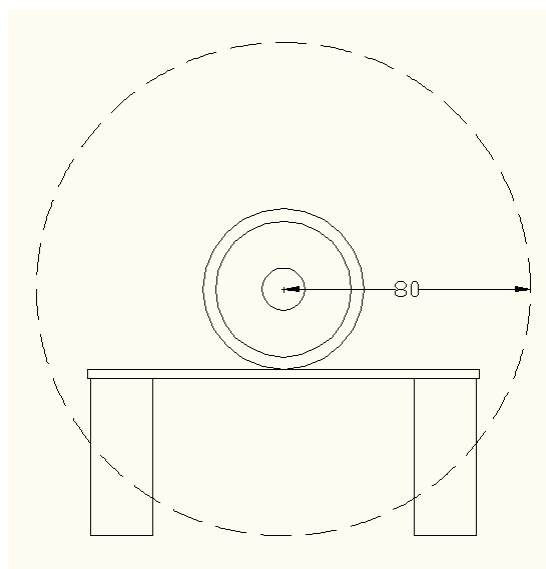


圖 4-60 熔絲絕緣距離(正視圖)

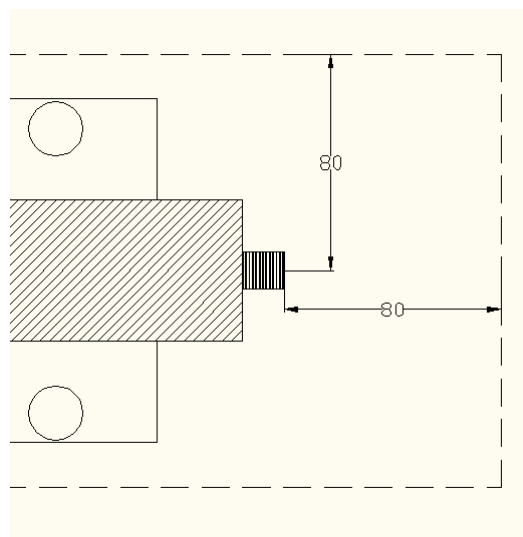


圖 4-61 熔絲絕緣距離(上視圖)

## 三、避雷器

將熔絲與避雷器水平放置時，兩帶電體間的距離改變，電場強度的變化如表 4-27 所示。若將熔絲與避雷器均改成垂直置放時，熔絲 6.9kV 與接

地避雷器零電位間的距離較水平置放來的遠，最大電場強度會降低。

表 4-27 改變避雷器和熔絲距離電場強度與絕緣油基準比較

距離(mm)	120	110	100	90	80
MaxE ( $10^5$ V/m)	1.456	1.678	2.077	2.548	2.757
絕緣油基準( $10^6$ V/m)	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97

#### 4.4 壓力釋放裝置

根據台電公司材規 C035(96-07) [1]，每具變壓器應於掛耳側高於攝氏 140 度油面線上方裝設一只自動壓力釋放閥或相等功能之壓力釋放裝置，當變壓器殼內壓力超過規定值 9~11 PSI 時，能自動釋放部分氣體，使內部保持正常之壓力。

絕緣油隨溫度的上升而膨脹，在常溫時(攝氏 25 度)須達到標準油面線以上，而壓力釋放裝置應置於最高運轉溫度(攝氏 140 度)時的油面線上方。最高運轉溫度的油面線計算方式如下[54]：

(1) 將攝氏 140 度時增加的油量算出

考慮原體積為  $V_0$  的流體，當溫度變化  $\Delta T$  時，體積變化量  $\Delta V$  與溫度變化成正比，以下式表示：

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T \quad (4-8)$$

式中， $\beta$  為體積膨脹係數(coefficient of volume expansion)，單位為  $K^{-1}$ 。

(2) 將增加的油量換算成油面上升高度

油面上升的高度  $H$  為所增加的體積  $\Delta V$  除以變壓器桶子面積  $A$ ：

$$H = \Delta V / A \quad (4-9)$$

#### 4.5 附屬配件配置原則之改善建議事項

一、避免導體形成尖端

高壓套管接線末端為圓筒導體，使得電場聚集於此，將接線末端改成球型導體，電場從原本聚集於圓筒尖端移至球型導體上，可以改善電場集中的現象。

##### 附件 4-5-1：避免電場集中於局部

(一) 套管部分，防止貫穿與沿面破壞[56]

(1) 因高壓帶電導體穿過接地的金屬外殼，如圖 A451-1(a)所示，而圖

A451-2 為實際分析時的結果。物理模型雖不太相同；但結果是一致的。等電位面分布會因導體間的形狀而有所改變，無法均勻的分布，使得等電位面集中於變壓器桶壁與套管接合處，造成局部電場變大；套管若沒有足夠絕緣強度設計時，可在此架構中在襯入薄導電箔片，如圖 A451-1(b)所示，沿等電位面放置且適當的分割。如同變壓器高低壓繞組間，絕緣紙與油的複合絕緣。可以改善電場集中，防止貫穿破壞，不過將使得成本提高與製造上的困難。

- (2) 在介質的表面，套管與絕緣油的表面存在可觀的電場強度，若表面有油漬、水份或其他汙染時，會使得絕緣性能降低，有可能造成沿面破壞。所以，為避免水份或其他雜質進入桶內，套管的氣密性須特別注意；而油面下降時會讓絕緣能力下降，也得考量。

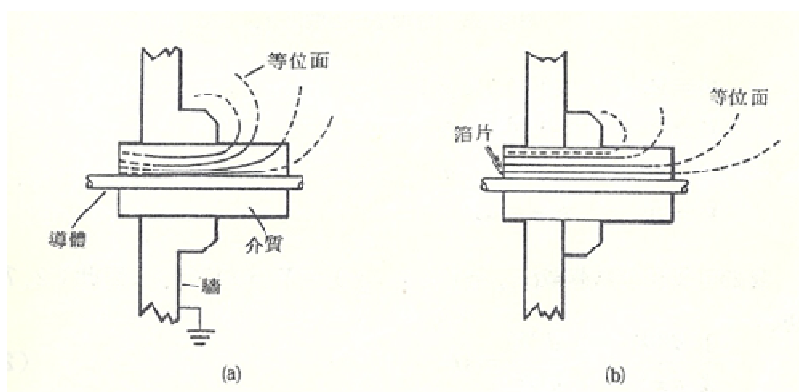


圖 A451-1 套管截面圖

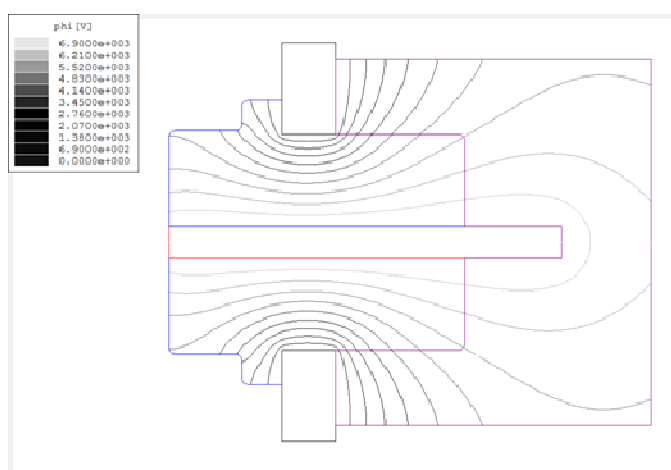


圖 A451-2 實際分析套管截面圖

## (二) 熔絲部分，避免楔形間隙

傑克熔絲型錄中，熔絲與固定架間形成尖端，如圖 A451-3 所示，稱為楔形間隙(Wedge gap) [57]，此種楔形間隙很容易造成電場的局部集中，如果支撐架使用金屬製品，聚集的情況更為明顯，如圖 A451-4 所示。愈遠離尖端處時，則電場愈小，電場最大值雖低於絕緣油容忍值  $1.2 \times 10^7$  (V/m)，短時間影響不大，但長時間放電之下可能使得絕緣油劣化，甚至使絕緣局部破壞，引發事故。因此，要避免楔形間隙，建議採用避雷器之固定方式，此時，熔絲與固定架間的尖端便消失，可改善電場集中問題。

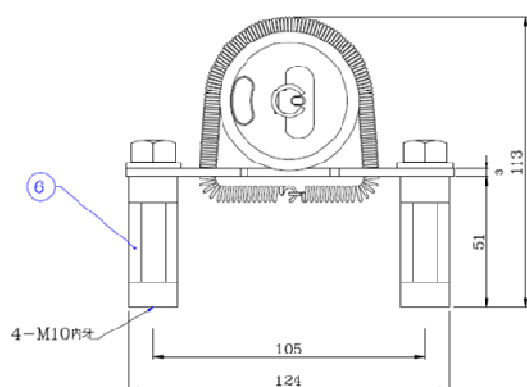


圖 A451-3 熔絲切面圖

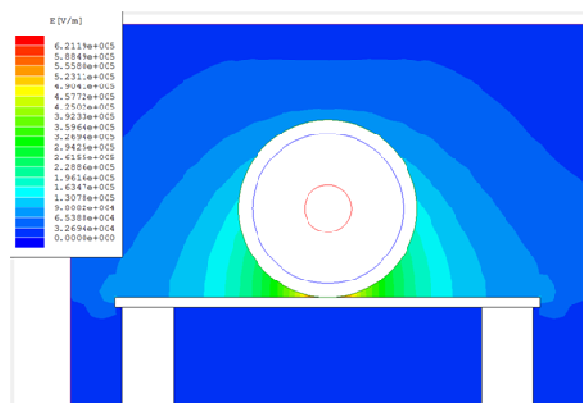


圖 A451-4 熔絲電場大小分布圖

## 二、高壓引線與桶壁距離

高壓引線與桶壁間的距離會影響電場強度，包覆絕緣的高壓引線與桶壁間的距離至少為 20mm，且須在絕緣油位線之下。

### 附件 4-5-2：保護設備的距離最佳化

- (一) 避雷器裝設位置，盡量靠近被保護之電力設備；接地引線( $14\text{mm}^2$  以上)盡可能短且直，接地電阻愈低保護效果愈佳[58]。避免急彎而造成增加避雷器放電時之阻抗，使避雷效果降低[59]。
- (二) 高電壓引線不能太靠近外殼，避免電場強度超過允許值[47]。

## 三、防止變壓器漏油

變壓器桶內的正常油面高度，應使高壓套管全部浸泡在絕緣油當中。絕緣油具有很好的絕緣性能，且絕緣性能比空氣好；缺油時桶內絕緣油的油面降低到高壓套管下緣，高壓套管未浸泡於絕緣油中，高套管接線端子暴露於空氣，使得絕緣的能力下降。

### (1) 加裝絕緣罩

在高壓套管加裝開口朝上的絕緣罩，正常變壓器充滿油時，高壓套管於絕緣油之中，當油位下降時，高壓套管內部仍充滿絕緣油，提供高壓帶電體良好的絕緣，防止因缺油造成沿面絕緣距離的不足。

## (2) 裝設缺油感測裝置

當變壓器絕緣油下降時，能藉缺油感測裝置啟斷變壓器，避免缺油使高壓套管裸露於空氣，造成沿面絕緣距離不足。

## 四、二次套管須通過材規 C035 (96-07)中規定的各項試驗

高壓套管與二次套管間，是絕緣油與空氣所構成的複合介質，若兩極間的距離改變，電場強度將產生變化；模擬結果顯示，雖然兩電極間距離相同，但相對位置的改變將使電場強度產生變化。而運轉中的油位高度因溫度改變而改變，也會影響電場強度的分布。因此難以訂出高壓套管與二次套管間的最短距離。

將高壓套管與二次套管置於空氣中時，則距離與二次套管電場強度變化的值如 4.3.3 節所示，距離為 80mm 有 27 倍以上的安全裕度。若出廠時能通過台電材規 C035 (96-07)規定的各項試驗，即可確保設備的品質。

## 五、熔絲與電位為零帶電體的距離

熔絲置放於變壓器夾件的上方，彼此之間有支撐架固定熔絲，且具備足夠的安全絕緣距離。而所需要的安全距離應該為多少，各製造廠家皆有不同標準。以熔絲的製造廠家為例，帶電體中心與接地夾件距離為 80mm，因此，若以 80mm 為安全絕緣的標準，在正常運轉情況下，有 13 倍以上的安全裕度。熔絲與電位為零的帶電體(如夾件、桶壁、避雷器等)間的距離至少為 80mm。且建議熔絲兩端與桶壁間的距離相等，避免造成兩端電場強度不一。

## 六、壓力釋放裝置[55]

- (1) 絕緣油因各種原因下分解而產生氣體，或者因為溫度上升使油面上升，造成桶內的壓力上升，若壓力洩壓速度太慢，使得桶內壓力超過所能承受的壓力時，將造成外殼變形。故壓力釋放裝置須符合規範，保證密閉性，壓力釋放裝置應加以緊固，以防止使用時鬆落。

- (2) 變壓器桶子外需有防水裝置，避免水分由壓力釋放裝置進入變壓器內(天氣或其他因素)，而使絕緣油劣化。
- (3) 須防止變壓器內之絕緣油洩漏到空氣中，變壓器運轉溫度上升時，絕緣油因熱漲冷縮原理使油面上升，計算出最高運轉溫度的油位線後，將壓力釋放裝置置於最高運轉溫度時之油位線上方。避免壓力釋放時，將絕緣油噴到桶外。

## 七、短路電磁力的影響

變壓器在短路狀況時，施加在線圈的電磁力上升，可能造成線圈嚴重彎曲或毀壞，或甚至造成變壓器外殼的破壞[60]。為避免此現象發生，建議可於線圈上方加裝固定裝置，以防線圈受力變形時，影響鐵心上方的保護設備。

## 4.6 內置遮斷開關之啟閉特性與試驗及絕緣油溫昇之影響

本節依斷路器標準文獻，檢討密封型桿上變壓器內置遮斷開關試驗報告之啟閉特性及絕緣油溫昇對啟閉性能之影響。主要依據台電材料規範C035(2010-07) [61]及斷路器相關標準，檢討試驗報告中有關啟閉特性相關參數及絕緣油溫昇對啟閉性能之影響。有關斷路器相關標準除台電材料規範所列標準(ANSI/IEEE Std. C37.41-1981 (已由 IEEE Std. C37.41-2008 [62]取代)外，本文亦參考其他國際(IEEE 及 IEC)相關標準所列相關參數加以檢討比較，並提出相關建議以供參考。

### 4.6.1 遮斷開關動作原理

密封型桿上變壓器內置遮斷開關可作為過載及變壓器二次側故障保護之用，其構造可能廠牌不同而有些差異，但主要的結構功能相同。圖 4-62 所示為一典型遮斷開關之外觀[51]，其主要構件尺寸如圖 4-63 所示[63]，該遮斷開關內部有負載磁性感測元件，利用負載電流流過感測元件時產生之溫度，改變其導磁能力，當溫度超過所設定之最高運轉溫度時，感測元件驅動遮斷開關跳脫以完成啟斷；故障時若故障電流小於其最大啟斷電流值時，感測元件仍會驅動遮斷開關跳脫以完成啟斷，且啟斷時間隨電流值而變小，故具有反時型之時間-電流特性曲線(TCC)，圖 4-64 及圖 4-65 分別為

最小動作之 TCC 及完全清除之 TCC 之範例。



圖 4-62 典型遮斷開關外觀[51]

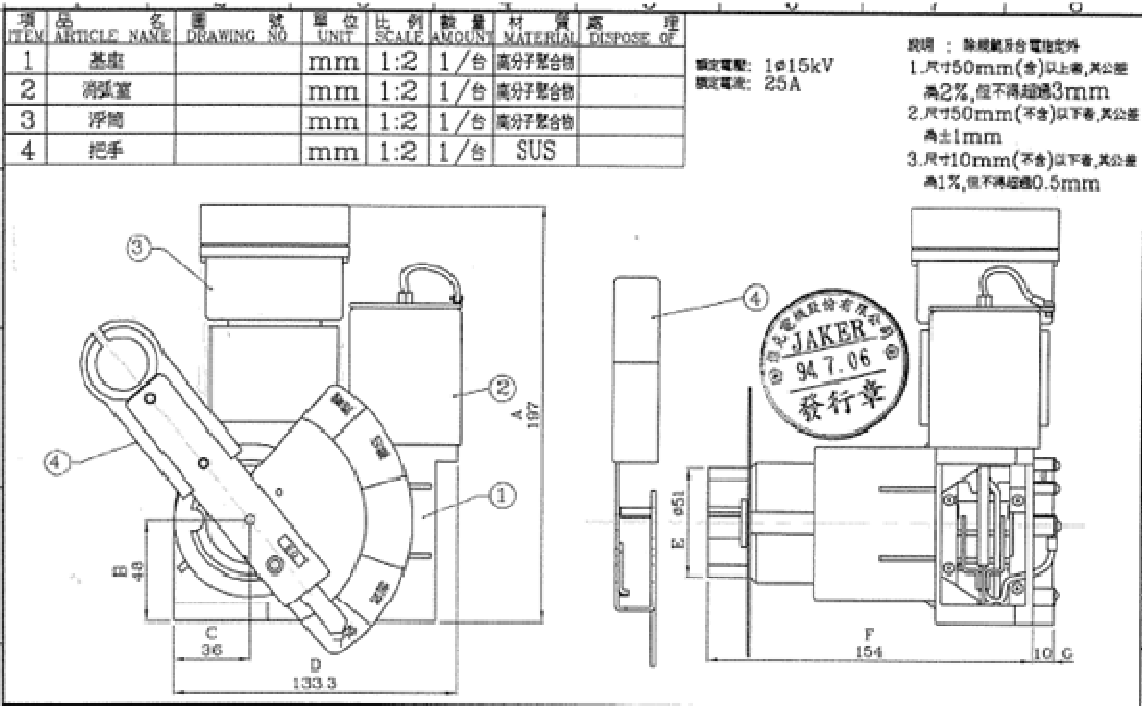


圖 4-63 典型遮斷開關構件平面圖範例[63]

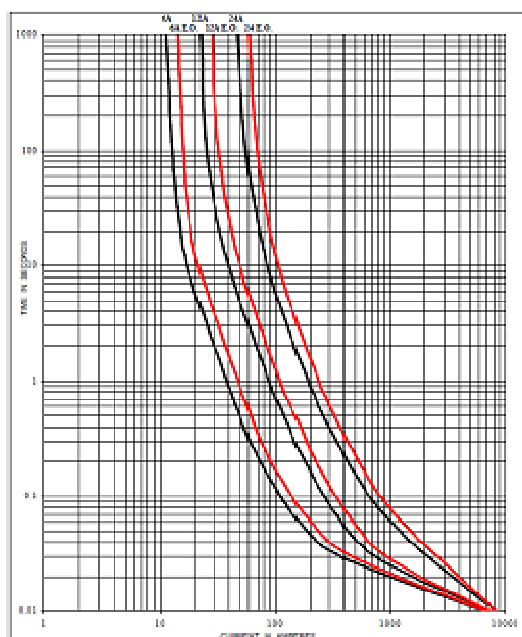


圖 4-64 最小動作 TCC 範例圖[51]

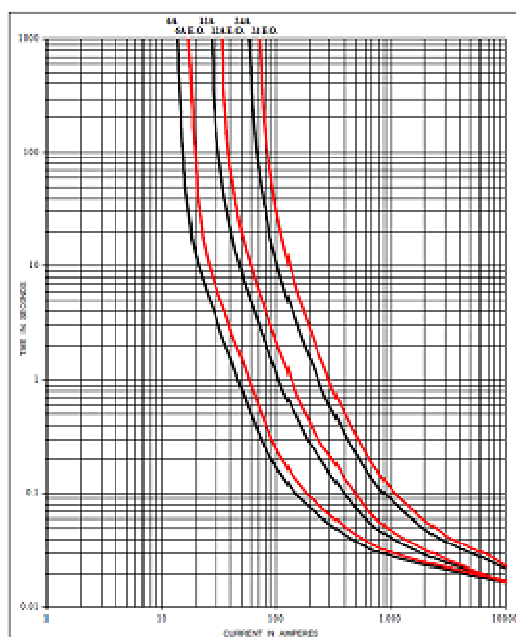


圖 4-65 完全清除 TCC 範例圖[51]

惟需注意若故障電流大於其最大啟斷電流值時，感測元件將不會驅動遮斷開關跳脫，此時故障電流必須由其上游熔絲啟斷，故遮斷開關通常作為變壓器二次側故障保護之用。

遮斷開關在電流啟斷的過程中其接觸子互相分離的時候產生電弧，電弧使消弧筒內接觸子附近的絕緣油蒸發氣化和發生熱分解，形成大量且滅弧能力很強的氣體和壓力較高的氣泡，且接觸子分離瞬間產生之真空吸引新油注入，有助於電弧很快熄滅。遮斷開關跳脫後，須使感測元件的溫度降至油溫時始可再投入，變壓器在自然冷卻情況下，依台電材料規範之規定，需在 30 分鐘內即可再投入額定負載。

#### 4.6.2 啟閉特性之重要參數

在探討遮斷開關試驗報告之啟閉特性前，先介紹影響啟閉特性的因素—回復電壓(Recovery Voltage, RV)，此電壓即為斷路器開啟電流遮斷時出現於接觸子極間之電壓(跨壓)，此電壓在電弧熄滅後在一極短暫時間內，呈現劇烈變化稱為暫態回復電壓(Transient Recovery Voltage, TRV)，俟後進入穩態僅呈現系統電壓稱為商頻回復電壓(Power-Frequency Recovery Voltage)，此電壓可視為在電弧熄滅後之穩態電壓。如圖 4-66 及圖 4-67 分別為驅弧型熔絲及斷路器啟斷之回復電壓波形之範例[64]。

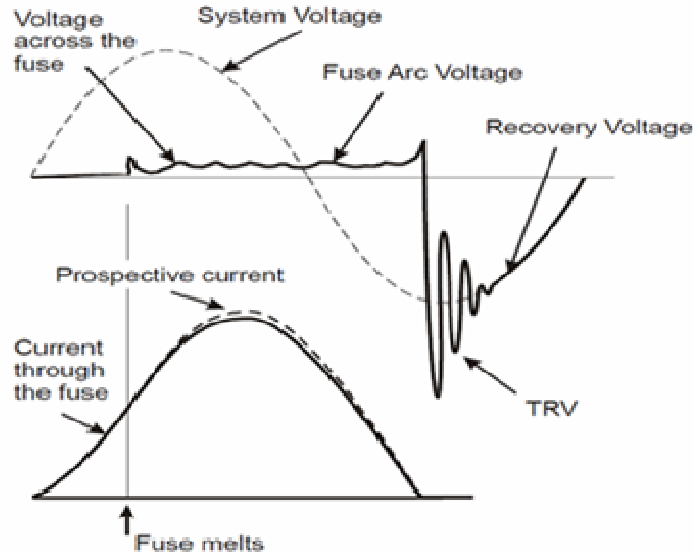


圖 4-66 驅弧型熔絲啟斷之回復電壓波形範例

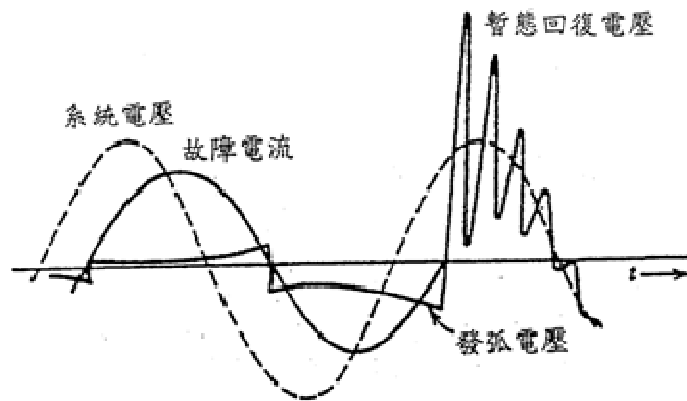


圖 4-67 斷路器啟斷之暫態電壓波形範例

TRV 之波形(含振幅、頻率、峰值及衰減常數等)，視受斷路器或遮斷開關之負載端與電源端之電路常數，及啟斷時之電壓電流而定，其類型可分為振盪型、三角函數型、指數函數型，或以上型式的組合[65]。對於三相斷路器來說，在最大額定電壓下，最嚴重的指數型或振盪型 TRV 會出現在三相對稱端點故障時，跨在斷路器最先斷弧的接觸子極間，且電壓持續時間很短，大約是幾十微秒。如果斷路器極間的暫態回復電壓高於斷路器內部的介質的絕緣強度，這將使電弧因介質被破壞而復燃，這一現象稱為再襲，表示斷路器啟斷失敗；而影響再襲的因素為回復電壓上昇率(Rate of Rise of Recovery Voltage, RRRV)，此值愈大愈可能造成再襲現象。故斷路器可承受之暫態回復電壓(不發生再襲現象之暫態回復電壓)，是斷路器規格中決定

啟閉特性之關鍵參數，在作各種啟斷試驗時必須載明其所依據之暫態回復電壓參數，可能的參數包括：峰值、頻率、上昇率等。

#### 4.6.3 台電對遮斷開關啟閉特性及相關試驗規定

根據台電材料規範 C035(2010-07)規定，密封型桿上變壓器內部之接線如圖 4-68 所示；其中遮斷開關應作為過電流、二次側故障及小故障電流之保護，且遮斷開關遮斷電流在 8.3kV 時，為 2180A (Sym)；遮斷開關為驅弧型，應符合 ANSI/IEEE Std. C37.41-1981 Table 3 之標準，且需有正常(normal)及過載(emergency overload, Eo)運轉兩段功能。前述有關 ANSI/IEEE Std. C37.41-1981 Table 3 (IEEE Std. C37.41-2008 Table 7 [62])之標準係指啟斷試驗時所依據之參數及條件，經整理後列出如表 4-28 所示，通常廠家為彰顯其品質的優越性會宣告其試驗電壓超過標準，如文獻[63]廠家之試驗報告宣告試驗電壓可至 9.13kV，且遮斷電流為 2200A。表 4-28 中所列試驗責務(Duty)不含責務 3、4，因其不適用於所探討之遮斷開關。

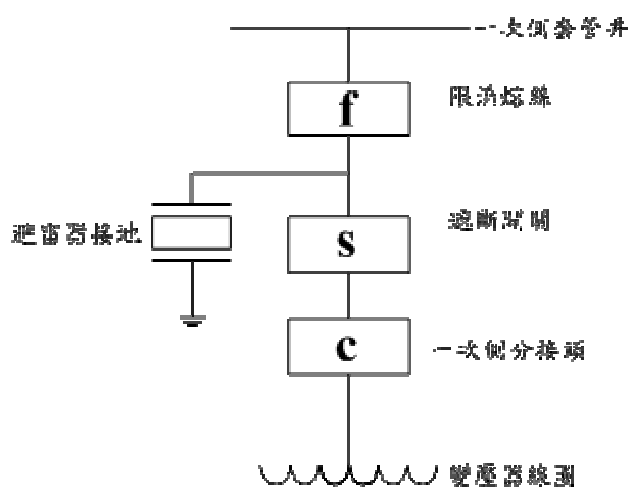


圖 4-68 變壓器內部接線圖 (C035(2010-07)之圖 1)

表 4-28 依據 ANSI C37.41-2008 Table 7 所訂之遮斷開關啟斷試驗參數

試驗責務(series)*		1	2	5
恢復電壓(kV)		最大額定電壓之 1~1.05 倍(8.3~8.715)		
暫態恢復電壓	頻率 (kHz)	3.3~3.63		調整電路達臨 界阻尼條件
	峰值 因數	1.3~1.43		
預期試驗電流 (rms)	Sym	額定遮斷電流 之 1~1.05 倍 (2180~2289A)	額定遮斷電流 之 0.7~0.8 倍 (1526~1744A)	額定電流之 2.7~3.3 倍
最小 X/R 比率 (功率因數 PF)		>8 (PF<0.12)		1.3~0.75 (PF=0.6~0.8)
投入角度(°) (相對於電壓零度)		第一次試驗：-5°~+15° 第二次試驗：+85°~+105° 第三次試驗：+130°~+150°		任意值
試驗次數		3	3	2
啟斷後恢復電壓持續 量測時間		≥0.5sec		

\*註：括弧中之電壓及電流為台電規定數據，而 ANSI C37.41 規定之試驗責務為：

試驗責務 1：驗證預期電流等於熔絲之額定遮斷電流。

試驗責務 2：驗證熔絲於 70%至 80%額定遮斷電流之啟斷能力。

試驗責務 5：驗證熔絲於小過載電流(額定電流之 2.7~3.3 倍)之啟斷能力。

遮斷開關啟閉特性相關試驗有「過載保護特性試驗」及「大電流保護特性試驗」，分別規定於規範 C035(2010-07)之 5.19 節及 5.20 節中，其規定內容如下：

1. C035(2010-07) 5.19 節之過載保護特試驗規定：

- (1) 變壓器施加 75%額定負載至穩定。
- (2) 再依下列規定擇一作過載試驗後，並經第 5.7.1 節耐電壓試驗及感應電壓試驗合格：

- A. 在週溫未達 30℃條件中，變壓器應可承受 1.56 倍額定負載，過載 4 小時，最高油面溫度不得超過 99℃，且保護設備不得跳脫。變壓器繼續施加 1.56 倍額定負載直到保護設備跳脫或 4 小時(合計連續 8 小時)後，最高油面溫度不得超過 120℃。

B. 在週溫 30°C 以上條件中，變壓器應可承受 1.44 倍額定負載，過載 4 小時，最高油面溫度不得超過 102°C，且保護設備不得跳脫。變壓器再繼續施加 1.44 倍額定負載直到保護設備跳脫或 4 小時(合計連續 8 小時)後，最高油面溫度不得超過 120°C。

(3) 如遮斷開關未跳脫，則繼續施加 2 倍額定負載直到遮斷開關跳脫為止，跳脫時變壓器最高油面溫度亦不得超過 120°C；遮斷開關跳脫後，變壓器在室溫自然冷卻情況下，需在 30 分鐘內即可再投入額定負載。

## 2. C035(2010-07) 5.20 節之大電流保護特性試驗規定：

- (1) 變壓器之遮斷開關置於正常位置，且在熔絲旁路條件下，施加額定電壓及 25 倍額定電流，遮斷開關跳脫時間須於其認可圖面 T-C 特性曲線之最大清除時間曲線下方範圍內。
- (2) 變壓器經 5.20.1 節試驗後，並經第 5.7.1 節耐電壓試驗及感應電壓試驗合格。
- (3) 定型試驗時，遮斷開關單獨置於油中，開關放置於過載(EO)位置，依本公司認可之 T-C 特性曲線選擇其中一點做試驗，遮斷開關須正常跳脫。

依台電材料規範 C035(2010-07)規定，遮斷開關的額定電壓是 8.3kV(單相電壓)，線電壓等級為 15kV，故本文將以線電壓 15kV 級斷路器及熔絲(熔線)之標準文獻來探討遮斷開關特性試驗報告之啟閉特性。

### 4.6.4 斷路器與熔絲之標準文獻探討

國際標準的兩大體系(IEEE 與 IEC)中均有在斷路器與熔絲相關標準，其中 IEEE Std. C37.04-1999 [66]為斷路器構造與材料相關標準，IEEE Std. C37.04b-2008 [67]定義斷路器 TRV 之表示方式，另 IEEE Std. C37.06-2009 [68]與 IEC 62271-100 [69]為斷路器試驗標準，IEEE Std C37.011-2011 [65]建議斷路器 TRV 相關參數之計算公式；至於驅弧型熔絲試驗標準在 IEEE Std. C37.41-2008 [62]及 IEC 60282-2 [70]均有規範。以上這些標準對斷路器及熔絲之啟閉特性，均以其 TRV 為主軸，對 TRV 相關參數有其規定或建議，整理說明如下：

## 一、斷路器之標準文獻探討

根據 IEEE Std. C37.04b-2008 之定義，額定電壓小於 100kV，其 TRV 是採用兩參數表示法；額定電壓高於 100kV 則採用四參數法。本文探討之遮斷開關，其額定電壓為 8.3kV，故將使用兩參數表示法；兩參數是指 TRV 波形之峰值( $U_c$ )及上昇至峰值之時間( $t_3$ )，此兩參數之定義表示如圖 4-69 所示。IEEE 及 IEC 相關標準均用此兩參數計算回復電壓上升率(RRRV)，其公式為(4-10)式。

$$RRRV = \frac{U_c}{t_3} \quad (\text{kV}/\mu\text{s}) \quad (4-10)$$

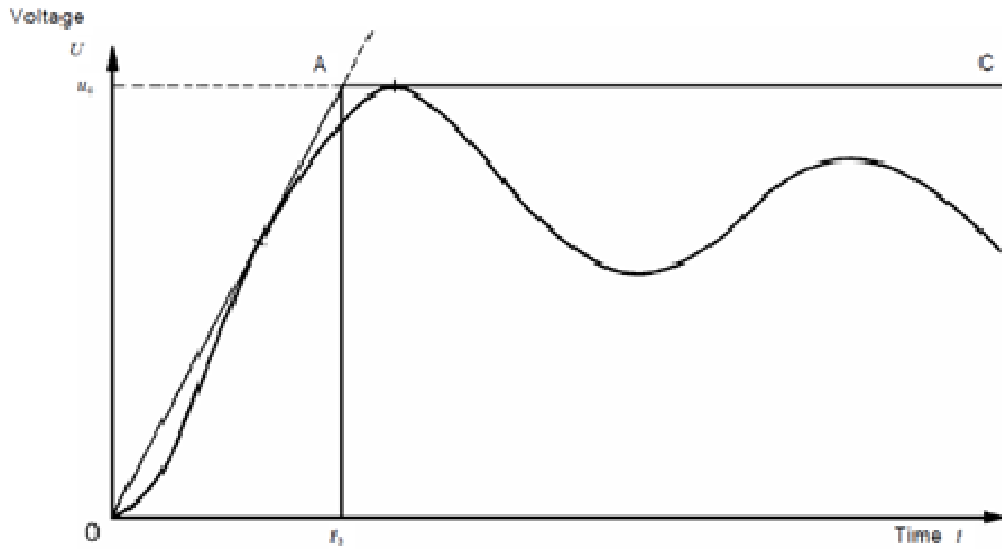


圖 4-69 TRV 之兩參數表示法示意圖

IEEE Std. C37.04-1999 [66]及 IEEE Std C37.011-2011 [65]均建議三相斷路器之 TRV 峰值依式(4-11)計算如下：

$$U_c = k_{pp} \times k_{af} \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times U_r \quad (\text{kV}) \quad (4-11)$$

式中：

$k_{pp}$ ：第一極清除因數(First-Pole-to-Clear Factor, FPCF)。

$k_{af}$ ：振幅因數(Amplitude factor)。

$k_{pp}$  是考慮斷路開啟時三相電流通常無法同時經過零點而將電弧清除，且第一極啟斷故障電流時對系統影響較大，在啟斷其他相電流前第一啟斷相極間恢復電壓與額定相電壓之比值即為  $k_{pp}$ 。

$k_{af}$  為 TRV 峰值與恢復電壓振幅之比值。

15kV 級斷路器在 IEEE Std. C37.06-2009 [68]與 IEC 62271-100 [69]標準中，不同試驗類型所選用的  $k_{pp}$  及  $k_{af}$  數據及計算所得之  $U_c$  值分別如表 4-29 及表 4-30 所示，表中亦列出所對應之參數  $t_3$  及 RRRV (註：僅列出額定電壓  $U_r$  為 15kV 等級斷路器之參數供參考)。由表 4-29 及表 4-30 得知，在終端故障下，架空線系統中之  $U_c$  較大且上昇時間較短，故 RRRV 值大於電纜系統；在架空線系統發生短線故障與終端故障時，其終端故障所產生之  $U_c$  較大。比較兩表可發現 IEEE Std. C37.06-2009 與 IEC 62271-100 規定之參數值幾乎相同，故採用任何一標準差異不大。

表 4-29 IEEE Std. C37.06 之 TRV 規定

100kV 以下電纜系統(S1 級)斷路器預期 TRV(兩參數表示法)						
$U_r$	試驗類型	$k_{pp}$	$k_{af}$	$U_c$	$t_3$	RRRV
15	T100	1.5	1.4	25.7	66	0.39
15	T60	1.5	1.5	27.5	29	0.95
15	T30	1.5	1.6	29.4	15	1.96
15	T10	1.5	1.7	31.2	15	2.08
100kV 以下架空線系統(S2 級)斷路器預期 TRV(兩參數表示法)						
$U_r$	試驗類型	$k_{pp}$	$k_{af}$	$U_c$	$t_3$	RRRV
15.5	終端故障	1.5	1.54	29.2	32	0.92
15.5	短線故障	1.0	1.54	19.5	32	0.62

註：表中 T100 為終端故障，T60 為 T100 故障電流之 60%，T30 為 T100 故障電流之 30%，T10 為 T100 故障電流之 10%。

表 4-30 IEC62271-100 之 TRV 規定

1kV 以上 100kV 以下電纜系統(S1 級)斷路器預期 TRV(兩參數表示法)						
$U_r$	試驗類型	$k_{pp}$	$k_{af}$	$U_c$	$t_3$	RRRV
15	T100	1.5	1.4	25.7	66	0.39
15	T60	1.5	1.5	27.6	29	0.95
15	T30	1.5	1.6	29.4	15	1.96
15	T10	1.5	1.7	31.2	15	2.08
15kV(含)以上 100kV 以下架空線系統(S2 級)斷路器預期 TRV(兩參數表示法)						
$U_r$	試驗類型	$k_{pp}$	$k_{af}$	$U_c$	$t_3$	RRRV
15	終端故障	1.5	1.54	28.3	31	0.91
15.5	短線故障	1.0	1.54	18.9	31	0.61

## 二、熔絲之標準文獻探討

台電材料規範 C035(2010-07)採用 ANSI/IEEE C37.41 Table 3，作為遮斷開關試驗之依據，ANSI/IEEE C37.41 Table 3 實為驅弧型熔絲之標準，故本文探討驅弧型熔絲之標準。ANSI/IEEE C37.41 Table 3 對 TRV 之要求是規定峰值因數(Peak Factor)與振盪頻率(f)，若欲求出 TRV 峰值及上昇時間應依下列公式計算：

$$peak\ factor = \frac{First\ TRV\ peak}{\sqrt{2} \times (power\ frequency\ recovery\ voltage) \times \sin(\tan^{-1}(X/R))} \quad (4-12)$$

$$t_3 = \frac{1000}{2f} \quad (4-13)$$

式中：

*First TRV peak*：TRV 峰值( $U_c$ )。

*Power frequency recovery voltage*：商頻回復電壓( $U_r$ )。

$t_3$ ：上昇時間( $\mu s$ )。

$f$ ：頻率 (kHz)。

$X/R$ ：試驗電路之電抗電阻比， $X/R > 8$

由表 4-28 之試驗參數代入式(4-12)與式(4-13)可得到暫態恢復電壓與上昇時間，如表 4-31 所示。

表 4-31 由表 4-28 參數所計算之 TRV 參數

$U_r$ (kV)	$U_c$ (kV)	$t_3$ ( $\mu s$ )	RRRV
8.3~9.13 (相電壓)	15.14~16.66	151.51~137.74	0.0999~0.121
14.37~15.81 (線電壓)			

IEEE Std C37.41-2008 標準之 Table 17 規定油浸式驅弧型熔絲啟斷試驗參數，整理如表 4-32 所示；與表 4-28 比較可發現除試驗責務少了試驗責務 5 一項，以及啟斷後恢復電壓持續量測時間從原本 0.5 秒增加為 1 分鐘，其餘規定幾乎相同；啟斷後恢復電壓持續量測時間大幅增加之原因，研判是實務上油浸式熔絲熔斷後並不會立刻掉出(droop-out)，使電壓持續加在熔斷點之時間較長，且在啟斷後系統電壓變化有可能使再襲現象發生，故試驗時必須將觀察時間延長。

表 4-32 IEEE Std. C37.41-2008 之油浸式驅弧型熔絲啟斷試驗參數

試驗責務(series)*		1	2
恢復電壓(kV)		最大額定電壓之 1~1.05 倍(8.3~8.715)	
暫態恢復電壓	頻率(kHz)	3.3~3.63	調整電路達臨界阻尼條件
	峰值因數	1.3~1.43	
預期試驗電流(rms)	Sym	額定遮斷電流之 1~1.05 倍 (2180~2289A)	額定電流之 2.7~3.3 倍
最小 X/R 比率 (功率因數 PF)		>8 (PF<0.12)	1.3~0.75 (PF=0.6~0.8)
投入角度(°) (相對於電壓零度)		第一次試驗：-5°~+15° 第二次試驗：+85°~+105° 第三次試驗：+130°~+150°	任意值
試驗次數		3	2
啟斷後恢復電壓持續量測時間		≥ 1 分鐘	

\*註：括弧中之電壓及電流為台電規定之遮斷開關數據，而 ANSI C37.41 規定之試驗責務為：

試驗責務 1：驗證預期電流等於熔絲之額定遮斷電流。

試驗責務 2：驗證熔絲於小過載電流(額定電流之 2.7~3.3 倍)之啟斷能力。

在 IEC 60282-2 (2008) Table 6 標準中，也規範了對於驅弧型熔絲的試驗，整理後列出如表 4-33 所示。在表中將熔絲分為 Class A 與 Class B 兩類，其敘述如下：

比較 IEEE 及 IEC 標準(表 4-28、4-32 及表 4-33)可發現兩標準大部分相同，差異部份是在於試驗責務較多且於 TRV 試驗參數中，其預期 TRV 以及恢復電壓上升率略有差異，且 IEC 標準有再將熔絲分為 Class A 與 Class B 兩類；此外，IEC 規定對於熔絲熔斷後非掉出(Nondroop-out)者，啟斷後恢復電壓持續量測時間應持續達 10 分鐘，而非 IEEE 所規定的 0.5 秒(油浸式 1 分鐘)，此表示 IEC 規定考慮實務上熔絲啟斷電流後，在很長時間內仍有可能發生再襲現象。

表 4-33 依據 IEC 60282-2 Table 6 所訂之遮斷開關啟斷試驗參數

試驗責務(series)*		1	2	3	4	5
恢復電壓(kV)		最大額定電壓之 1~1.05 倍(8.3~8.715)				
暫態恢復電壓	上升時間 ( $t_3$ )	Class A：128 $\mu$ s				調整電路達臨界阻尼條件
		Class B：95 $\mu$ s				
	TRV 峰值	Class A：14.3kV				
		Class B：16.4kV				
預期試驗電流 (rms)	Sym(A)	額定遮斷電流之 1~1.05 倍 (2180~2289)	額定遮斷電流之 0.6~0.8 倍 (1308~1744)	額定遮斷電流之 0.2~0.3 倍 (436~654)	400~500	額定電流之 2.7~3.3 倍
功率因數	Class A	小於 0.15			0.5~0.6	0.6~0.8
	Class B	小於 0.1			0.4~0.5	
投入角度(°) (相對於電壓零度)		第一次試驗：-5°~+15° 第二次試驗：+85°~+105° 第三次試驗：+130°~+150°			+85°~+105°	任意值
試驗次數		3	3	1	2	2
啟斷後恢復電壓持續量測時間	A and B (drop-out)	>0.5 秒				
	A and B (nondrop-out)	10 分鐘			1 分鐘	

註：括弧中之電壓及電流為台電規定遮斷開關數據。

Class A：此熔絲一般用於功因修正和電壓調節之小型變壓器與小電容器組之保護，設置地點為電力配電系統上，離主變電站距離較遠，其 TRV 較小，達到 TRV 時間較長。

Class B：此熔絲一般用來保護的設備與 Class A 相似，不過此型熔絲設置地點離主變電站或饋線迴路之距離較近，其 TRV 較大，達到 TRV 時間較短。

### 三、遮斷開關依據標準之檢討

綜上可知，斷路器在 IEEE 與 IEC 兩標準中，其差異不大(參見表 4-29 及表 4-30 之數據)。在驅弧型熔絲方面，因 IEC 60282-2 Table 6 相較於 ANSI C37.41 Table 3 須多作責務 3 及責務 4 之試驗，試驗較費時且須注意熔絲之類型。但其預期 TRV 峰值與恢復電壓上升率則與兩標準相差不大。斷路器與驅弧型熔絲之標準相較之下，可發現斷路器之預期 TRV 峰值超過為驅弧

型熔絲之預期 TRV 峰值約 1.54 倍，恢復電壓上昇率約為 3.22 倍，故斷路器之標準較驅弧型熔絲之標準嚴格許多。

#### 4.6.5 絕緣油溫昇之影響檢討

##### 一、規範及標準文獻相關規定

密封型桿上變壓器的絕緣油，除作為各元件間及格元件與外殼間的絕緣介質外，亦作為遮斷開關啟斷電流時之消弧介質。此外，此外亦藉助絕緣的流動達到散熱效果。理論上絕緣油的溫度愈高其絕緣耐力、消弧能力及散熱能力相對愈差，因此，對絕緣油溫度有必要加以規範，例如 4.6.3 節提到台電材料規範 C035 對過載保護特性試驗時最高油面溫度之規定。

在斷路器標準 IEEE Std. C37.04-1999 Table 1 [66]中規定，油斷路器基於環境溫度 40°C 下，溫昇不得超過 50°C 且總溫度不得超過 90°C。又依照 IEEE Std. C37.010-1999 Table 3 [71]，斷路器於正常運轉時，分別於各種不同環境溫度下，可運轉之負載電流；於同標準之 Table 5b、Table 5c 中規定了當緊急運轉期間於 4 小時與 8 小時，在各種環境溫度下之允許負載電流均有規定；將 IEEE Std. C37.04-1999 Table 1 及 IEEE Std. C37.010-1999 Table 3、Table 5b、Table 5c 中，有關斷路器各組件及絕緣油於緊急運轉期間在各種環境溫度下之允許負載電流及溫度限制如表 4-34 所示。由這些表中數據顯示斷路器不同組件允許最高溫度限制不盡相同，且相對於不同環境溫度有不同的緊急載電流因數(Emergency Load Carry Current Factor, ELCCF)，ELCCF 為額定負載之倍率。

此外，絕緣油溫度過高會加速其劣化，根據 IEEE Std. 57.104-2008 [72]的說明，變壓器的絕緣油是由許多不同的碳氫化合物分子組成，這些碳氫化合物在熱或電氣故障時會分解，其過程十分複雜；其基本分解步驟為碳-氫和碳-碳分子鍵的斷裂，而形成活性氫原子與碳氫化合物的碎片，這些自由基會互相結合，形成氣體，如氫氣、甲烷、乙烷等。進一步的分解或重組過程會在油中產生乙烯或乙炔，在極端的情況下，會產生氰化碳的微粒，這些過程取決於在故障點附近的能量與溫度的分布和對碳氫化合物分子的影響。所有的變壓器在正常工作溫度下也會產生氣體，但異常的氣體會因為局部或一般性過熱、介質問題而產生。在變壓器中，絕緣油會因為劣化產生油泥(Sludge)，此成分會使絕緣油吸收水分，阻塞線圈溝之油流而減低

散熱作用，進一步降低絕緣強度而影響其消弧能力，對電流啟斷能力有不利的影響。

表 4-34 IEEE Std. C37.010-1999 油斷路器組件溫度限制及載流因數

緊急運轉時間			4 小時			8 小時		
組件編號*			1	2	3	1	2	3
最高溫度限制			80	90	105	80	90	105
溫昇			40	50	65	40	50	65
環境溫度 ℃	60	載流因數	0.93	0.95	0.92	0.85	0.87	0.9
	50		1.04	1.04	1.06	1	0.99	1
	40		1.15	1.12	1.19	1.13	1.1	1.08
	30		1.24	1.19	1.3	1.25	1.19	1.16
	25		1.29	1.23	1.36	1.3	1.24	1.19
	20		1.33	1.27	1.41	1.36	1.29	1.23
	10		1.41	1.33	1.51	1.46	1.37	1.3
	0		1.5	1.4	1.61	1.56	1.46	1.37
	-10		1.57	1.47	1.7	1.65	1.54	1.43
	-20		1.65	1.52	1.79	1.75	1.61	1.51
	-30		1.72	1.59	1.88	1.84	1.68	1.56

\*註：組件 1：油斷路器之金屬及絕緣組件及裸銅或銅合金接觸子。

組件 2：油斷路器之接觸子其材料為銀、鍍鎳、鍍錫。

組件 3：連接至外部導體之端子其連接螺栓材料為銀、鍍鎳、鍍錫。

## 二、絕緣油溫昇規定之檢討

雖然台電材料規範 C035 之規定有針對過載保護時之週溫、負載倍率及時間之限制條件，但涉及遮斷開關跳脫時的油面最高溫度限制值僅規定為 120℃，對於遮斷開關各組件溫度限制並未規定，且遮斷開關可正常啟斷大電流的油溫限制亦未規定。依照台電之規範於週溫 30℃ 以上時可過載 1.44 倍 8 小時，週溫未達 30℃ 時可過載 1.56 倍 8 小時，此狀況遮斷開關必須跳脫，並保持油面最高溫度在 120℃ 以下，此或許能勉強說明油溫 120℃ 以下遮斷開關能啟斷 1.56 倍之過載電流，但不代表只要油溫不超過 120℃ 遮斷開關即可正常啟斷大電流(故障電流)。

若將遮斷開關視為油斷路器，則依前述斷路器 IEEE 標準規定，油斷路器各組件及油溫之限制，將使其達台電規範過載能力(1.44 倍及 1.56 倍)時之允許週溫大約僅在 10℃~0℃ 遠低於 30℃ (參見表 4-34)；此外，油斷路器接觸子浸於油中允許溫度不超過 90℃，此遠低於台電規範值油面溫度 120

°C(油中溫度可能更高)，故顯然斷路器之 IEEE 標準規定較為嚴格。依此判斷若依斷路器的標準來規範遮斷開關，其絕緣油溫度應限制在 90°C 以下(油面溫度須更低)，而參考表 4-34 數據其 30°C 週溫之過載能力亦應配合大幅下修至 1.16 倍。

#### **4.6.6 遮斷開關啟閉特性與試驗及絕緣油溫昇對其影響建議**

遮斷開關之啟閉特性試驗主要須在在各種試驗責務下，於預定的時間內完成啟斷電流，且在預期發生的 TRV 及 RRRV 下不會發生再襲現象。本文已將 IEEE 及 IEC 中斷路器及熔絲相關標準之試驗規定進行分析及比較，藉此檢討台電材料規範 C035 (2010-07)對遮斷開關之規定。基本上台電材料規範是比照 ANSI/IEEE C37.41 Table 3 (1981 年版)規定，該規定是針對驅弧型熔絲之規定而非斷路器之規定。IEEE 與 IEC 兩大國際標準對驅弧型熔絲試驗之 TRV 及 RRRV 規定類似，但 IEC 再考慮其熔絲設置地點及保護對象，將熔絲分為 A、B 兩類，且考慮較長之試驗之恢復電壓持續量測時間(最長為 10 分鐘)，可知 IEC 在這方面考量較為周全。至於斷路器方面 IEEE 及 IEC 的 TRV 及 RRRV 規定也頗為一致，IEEE 及 IEC 標準對斷路器 TRV 及 RRRV 之規定，均遠高於驅弧型熔絲。因此，若遮斷開關試驗標準改適用斷路器之標準，其預期的 TRV 及 RRRV 須再大幅提高。

絕緣油溫度對遮斷開關啟閉特性之影響，經參考斷路器相關標準檢討，顯示油溫愈高斷路器各組件得耐電流能力愈低，因此，對絕緣油的溫昇及最高溫度均有限制。目前台電規範遮斷開關過載保護跳脫時的油面最高溫度限制值僅規定為 120°C，對於遮斷開關各組件溫度限制並未規定，且遮斷開關可正常啟斷大電流的油溫限制亦未規定。

若將遮斷開關視為油斷路器，則依斷路器標準規定，其允許週溫(或過載能力)，以及絕緣油溫度均應配合大幅下修。

### **4.7 全域型熔絲之啟斷特性及保護區域與協調及改善建議**

#### **4.7.1 限流熔絲之各項額定值及測試標準**

密封型桿上變壓器之全域型限流熔絲係配合油浸式配電變壓器安裝在絕緣油中使用；依據 IEEE Std C37.41-2008 [62]規範屬 2CL 型熔絲，即熔絲安裝於一隔離周圍介質如空氣或液體之密封容器內，容器外之冷卻介質可

自由循環，此熔絲之額定最大工作溫度取決於容器外液體之散熱能力。又參考 IEEE Std. C37.47-2011 [73]對於配電級限流型熔絲之各項詳細規格，限流熔絲之各項額定值及測試標準為：

1. 額定電壓：2.8, 5.5, 8.3, 15.5, 17.2, 21.0, 22.0, 23.0, 27.0, 38.0kV。
2. 額定電流：6, 8, 10, 12, 15, 18, 20, 25, 30, 40, 50, 65, 80, 100, 125, 150, 200 A。
3. 工作頻率：50 赫茲或 60 赫茲。
4. 最大啟斷電流：50 kA (SYM)。台電材規 C035(99-07)
5. 最大工作溫度：140°C。台電材規 C035(99-07)
6. 耐衝擊電壓(BIL)及交流耐壓：如表 4-35 所示。
7. 啟斷能力測試：如表 4-36 所示。
8. 無線干擾測試：如表 4-37 所示。
9. 溫昇測試：如章節 4.7.5 所述。
10. 時間電流特性測試：如章節 4.7.6 所述。
11. 液體強度測試：如章節 4.7.7 所述。

#### 4.7.2 耐衝擊電壓及交流耐壓測試

測試交流耐壓(乾燥)時，依據 IEEE Std C37.41-2008 之規定，此測試之測試電壓須依照 IEEE Std 4-1995[74]之規定量測及校正。測試電壓須為交流且其頻率需與工作頻率相同，測試電壓波形需為正弦波且上下半週需幾乎相同，其電壓最大值與均方根值之比值需為  $1.414 \pm 5\%$ 。測試交流耐壓(乾燥)時，需將表 4-35 指明之電壓經大氣壓力因素校正後，對設備施加 1 分鐘。於測試開始時須先對設備施加較低的電壓避免開關時之暫態電壓對設備造成影響，之後緩慢提升測試電壓至額定 75%之交流耐壓值(乾燥)，並在 5 秒至 30 秒之間逐漸上升至 100%。測試期間絕緣材料不得被破壞或出現閃絡。

測試耐衝擊電壓時，測試波形須為符合 IEEE Std. 4-1995 之  $1.2/50\mu s$  全波測試電壓，其波形如圖 4-53 所示[74]，其波頭時間須不大於  $1.2\mu s$ 、峰值電壓須不小於表 4-35 指明之電壓值。圖 4-53 中，波頭時間 T1 為 30%波峰至 90%波峰經過之時間 T 乘以 1.67 倍，虛擬零點 O1 為 30%波峰點 A 及 90%波峰點 B 所連直線與時間軸之交點。波尾時間 T2 為虛擬零點至波峰降至 50%經過之時間。待測裝置需可承受正、負極性之衝擊電壓正負各三次。

測試期間不得出現任何破壞性放電，若出現超過一次破壞性放電則不合格；若於測試期間僅發生一次破壞性放電，則再施加九次相同之測試電壓若無再次發生破壞性放電亦算合格。

表 4-35 屋內設備之衝擊電壓及交流耐壓[73]

Rated maximum voltage (kV, rms)	Rated lightning impulse voltage (kV, peak)	Minimum dielectric test voltages				
		Terminal-to-ground for all devices and pole-to-pole (phase-to-phase) for multipole devices			Terminal-to-terminal	
		Power-frequency dry test, 1 min (kV, rms)	Power-frequency dew test, 10 sec (kV, rms)	Impulse test, $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ (kV, peak)	Power-frequency dry test, 1 min (kV, rms)	Impulse test, $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ (kV, peak)
2.8	45	15	10	45	15	45
	60	19	15	60	19	60
5.5	60	19	15	60	19	60
	75	26	24	75	26	75
8.3	75	26	24	75	26	75
	95	35	26	95	35	95
15.5-17.2	95	35	26	95	35	95
	110	50	30	110	50	110
23.0(21-22)	125	42	28	125	42	125
	150	60	40	150	60	150
27.0	125	42	28	125	42	125
	150	60	40	150	60	150
38.0	200	95	80	200	95	200

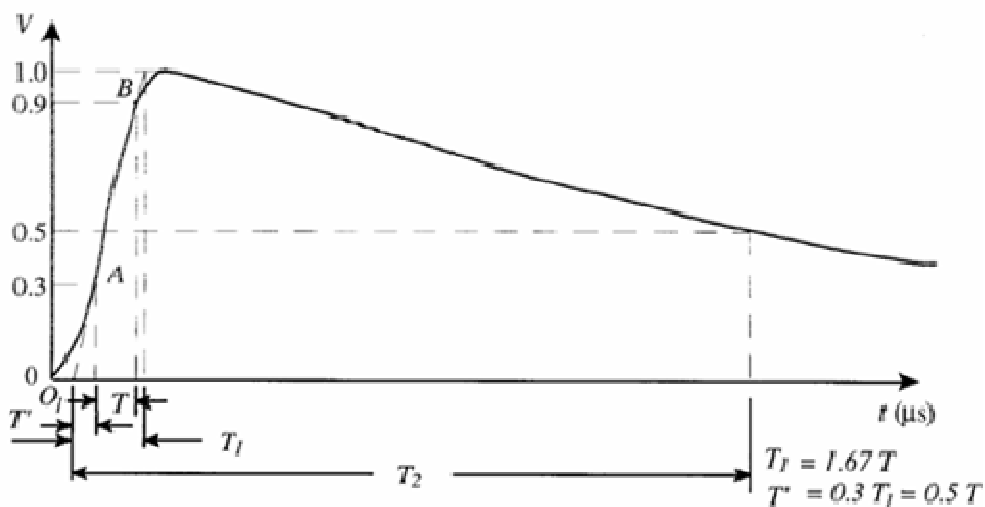


圖 4-70 全波衝擊電壓[74]

### 4.7.3 啟斷能力測試

測試啟斷能力時須使用單相交流電流，控制電路 X/R 比之元件及熔絲須以串聯方式連接，測試電路之頻率需為額定頻率之 $\pm 2$  赫茲，若 60 赫茲之測試設備因故無法使用，可改以 50 赫茲測試，但須注意 50 赫茲或許會產生較低之峰值截斷電流，但可能流過較 60 赫茲多的  $I^2T$ 。

在選擇適當熔絲額定值時必須計算系統負載側之最大對稱故障電流並與熔絲之啟斷容量相比較，藉此檢驗此熔絲是否有足夠能力清除故障。目前大多數熔絲製造商訂定之額定值為對稱電流之形式，可較直接的比較故障電流與熔絲額定值適不適當，但許多較早期製造之熔絲額定是以非對稱電流為基準制定的，對於這些非對稱電流需除以一適當之因數即可計算出對應之對稱電流值。而目前以非對稱峰值電流為基準的暫態電流可以對稱電流之均方根值乘以一適當因數求得。這些因數主要取決於測試電路之 X/R 比，其值如圖 4-71 所示。若測試時之 X/R 比較表 4-36 所示之值高時，則測試週期需更為嚴謹。將原本預計之對稱電流降低來符合非對稱電流是不允許的。

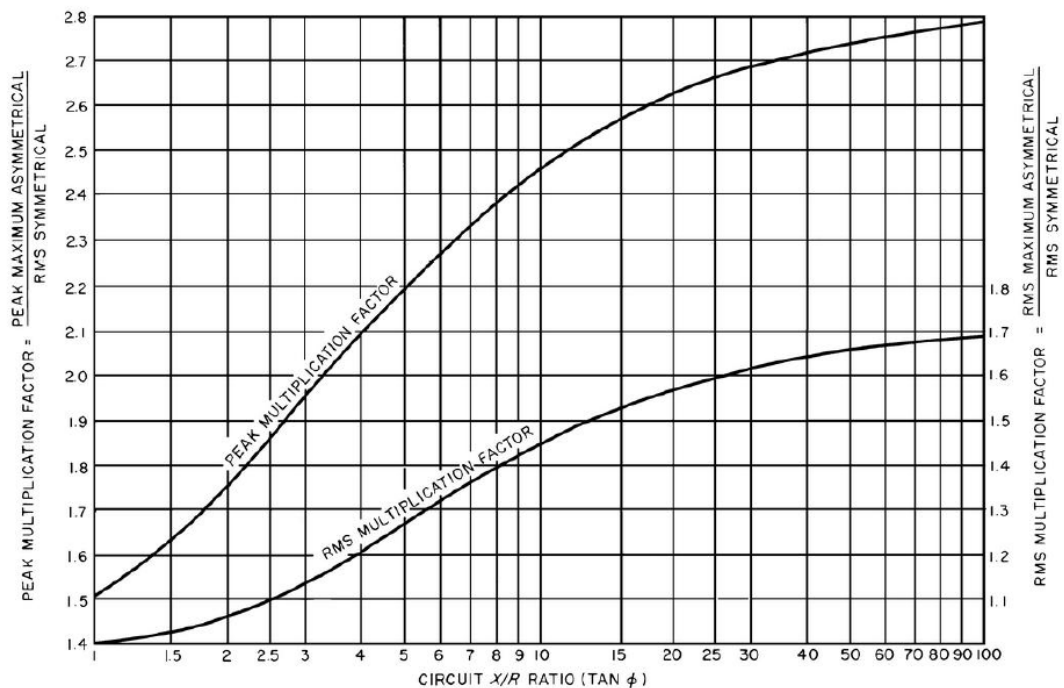


圖 4-71 X/R 比與電流轉換因數曲線圖[62]

表 4-36 啟斷能力測試參數[62]

Parameters	Test series				
	1		2		3
Power-frequency recovery voltage	Rated maximum voltage +5%, -0%				
TRV	Frequency (f)(kHz) +10%, 0%	Peak factor +10%, 0%	Frequency (f)(kHz) +10%, 0%	Peak factor +10%, 0%	The TRV for this test circuit shall be critically damped.
	4.7	1.4	2.3	1.5	
Prospective or test current rms symmetrical	$I_1$ +5%, -0%		$I_2$		$I_3$ +0%, -10%
X/R ratio (power factor)	Not less than 10 (not greater than 0.100)				2.3~1.3(0.4~0.6)
Making angle after voltage zero—degrees	-		0~20		Random timing
Instantaneous current at initiation of arcing	-		0.85 $I_2$ to 1.06 $I_2$		-
Initiation of arcing after voltage zero—degrees	For one test: from 40 to 65 For two tests: from 65 to 90		-		-
Duration of power-frequency recovery voltage after interruption	Not less than dropout time or 1s, whichever is greater				
Number of tests	3		3		2

全域型限流熔絲其啟斷測試分為三種責務分別代表不同之電流值，測試相關參數如表 4-36 所示。

責務一：驗證熔絲工作於一預測電流  $I_1$  其值與熔絲額定啟斷電流相等，測試電壓為期額定最大電壓。

責務二：當測試電路中電感儲存大量能量時，驗證熔絲工作於一預測電流  $I_2$ 。

$I_2$  之值可以用下列兩種方法求得：

1. 若於責務一之測試故障對稱電流值為額定電流之 150 倍以上：

$$I_2 = i_1 \sqrt{\frac{i_1}{I_1}}$$

$I_1$  為責務一之預測電流。

$i_1$  為責務一熔斷瞬間之電流值。

2. 反覆測試 3 至 4 次，試驗出造成熔絲熔斷於 0.01 秒之電流值。

責務三：此責務之測試電流為小於熔絲於廠商提供之最大工作溫度造成熔斷之電流。此電流值之取得方法為：將熔絲安裝於一穩定之熱源環境下(如溫度控制箱)，箱內溫度為廠商提供之額定最大工作溫度，當熔絲本身溫度到達此溫度時，箱內空氣循環風扇需關閉並將電流通入熔絲中，當熔絲本身溫度於一時內變化小於 2% 時，電流則增加 5% 至 10%。重複上述步驟直至熔絲熔斷。重複取樣三次後，取不會將熔絲熔斷之最高電流乘以 0.9 倍即為  $I_3$ 。此責務之測試電路需為臨界阻尼，即滿足。 $(f_0$  為自然頻率， $f_n$  為商用頻率， $X$  為商用頻率下電路之電抗)。

於啟斷能力測試責務一及責務二產生之過電壓應以頻率響應高於待測波形之陰極射線示波器紀錄；而於責務一中產生之最大截斷電流不得超越製造商指明之值，製造商亦需提供熔絲之總清除  $I^2t$  圖及燃弧  $I^2t$  圖(總清除  $I^2t$  為熔絲於工作條件下可能遭遇之最高值；燃弧  $I^2t$  為熔絲於工作條件下可能遭遇之最低值)。

#### 4.7.4 無線電干擾測試

此無線電干擾測試電壓為通電設備對鄰近裝置或接地裝置之影響，執行此測試時需調整其熔絲位置、各個裝置安裝位置、電壓源及接地位置至其電磁場強度與一般工作情況相同。待測裝置需符合表 4-37 指明之無線電干擾電壓。

表 4-37 無線電干擾電壓[74]

Rated maximum voltage (kV, rms)	Minimum test voltage (kV, rms)	Maximum allowable radio influence voltage ( $\mu$ V at 1 MHz)
2.8	3.0	250
5.5	5.8	250
8.3	8.7	250
15.5-17.2	16.3	250
23.0(21-22)	24.0	250
27.0	23.0	250
38.0	23.0	250

#### 4.7.5 溫昇測試

待測裝置需安裝於一可隔絕外來熱源之場所，此場所內之溫度需介於 10°C 至 40°C 之間。場所內之溫度測量需使用三台溫度計之平均值，此三台溫度計需分別裝設於待測裝置之上方 30 公分處、下方 30 公分處且需與地面距離 30 公分；若待測裝置安裝於地面上，則溫度計須放置於其旁邊 30 公分處，第三台溫度計需安裝於上述兩溫度計之中間 30 公分處。待測裝置需持續流過測試電流至三個溫度計之讀值於 30 分鐘內無超過 1°C 之變動。

#### 4.7.6 時間電流特性測試

依照此標準之熔絲 TCC 曲線，不需符合某特行斜率或曲線，熔絲之熔斷曲線之斜率與曲線形狀是由電流響應之熔體來決定的，各製造商之曲線特色皆不同。但有些熔絲被設計成符合有 C-rate 之值，此值指明一熔絲必須於某特定電流於特定時間內熔斷。

含有 C-rate 值之熔絲需於 170% 至 240% 額定電流於 1000 秒內熔斷，製造商需提供最小熔斷 TCC 曲線於任何超越 240% 額定電流之值。在相同的熔斷時間下，最大熔斷電流不得超越最小熔斷電流之 20%。

測試期間周圍溫度需介於 20°C 至 30°C 之間，待測裝置不得事先流過電流。測試時需安裝至與一般工作情況相同。乘載超過五秒之電流需以標準電流表測量，小於五秒之電流需以示波器或符合之儀器測量，電流波形需修正至穩態以利於繪出總熔斷時間及時間電流曲線。測試期間之時間若大於 10 秒，需使用碼表、電子錶或計時器；測試時間於 1 至 10 秒之間需使用同步定時器；測試時間小於 1 秒需使用示波器或符合之儀器測量。

#### 4.7.7 液體強度測試

此標準建議 2CL 型熔絲可執行相關液體強度測試，確保熔絲性能不會受絕緣液體之影響。

待測裝置需安裝至與一般工作情況相同，待測裝置需以熱循環的方式於 6 小時內將液體由室溫加熱至廠商提供的額定最高工作溫度，溫度上升速度不可超過每分鐘 0.5°C，當液體溫度到達額定最高工作溫度時，將熔絲通以額定電流並維持液體內的溫度達 2 小時，之後此液體需能冷卻至 25±5

°C 以上為一次循環，於測試時需測試總共 10 次循環。以下為選擇性之測試標準(非必要)：

1. 當裝置浸泡於液體中，維持最低正 96kPa 的氣壓變動，持續 5 分鐘，過後液體內不得有任何氣泡。
2. 上述測試前後，使用氦檢測質譜儀測量其洩漏率，不得超過  $10^{-6}\text{cm}^3$ 。
3. 待測裝置需以紫外線、光譜儀或其他適合裝置仔細檢查有無液體滲入情形。

#### 4.7.8 全域型熔絲之啟斷特性

熔體是熔絲啟斷電流的主要構件，限流熔絲之熔體通常為高導電材質製成，如銅或銀，纏繞在柱型支架上並以高純度石英砂包住。如圖 4-72 為典型限流熔絲之熔體構造[64]。當限流熔絲因流過故障電流而熔斷時，熔體將會在缺口處熔斷成多個小段，於故障電流迴路中產生抑制作用，此方法通常用在較高的故障電流。而單一截面之熔體(如絲狀熔體)通常用於較低的故障電流，於熔斷時會產生多個珠狀的小段。熔斷之熔體會汽化並擴散至砂中。熔斷之熔體在每個分段點都會產生電弧，限流熔絲之電弧電壓為所有電弧電壓之合。

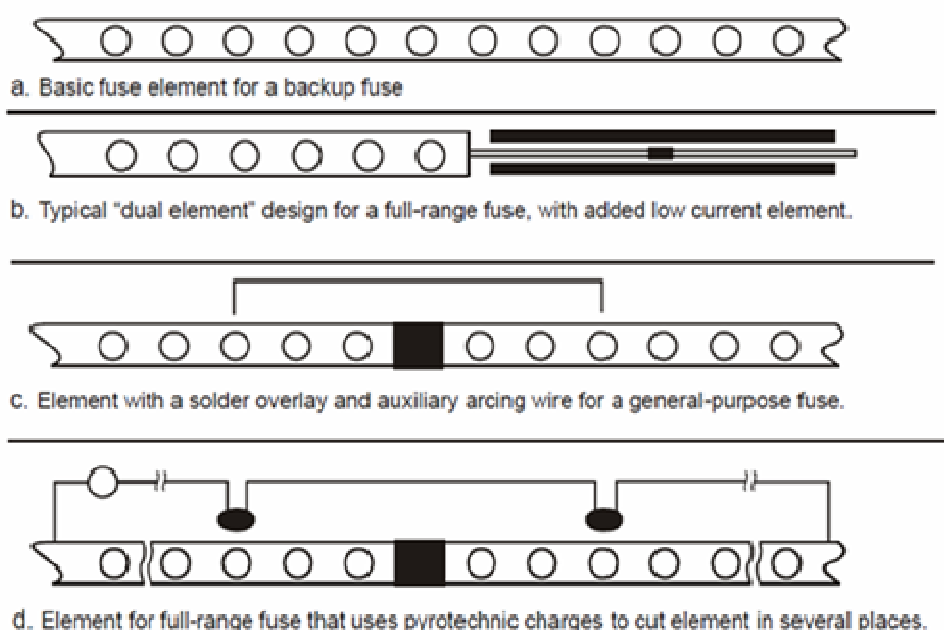


圖 4-72 典型限流熔絲熔體構造[64]

典型全域型限流熔絲之熔體分為高啟斷區域及低啟斷區域，兩端區域之熔體採用串聯方式連接；外部接線接至熔絲端蓋板之壓接端子，經銅製兩端蓋板焊接至高啟斷區域熔體-銀帶及低啟斷區域熔體-銀絲，銀帶及銀絲經焊接連結後纏繞在雲母柱型支架上。

圖 4-73 為典型限流熔絲之構造[64]，兩端為連接端予供連結至迴路用，含有柱狀外殼、端蓋等組件以裝入熔體、柱型支架、滅弧介質等。柱狀外殼上含有識別銘牌。高啟斷區域熔體-銀帶及低啟斷區域熔體-銀絲，經焊接連結後通常以纏繞之方式安裝於柱型支架上以縮短整體熔絲長度。

限流型熔絲可於故障電流之第一週波波峰發生前熔斷，因此可以限制故障電流值及故障持續時間。限流熔絲於其熔體熔斷時始限制故障電流上升至原本之峰值。當限流熔絲之熔體熔斷後與管內冷卻及消弧介質(通常為砂)交互作用產生一迅速上升之等效電阻於故障迴路中進而抑制故障電流。

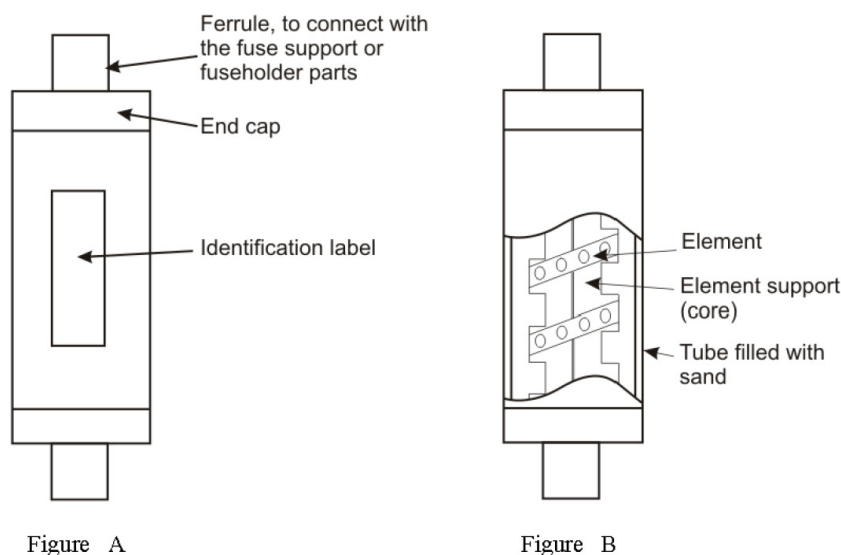


圖 4-73 典型限流熔絲之構造[64]

如圖 4-74 所示，一限流熔絲乘載故障電流後於第一週波波峰出現前即熔斷。故障電流峰值產生於電弧電壓與系統瞬時電壓相等時。於此現象過後，由於電路之感應電壓反對故障電流下降因而加至系統電壓中，熔絲兩端電弧電壓即超過系統電壓。熔絲將故障迴路由高電流低功率因數(介質電力因數)轉變為低電流較高功率因數之電路。因此故障電流在一般電流零點前被強迫靠至零點且靠近電壓零點。通常上述現象會於故障開始後二分之一週波內發生。因為電流零點很靠近電壓零點的緣故，會產生較低的暫態恢復電壓(Transient Recovery Voltage, TRV)。

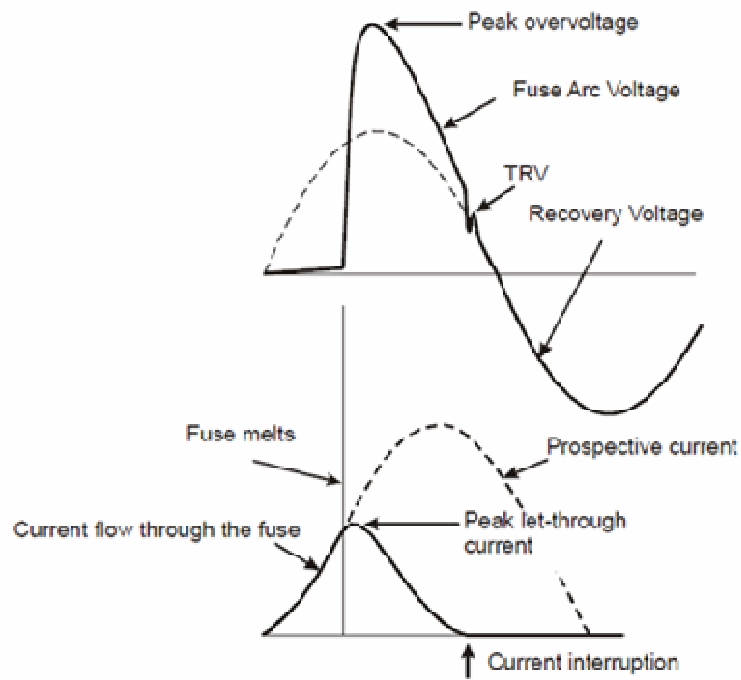


圖 4-74 限流型熔絲之啟斷特性[64]

#### 4.7.9 全域型熔絲之保護區域及協調

變壓器設置熔絲的目的，是要作為短路及過載之後衛保護；因此，必須檢討熔絲的啟斷時間電流特性(Time-Current-Characteristic, TCC)曲線，是否能與變壓器激磁突流、變壓器破壞曲線及遮斷開關保護曲線協調。當設置在變壓器絕緣油內的熔絲動作啟斷之後，就必須將變壓器絕緣油取出，打開外箱後才可更換新的熔絲；因此，更換熔絲非常耗費時間。變壓器主要係由遮斷開關保護，熔絲則做為遮斷開關之後衛保護。

依照 IEEE Std. C57.109-1993 [75]規定，單相變壓器 25/50/100 kVA 屬第一類變壓器(單相 5 kVA 至 500 kVA)，其破壞曲線在 0.5 秒至 2 秒時間內，以  $t = 1250 / I^2$  之額定電流倍數計算；IEEE Std. 242-2001 [76]指出變壓器保護協調須注意以下幾點：

1. 變壓器之各項額定值(電壓、容量及阻抗)。
2. 變壓器一二次側連接方式。
3. 變壓器之負載。
4. 變壓器之激磁突(湧)流。
5. 變壓器之破壞曲線。
6. 變壓器一二次側可承受之短路電流。

該標準亦指出需以 IEEE Std. C57.109-1993 之變壓器破壞曲線(圖 4-75) [75]為基準，規劃設定變壓器之過電流電驛；且最大激磁突流通常假設於 0.1 秒為 8 至 12 倍變壓器額定電流。檢討變壓器保護協調之 TCC 曲線時，遮斷開關的啟斷 TCC 曲線必須在變壓器激磁突流的右上方，以確保變壓器投入時，遮斷開關不會誤動作；而變壓器的破壞曲線則必須在遮斷開關 TCC 曲線的右上方，如此遮斷開關才能保護變壓器不被破壞。

至於熔絲的 TCC 曲線，依照 IEEE Std. C37.48-2005 [77]指出後衛保護之熔絲可使用 75% 最小熔斷時間曲線可防止熔絲由於持續乘載電流之積熱效應及一般溫度變化造成誤動作的情況。因此熔絲之 75%最小熔斷時間曲線須位在遮斷開關 TCC 曲線右上方，總清除電流 TCC 曲線須位在變壓器破壞曲線左下方，才能作為遮斷開關之後衛保護並有效的保護變壓器。

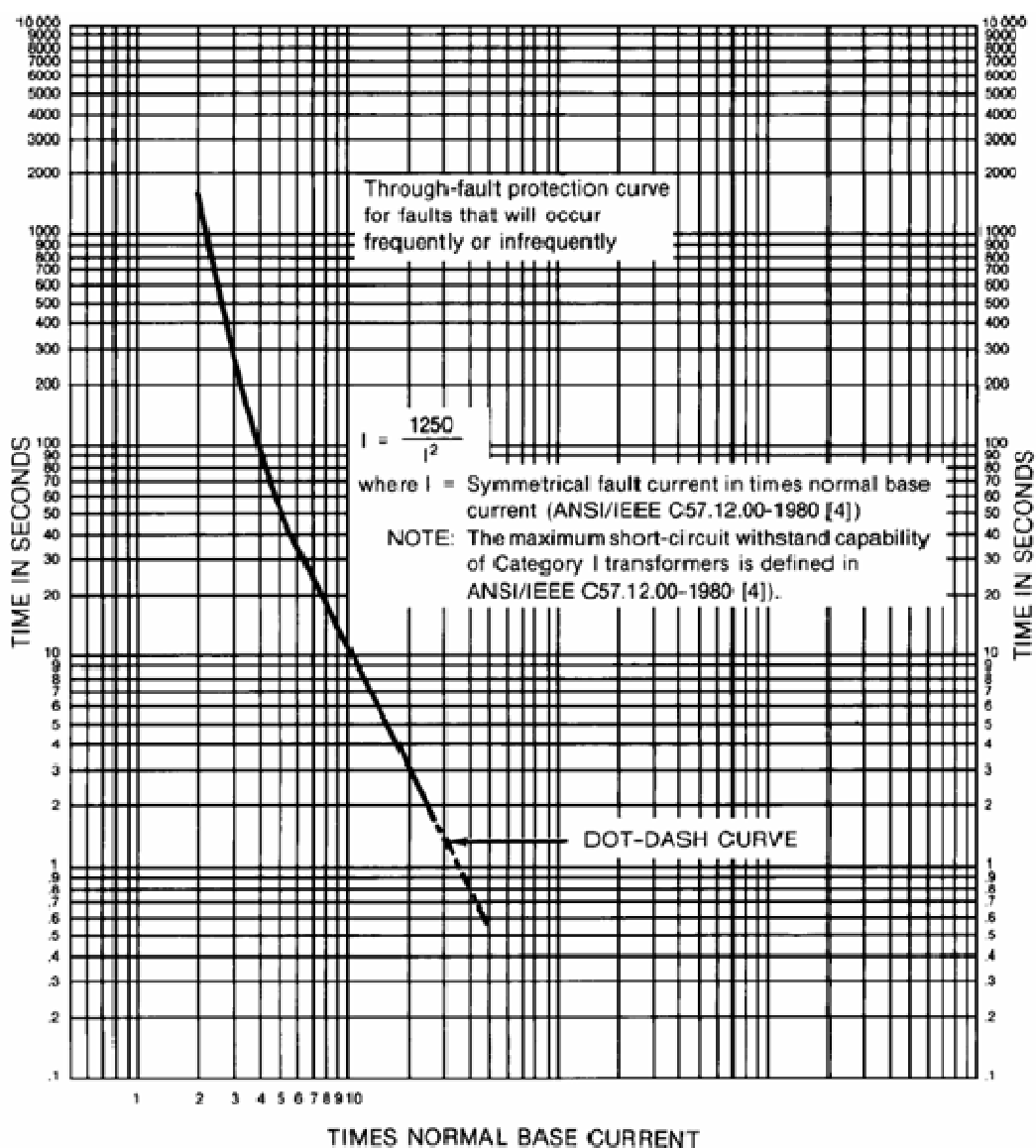


圖 4-75 第一類液浸式變壓器破壞曲線[75]

圖 4-76 為變壓器使用交流延時過電流保護電驛與熔絲保護曲線協調範例圖[76]，圖中可發現保護電驛與熔絲之 TCC 曲線皆位於變壓器激磁突流之右上方及變壓器破壞曲線之左下方，可確保保護電驛及熔絲於變壓器切入時不會產生誤動作的情況且可保護變壓器免於乘載過大的故障電流。而熔絲 TCC 曲線位於保護電驛 TCC 曲線之右上方即保護電驛為變壓器之主保護，熔絲為保護電驛之後衛保護。

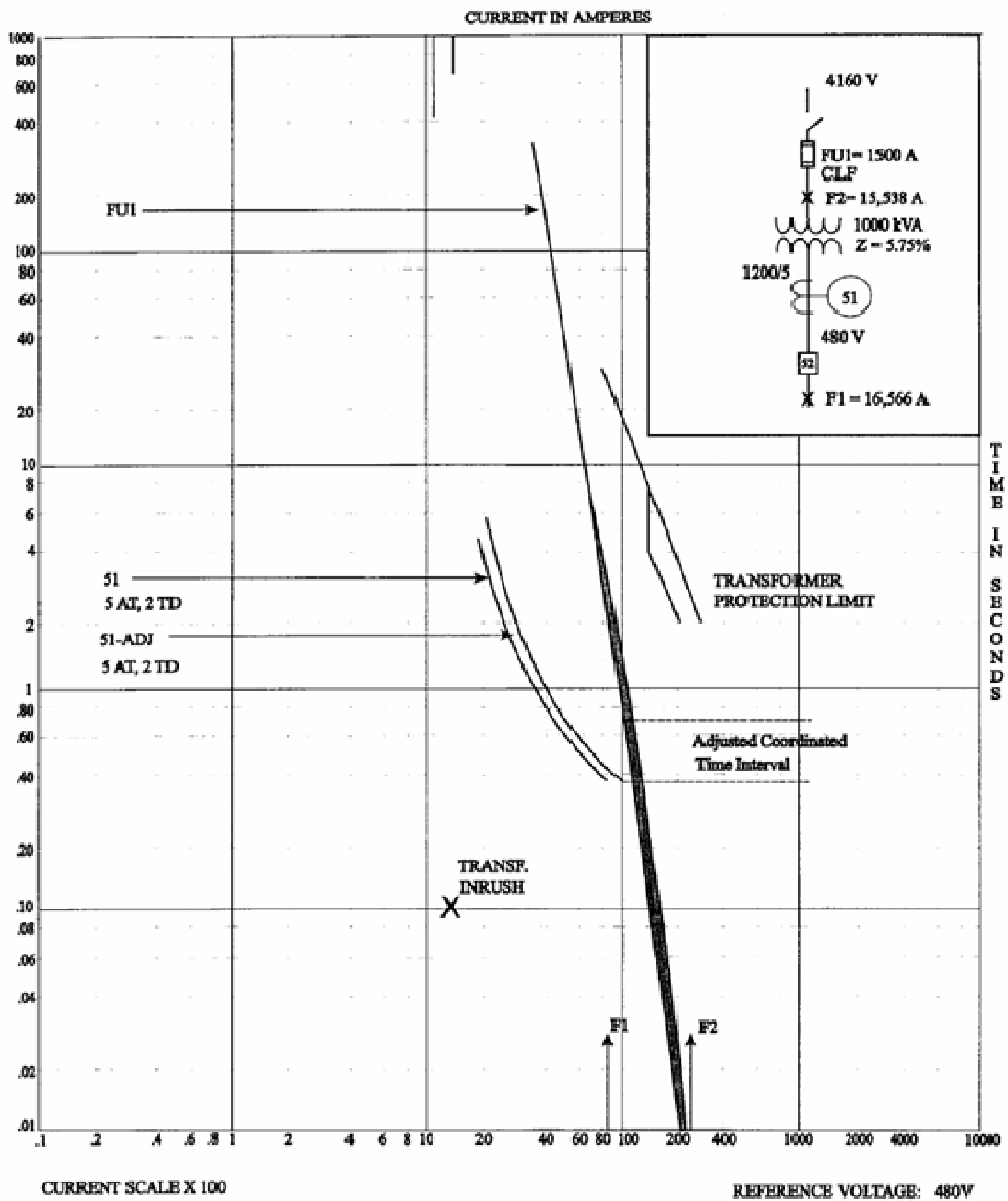


圖 4-76 變壓器保護曲線協調範例 1 [76]

圖 4-77 為密封型桿上變壓器保護設備及零組件型錄中變壓器之保護協調曲線圖[51]，圖中，各保護裝置之 TCC 曲線雖與協調範例不盡相同，其遮斷開關之 TCC 曲線位於變壓器激磁突流及變壓器破壞曲線之中央區域，可確保開關投入時不會產生誤動作且於故障時可保護變壓器，而全域型限流熔絲之 TCC 曲線雖位於變壓器破壞曲線之右上方，但其大電流之動作能力較遮斷開關佳，能確保當故障電流過大時，配電線路斷路器不會跳脫而使整條配電線停電。

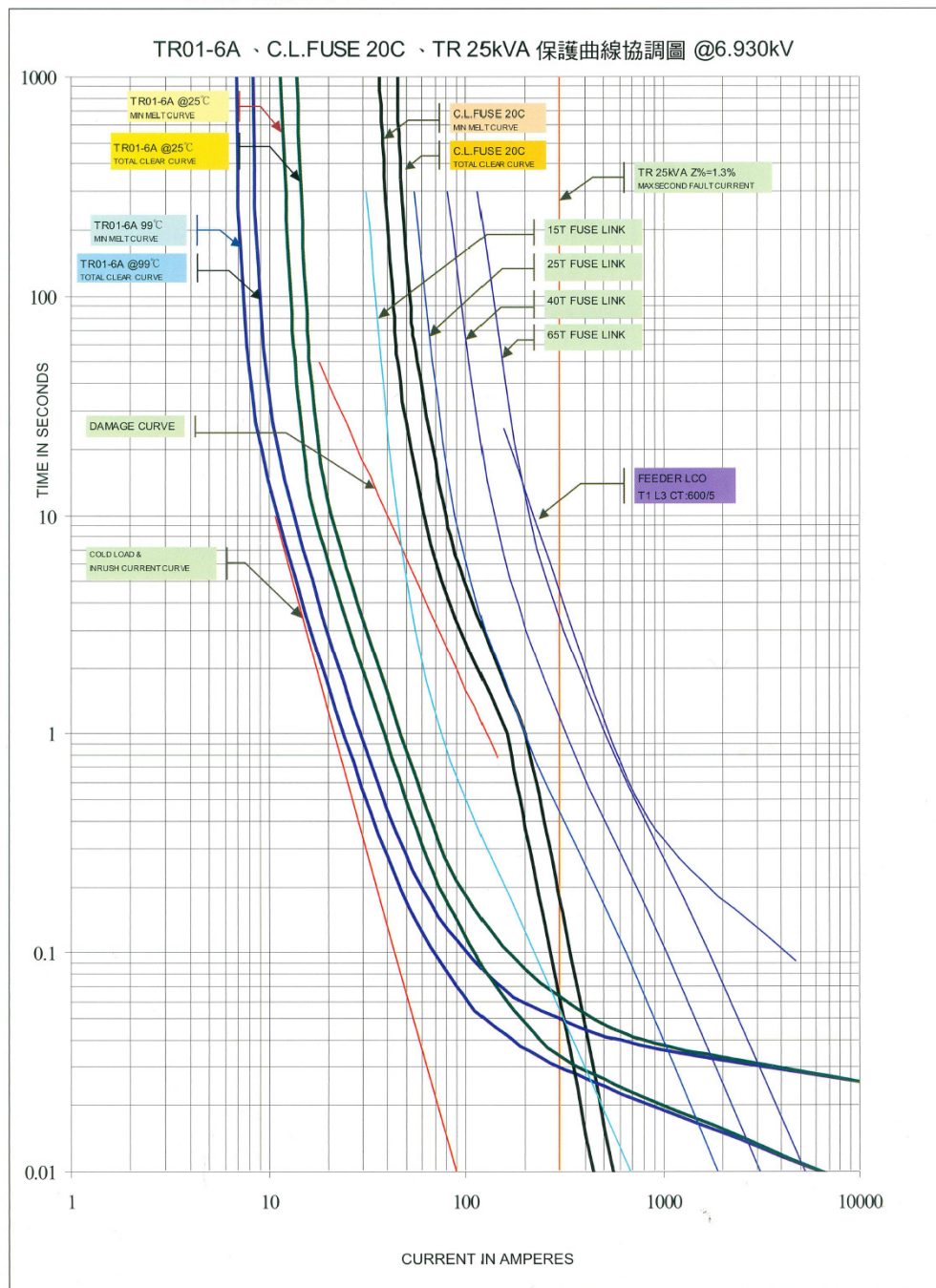


圖 4-77 變壓器保護曲線協調範例 2 [51]

#### 4.7.10 改善及建議事項

依據台灣電力公司密封型桿上變壓器之材料標準 C035(99-07) [61]中對於全域型限流熔絲之規定為：

1. 變壓器之過電流保護方式，應採用一次遮斷開關串聯全域型(Full Range)限流熔絲，並符合下列規定。
2. 遮斷開關作為二次側故障及小故障電流保護，全域型限流熔絲作為大故障電流及後衛保護用，兩者均應為耐油型且均裝置於變壓器桶內油面下。
3. 開關等遮斷電流應為 50kA (SYM)。
4. 全域型限流熔絲為非驅弧型，應符合 ANSI C37.41 (1981) Table 4 之標準。

由上顯示全域型限流熔絲僅需符合 1981 年版 ANSI C37.41 Table 4 即可，而 IEEE 也已於 1988、1991、1994、1996、2000 及 2008 年更新了此份標準。因此參考現行 IEEE Std. C37.41 (2008)，相互對照後為 Table 14，此表格僅規定全域型限流熔絲之啟斷能力，對於熔絲之其他性能如耐衝擊電壓(BIL)、交流耐壓、溫昇…等皆未限制。又參照 IEEE Std. C37.47 (2011)標準內之溫昇測試亦指出需參照 IEEE Std. C37.40 (2003) [78]；對於協調、動作及維護需參照 IEEE Std. C37.48 及 IEEE Std. C37.48.1…等。因此，全域型限流熔絲之規定需符合標準如下：

1. 於 IEEE Std. C37.41 (2008)中指明熔絲之其他性能測試參數需參照 IEEE Std. C37.47 (2011)；測試波形與量測方法需參照 IEEE Std. 4 (1995)；於溫昇測試及一般工作條件需參照 IEEE Std. C37.40。
2. 於 IEEE Std. C37.47 (2011)中指明熔絲之協調需參照 IEEE Std. C37.48；熔絲之應用、動作及構造需參照 IEEE Std. C37.48.1。
3. 於 IEEE Std. C37.48.1 (2011)中指明變壓器之破壞曲線需參照 IEEE Std. C57.109。

而台電材規對於全域型熔絲之保護區域，僅說明需作為大故障電流及後衛保護用，對保護程度敘述不甚明確。因台電材規內未明確指出全域型限流熔絲是為保護配電線路不因單一線路之變壓器故障而停止整條配電線供電(無法保護變壓器)亦或是作為遮斷開關之後衛保護當遮斷開關於變壓器過載未跳脫時熔斷(可保護變壓器)，關於此部分可檢視是否應將保護區域與程度以較明確的方式說明。

## 4.8 避雷器動作特性及保護區域與協調以及改善建議

避雷器是密封型桿上變壓器內必備的裝置，其功能主要用於保護變壓器內各設備及其下游線路及設備免於突波(Surge)傷害。來自於線路的突波包括雷擊突波(Lightning Surge)及開關突波(Switching Surge)，避雷器的功能提供突波能量洩放的路徑及協助消散或吸收突波能量以抑制突波電壓，以防止系統及設備絕緣破壞。避雷器的型式主要為閥型(Valve Type)避雷器及金屬氧化物(Metal Oxide)避雷器，前者如碳化矽串聯放電間隙的避雷器，而後者目前以氧化鋅(Zinc Oxide, ZnO)避雷器最多；以放電特性而言，金屬氧化物避雷器的可靠性比閥型避雷器為佳，但其洩漏電流可能較大。台電公司密封型桿上變壓器內的避雷器均為配電級的油浸式避雷器，其材質為氧化鋅。

本文將依變壓器衝擊波絕緣基準(Basic Impulse Insulation Level, BIL)探討避雷器動作特性及保護區域與協調，此外，亦將檢討台電公司桿上變壓器故障統計數據中有涉及避雷器故障情形，並探討避雷器的裝設位置，一併提出改善建議事項。

### 4.8.1 背景簡介

避雷器是密封型桿上變壓器內唯一的突波保護設備，其設計理念除保護變壓器繞組本體外，亦應保護內部各元件之絕緣免於被突波破壞，包括套管、套管井、遮斷開關、限流熔絲、接線端子等之絕緣。現場運轉經驗顯示，密封型桿上變壓器故障率較傳統桿上變壓器高出許多，其中將避雷器裝於變壓器筒槽(Tank)內，是否造成故障率偏高的原因之一，有必要加以探討。表 4-38 所示為台電公司於 2006 年至 2010 年統計之密封型桿上變壓器故障原因，其中避雷器故障雖然比率很低，但不代表突波傷害比率很低，因其他元件之故障與絕緣破壞有密切關係，突波電壓對絕緣有不利的影響，因而與避雷器動作特性有關，甚至與避雷器安裝位置亦有相關；例如依台電材規 C035 圖 1 所示之變壓器接線圖中(如圖 4-78 所示)，避雷器是裝於限流熔絲之後(負載側)，雷擊發生時雷電流將通過熔絲，且避雷器放電電流亦會通過熔絲，避雷器放電時，有可能使限流熔絲同時熔斷，或使熔絲受到損傷，而影響其特性及功能，使得雷擊造成熔絲故障率自然增加。本

文將探討避雷器裝設於一次電源側與限流熔絲負載側來作比較。

表 4-38 台電公司 2006 年至 2010 年密封型變壓器故障統計表

項次	故障可能原因	件數	佔比
1	線圈燒損	156	44.57%
2	線圈層間短路或絕緣不良	65	18.57%
3	一次斷線	51	14.57%
4	遮斷開關故障	36	10.29%
5	限流熔絲故障	17	4.86%
6	一次套管井裂化	5	1.43%
7	漏油	4	1.14%
8	超載燒損	3	0.86%
9	避雷器故障	2	0.57%
10	絕緣油劣化	2	0.57%
11	外殼鏽蝕	2	0.57%
12	二次接線端子不良	1	0.29%
13	其他	6	1.71%
	合計	350	100%

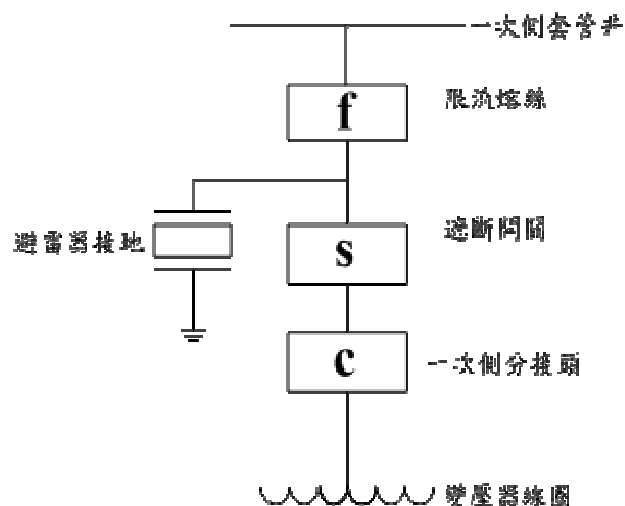


圖 4-78 材規 C035 圖 1 變壓器內部接線圖

避雷器是以其非線性壓控電阻特性控制通過的突波電流，正常時避雷器有很高的電阻宛如絕緣礙子；而突波電壓超過某一閾值(Threshold Value)

時，避雷器電阻急速降低瞬間將突波能量洩放至大地，突波通過後避雷器再恢復高電阻狀態。這種電阻隨電壓變化的特性即為避雷器的動作特性，此特性必須與被保護設備的絕緣耐電壓能力相配合，才能達到保護效果，一般稱為絕緣協調(Insulation Coordination)。對此本文將加以探討，其中將蒐集國內外金屬氧化型避雷器標準文獻與廠家資料，藉由標準與廠家的定型試驗報告探討試驗的參數與流程，並進一步應用電磁暫態分析程式(ATP)建立模型，藉此分析避雷器裝置於限流熔絲之電源側與負載側之突波情形，並加以比較以評估其影響。

#### 4.8.2 避雷器動作特性介紹及相關參數

##### 一、構造及組成元件性能

密封型桿上變壓器內部避雷器是採用氧化鋅避雷器，其構造主要是內部為氧化鋅元件疊積為圓柱型而組成，主要材料為氧化鋅(Zinc Oxide)，氧化鋅避雷器構造如圖 4-79 所示，再添加微量的  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ， $\text{CoO}$ ， $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ， $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ，等物質經過混合，造粒、成型，密燒等製造過程而成陶瓷狀態，是具有一種半導體晶體狀。疊積圓塊狀氧化鋅元件的數目依避雷器最大連續操作/運轉電壓  $V_{\text{MCOV}}$  (Maximum Continuous Operating Voltage, MCOV)而定，疊積成圓柱體的氧化鋅元件被完全密封的磁套管裏或矽膠裏，當施加電壓  $V_{\text{MCOV}}$  時圓柱體氧化鋅元件有如電容器，而每一塊狀氧化鋅元件對地的雜散電容均不同而使分布在圓柱體軸上的電壓呈現限非線性分布。



圖 4-79 氧化鋅避雷器構造圖

圖 4-80 是理想避雷器與氧化鋅避雷器之 V-I 工作特性，氧化鋅元件的

非線性特性，主要是它能將吸收的能量化為熱能並將能量散去。當它吸入的熱能少於它散去的熱能，氧化鋅電阻片便能呈穩定狀態；反之就是不穩定狀態稱為熱崩潰(thermal runaway)，如圖 4-81 所示。

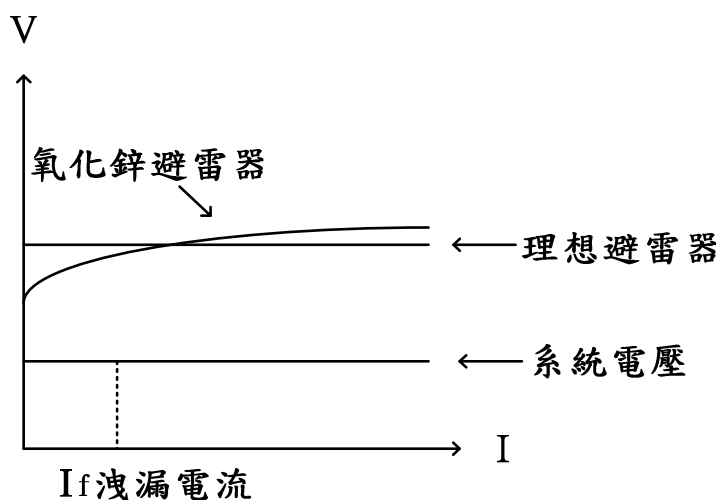


圖 4-80 理想避雷器與氧化鋅避雷器之 V-I 工作特性

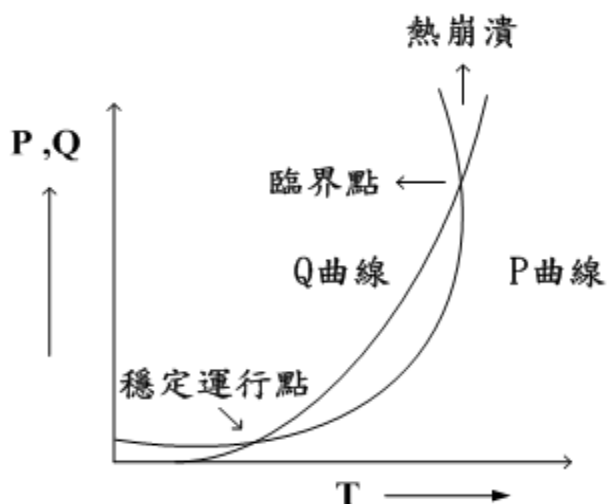


圖 4-81 氧化鋅的穩定性與熱崩潰趨勢示意圖

對氧化鋅電阻片的最大影響是溫度，P 是氧化鋅避雷器在連續操作電壓時的電力損失，Q 式熱量從氧化鋅電阻流向外部的散熱效果。在臨界點以上， $P > Q$ ，散熱效果差，產生的電力損失不足以散溢出去，電阻又繼續產生熱，直到避雷器中因過熱而損壞。若進入氧化鋅電阻的總能量不超過臨界點，則  $P < Q$ ，氧化鋅電阻逐漸冷卻到達穩定的運轉點。

## 二、動作特性及參數描述

氧化鋅是非線性可變電阻元件，主要材料為氧化鋅。其工作特性為正常系統電壓時，其阻抗極大只有數毫安培洩漏電流。當衝擊電壓高過避雷器之放電電壓時，氧化鋅避雷器開始動作洩放電流，其阻抗降為極低使衝擊電流能順利導入大地；衝擊波過後恢復正常系統電壓時，阻抗立刻上升為極大，指續流恢復原先之數毫安培洩放電流。

氧化鋅之簡化電器特性模型如圖 4-82 所示，其洩漏電流由總洩漏電流  $I_t$ 、電阻性洩漏電流  $I_r$  與電容性洩漏電流  $I_c$  來表示。避雷器在正常系統電壓下，流經避雷器之洩漏電流很小，洩漏電流( $I_t$ )可分為電容性部分( $I_c$ )及電阻性部分( $I_r$ )；其中電容性係由氧化鋅電阻膜片間之極間電容、雜散電容及內部電容所生成，其電容值隨其氧化鋅變阻體的串聯疊加數量與變阻體之直徑有關。

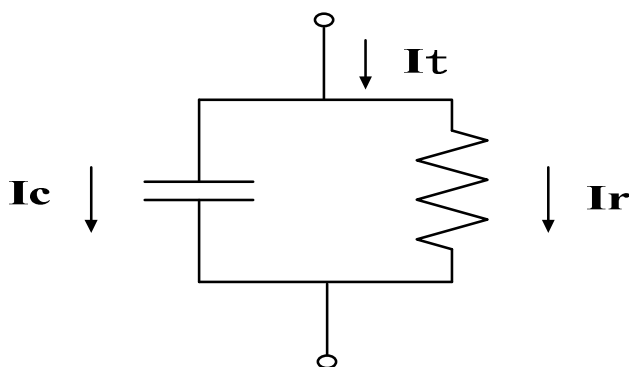


圖 4-82 氧化鋅避雷器之等效電路

避雷器應用上之重要電氣參數定義如下：

(一) 最大連續運轉電壓(Maximum Continuous Operating Voltage, MCOV)

最大續轉電壓表示避雷器在該電壓下為不動作狀態，在不動作狀態之下避雷器僅有很小的洩漏電流，以限制避雷器本身之電力消耗，同時不致干擾到受保護之線路。選用避雷器之 MCOV 時需比系統最大相電壓略高，表 4-39 所示為 IEEE Std. C62.11-1999 [79] 避雷器額定對應之 MCOV。而密封型桿上變壓器系統電壓為 11.4kV，責務電壓為 9kV 級對應最大連續運轉電壓為 7.65kV。

表 4-39 避雷器之額定與對應之 MCOV

Duty-cycle	MCOV	Duty-cycle	MCOV
------------	------	------------	------

Voltage (kV rms)	(kV rms)	Voltage (kV rms)	(kV rms)
3	2.55	144	115
6	5.1	168	131
9	7.65	172	140
10	8.4	180	144
12	10.2	192	152
15	12.7	228	180
18	15.3	240	190
21	17	258	209
24	19.5	264	212
27	22	276	220
30	24.4	288	230
36	29	294	235
39	31.5	312	245
45	36.5	396	318
48	39	420	335
54	42	444	353
60	48	468	372
72	57	492	392
90	70	540	428
96	76	564	448
108	84	576	462
120	98	588	470
132	106	612	485

## (二) 衝擊波絕緣基準(Basic Impulse Insulation Level, BIL)

將各種電力設備依照系統運轉電壓之高低，依其應有之絕緣強度分為若干等及各級設備之標準衝擊波試驗時，規定其應能承受之全波試驗值，該項最低衝擊波試驗值稱為衝擊波絕緣基準(Basic Impulse Insulation Level, BIL)。基本衝擊絕緣基準亦稱為絕緣基準，該電氣設備承受 1.2/50  $\mu$ s 衝擊波之絕緣能力。表 4-40 為 IEEE Std. C62.11-1999 之變電所級與中間級與配電級避雷器絕緣耐受電壓。

## (三) 開關突波絕緣基準(Basc Switching Impulse Insulation Level, BSL)

電氣設備耐受 250/2500  $\mu$ s 衝擊波之絕緣能力，衝擊波之持續時間視設備種類而定。

## (四) 截斷衝擊波絕緣能力(Chopped Wave Withstand, CWW)

電氣設備耐受 1.2/50  $\mu$ s 衝擊波中之 1~3  $\mu$ s 截斷衝擊波的絕緣能力。

(五) 波前截斷絕緣能力(Front of Wave Withstand, FOW)

電氣設備耐受  $1.2/50 \mu s$  衝擊波中，對  $0.5 \mu s$  截斷衝擊波前的絕緣能力。依 IEEE Std. C62.2-1987，表 4-41 為油浸式設備 BIL 與 BSL、CWW、FOW 之關係。

表 4-40 避雷器額定絕緣耐受電壓

rms duty-cycle voltage rating of arrester (kV) <sup>a</sup>	Station and Intermediate Arresters			Distribution Arresters		
	Impulse test 1.2/50 full wave (kV) crest <sup>b</sup> (BIL)	60 Hz rms test voltage (kV)		Impulse test 1.2/50 full wave (kV) crest <sup>b</sup> (BIL)	60 Hz rms test voltage (kV)	
		1 min dry test	10 s wet test <sup>c</sup>		1 min dry test	10 s wet test <sup>c</sup>
1	—	—	—	30	10	6
3	60	21	20	45	15	13
6	75	27	24	60	21	20
9	95	35	30	75	27	24
10	110	50	45	75	27	24
12	110	50	45	85	31	27
15	110	50	45	95	35	36
18	150	70	60	125	42	36
21	150	70	60	125	42	36
24	150	70	60	125	42	36
27	200	95	80	150	70	60
30	200	95	80	150	70	60
36	200	95	80	—	—	—
39	250	120	100	—	—	—
48	250	120	100	—	—	—

表 4-41 油浸式設備 BIL 與 BSL、CWW、FOW 之關係

	變壓器
FOW	$1.3 \sim 1.5 \times \text{BIL} (0.5 \mu s)$
CWW	$1.1 \sim 1.15 \times \text{BIL} (3 \mu s)$
BSL	$0.83 \times \text{BIL}$

(六) 雷擊波保護等級(Lightning Impulse Protect Level, LPL)

測試避雷器進行  $1.2/50 \mu s$  衝擊波電壓與  $8/20 \mu s$  放電電流對應放電電壓，其中較高者為雷擊波保護等級。

#### (七) 開關突波保護等級(Switching Impulse Protect Level, SPL)

應用開關脈衝額定電流大小到達  $40 \sim 60 \mu s$  的實際電流測量避雷器對應的波峰放電電壓。

#### (八) 避雷器額定電壓(Rate Voltage, Vr)

避雷器額定電壓為避雷器兩端所承受之最高 AC 電壓有效值，此電壓代表避雷器於放電後保證切斷續流之最高電壓，並非代表放電電壓。而額定電壓的選擇需考慮系統電壓及系統接地條件，並考慮系統電壓、接地方式即被保護之設備或線路 BIL 值。

#### (九) 放電電壓-電流特性曲線(Discharge Voltage Current Characteristics)

應用  $8/20 \mu s$  衝擊波測量當電流達 1500A，3000A，5000A，10000A，20000A 所對應到的電壓峰值，表 4-42 為 IEEE Std. C62.11-1999 避雷器的額定等級對應的電流峰值。

表 4-42 避雷器額定雷擊脈衝電流

Classification of arrester	Impulse value crest (kA)
Station (800 kV) <sup>a</sup>	20
Station (550 kV) <sup>a</sup>	15
Station (below 550 kV) <sup>a</sup>	10
Intermediate	5
Distribution, heavy duty	10
Distribution, normal duty	5
Distribution, light duty	5

### 4.8.3 避雷器保護區域及絕緣協調

避雷器主要能保護變壓器在遭受雷擊時，當有過大的突波電壓時，在變壓器內部各元件尚未絕緣破壞時，及時動作抑制電壓超過元件之絕緣耐力，此絕緣耐力依各元件設計時所依據的標準而定，例如依照 IEEE Std. C62.2-1987 [80]所定的「衝擊波絕緣基準」(Basic Impulse Insulation Level, BIL)，避雷器必須將突波電壓抑制到低於被保護設備的 BIL 值之下，才能確保設備絕緣不被破壞。此外，避雷器的設計也應盡可能考慮減少突波電流流進變壓器中，造成設備的損壞。現今配電變壓器內部接線如圖 4-78 所

示，當在一次側遭受雷擊時，突波電流先經過於限流熔絲，此時雷擊電壓高過避雷器放電電壓而避雷器開始動作洩放電流，減少雷擊電流經過後端的遮斷開關、一次側分接頭與變壓器線圈等元件，以免大電流流經這些元件造成更大的損壞，不過限流熔絲不會因避雷器放電而減少電流，反而流過更大電流。因此，這樣設計不能將避雷器視為限流熔絲的突波電流保護裝置。

依照 IEEE Std. C62.2-1987，圖 4-83 為典型油浸式變壓器絕緣能力與避雷器之電壓時間絕緣協調曲線(Volt-Time Curves for Coordination)，上曲線為設備之絕緣能力，下曲線部分為該設備放置位置之避雷器放電電壓應力。電力設備絕緣水平愈高，其絕緣被破壞機會愈小，但成本會提高；反之設備絕緣水平定低，成本降低但遭受絕緣破壞波會增加。因此避雷器與保護設備之絕緣特性必須互相配合，及適當地選擇設備絕緣水準在設置地於該絕緣水平之避雷器，遇有異常電壓襲擊時使其不致升高到設備之絕緣水平，由避雷器洩去，其為絕緣協調原理。

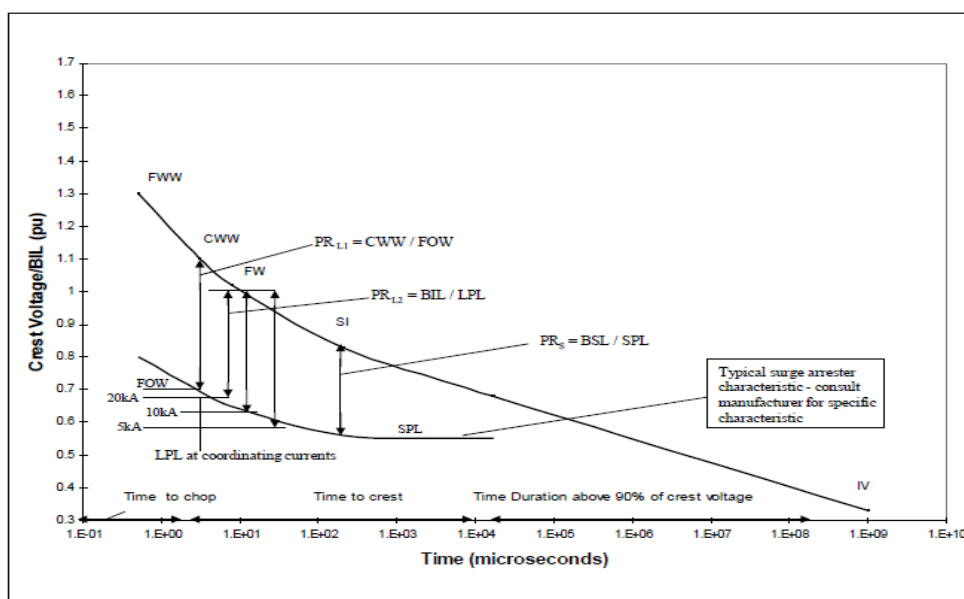


圖 4-83 典型油浸式變壓器絕緣能力與避雷器之電壓時間絕緣協調曲線

良好保護協調取決於下方曲線應在所有突波發生的範圍內，且均與上方的設備曲線保持一個適當距離，兩曲線之差距愈大則保護效果愈好但是會增加製造成本。

為確保設備絕緣能力因老化而下降時，不至於造成被保護之設備，遭受雷擊或事故而發生危險，所以必須有安全餘裕，及保護裕度(Protect Margin,

PM)，其計算如下：

$$[(CWW/FOW)-1] \times 100\% \geq 20\% \quad (4-14)$$

$$[(BIL/LPL)-1] \times 100\% \geq 20\% \quad (4-15)$$

$$[(BSL/SPL)-1] \times 100\% \geq 15\% \quad (4-16)$$

表 4-43 為 IEEE Std. C62.22- 2009 [81]建議保護裕度，依 IEEE Std. C62.22 之 6.5 節，配電系統絕緣協調建議保護裕度，計算如下：

$$PM_{L1} = \left( \left[ \frac{CWW}{FOW + L \frac{di}{dt}} \right] - 1 \right) \times 100\% \geq 20\% \quad (4-17)$$

$$PM_{L2} = \left( \left[ \frac{BIL}{LPL} \right] - 1 \right) \times 100\% \geq 20\% \quad (4-18)$$

表 4-43 設備建議保護裕度(IEEE Std. C62.22-2009)

設備耐受等級	避雷器保護等級	保護裕度
CWW	FOW	20%
BIL	LPL	20%
BSL	SPL	15%

依據峻鼎電機有限公司提供密封行桿上變壓器定型試驗報告中，截斷波電壓試驗兩次(CWW=121.4kV)，全波電壓試驗一次(BIL=109.9kV)，而在計算保護裕度需得知引線連接到避雷器這段的跨壓( $Ldi/dt$ )，在電感的假設範圍取用 IEEE Std. C62.22 每公尺 1.3 微亨利( $1.3 \mu H/m$ )，引線的長度假設為 1.83 公尺，雷突波的電流上升率以  $20kA/\mu s$ 。

在 JK 廠家的避雷器的定型試驗報告實施前波電壓測試，選用前波電壓數據為表 4-44 試樣 #3，三次測試的電壓取平均值來計算  $(32.48+32.48+32.32)kV/3=32.42kV$ ，雷突波保護電壓等級選用表 4-45 試樣 #3 放電電壓三次試驗中作平均  $(28+28+28)kV/3=28kV$ 。

依上述數據代入  $PM_{L1}$ 、 $PM_{L2}$  保護裕度均有符合保護範圍，如式(4-19)、式(4-20)。

$$PM_{L1} = \left( \left[ \frac{CWW}{FOW + (1.3\mu H / m \times 1.83m)(20kA / \mu s)} \right] - 1 \right) \times 100\% = 51.75\% \geq 20\% \quad (4-19)$$

$$PM_{L2} = \left( \left[ \frac{BIL}{LPL} \right] - 1 \right) \times 100\% = 292.5\% \geq 20\% \quad (4-20)$$

表 4-44 廠家實測放電電壓-時間特性試驗(試樣編號#01、#02、#03)

衝擊電 流波形 ( $\mu$ s)	成品 試樣 編號	第 1 次		第 2 次		第 3 次	
		衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)	衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)	衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)
0.51	#01	10.03	32.4	10.12	31.68	10.24	32.48
	#02	10.27	32.0	10.21	32.16	10.15	32.80
	#03	10.18	32.48	10.12	32.48	10.12	32.32

合格標準：1. 避雷器兩端(包括引線)測量放電電壓，不得超過表中所列數值為合格。

2. 取  $0.5 \mu$ s 時之放電電壓值，對 9kV 級避雷器其未 40kV(波峰值)為合格

表 4-45 廠家放電電壓-電流測試結果(試樣編號#01、#02、#03)

衝擊電流 波形 ( $\mu$ s)	成品 試樣 編號	第 1 次		第 2 次		第 3 次	
		衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)	衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)	衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)
7.75×19.2	#01	5.04	26.8	5.04	27.2	5.12	27.2
		10.08	28.4	10.08	28.4	10.08	28.4
		20.0	31.2	20.0	31.2	20.0	30.8
	#02	5.04	26.8	5.04	26.8	5.04	26.8
		10.2	27.2	10.2	27.2	10.0	27.2
		20.0	30.4	20.2	31.2	20.2	31.2
	#03	5.04	26.8	5.04	26.4	5.04	26.4
		10.08	28.0	10.0	28.0	10.0	28.0
		20.2	30.8	20.2	30.4	20.2	30.4

#### 4.8.4 標準文獻與廠家試驗報告比對

##### 一、避雷器絕緣耐力試驗

依照 IEEE C62.11 8.1 節 Arrester Insulation Withstand Test，試驗條件在於線路端與接地端，其試驗對象將避雷器內部氧化鋅元件取出以絕緣物取代，依避雷器責務電壓為 9kV 為配電級避雷器，試驗衝擊波電壓依照 IEEE

C62.11 Table 4 如表 4-46 所示，廠家依標準測試試驗，使用  $1.2 \times 50 \mu s$  正負脈衝電壓進行測試，測試結果如表 4-47 所示。廠家測試結果符合 IEEE C62.11 標準，試驗進行中未發生閃絡或其他傷害。

表 4-46 額定電壓 9kV 絕緣耐壓試驗

額定電壓	衝擊電壓(kV) 1.2×50μs 波峰值	60Hz 1 分鐘/乾式 電壓(kV rms)	60Hz 10 秒鐘/濕式 電壓(kV rms)
9kV	75	27	24

表 4-47 廠家脈衝電壓測試結果

試驗項目	成品試樣編號	#15	#16	#17
衝擊電壓試驗	正波 (1.2×50.8 μs)	78.5 kV	77.0 kV	78.0 kV
		78.5 kV	76.5 kV	77.5 kV
		78.5 kV	77.0 kV	77.5 kV
	負波 (1.16×50.6 μs)	78.0 kV	77.0 kV	78.0 kV
		78.0 kV	77.0 kV	78.0 kV
		78.0 kV	78.0 kV	78.0 kV
交流耐電壓試驗	AC 60Hz 1 min 乾式耐壓	29.0 kV	29.0 kV	29.0 kV

## 二、放電電壓-電流特性試驗

依照 IEEE C62.11 8.3.1 節 Discharge Voltage-Current Characteristic Test，以  $8 \times 20 \mu s$  之波型衝擊電流通過避雷器，電流之波峰值分別為 1500A、3000A、5000A、10000A、20000A 對應之放電電壓，放電電壓標準值須符合台電 C002 規定，如表 4-48 所示。依照 IEEE C62.22 Table 9 避雷器波頭與放電電壓-電流保護特性，如表 4-49 所示。廠家依標準測試試驗，實測使用  $7.75 \times 19.2 \mu s$  脈衝電流進行測試，測試結果如表 4-45 所示。

表 4-48 台電 C002 規定-放電電壓電流

衝擊電流波峰值	5kA	10kA	20kA
放電電壓	< 30kV	< 35kV	< 40kV

表 4-49 避雷器前波(波頭)與放電電壓-電流保護特性

Voltage ratings (rms)		Peak protective level – Range of industry maxima (kV)					
Duty-cycle rating(kV)	MCOV (kV)	Front-of-wave protective level			Discharge voltage with 8/20 wave		
		5 kA nomal duty	10 kA heavy duty	10 kA niser pole	5 kA nomal duty	10 kA heavy duty	10 kA niser pole
3	2.55	11.2-17	13.5-17	10.4	10.2-16	9.1-16	8.2
6	5.1	22.3-25.5	25.0-27	17.4-18	20.3-24	18.2-25	16.2
9	7.65	33.5-36	26.5-35.3	22.5-36	30.0-33.5	21.7-31.5	20.0-24.9
10	8.4	36.0-37.2	29.4-39.2	26.0-36	31.5-33.8	24.5-35	22.5-26.6
12	10.2	44.7-50	35.3-50	34.8-37.5	40.6-44	32.1-44	30.0-32.4
15	12.7	54.0-58.5	42.0-59	39.0-54	50.7-52	35.9-52	33.0-40.2
18	15.3	63.0-67	51.0-68	47.0-63	58.0-60.9	43.4-61	40.0-48
21	17.0	73.0-80	57.0-81	52.0-63.1	64.0-75	47.8-75	44.0-56.1
24	19.5	89.0-92	68.0-93	63.0-72.5	81.1-83	57.6-83	53.0-64.7
27	22.0	94.0-100.5	77.0-102	71.0-81.9	87.0-91.1	65.1-91	60.0-72.1
30	24.4	107.0-108	85.0-109.5	78.0-85.1	94.5-99	71.8-99	66.0-79.5
36	29.0	125.0	99.0-136	91.0-102.8	116.0	83.7-125	77.0-96

### 三、放電電壓-時間特性試驗

依照 IEEE C62.11 8.3.2 節 Discharge Voltage-Time Characteristics Test [79]，以電壓峰值和達電壓峰值的相對時間繪出電壓/時間對數的線性延伸曲線。試驗避雷器的前波保護水平是由時間  $0.5 \mu s$  之線性電壓值或前波閃絡電壓，兩者之較大值來決定。按照 IEEE C62.22 標準波頭保護保護特性如表 4-49 所示；廠家實測放電電壓-時間特性試驗如表 4-44 所示測試結果。

### 四、放電電流耐受試驗(Discharge-Current Withstand Tests) [79]

試驗項目：

A. 高電流短時間試驗 (High Current Short Duration Tests)

B. 低電流長時間試驗 (Low Current Long Duration Tests)

#### (一) 高電流-短時間試驗

試驗方法：將油浸式避雷器須放在  $75 \pm 5^\circ C$  絕緣中，並使避雷器達到  $75 \pm 5^\circ C$  之熱平衡。

試驗次數：試驗過程由避雷器的兩次放電組成，其波形為  $4 \times 10 \mu s$  大小依照 IEEE C62.11 Table 10，如表 4-50 所示。試驗時，需量測放電電流和放電電壓波形，測試樣品在兩次放電間可冷卻之環境溫度。

表 4-50 避雷器額定波形  $4 \times 10 \mu s$  最小電流峰值

Arrester classification	Minimum Crest Current (kA)
Station	65
Intermediate	65
Distribution, heavy duty	100
Distribution, normal duty	65
Distribution, light duty	40

試驗評估：在第二次電流放電後的 5 分鐘內，施加商頻交流恢復電壓 30 分鐘。對於一個完整的避雷器，其恢復電壓為最大續轉電壓乘上  $k_c$ ，故恢復電壓為  $7.65\text{kV} (V_{\text{MCOV}}) \times 1.05 (k_c)$  等於  $8.03\text{kV}$ 。加壓過程中應監測閘元件的溫度、電阻性電流分量或功率損耗，直到測量值已降至適當值(成功)或有明顯的熱崩潰條件(失敗)。

合格標準：證明其熱恢復性良好、示波紀錄無任何不正常；表 4-51、表 4-52 為高電流-短時間試驗結果。

表 4-51 高電流-短時間試驗(試樣編號#04、#05、#06)

衝擊電流 波形 ( $\mu\text{s}$ )	成品試樣 編號	第 1 次		第 2 次	
		衝擊電流 (kA)	放電電壓 (kV)	衝擊電流 (kA)	放電電壓 (kV)
4.25×10.2	#04	108.8	64.0	107.2	64.0
	#05	106.8	64.0	106.4	64.0
	#06	107.2	62.4	108.8	64.0

表 4-52 電阻性電流分量值降低數據(試樣編號#04、#05、#06)

試驗電壓 (kV)	加壓時間 (min)	成品試驗編號		
		#04	#05	#06
		電阻性電流分量值(mA)		
8.03	0	1.003	1.102	1.211
	10	0.851	1.007	1.070
	20	0.749	0.944	0.998
	30	0.512	0.726	0.812

## (二) 低電流-長時間試驗

此試驗應在完整避雷器或者比例元件上進行。該試驗要求責務電壓額定試驗值須 3kV 以上，但不超過 9kV。

試驗程序：

- A. 本試驗之放電電流波形需接近方波，依 IEEE C62.11 Table 12，如表 4-53 所示，測試之方波值須大於表中最小電流值。

表 4-53 低電流-長時間試驗最小電流值

Arrester classification	Minimum Crest Current (kA)
Station	65
Intermediate	65
Distribution, heavy duty	100
Distribution, normal duty	65
Distribution, light duty	40

- B. 試驗須依下列方法進行 20 次動作，測試樣品應由 3 組、每組 6 個連續放電動作組成，之後有一個一組兩個放電動作，兩次放電動作間隔時間為 50-60 秒。前 18 次動作的環境溫度應在  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$  絕緣油中，測試樣品應保持前述溫度下足夠長的時間已達到熱平衡。

在第 6 次、12 次級 18 次試驗前允許降低至室溫，第 19 次及第 20 次試驗前須於絕緣油中加溫至  $120\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。在第 20 次動作後的 5 分鐘內，應施加商頻恢復電壓至少 30 分鐘。對於完整之避雷器，其恢復電壓為  $V_{\text{MCOV}}\times k_c$ 。加壓過程中應監測閥元件的溫度、電阻性電流分量或功率損耗，直到測量值已降至適當值(成功)或有明顯的熱崩潰條件(失敗)。

- C. 在測試樣品動作之前兩次動作和最後兩次動作期間，需記錄其中一個完整的放電電壓和放電電流波形，電壓電流不需要同時記錄。

測試評估：在每一個試驗 B 過程完畢，測試樣品達到熱平衡時，測試樣品應熱卻到接近環境溫度，然後再重複試驗。當下列情況發生時，認為該設計是適當的：

- 證明其熱恢復性良好。
- 避雷器無任何異狀。
- 示波紀錄無任何不正常。
- 試驗前、後之 10kA 放電電壓變化值不超過測量值的  $\pm 10\%$ 。

實測結果：如表 4-54、表 4-55、表 4-56 所示：

表 4-54 低電流-長時間試驗(試樣編號#07、#08、#09)

次數	成品試樣編號					
	#07		#08		#09	
	衝擊 電流(A)	持續 時間(ms)	衝擊 電流(A)	持續 時間(ms)	衝擊 電流(A)	持續 時間(ms)
第 1 次放電	264	2.0	261	2.0	261	2.0
第 2 次放電	255	2.0	258	2.0	261	2.0
第 19 次放電	258	2.0	255	2.0	261	2.0
第 20 次放電	258	2.0	258	2.0	261	2.0

表 4-55 電阻性電流分量值降低數據(試樣編號#07、#08、#09)

試驗電壓 (kV)	加壓時間 (min)	成品試驗編號		
		#07	#08	#09
		電阻性電流分量值(mA)		
8.03	0	0.958	0.877	0.932
	10	0.796	0.812	0.785
	20	0.655	0.754	0.652
	30	0.543	0.646	0.593

表 4-56 試驗前、後之 10kA 放電電壓變化值不超過測量值的 $\pm 10\%$

衝擊電流 波形( $\mu$ s)	成品試樣 編號	低電流長時間試驗 -試驗前		低電流長時間試驗 -試驗後		放電電壓 前、後 變化率 (%)
		衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)	衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)	
7.75 $\times$ 19.2	#07	10.00	28.0	10.08	28.8	+2.0
	#08	10.16	28.4	10.00	28.8	+1.4
	#09	10.16	28.4	10.08	28.8	+1.4

## 五、無線電干擾試驗

測試方法：依 IEEE C62.11 之“Internal-Ionization Voltage (IIV) and Radio-Influence Voltage (RIV) Tests”，RIV 與 IIV 測量頻率接近 1.0MHz。

在避雷器尚未接於試驗迴路前，先加電壓值為  $V_{MCOV} \times kc = 8.03kV$  ( $kc=1.05$ 、 $V_{MCOV}=7.65kV$ )之電源依決定周圍無線電干擾電壓值。若於試驗電源加壓 10 秒鐘後，周圍無線電干擾電壓逐漸減少即可進行試驗，施加  $V_{MCOV} \times kc = 8.03kV$ ，於 5 分鐘內開始量測其 RIV 與 IIV 值。

設備要求：設備和方法符合 NEMA107-1987。

試驗樣品：油浸式避雷器需放入室溫的絕緣油中。

合格標準：量取被試樣品無線電干擾電壓不大於  $250 \mu V$ ；試驗結果如表 4-57 所示。

表 4-57 無線電干擾電壓試驗結果

試驗電壓	成品試驗編號	#01	#02	#03
8.05 kV	背景值( $\mu V$ )	5	6	6
	測試值( $\mu V$ )	16	16	18
	實際值( $\mu V$ )	11	10	12

## 六、暫時性過電壓試驗

測試方法：依 IEEE C62.11 之 Temporary Overvoltage (TOV) Tests 暫時性過電壓試驗 8.12 節規定辦理。

試驗程序：此試驗程序的目的是確定避雷器對暫時性過電壓之能力。製造商所公布的數據應包括橫坐標為時間縱座標為  $V_{MCOV}$  之曲線。除此之外，製造商還要公布 TOV 表以  $V_{MCOV}$  之 p.u. (標么值)標示至少對應三個數值，並對應之時間為 0.02，0.1，1，10，100，1000 秒；表值應可從曲線求得，並且包括無優先責務和優先責務的數據；所公布之曲線和表格應說明避雷器使用之額定範圍。TOV 試驗應在下述時間範圍(a)和(f)內任意三個時間範圍內對完整的避雷器或者是比例元件上進行。單位為秒的時間範圍如下：

- (a) 0.01-0.1, (b) 0.11-1.0, (c) 1.1-10, (d) 10.1-100, (e) 101-1000  
(f) 1001-10000

試驗要求：對於配電避雷器，試驗應在完整避雷器上進行，並且其責務電壓額定應為 9-12kV。連接線應不大於 AWG#12。對於一定避雷器的型式和設計，當有使用不同尺寸的電阻片時，對於 TOV 試驗所選擇的電阻片應為每單位  $V_{MCOV}$  之最小材料體積。

試驗準備：在試驗之前，如果施加如 IEEE C62.11 第 8.2 節之商頻閃絡電壓，應在  $20\pm5^{\circ}\text{C}$  時量測 IEEE C62.11 Table 6 之分類電流的放電電壓。

試驗線路：避雷器或比例元件應連結至頻率為 48-62Hz 電源兩端，一般試驗頻率(為 50 或 60Hz)應予公布數據中說明，在過電壓時，應測量避雷器兩端之商頻電壓之峰值。所測得之最小峰值除以  $(\text{SQRT}(2))\times V_c$  就是標註數據時所需使用的 p.u. 值。

試驗過程：試驗應在穩定之空氣中進行，其溫度為  $20\pm5^{\circ}\text{C}$ ；油浸式避雷器需放入  $120\pm5^{\circ}\text{C}$  絕緣油中並達熱平衡。

無優先責務試驗：在 IEEE C62.11 第 8.12.1 節所述之任一時間範圍內施以商頻過電壓。在過電壓後之 1 秒鐘之內，施加恢復電壓最少 30 分鐘，此時要監測閘元件之溫度、電阻性電流、或者電力損失，直到量測值明顯減少(成功)或明顯達熱崩潰條件(失敗)。對 5 個測試樣品重複此試驗，每一個試品均須於選定之 5 個時間範圍內進行測試，放入  $120\pm5^{\circ}\text{C}$  絕緣油中並達熱平衡。

合格標準：當測試樣品在 3 個選定之時間範圍內作完試驗後，將其冷卻到  $20\pm5^{\circ}\text{C}$ 。然後，重複 IEEE C62.11 第 8.12.1.1 節試驗，在下列情況下，試品認為通過試驗。

- a. 試驗前後之 10kA 放電電壓變化不超過 10%。
- b. 避雷器未發生任何損壞。

當全部 5 個試品都已通過 TOV 電壓試驗和其試驗之對應時間等於或者大於在曲線上所標示者，表示製造商所公佈的曲線確認通過了評估標準。。試驗結果如表 4-58~表 4-67、圖 4-84~圖 4-88 所示，標示 6 個時間範圍內進行試驗結果。(註：施加恢復電壓 8.03kV 至少 30 分鐘，監測電阻性電流分量值；加壓 30 分鐘後，試品電阻性電流分量值逐漸降低。)

表 4-58 暫時性過電壓試驗(0.01~0.1 秒)

成品 試樣 編號	時間 範圍 (sec)	試驗 電壓 (kV)	動作 時間 (sec)	衝擊 電流 波形 ( $\mu$ s)	TOV 試驗-試驗前		TOV 試驗-試驗後		放電電壓 前、後 變化率 (%)
					衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)	衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)	
#10	0.01~0.1	9.5	0.055	7.75×19.2	10.08	28.8	10.08	29.6	+2.7
#11		9.5	0.060		10.08	28.8	10.08	29.6	+2.7
#12		9.6	0.043		10.00	28.8	10.00	29.6	+2.7
#13		9.4	0.049		10.08	29.2	10.00	29.2	+0.0
#14		9.3	0.049		10.00	29.2	10.00	29.6	+1.3

表 4-59 暫時性過電壓試驗(0.01~0.1 秒)後施加恢復電壓電阻性電流分量值

試驗 電壓 (kV)	加壓 時間 (min)	成品試驗編號				
		#10	#11	#12	#13	#14
		電阻性電流分量值(mA)				
8.03	0	0.733	0.647	0.688	0.801	0.742
	10	0.715	0.621	0.654	0.726	0.583
	20	0.646	0.573	0.613	0.679	0.624
	30	0.596	0.526	0.592	0.631	0.578

表 4-60 暫時性過電壓試驗(0.11~1.0 秒)

成品 試樣 編號	時間 範圍 (sec)	試驗 電壓 (kV)	動作 時間 (sec)	衝擊 電流 波形 ( $\mu$ s)	TOV 試驗-試驗前		TOV 試驗-試驗後		放電電壓 前、後 變化率 (%)
					衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)	衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)	
#10	0.11~1.0	9.0	0.650	7.75×19.2	10.08	28.8	10.00	29.2	+1.3
#11		8.9	0.157		10.08	28.8	10.08	29.2	+1.3
#12		8.9	0.177		10.00	28.8	10.00	29.6	+2.7
#13		9.1	0.184		10.08	29.2	10.00	30.0	+2.7
#14		8.9	0.225		10.00	29.2	10.00	30.4	+4.1

表 4-61 暫時性過電壓試驗(0.11~1.0 秒)後施加恢復電壓電阻性電流分量值

試驗 電壓 (kV)	加壓 時間 (min)	成品試驗編號				
		#10	#11	#12	#13	#14
		電阻性電流分量值(mA)				
8.03	0	0.803	0.831	0.796	0.758	0.699
	10	0.762	0.766	0.724	0.683	0.643
	20	0.710	0.713	0.676	0.597	0.579
	30	0.614	0.649	0.610	0.533	0.521

表 4-62 暫時性過電壓試驗(10.1~100 秒)

成品 試樣 編號	時間 範圍 (sec)	試驗 電壓 (kV)	動作 時間 (sec)	衝擊 電流 波形 (μs)	TOV 試驗-試驗前		TOV 試驗-試驗後		放電電壓 前、後 變化率 (%)
					衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)	衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)	
#10	10.1~100	8.7	11.65	7.75×19.2	10.08	28.8	10.08	30.0	+4.1
#11		8.7	13.70		10.08	28.8	10.00	30.4	+5.5
#12		8.8	14.20		10.00	28.8	10.00	29.2	+1.3
#13		8.8	14.62		10.08	29.2	10.08	29.6	+1.3
#14		8.8	14.00		10.00	29.2	10.00	29.6	+1.3

表 4-63 暫時性過電壓試驗(10.1~100 秒)後施加恢復電壓電阻性電流分量值

試驗 電壓 (kV)	加壓 時間 (min)	成品試驗編號				
		#10	#11	#12	#13	#14
		電阻性電流分量值(mA)				
8.03	0	1.108	0.958	1.035	1.025	0.971
	10	0.881	0.826	0.925	0.895	0.827
	20	0.763	0.717	0.834	0.794	0.769
	30	0.628	0.639	0.684	0.703	0.673

表 4-64 暫時性過電壓試驗(101~1000 秒)

成品 試樣 編號	時間 範圍 (sec)	試驗 電壓 (kV)	動作 時間 (sec)	衝擊 電流 波形 ( $\mu$ s)	TOV 試驗-試驗前		TOV 試驗-試驗後		放電電壓 前、後 變化率 (%)
					衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)	衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)	
#10	101~1000	8.3	122.3	7.75×19.2	10.08	28.8	10.00	29.6	+2.7
#11		8.3	121.5		10.08	28.8	10.00	30.0	+4.1
#12		8.3	121.6		10.00	28.8	10.00	30.0	+4.1
#13		8.3	121.5		10.08	29.2	10.00	30.0	+2.7
#14		8.3	120.0		10.00	29.2	10.00	30.0	+2.7

表 4-65 暫時性過電壓試驗(101~1000 秒)後施加恢復電壓電阻性電流分量值

試驗 電壓 (kV)	加壓 時間 (min)	成品試驗編號				
		#10	#11	#12	#13	#14
		電阻性電流分量值(mA)				
8.03	0	0.932	1.003	0.926	0.874	1.112
	10	0.854	0.881	0.814	0.743	0.836
	20	0.723	0.762	0.739	0.661	0.715
	30	0.601	0.635	0.587	0.579	0.647

表 4-66 暫時性過電壓試驗(1001~10000 秒)

成品 試樣 編號	時間 範圍 (sec)	試驗 電壓 (kV)	動作 時間 (sec)	衝擊 電流 波形 ( $\mu$ s)	TOV 試驗-試驗前		TOV 試驗-試驗後		放電電壓 前、後 變化率 (%)
					衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)	衝擊 電流 (kA)	放電 電壓 (kV)	
#10	1001~ 10000	7.7	1082	7.75×19.2	10.08	28.8	10.00	30.4	+5.5
#11		7.7	1094		10.08	28.8	10.00	30.0	+4.1
#12		7.7	1106		10.00	28.8	10.16	29.6	+2.7
#13		7.7	1079		10.08	29.2	10.00	30.0	+2.7
#14		7.7	1088		10.00	29.2	10.00	30.0	+2.7

表 4-67 暫時性過電壓試驗(1001~10000 秒)

試驗 電壓 (kV)	加壓 時間 (min)	成品試驗編號				
		#10	#11	#12	#13	#14
		電阻性電流分量值(mA)				
8.03	0	0.584	0.545	0.623	0.611	0.572
	10	0.516	0.526	0.595	0.582	0.510
	20	0.478	0.488	0.535	0.513	0.473
	30	0.459	0.451	0.493	0.466	0.422

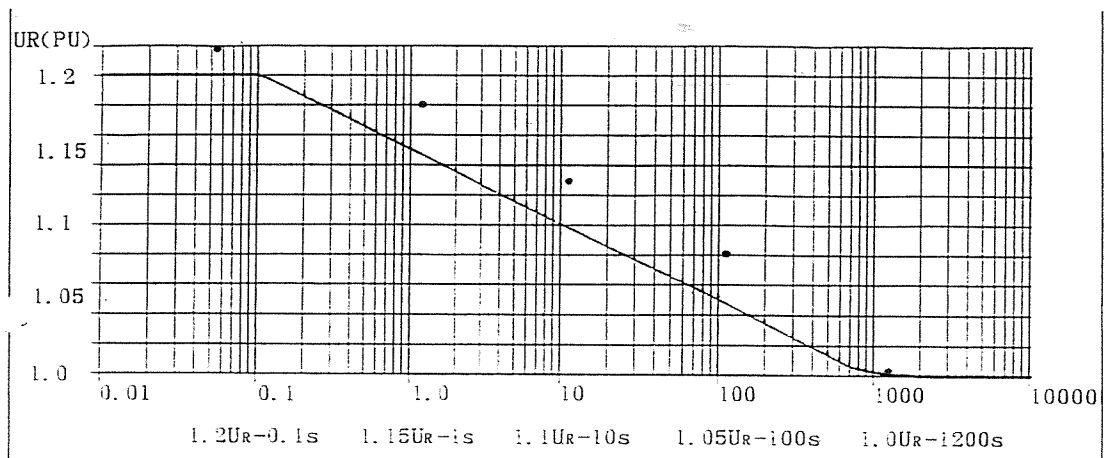


圖 4-84 暫時性過電壓試驗動作時間試驗曲線圖(試樣編號#10)

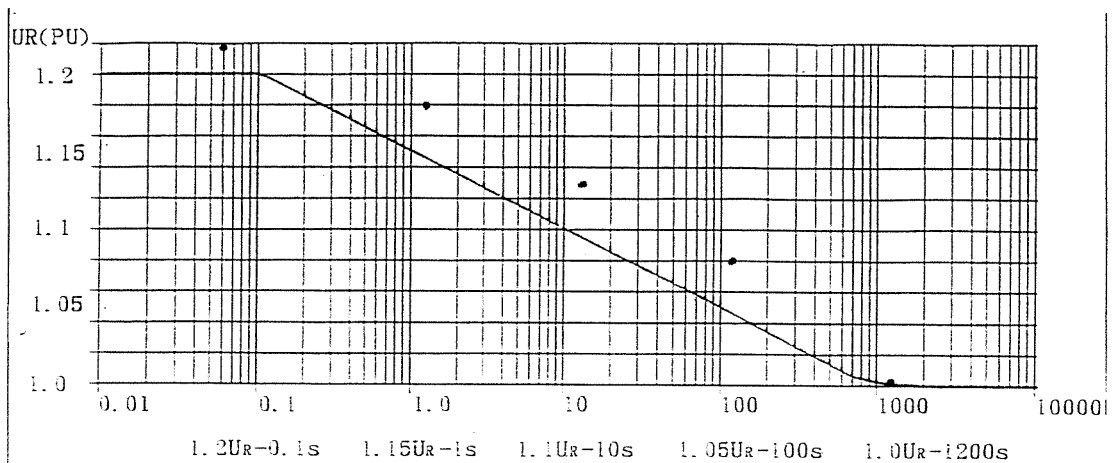


圖 4-85 暫時性過電壓試驗動作時間試驗曲線圖(試樣編號#11)

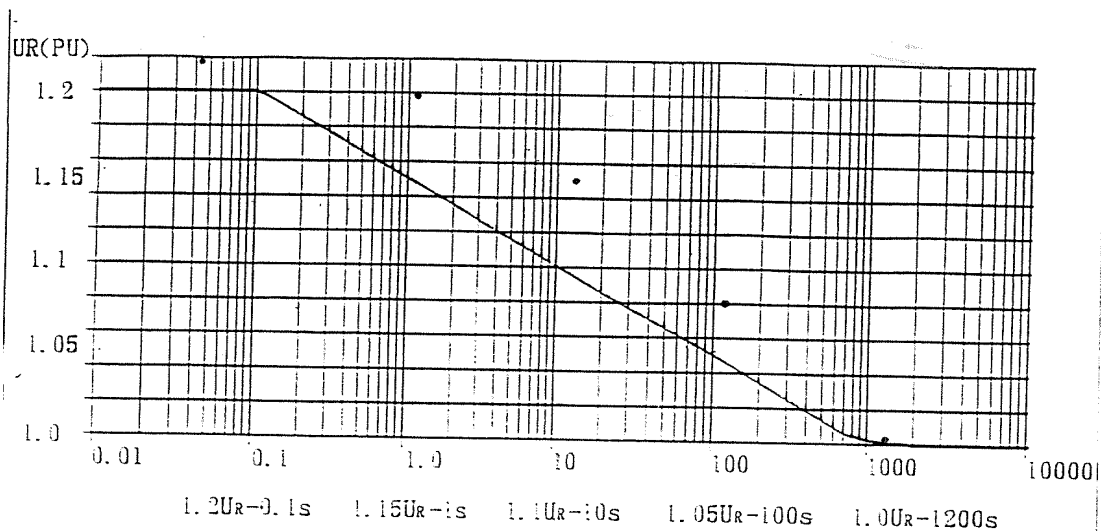


圖 4-86 暫時性過電壓試驗動作時間試驗曲線圖(試樣編號#12)

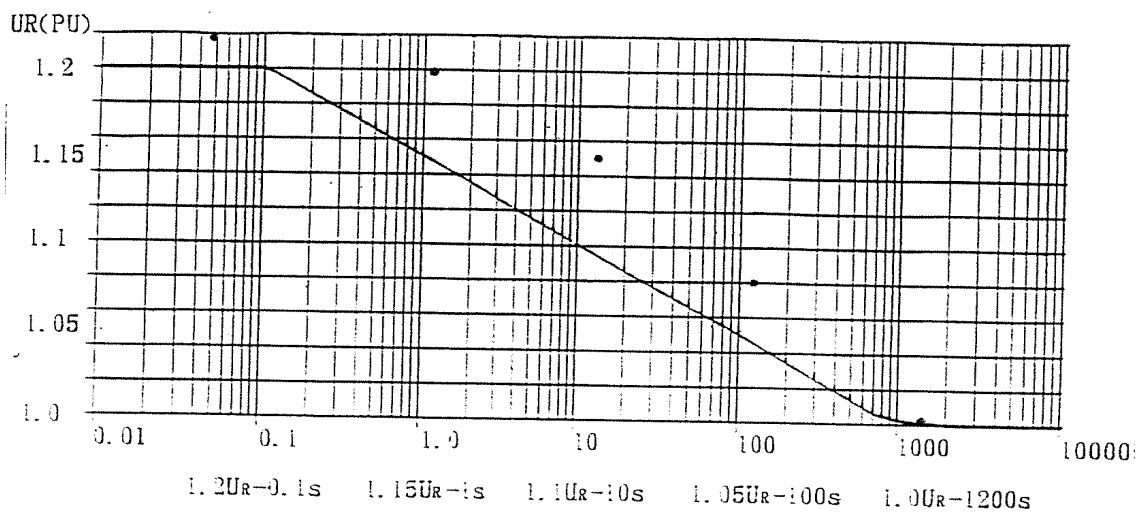


圖 4-87 暫時性過電壓試驗動作時間試驗曲線圖(試樣編號#13)

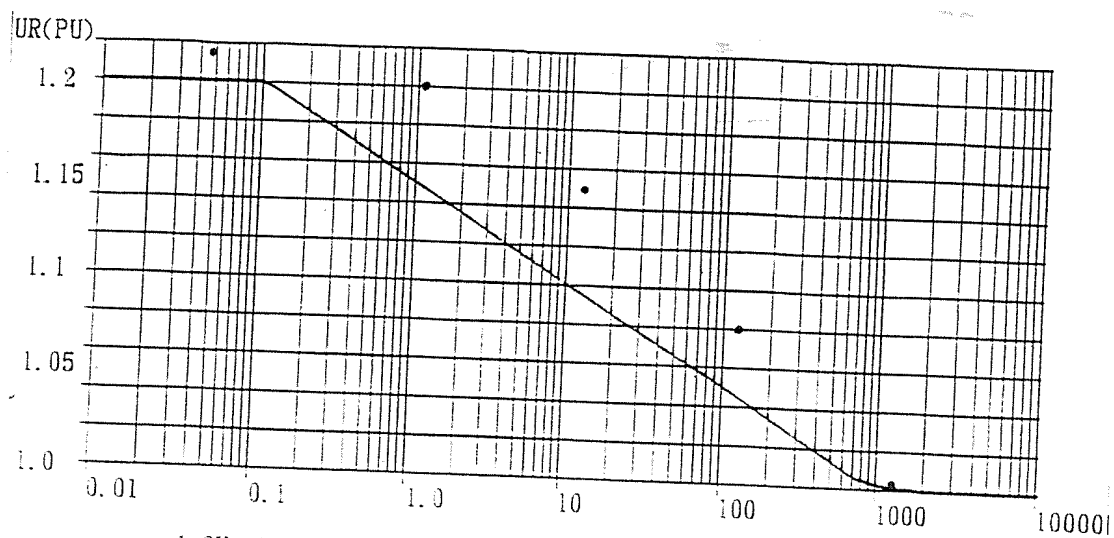


圖 4-88 暫時性過電壓試驗動作時間試驗曲線圖(試樣編號#14)

## 七、責務試驗

試驗程序：依 IEEE C62.11 第 8.11.1.3 節規定辦理。將三具整支避雷器拆解成九片氧化鋅元件，每一支避雷器取一片氧化鋅元件，共三片氧化鋅元件，將他靜至在靜止空氣中，在溫度  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$  中，先進行放電電壓試驗，既對避雷器支氧化鋅元件實施一次  $[8/20\mu\text{s}; 10\text{kA}$  電流衝擊試驗]，量測記錄其殘餘電壓值。避雷器支氧化鋅元件應連接在頻率 48 至 62Hz 之線路上，施加工頻電壓之電壓值為責務電壓( $V_r=3\text{kV}$ )之  $K_r$  倍( $K_r=1.0$ )；其電壓的峰值在有加和未加避雷器之氧化鋅元件間之差異不超過 1%。在加壓下施行 20 同極性的  $8/20\mu\text{s}$ 、 $10\text{kA}$  的衝擊電流試驗，每次間隔時間 50~60 秒；放電電壓的突波初始值應在電源電壓達到峰值前約 60 度，且突波的極性要與電源電壓的極性相同。再經 20 次責務試驗之後，將避雷器之氧化鋅元件加熱到  $120\pm 5^{\circ}\text{C}$  的熱平衡狀況，在施加最高續轉電壓  $V_{\text{MCOV}}$  ( $V_{\text{MCOV}}=2.55\text{kV}$ )之  $K_c$  倍( $K_c=1.05$ )的電源電壓下，再進行  $8/20\mu\text{s}$ 、 $40\text{kA}$  衝擊電流試驗兩次，每次間隔時間 50~60 秒。

試驗評估：

1. 五分鐘內，施加最高續轉操作電壓  $V_{\text{MCOV}}$  ( $V_{\text{MCOV}}=2.55\text{kV}$ )之  $K_c$  倍( $K_c=1.05$ )的商頻恢復電壓，時間持續 30 分鐘，並測量電阻性電流或功率損失及氧化鋅元件溫度，直到值下降。
2. 待試樣溫度降之接近室溫後，依再進行放電電壓試驗，即對避雷器之氧化鋅元件實施一次  $[8/20\mu\text{s}; 10\text{kA}$  的衝擊電流試驗]，量測記錄其殘餘電壓值。
3. 證明熱恢復良好
4. 外掛沒有明顯的損壞
5. 責務試驗前、後， $8/20\mu\text{s}; 10\text{kA}$  放電電壓變化不超過 10%。

試驗結果：三具整支避雷器式樣編號分別為#18、#19、#20，拆解成 9 片氧化鋅元件，在每一支避雷器取依片氧化鋅元件，共三片氧化鋅元件，試片編號分別為#1697、#1702、#1703，經責務試驗後，外觀無異狀，試驗結果如表 4-68 所示。

表 4-68 責務電壓試驗數據(環境溫度：23℃)

氧化鋅元件試片編號		#1697	#1702	#1703
責務試驗前 8/20 $\mu$ s、10kA 殘壓(kV)		9.50	9.51	9.60
責務電壓 $U_R$ (kV)		3.0	3.0	3.0
$U_R \cdot K_r$ (kV)		3.0	3.0	3.0
$U_R \cdot K_r=3.0$ kV 下， 施加 8/20 $\mu$ s、10kA； 點火角度電壓峰值前 60 度， 每次間隔時間約 50~60 秒	衝擊 次數	20	20	20
絕緣油箱遇熱(℃)		120 $\pm$ 2	120 $\pm$ 2	120 $\pm$ 2
最高連續操作電壓 $U_C$ (kV)		2.55	2.55	2.55
$K_C \times U_C$ (kV)		2.68	2.68	2.68
試驗電壓 $K_C \times U_C=2.68$ kV 時， 施加 8/20 $\mu$ s、40kA， 衝擊耐受兩次， 每次間隔時間約 50~60 秒	第一次	41.2	40.0	40.4
	第二次	40.8	41.6	40.0
經 4 分鐘施加 $U_C$ 、 $K_C$ 電壓(kV)		2.68	2.68	2.68
在試驗電壓 $U_C$ 、 $K_C=2.68$ kV 下 功率消耗(W)	1 分鐘	2.72	2.63	2.68
	15 分鐘	2.13	1.88	2.04
	30 分鐘	1.71	1.16	1.53
責務試驗後 8/20 $\mu$ s、10kA 殘壓(kV)		9.77	9.79	9.82
責務試驗前、後殘壓變化率(%)		+2.8	+2.9	+2.3
氧化鋅元件試片狀態檢查		無異狀	無異狀	無異狀

註：依 IEEE C62.11 第 8.5.2 節規定，其  $K_r=1.0$  及  $K_c=1.05$  為最大值，故採用  $K_r=1.0$  及  $K_c=1.05$  執行責務試驗。

#### 4.8.5 模型建立及參數設定

本報告針對避雷器放置於一次電源測與限流熔絲負載側比較當雷擊時，避雷器的位置對於整體配電系統的影響以及對 CP 與 JK 廠家避雷器之參數進行模擬，當雷擊發生時觀察重要位置之電壓電流變化是否對設備造成影響及破壞。分析工具應用電磁暫態分析程式 ATP 來構建桿上密封型變壓器內部模型，以 ATP 中之 ATPDraw 模組進行雷擊突波，分析雷擊於桿上變壓器一次側時，觀察重要位置電壓、電流變化。

##### 一、系統模型之建立及參數設定

應用電磁暫態分析軟體程式 ATP 建構整體密封型桿上變壓器系統模型如圖 4-89 所示，並對桿上變壓器內部模型設定相關參數。

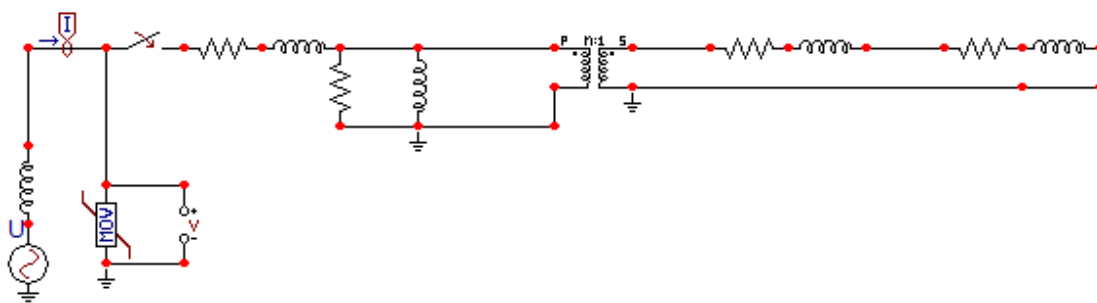


圖 4-89 密封型桿上變壓器系統模型

### (一) 電源模型與參數設定

台電公司規定 11.4kV 配電系統短路容量為 250MVA，表 4-69 為配電系統 11.4kV 電源端和系統等效阻抗之參數值，計算系統端電源及阻抗之參數值如式(4-21)，圖 4-90 為配電系統 11.4kV 電源端和系統等效阻抗模型。

表 4-69 配電系統 11.4kV 電源資料

系統電源	參數值
電壓 $V_s$	11.4kV
系統短路容量	250MVA
系統短路阻抗 $X_s$	0.5198 $\Omega$

參數  $X_s$  計算如下：

$$X_s = \frac{(11.4kV)^2}{250MVA} = 0.5198(\Omega) \quad (4-21)$$

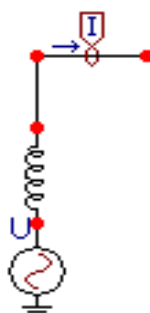


圖 4-90 配電系統 11.4kV 電源及其等效阻抗 ATP 模型

## (二) 變壓器模型及參數設定

變壓器內部等效電路模型如圖 4-91 所示。根據廠家提供變壓器定型試驗報告，符合台電材規 C035 規範，一次側電壓為 6.9kV、二次側電壓為 240V 變壓器，依開、短路試驗的實測值如表 4-70 所示。

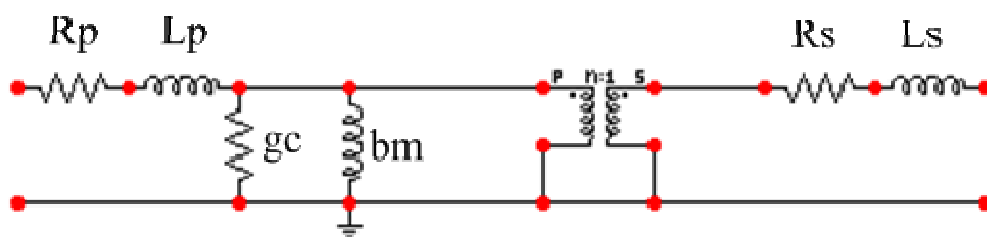


圖 4-91 變壓器內部等效電路模型

表 4-70 變壓器(6.9kV/240V)資料

項目	變壓器
變壓器容量	25kVA
一次側電壓	6.9kV
二次側電壓	240V
高壓側線圈電阻 $R_p$	8.861 $\Omega$
低壓側線圈電阻 $R_s$	10.5695m $\Omega$
高壓側線圈電感 $L_p$	27.9mH
低壓側線圈電感 $L_s$	0.03375mH
激磁電導 $g_c$	0.9865 $\mu$ S
激磁電納 $b_m$	1.0974 $\mu$ S

## (三) 避雷器模型及參數設定

由避雷器 CP 與 JK 兩廠家[51,82]取得 11.4kV 級避雷器電壓-電流特性曲線，其參數依據廠家提供如表 4-71、表 4-72 所示，避雷器參數設定及特性曲線如圖 4-92、圖 4-93 所示，其 JK 廠家之避雷器參數設定選用定型試驗報告中式成品編號式樣#3。

表 4-71 避雷器之電壓-電流特性曲線設定值(CP 廠家)

電壓等級	動作電壓	V-I (Volt-Ampere)						
		V	24.6kV	26.1kV	27.3kV	29.8kV	33kV	37.1kV
11.4kV	24.6kV	I	1.5kA	3kA	5kA	10kA	20kA	40kA

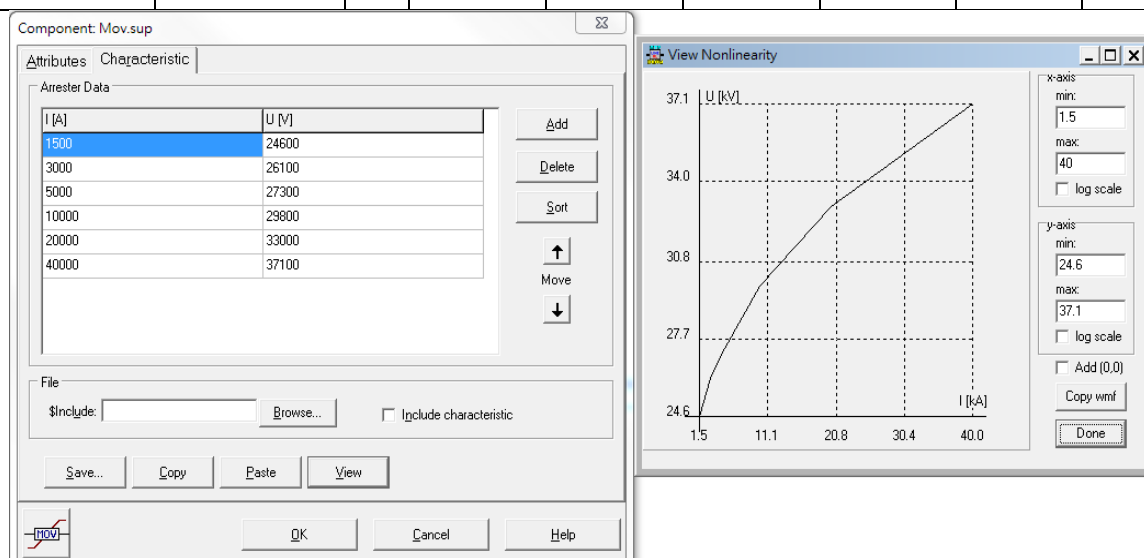


圖 4-92 避雷器參數設定及特性曲線(CP 廠家)

表 4-72 避雷器之電壓-電流特性曲線設定值(JK 廠家)

電壓等級	動作電壓	V-I (Volt-Ampere)			
11.4kV	26.8kV	V	27.2kV	28.4kV	31.2kV
		I	5.04kA	10.8kA	20kA

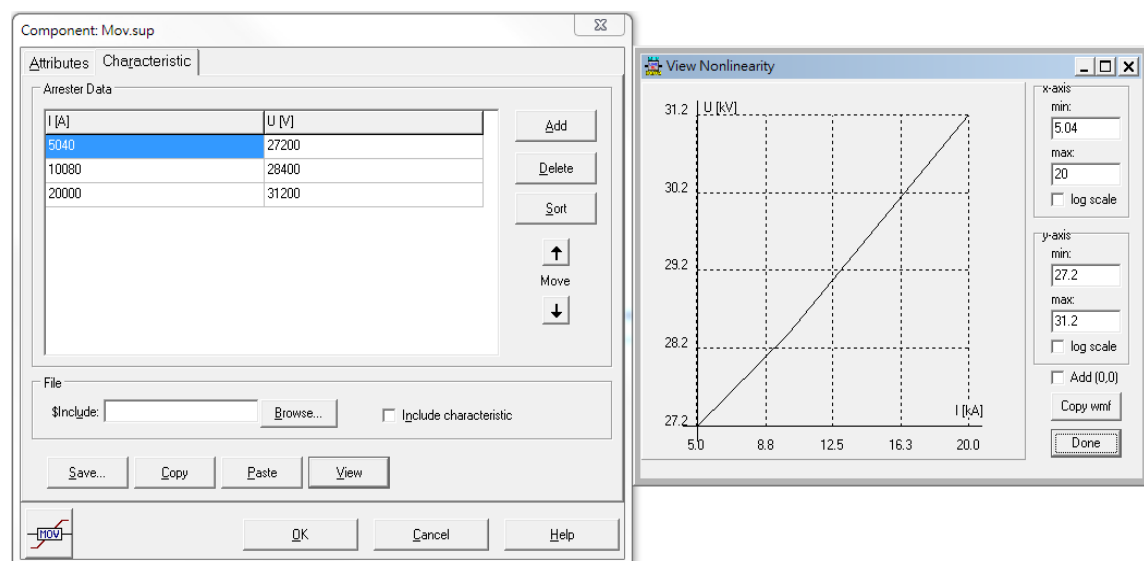


圖 4-93 避雷器參數設定及特性曲線(JK 廠家)

#### (四) 雷擊電流( $8/20\mu s$ )模型建立與參數設定

雷擊電流源模型建立及參數設定參考 IEEE Std 4-1995 [74]，定義脈衝電流波形波頭時間為  $8\mu s$  與波尾時間為  $20\mu s$ ，雷電流峰值考慮  $35kA$ ，模型建立及參數設定如圖 4-94 所示，利用 ATP 內的 PlotXY 繪圖程式、繪出雷突波電流波形如圖 4-95。

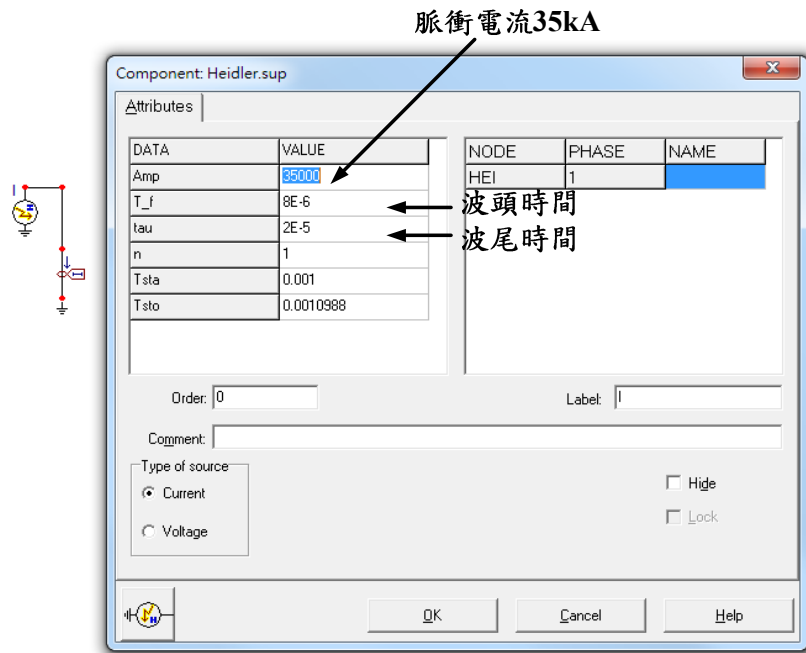


圖 4-94 雷擊電流  $8/20\mu s$  模型建立及參數設定

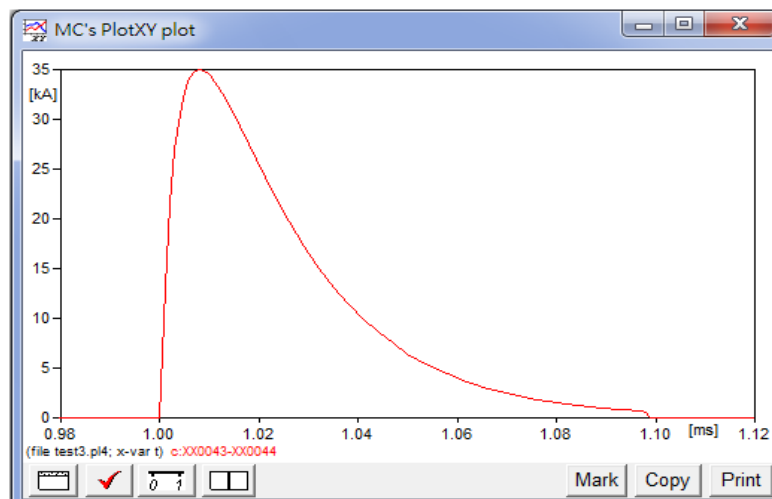


圖 4-95 雷擊電流  $8/20\mu s$  模擬波形

#### (五) 負載模型與參數設定

依桿上變壓器二次側輸出額定電壓  $240V/120V$ ，額定輸出容量  $25kVA$

功率因數為 0.8，本報告採二次側輸出額定電壓 240V 作模擬分析，計算二次側負載阻抗如式(4-22)-式(4-25)，建立負載參數如表 4-73，負載模型如圖 4-96 所示。

$$Z_L = \frac{(240)^2}{25KVA} = 2.304(\Omega) \quad (4-22)$$

$$R_L = 2.304 \times 0.8 = 1.8432(\Omega) \quad (4-23)$$

$$X_L = 2.304 \times 0.6 = 1.3824(\Omega) \quad (4-24)$$

$$L_L = \frac{1.3824}{2\pi f} = 3.667(mH) \quad (4-25)$$

表 4-73 負載等效阻抗資料

	S (kVA)	PF	$R_L + jX_L(\Omega)$	$R_L(\Omega)$	$L_L(mH)$
負載等效 阻抗	25	0.8	$1.8432 + j1.3824$	1.8432	3.667

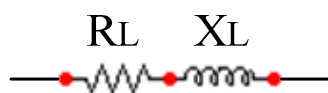


圖 4-96 負載等效阻抗模型

#### 4.8.6 密封型桿上變壓器雷擊突波分析

##### 一、案例分析條件說明

首先輸入兩廠家避雷器參數時，觀察試驗雷電流  $8/20 \mu s$  注入於變壓器一次側，考慮波峰電流 35kA，波頭時間  $8 \mu s$  及波尾時間  $20 \mu s$ ，觀察重要位置的電壓電流變化；再比較避雷器設置位置不同，遭受雷擊時對變壓器內部的影響；並觀察桿上密封型變壓器一、二次側電壓和電流變化、以及對於限流熔絲的影響。模擬總時間為 0.01 秒，雷擊發生於 0.001 秒，雷擊結束於 0.0010988 秒，取樣時間為  $1 \mu s$ 。

##### 二、雷電流注入電源端一次側分析

雷電流( $8/20 \mu s$ ) 35kA 注入於電源一次側端，觀察變壓器一次側電壓與限流熔絲上的電流，避雷器上電壓與電流、二次側電壓電流，將各項觀察點暫態最大值以表列出，並記錄觀察項目之模擬波形。

依據 CP 廠家避雷器資料輸入，進行雷電流 35kA 注入電源一次側端分析結果，變壓器一次側端電壓為 36249.7734V、端電流最大暫態值為 5.4214A，避雷器跨壓為 36249.7734V、電流最大暫態值為 34871.1289A，變壓器二次側端電壓為 1250.7275V、端電流最大暫態值為 155.2634A，數據彙整如表 4-74 所式，模擬觀察點電壓電流波形如圖 4-97~圖 4-104 所示。

表 4-74 雷電流注入電源端一次側分析(CP 廠家)

分析項目	雷電流 35kA 時突波峰值
變壓器一次側端電壓(V)	36249.7734V
變壓器一次側端電流(A)	5.4214
一次側線圈電壓	48.0389
限流熔絲上的電流(A)	34876.0977
避雷器跨壓(V)	36249.7734V
避雷器上電流(A)	34871.1289A
變壓器二次側端電壓(V)	1250.7275V
變壓器二次側端電流(A)	155.2634A
二次側線圈電壓	1.6411

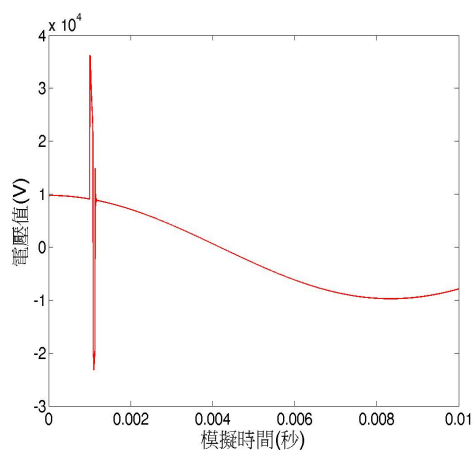


圖 4-97 雷電流注入電源一次側時，一次側端電壓波形(CP 廠家)

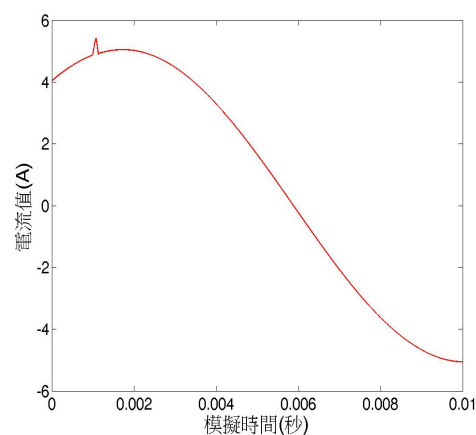


圖 4-98 雷電流注入電源一次側時，一次側端電流波形(CP 廠家)

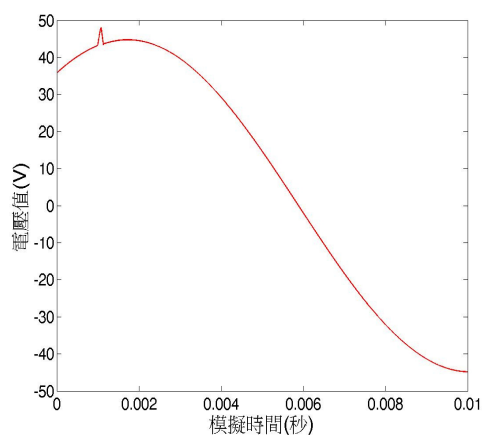


圖 4-99 雷電流注入電源一次側時，一次側線圈電壓波形(CP 廠家)

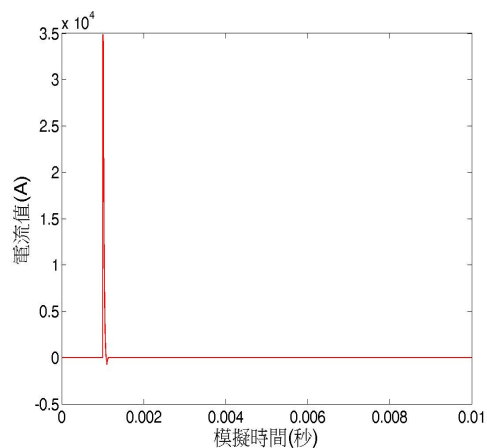


圖 4-100 雷電流注入電源一次側時，限流熔絲電流波形(CP 廠家)

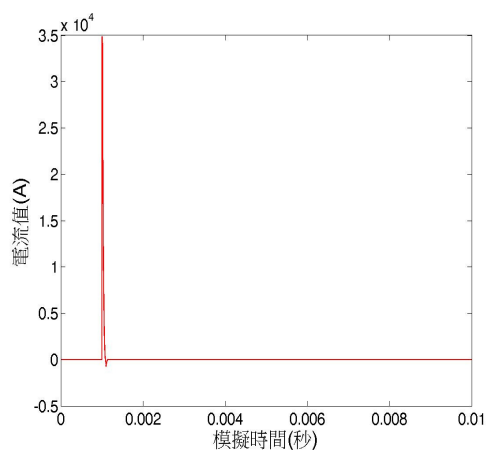


圖 4-101 雷電流注入電源一次側時，避雷器電流波形(CP 廠家)

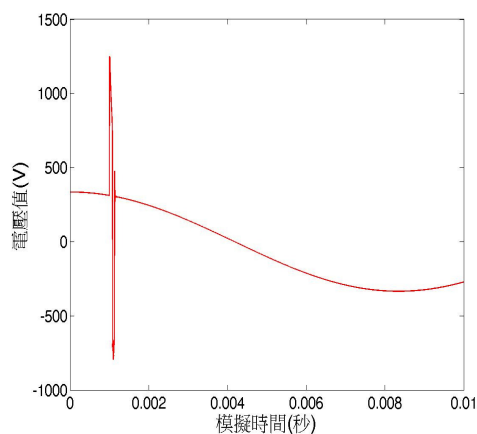


圖 4-102 雷電流注入電源一次側時，二次側端電壓波形(CP 廠家)

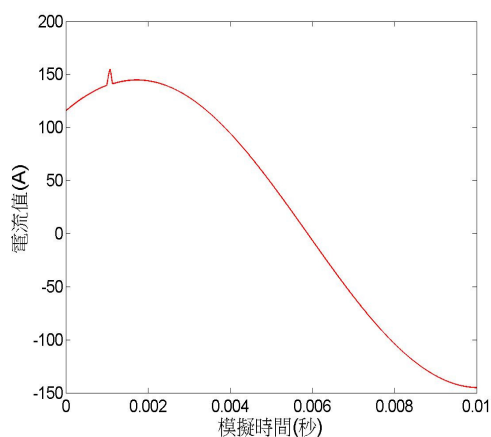


圖 4-103 雷電流注入電源一次側時，二次側端電流波形(CP 廠家)

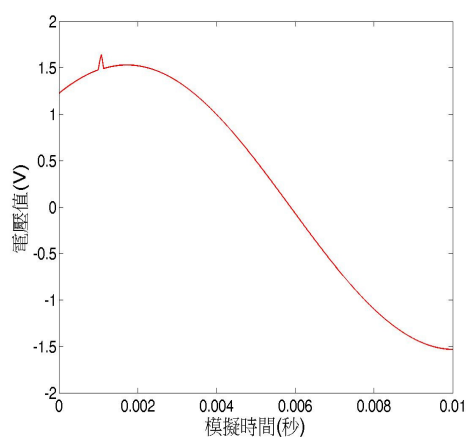


圖 4-104 雷電流注入電源一次側時，二次側線圈電壓波形(CP 廠家)

依據 JK 廠家避雷器資料輸入，進行雷電流 35kA 注入電源一次側端分析，結果為變壓器一次側端電壓 33674.6797V、端電流最大暫態值 5.4104A，避雷器跨壓為 33674.6797V、電流最大暫態值為 34880.4727A，變壓器二次側端電壓為 1164.2175V、端電流最大暫態值為 154.8455A；數據彙整如表 4-75 所示，模擬觀察點電壓電流波形如圖 4-105~圖 4-112 所示。

表 4-75 雷電流注入電源端一次側分析(JK 廠家)

分析項目	雷電流 35kA 時突波峰值
變壓器一次側端電壓(V)	33674.6797V
變壓器一次側端電流(A)	5.4104A
一次側線圈電壓(V)	47.9413V
限流熔絲上的電流(A)	34885.4297A
避雷器跨壓(V)	33674.6797V
避雷器上電流(A)	34880.4727A
變壓器二次側端電壓(V)	1164.2175V
變壓器二次側端電流(A)	154.8455A
二次側線圈電壓(V)	1.6367V

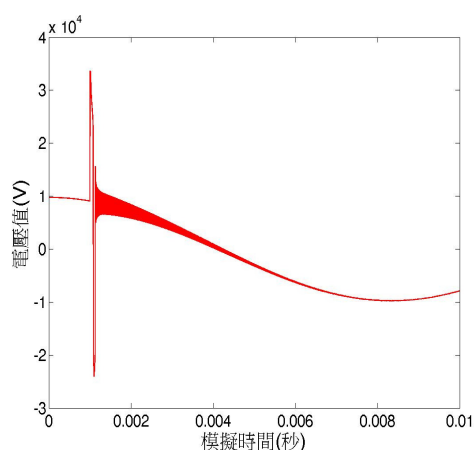


圖 4-105 雷電流注入電源一次側時，一次側端電壓波形(JK 廠家)

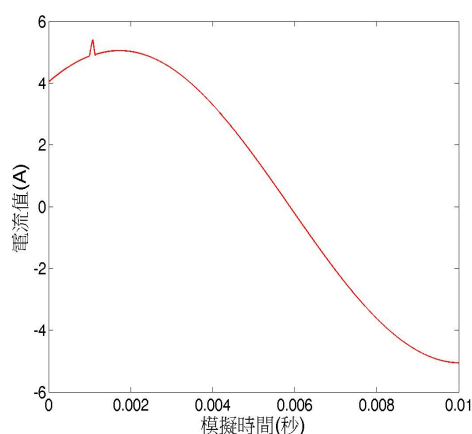


圖 4-106 雷電流注入電源一次側時，一次側端電流波形(JK 廠家)

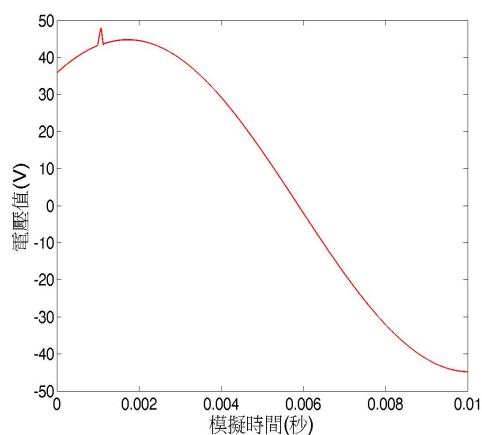


圖 4-107 雷電流注入電源一次側時，一次側線圈電壓波形(JK 廠家)

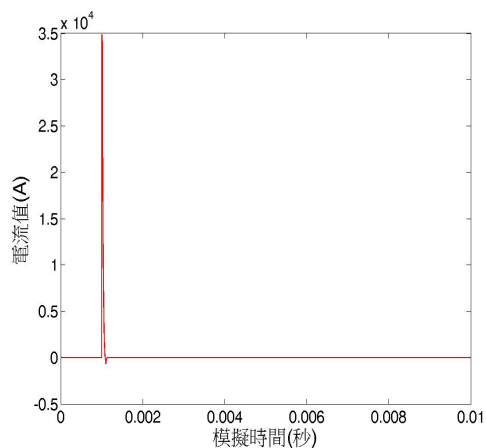


圖 4-108 雷電流注入電源一次側時，限流熔絲電流波形(JK 廠家)

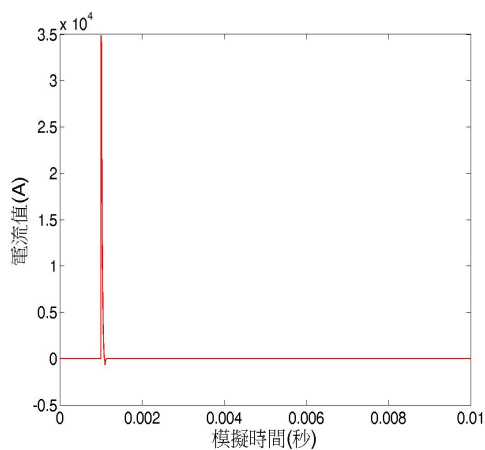


圖 4-109 雷電流注入電源一次側時，避雷器電流波形(JK 廠家)

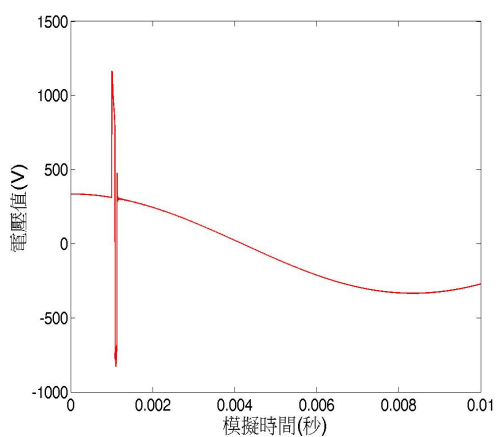


圖 4-110 雷電流注入電源一次側時，二次側端電壓波形(JK 廠家)

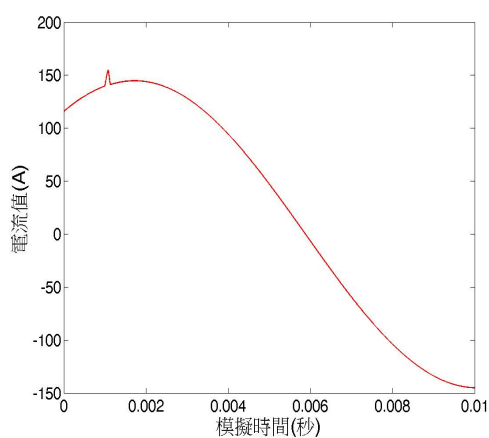


圖 4-111 雷電流注入電源一次側時，二次側端電流波形(JK 廠家)

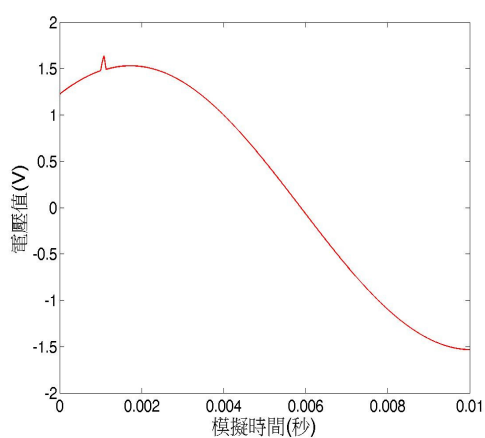


圖 4-112 雷電流注入電源一次側時，二次側線圈電壓波形(JK 廠家)

### 三、避雷器裝設於電源端一次側雷擊突波分析

本節將模擬避雷器裝設於一次電源端，雷電流 35kA 注入於電源一次側端，應用 JK 廠家避雷器參數，觀察變壓器一次側電壓與限流熔絲上的電流，避雷器上電壓與電流、二次側電壓電流，將各項觀察點暫態最大值以表列出，並記錄觀察項目之模擬波形。

雷電流 35kA 雷擊電源一次側端分析結果，變壓器一次側端電壓為 33674.6797V、端電流最大暫態值為 5.4104A，避雷器跨壓為 33674.6797V、電流最大暫態值為 34880.4727A，變壓器二次側端電壓為 1164.2175V、端電流最大暫態值為 154.8455A；數據彙整如表 4-76 所示，模擬觀察點電壓電流波形如圖 4-113~圖 4-117 所示。

表 4-76 避雷器裝設於電源端一次側雷擊突波

分析項目	雷電流 35kA 時突波峰值
變壓器一次側端電壓(V)	33674.6797V
變壓器一次側端電流(A) (限流熔絲上的電流)	5.4104A
避雷器跨壓(V)	33674.6797V
避雷器上電流(A)	34880.4727A
變壓器二次側端電壓(V)	1164.2175V
變壓器二次側端電流(A)	154.8455A

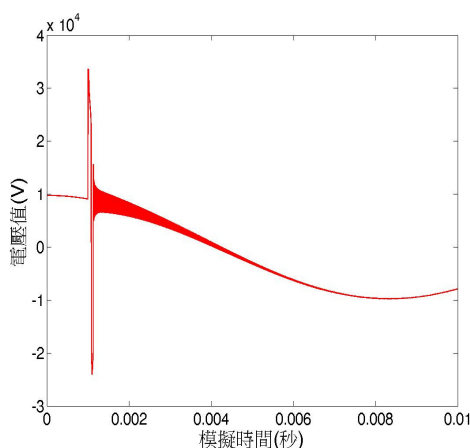


圖 4-113 雷電流注入電源一次側時，一次側端電壓波形(避雷器裝設於電源端)

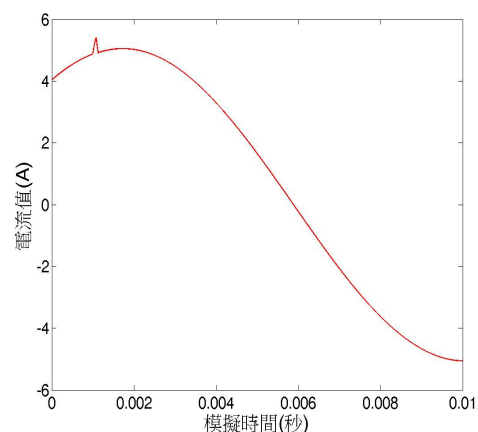


圖 4-114 雷電流注入電源一次側時，一次側端電流波形(避雷器裝設於電源端)

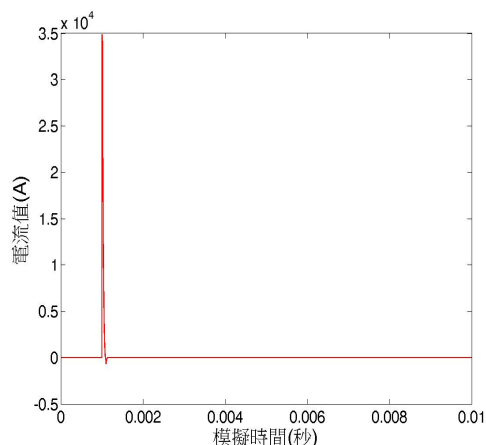


圖 4-115 雷電流注入電源一次側時，避雷器電流波形(避雷器裝設於電源端)

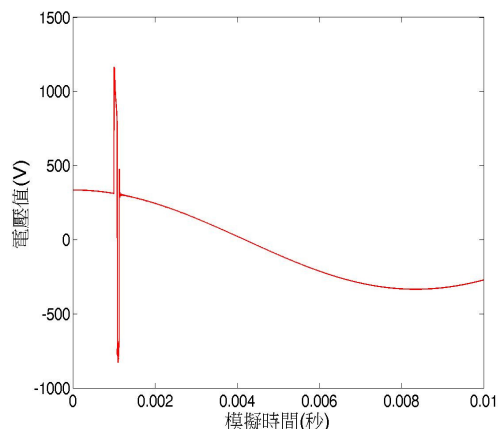


圖 4-116 雷電流注入電源一次側時，二次側端電壓波形(避雷器裝設於電源端)

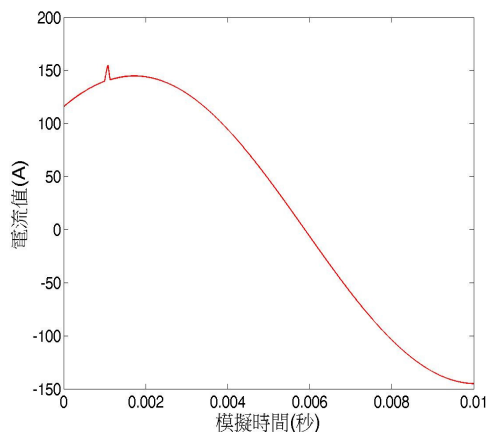


圖 4-117 雷電流注入電源一次側時，二次側端電流波形  
(避雷器裝設於電源端)

#### 四、避雷器裝設於限流熔絲負載端雷擊突波分析

本節將模擬避雷器裝設於限流熔絲負載端，雷電流 35kA 於電源一次側端，觀察變壓器一次側電壓與限流熔絲上的電流、避雷器上電壓與電流、二次側電壓電流，將各項觀察點暫態最大值以表列出，並記錄觀察項目之模擬波形。

雷電流 35kA 雷擊電源一次側端分析結果，變壓器一次側端電壓為 33674.6797V、端電流最大暫態值為 5.4104A，限流熔絲上的電流最大暫態值 34885.4297A，避雷器跨壓為 33674.6797V、電流最大暫態值為 34880.4727A，變壓器二次側端電壓為 1164.2175V、端電流最大暫態值為

154.8455A；數據彙整如表 4-77 所示，模擬觀察點電壓電流波形如圖 4-118~圖 4-123 所示。

表 4-77 避雷器裝設於限流熔絲負載端雷擊突波

分析項目	雷電流 35kA 時突波峰值
變壓器一次側端電壓(V)	33674.6797V
變壓器一次側端電流(A)	5.4104A
限流熔絲上的電流(A)	34885.4297A
避雷器跨壓(V)	33674.6797V
避雷器上電流(A)	34880.4727A
變壓器二次側端電壓(V)	1164.2175V
變壓器二次側端電流(A)	154.8455A

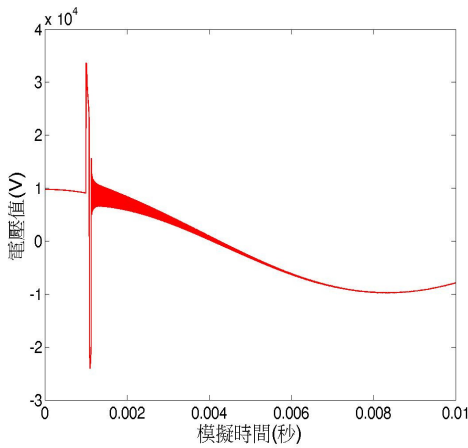


圖 4-118 雷電流注入電源一次側時，一次側端電壓波形(避雷器裝設於限流熔絲)

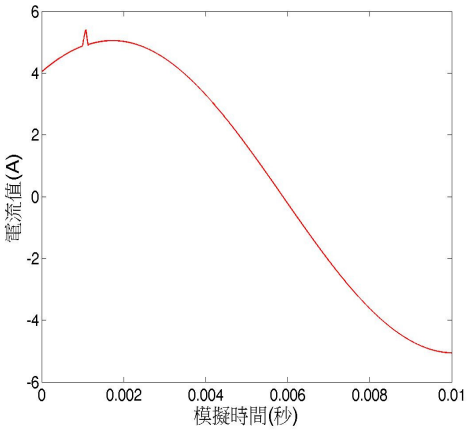


圖 4-119 雷電流注入電源一次側時，一次側端電流波形(避雷器裝設於限流熔絲)

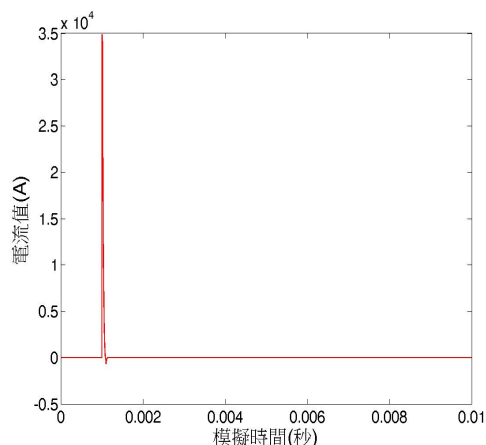


圖 4-120 雷電流注入電源一次側時，  
限流熔絲電流波形(避雷器  
裝設於限流熔絲)

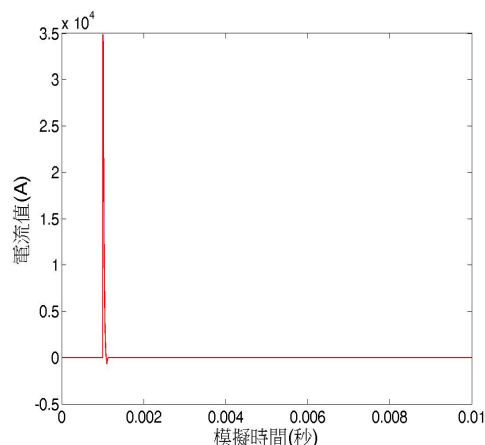


圖 4-121 雷電流注入電源一次側時，  
避雷器電流波形(避雷器裝  
設於限流熔絲)

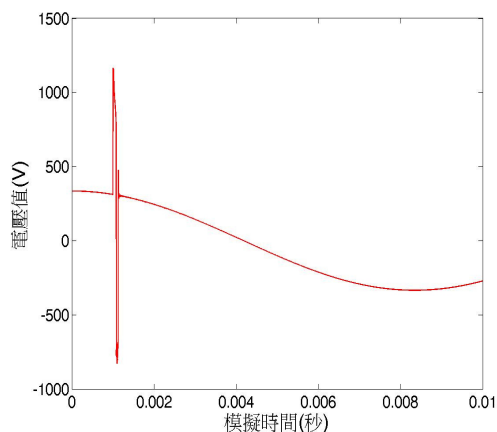


圖 4-122 雷電流注入電源一次側時，  
二次側端電壓波形(避雷器  
裝設於限流熔絲)

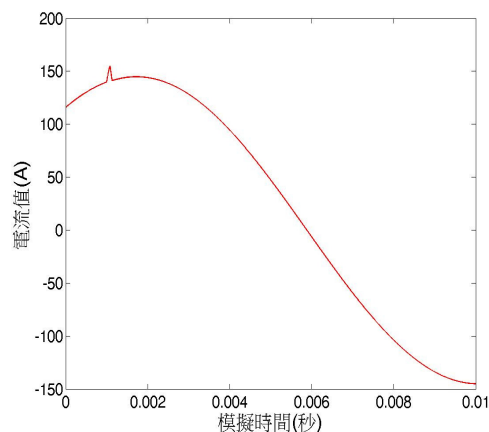


圖 4-123 雷電流注入電源一次側時，  
二次側端電流波形(避雷器  
裝設於限流熔絲)

#### 4.8.7 結論及建議事項

依據 IEEE C62.22 之 6.5 節計算絕緣協調保護裕度  $P_{M1}$ 、 $P_{M2}$ ，以 JK 廠家定型試驗報告數據代入計算，保護裕度均有大於 20%。但以台灣地區雷擊電流數據顯示，平均負極性雷電流大約在 20~40kA 之間，亦可能高達 100kA，而正極性雷電流大多分布在 5~20kA 之間，其中除高電流和能量的影響，主要問題在其有非常高的電流上升率。

實際上，負極性雷擊佔全部雷擊之大部分，正極性雷擊平均佔全部之雷擊的 10%，如在雷擊的分析中使用 35kA 雷電流作模擬，電流上升率為 35kA/ $\mu$ s 計算保護裕度  $P_{M1}$ 、 $P_{M2}$ ，數據顯示如式(4-26)、式(4-27)，保護裕

度  $P_{M1}$  並不大於 20%，在此絕緣協調的能力可能須考慮過大的雷擊電流上升率，根據  $P_{M1}$  式中所需保護裕度須大於 20%，數學式最能改變的因子如縮短引線之長度，或者是對整體變壓器加強絕緣強度予以改善。

$$PM_{L1} = \left( \left[ \frac{CWW}{FOW + (1.3\mu H / m \times 1.83m)(35kA / \mu s)} \right] - 1 \right) \times 100\% = 4.94\% \leq 20\% \quad (4-26)$$

$$PM_{L2} = \left( \left[ \frac{BIL}{LPL} \right] - 1 \right) \times 100\% = 292.5\% \geq 20\% \quad (4-27)$$

CP 與 JK 兩廠家，測試於 8/20  $\mu s$  放電電壓-電流曲線中，CP 在量測各額定電流為 1.5、3、5、10、20、40kA 所對應之放電電壓；而 JK 廠家定型試驗報告中量測 8/20  $\mu s$  放電電壓-電流曲線中，只量測於 5、10、20kA 所對應之放電電壓。依 IEEE Std C62.11 量測於 8/20  $\mu s$  放電電壓-電流曲線中，依序量測為 1.5、3、5、10、20kA 之放電電壓，在此方面量測需探討是否與 IEEE C62.11 符合準規定。[83]

本報告針對避雷器裝設於不同位置，探討雷擊時對限流熔絲的影響。對於避雷器裝設於限流熔絲負載端，當雷擊發生時，過大的雷擊電流會先通過限流熔絲在經過避雷器放電，而放電的路徑中限流熔絲須承受短時間大電流，熔絲可能會因大電流而受損或斷裂。若將避雷器裝設於一次電源側，當雷擊發生時，雷電流會直接注入避雷器直接洩漏電流，對限流熔絲上的影響較小，可減少對熔絲熔斷的情況。

依分析結果顯示，比較避雷器裝設於一次電源側與限流熔絲負載端，當雷擊發生時，避雷器裝於一次電源側較利於保護限流熔絲避免過大的雷擊電流損壞熔絲與熔斷的情形；但因避雷器裝設於一次電源側須暴露於空氣中，可需考慮避雷器與變壓器的引線長度，與外在環境下如溫度、水氣、灰塵等影響，造成避雷器故障等問題。

## 4.9 本章結論

### 一、以有限元素模擬軟體分析檢討

#### 1. 避免導體形成尖端

高壓套管接線末端為圓筒導體，使得電場聚集於此，將接線末端改

成球型導體，電場從原本聚集於圓筒尖端移至球型導體上，可以改善電場集中的現象。

## 2. 高壓引線與桶壁距離

高壓引線與桶壁間的距離會影響電場強度，包覆絕緣的高壓引線與桶壁間的距離至少為 20mm，且須在絕緣油位線之下。

## 3. 防止變壓器漏油

變壓器缺油時桶內絕緣油的油面降低到高壓套管下緣，高壓套管未浸泡於絕緣油中，高套管接線端子暴露於空氣，使得絕緣的能力下降。

### (1) 加裝絕緣罩

在高壓套管加裝開口朝上的絕緣罩，正常變壓器充滿油時，高壓套管於絕緣油之中，當油位下降時，高壓套管內部仍充滿絕緣油，提供高壓帶電體良好的絕緣，防止因缺油造成沿面絕緣距離的不足。

### (2) 裝設缺油感測裝置

當變壓器絕緣油下降時，能藉缺油感測裝置啟斷變壓器，避免缺油使高壓套管裸露於空氣，造成沿面絕緣距離不足。

## 4. 二次套管須通過材規 C035 中規定的各項試驗

若出廠時能通過台電材規 C035 規定的各項試驗，即可確保設備的品質。

## 5. 熔絲與電位為零帶電體的距離

熔絲與電位為零的帶電體(如夾件、桶壁、避雷器等)間的距離至少為 80mm，在正常運轉情況下，有 10 倍以上的安全裕度。

## 6. 壓力釋放裝置

(1) 壓力釋放裝置須符合規範，保證密閉性，壓力釋放裝置應加以緊固，以防止使用時鬆落。需有防水裝置，避免水分由壓力釋放裝置進入變壓器內(天氣或其他因素)，而使絕緣油劣化。

(2) 變壓器運轉溫度上升時，絕緣油因熱漲冷縮原理使油面上升，計算出最高運轉溫度的油位線後，將壓力釋放裝置置於最高運轉溫度時之油位線上方。避免壓力釋放時，將絕緣油噴到桶外。

## 二、內置遮斷開關之啟閉特性與試驗及絕緣油溫昇之影響

1. 基本上台電材料規範是比照 ANSI/IEEE C37.41 Table 3 (1981)規定，該

規定是針對驅弧型熔絲之規定而非斷路器之規定。IEEE 及 IEC 標準對斷路器 TRV 及 RRRV 之規定，均遠高於驅弧型熔絲。因此，若遮斷開關試驗標準改適用斷路器之標準，其 TRV 及 RRRV 須再提高。

2. 目前台電規範遮斷開關過載保護跳脫時的油面最高溫度限制值僅規定為  $120^{\circ}\text{C}$ ，對於遮斷開關各組件溫度限制並未規定，且遮斷開關可正常啟斷大電流的油溫限制亦未規定。若將遮斷開關視為油斷路器，依斷路器標準，其允許週溫(或過載能力)以及絕緣油溫度均應配合下修。

### 三、全域型熔絲之啟斷特性及保護區域與協調

需引用標準部分於台電材規中補齊，互相關連之標準如下：

1. 於 IEEE Std. C37.41 (2008)中指明熔絲之其他性能測試參數需參照 IEEE Std. C37.47 (2011)；測試波形與量測方法需參照 IEEE Std. 4 (1995)；於溫昇測試及一般工作條件需參照 IEEE Std. 37.40。
2. 於 IEEE Std. C37.47 (2011)中指明熔絲之協調需參照 IEEE Std. C37.48；熔絲之應用、動作及構造需參照 IEEE Std. C37.48.1。
3. 於 IEEE Std. C37.48.1 (2011)中指明變壓器之破壞曲線需參照 IEEE Std C57.109。

### 四、避雷器動作特性及保護區域與協調

負極性雷擊佔全部雷擊之大部分，正極性雷擊平均佔全部之雷擊的 10%，如在雷擊的分析中使用 35kA 雷電流作模擬，電流上升率為  $35\text{kA}/\mu\text{s}$ ，依據 IEEE C62.22 之 6.5 節計算絕緣協調保護裕度  $P_{M1}$ 、 $P_{M2}$ ，保護裕度  $P_{M1}$  並不大於 20%，在此絕緣協調的能力可能須考慮過大的雷擊電流上升率；根據  $P_{M1}$  式中所需保護裕度須大於 20%，數學式最能改變的因子如縮短引線之長度，或者是對整體變壓器加強絕緣強度予以改善。

至於避雷器裝設於不同位置，雷擊時對限流熔絲的影響。當雷擊發生時，避雷器裝於一次電源側較利於保護限流熔絲避免過大的雷擊電流損壞熔絲與熔斷的情形；但因避雷器裝設於一次電源側須暴露於空氣中，需考慮避雷器與變壓器的引線長度，與外在環境下如溫度、水器、灰塵等造成避雷器故障問題。

## 第五章 密封型桿上變壓器之故障指示器

高壓架空線路上之密封型桿上變壓器若發生故障停電，現場如有加裝故障指示器，搶修人員到現場看到故障指示器之指示元件有顯示故障信號，即表示該變壓器有故障電流通過，其內部已故障，可先檢測及檢查二次側線路後就可更換變壓器復電，對用戶停電時間可減少；但如未裝故障指示器，現場搶修人員必須檢查已停電之變壓器外觀及釋壓閥有否動作，再打開鐵蓋檢查內裝之遮斷開關或限流熔絲有否動作，檢查變壓器配件及配線有否損壞，再實施檢修測試，以判定變壓器已故障，如搶修車上有預備變壓器就可更換，如未有預備變壓器，還要增加運送時間，相對的均會增加用戶停電時間。因此考慮加裝故障指示器時必須慎重選擇適當的故障指示器型式，並訂定裝設方式與地點，對故障指示器材料及施工維護安全性也需分別探討分析研議之。

### 5.1. 故障指示器之動作原理與型式

故障指示器在美國通常使用於高壓架空線路、高壓地下電纜系統、開關裝置及亭置式變壓器；套管型桿上變壓器並未裝置故障指示器，而密封型桿上變壓器亦未使用。本章探討適用於密封型桿上變壓器之故障指示器型式，首先說明故障指示器動作之原理，再探討其形式及相關特性，如觸發電流之選定、湧入電流之抑制、誤復歸之抑制、導線相鄰之效應及故障指示器之指示元件。

#### 5.1.1 故障指示器之動作原理

高壓配電線路使用之故障指示器，其結構分為機械式液體型、機械式轉子型及電子式；前兩種在歐洲使用，歐洲亦有使用電子式，在美國亦使用電子式。

電子式故障指示器係依儲存能源原理而動作[84]，此能源係由電容器充電而儲存，電容器充電之電源，依不同之復歸形式而有不同之電源，每一故障指示器為整體單元，透過橋式整流器充電兩個電容器，以儲存能源，而此儲存能源作為啟動復歸及觸發電路用，復歸及觸發電路為對稱，亦為

兩極管封鎖之獨立電路；為使觸發電路可靠，電容器必須維持滿載充電。觸發電路係在高壓配電線路發生故障時啟動，此現象由條式開關感應，當條式開關閉合其接點，使其完成內部電路，並促使電容器透過電磁線圈充電其電源。有極性之電磁線圈可旋轉框軸磁性為故障信號，以顯示故障電流已通過，如高壓配電線路已復電，電容器會充電使矽控整流器啟動，並透過磁性繞組引起復歸電容器再放電，而使電磁線圈極性反向，使框軸電路動作及其故障信號轉換，並顯示故障指示器已復歸為正常。當復歸電路動作，觸發電路電容器不放電，以備如有另一故障發生時作為復歸電路之觸發電路獨立動作。

國內廠家亦提出故障指示器動作原理[85]，說明故障指示器感應元件使用高精度之封閉磁路電流轉換變壓器，利用感應元件偵測電流信號，透過濾波器及 PIC 系列晶片及軟體運算，濾除雜訊，還原故障及復歸電流信號。

### 5.1.2 故障指示器之型式

故障指示器之型式通常係指其復歸型式，而復歸型式係依故障指示器復歸方法及其所連接系統而定；其係當高壓配電線路或變壓器故障停電時，故障電流通過故障指示器時，會感應使其指示元件顯示線路或變壓器已故障之信號，經現場搶修人員修復後再送電，故障指示器感應元件會感應電流或電壓之存在或依預定復歸時間，而使故障指示器之指示元件自動復歸至正常位置，另亦可現場手動復歸。經參考國外廠家型錄資料[84,86]說明如下：

#### 一、時間復歸型(Timed Reset Type)

當高壓配電線路故障停電時，故障點電源側之時間復歸型故障指示器，其指示元件會顯示供電線路已故障停電之信號，當現場搶修人員修妥復電後，如預定復歸時間到了，故障指示器會感應自動復歸，其指示元件會顯示為正常信號。如已搶修妥而設定復歸時間未到，現場人員亦可改以手動將故障指示器指示元件復歸為正常位置。

時間復歸型故障指示器之定時復歸時間，依廠家別，指示器類別及特性而有不同設計，如 1、2、4、6 小時，或 2、4、8 小時，或 2、4、8、24 小時，或 4 小時，或 4、8 小時等。通常復歸時間係依客戶需求指定時間而由廠家製造時設定，設定時間較長，對搶修路程較長遠，線路範圍廣及搶

修時間長者較有利。時間復歸型故障指示器適用處所分為高壓架空線路用、高壓地下電纜用、高壓架空與地下線路用、亭置式變壓器用、高壓架空線路、開關裝置與亭置式變壓器用，其可由客戶依系統線路別及裝置處所別選訂適用之類型。

## 二、電流復歸型(Current Reset Type)

當高壓配電線路故障停電時，故障點電源側之電流型故障指示器，其指示元件會顯示供電線路已故障停電之信號，如現場搶修人員修妥復電後，電流復歸型故障指示器會感應供電線路負載電流已通過，並自動復歸，且指示元件會顯示為正常信號。

電流復歸型故障指示器，其復歸方式係依供電線路之負載電流而動作，而所設定負載電流值，依廠家別，指示器類型及特性而有不同設計，如最小負載電流為 2A 或 2.4A 或 3A，在 5 分鐘內動作而自動復歸，其指示元件會顯示為正常信號；亦有最小負載電流為 1.5A 或 3A 或 10A，在 25 秒內動作而自動復歸，其指示元件會顯示為正常信號。電流復歸型故障指示器適用處所分為高壓架空線路用、高壓地下電纜用、高壓架空線路、高壓地下電纜與亭置式變壓器用，其可由客戶依系統線路別及裝置處所別選訂適用之類型。電流復歸型另有一種類型為無線感應器，可自動儲存負載及溫度資料，並監控高壓配電線路之電壓消失或電流消失或線路故障，利用整合無線電電訊將報告傳送致監控中心。

## 三、電壓復歸型(Voltage Reset Type)

當高壓配電線路故障停電，故障點電源側之電壓復歸型故障指示器，其指示元件會顯示線路已故障停電之信號，如現場搶修人員修妥復電後，電壓復歸型故障指示器會感應供電線路電壓之存在，並自動復歸，其指示元件會顯示為正常信號。

電壓復歸故障指示器，其復歸方式係依供電線路之電壓值而動作，而所設定電壓動作值，依廠家別，指示器類型及系統運轉電壓別有不同設計，如在 6.9kV 時、8 分鐘內，或在 5kV 時、3 分鐘內或 5 分鐘內，或在 120 伏時、30 秒內，或在 105 伏(最小)時、6~9 秒內動作而自動復歸，其指示元件會顯示為正常信號。電壓復歸型故障指示器之動作電壓分為高壓復歸型、肘型端頭測試點高壓復歸型及變壓器二次低壓復歸型，通常高壓架空線路及高壓地下電纜使用高壓復歸型，亭置式變壓器使用肘型端頭測試點高壓

復歸型，變壓器無肘型端頭者使用二次低壓復歸型。

#### 四、手動復歸型(Manual Reset Type)

手動復歸型故障指示器係當高壓配電線路故障停電時，經現場搶修人員修妥復電後，其指示元件不依認定時間或不依復電後之線路電壓或負載電流而自動復歸；而是由現場搶修人員直接使用操作工具，以手操作復歸或直接按下其復歸按鈕復歸，而使指示元件顯示為正常信號。通常高壓架空線路，高壓地下電纜及亭置式變壓器或密封型桿上變壓器均可使用手動復歸型故障指示器。

#### 5.1.3 觸發電流(Trip Current)額定之選用

故障指示器作為高壓配電線路有否故障停電之判定，因此故障電流通過供電導線或電纜，其周圍產生磁場，在供電導線或電纜上所裝置之故障指示器會檢測並觸發感應元件，而使其指示元件顯示供電線路已故障信號，亦即觸發電流使故障指示器動作，而觸發電流係依故障電流而定，並非依負載電流[84]，但通常仍以負載電流之倍數選定，再考慮故障電流，兩者均予採用。所以採購故障指示器應指定適當觸發電流，使可正確可靠判定供電線路故障停電，不要有應動作而未動作或誤動作；未達到觸發電流值亦不能動作[87]，以避免造成事故停電處理之困擾，影響用戶用電權益。

故障指示器觸發電流額定，依廠家別，指示器類型與復歸型及高壓配電系統別有不同的額定電流，通常觸發電流額定有 20、50、100、300、400、600、800、1000 及 1200A 等，而廠家係標示觸發電流額定多種不同範圍，如 50~1200A 等，顯示其最小及最大觸發電流額定值。觸發電流之設定有兩種，一種係由在現場依負載電流大小，故障指示器在多個觸發電流值中，自動選定一個觸發電流值，不需由人操作調整；另一種係依客戶要求，在工廠設定一個觸發電流值。台電公司故障指示器材規 Y231 (101-01)規定其觸發電流為 600A 及 1000A [87]。

故障指示器觸發電流之選定，得依高壓配電系統別舉例說明之[84]，如高壓架空線路，其故障指示器觸發電流額定之選定，至少為最大連續滿載負載電流之二倍，且觸發電流需小於在裝置點之最小接地故障電流，但如相關運轉資料不足，自動復歸型故障指示器可選用滿載負載電流之三倍，手動復歸型故障指示器可選用滿載負載電流之四倍。高壓地下電纜因其通

常為永久性故障，其故障指示器觸發電流額定之選定，得以最大線對地故障電流為基準；高壓地下幹線故障指示器觸發電流至少為最大連續滿載負載電流之二倍，並小於供電線路末端處之最大接地故障電流；而高壓地下分歧線，因考慮地下電纜系統常有電容器放電電流或電纜放電電流引起誤觸發，會使現場搶修人員誤判定，通常其產生之電流約 300 安培可觸發故障指示器，因此高壓地下分歧線所選定觸發電流除至少為最大連續滿載負載電流之二倍外，另再考慮電容器及電纜之放電電流，即觸發電流需等於或大於 300 安培。另亦有廠家提示故障指示器觸發電流之選定，得依負載電流大小，分別為負載電流之 2~5 倍[86]；另一廠家提示觸發電流之選定，得依負載電流大小，分別為負載電流之 4~6 倍[88]。所以需選用適當之觸發電流值，如選用較小觸發電流之故障指示器，高壓電纜及電容器之放電電流易使故障指示器誤觸發。

故障指示器之觸發電流選定後，需了解在多少時間內會反應使能觸發感應元件，而觸發反應時間係指故障指示器依故障電流指定值及需求的時間反應動作[89]。通常觸發電流反應時間依廠家、故障指示器類型、復歸型式、及高壓線路有不同的反應時間，其反應時間有 1ms、8ms、24ms、160ms 或 200ms 等，另亦可參考故障指示器觸發電流之時間與電流曲線圖。但也有一種類別，可依偵測電流值自動調整觸發反應時間，配合與電源端過電流保護設備取得兩者動作時間之協調[86]，惟通常故障指示器感應元件之觸發反應時間會較其電源側過電流保護設備動作時間為快，且過電流保護設備未動作前，故障指示器之指示元件已顯示供電線路已故障之信號[84]。

#### **5.1.4 湧入電流之抑制(Inrush Current Restraint)**

故障指示器如有故障電流或湧入電流超過其觸發電流時，故障指示器就會動作，其指示元件會顯示供電線路已故障停電之信號，但故障指示器未具有湧入電流抑制功能，則無法區分故障指示器係由故障電流或湧入電流引起之過電流而動作。通常高壓配電線路之湧入電流係配電線路受電後，由變壓器鐵心之激磁及電力電纜與電容器之放電產生的，高壓配電線路之湧入電流通常為經常負載電流之 12~60 倍[84]，而變壓器之湧入電流通常為滿載負載電流之 12 倍(在 0.1 秒)至 25 倍(在 0.01 秒)。

大多數高壓架空配電系統，其饋線在變電所裝有復閉電驛或幹線裝有

復閉器之啟開與復閉程序，當復閉啟動後，配電線路之湧入電流會使故障指示器動作，而不是故障電流；此種不正常動作停電，會造成現場搶修人員尋找故障點之困擾。因此故障指示器如具有湧入電流抑制功能，其可判定係由故障電流或湧入電流引起而動作，並可抑制或駁回湧入電流，感應復歸電源(電壓或電流)之瞬間消失，使故障指示器不動作而維持在正常位置[84]。茲舉例說明，高壓架空配電線路，如 A 相線路故障停電，故障電流超過故障點前故障指示器之觸發電流就會動作，在 B 相及 C 相線路之故障指示器具有湧入電流抑制功能，會偵測已停電；如斷路器再復閉送電，A 相線路仍停電，A 相線路故障點前之故障指示器仍顯示已停電信號，但 B 相及 C 相線路之故障指示器，其觸發電容已放電，所以不會動作，並會依復閉程序一直至所設定之復閉次數完成為止，即仍僅 A 相線路故障點前之故障指示器動作，A 相之健全線路區段及 B 相與 C 相線路之故障指示器仍不動作。

高壓架空配電線路依復閉程序，停電再復電而產生湧入電流，為避免其電源側過電流保護設備先動作，因此須與電源側過電流保護設備取得協調，如故障指示器要啟動其湧入電流抑制功能，需配合湧入抑制反應時間，以利協調。湧入抑制反應時間係依廠家別，復歸型式及故障指示器類型有不同之湧入抑制反應時間，如 1、8、16、80、160、200、300ms 等，得依高壓配電系統需求，選擇適當之湧入抑制反應時間；較快反應時間，易於與電源側過電流保護設備協調。

### 5.1.5 誤復歸之抑制(False Reset Restraint)

故障指示器如未具有復歸抑制功能，在故障相線路復電前，會有過度電壓或電流回饋而引起故障指示器復歸，如三相高壓線路僅單相或兩相受電，實際上會有電壓或電流回饋；單相線路大多數係依變壓器及負載連接方式而引起回饋現象，例如接線之負載對回饋較為敏感。如高壓線路 A 相發生故障停電，B 相及 C 相線路仍供電中，線路上有變壓器及負載，且回饋電壓或電流容許環流返回至 A 相停電線路，在 A 相線路上之故障指示器會有足夠電壓或電流而自行復歸；如有此種現象發生，則所有三相線路之故障指示器會顯示為正常信號，使現場搶修人員無法判定那一相線路發生故障，因此可選用其有復歸抑制功能之故障指示器，並裝置於易受影響之

位置[84]。

故障指示器具有復歸抑制功能之型式有二次低壓復歸型、測試點電壓型及電流復歸型。如選用電壓復歸型故障指示器，需考慮因素如下：

- (1) 線路電壓小於故障指示器復歸電壓要求值時，將不會復歸，即此電壓需大於回饋電壓最大值(通常為經常運轉電壓之 60%，測試點電壓復歸型為經常運轉電壓之 50%)。
- (2) 線路電壓大於故障指示器復歸電壓要求值，必須能時常復歸(通常為經常運轉電壓之 95%)。

如選用電流復歸型故障指示器，需考慮因素如下：

- (1) 線路負載電流小於電流復歸型故障指示器之復歸電流要求值時，將不會復歸(即此電流值大於回饋電流之最大值)。
- (2) 線路負載電流大於電流復歸型故障指示器之復歸電流要求值時，必須能時常復歸(此電流值為小於運轉負載電流之最小值)。

如故障指示器具有復歸抑制功能，其可消除因回饋電壓而引起線路已故障之誤復歸，復歸抑制電路之設定值為經常電壓之 60%以上。[84]

### 5.1.6 電纜相鄰之效應(Proximity Effect)

電纜相鄰之效應，係指多條電纜配置很靠近，如其中一條電纜有負載電流或故障電流通過時，會使相鄰相導線或相電纜或接地導線產生磁場效應，可能會引起鄰近相線路上之故障指示器誤觸發或觸發失誤或不正確復歸[84]。通常消除電纜相鄰效應之方法如下：

- (1) 可選用較高的觸發電流值，使對鄰近相電纜降低感知度。[84]
- (2) 使用開式或閉式比流器，可從電纜集結磁通及降低鄰近相電纜感應元件之感知度。[84]
- (3) 相鄰電纜間隔至少為 120mm。[87]

台電公司故障指示器材規 Y231-(101-01) [87]亦規定故障指示器不得因鄰近電纜之電流干擾而誤動作。

### 5.1.7 故障指示器之指示元件

故障指示器如有故障電流通過時，其指示元件會顯示供電設備已故障之信號，其顯示信號分別有 LED 燈或旗型，顏色分別有橘紅色、黑色或白

色。依廠家別，LED 燈方式為橘紅色表示故障信號，黑色表示正常信號[84]，或旗型方式為橘紅色表示故障信號，白色表示正常信號或以閃爍方式顯示。另有一種可顯示永久性故障(以紅色及黃色 LED 燈顯示)或臨時性故障(以黃色 LED 燈顯示)，其係利用微處理器檢測電壓及負載電流狀況，以判定係永久性故障或臨時性故障[86]；因高壓架空裸線線路，如受到樹枝碰觸後又離開，係屬臨時性故障，或高壓架空被覆線線路，未被覆之帶電體如受到外力碰觸後又離開，亦會發生臨時性故障。

## 5.2 故障指示器之裝設方式及裝設地點

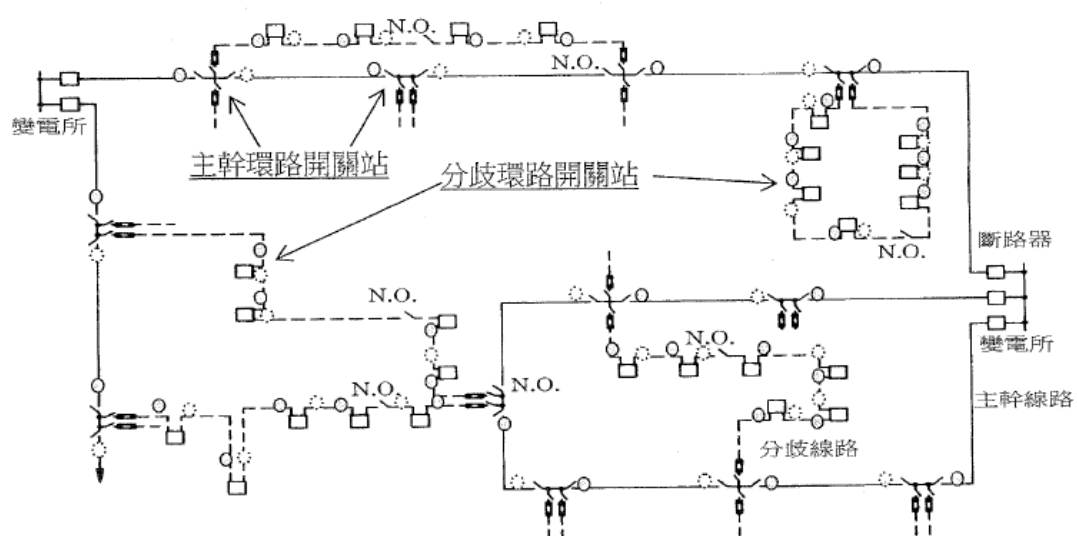
台電公司配電線路有架空配電線路及地下配電線路。在各區營業處營業範圍內核心地區(如科學園區、工業區、都會區等)及事故頻範區域之地下饋線，配電場所出入方便或重要行政機關等處所(主幹線、分歧線路)裝置線路故障指示器，俾於地下配電線路如有故障時，協助搶修人員、盡速研判事故點，以減少停電時間。

線路故障指示器以裝置於地下配電常開環路系統之主幹開關站，分歧開關站及亭置式變壓器連續環路(IN, OUT)之連接站等為原則。線路故障指示器裝置位置，包括：自動負載切換開關、亭置式氣封開關(4-WAY)、亭置式二路氣封開關(2-WAY)、四路分歧插頭及亭置式變壓器等之電纜肘型端頭及終端接頭上。環路開關站常開點(主幹線、分歧線或亭置式變壓器均同)，免裝置。地下配電線故障指示器裝置位置，例如圖 5-1。

台電公司架空配電線路事故，依配電線路故障跳脫試送電之標準作業程序得試送電，以加速正常區段復電，亦得縮小事故區段，俾利事故原因之查尋。架空配電線路若能比照地下配電線路使用故障指示器，查修故障，將可大幅收斂查修區段，讓查修故障範圍縮小，以利事故搶修人員易於研判，減少試送電次數，降低對設備之損害，並可迅速找到故障點，以便排除後復電，加速復電。

有鑑於現場實務需要，台電公司業務處於 97 年提出研發「屋外型架空線路故障指示器」，將地下線路故障指示器加上線徑調節固定器，將線路故障指示器設計可牢靠固定於#2 或 477MCM 之架空線路，並交樣品(試樣)由台北南區營業處將故障指示器樣品以三角型(點)吊掛方式，分別吊掛於三相高壓架空#2 相線上，裝置情形如圖 5-2~圖 5-5。97 年 9 月 5 日至 97 年 11

月 5 日共 60 日，經測試並評估試裝結果可行。



○ 線路故障指示器優先裝置位置。

○ 為利研判係開關或線路事故，得加裝另一組線路故障指示器位置。

圖 5-1 地下配電線路故障指示器裝置位置參考圖

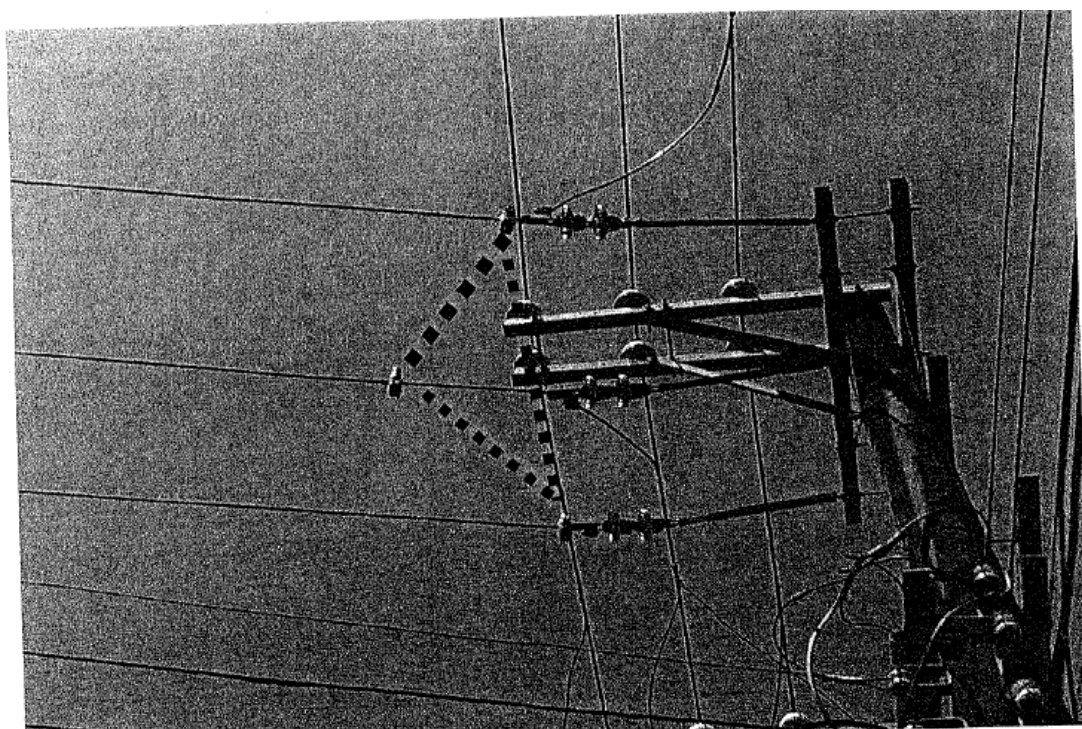


圖 5-2 線路故障指示器吊掛於三相高壓架空相線上裝置情形(a)

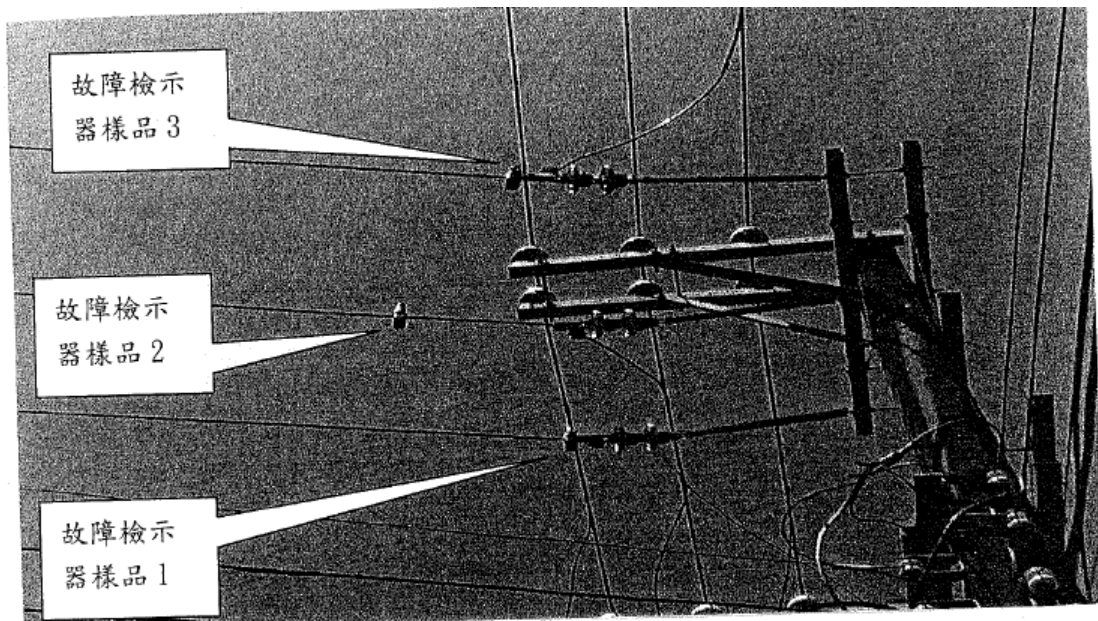


圖 5-3 線路故障指示器吊卦於三相高壓架空相線上裝置情形(b)

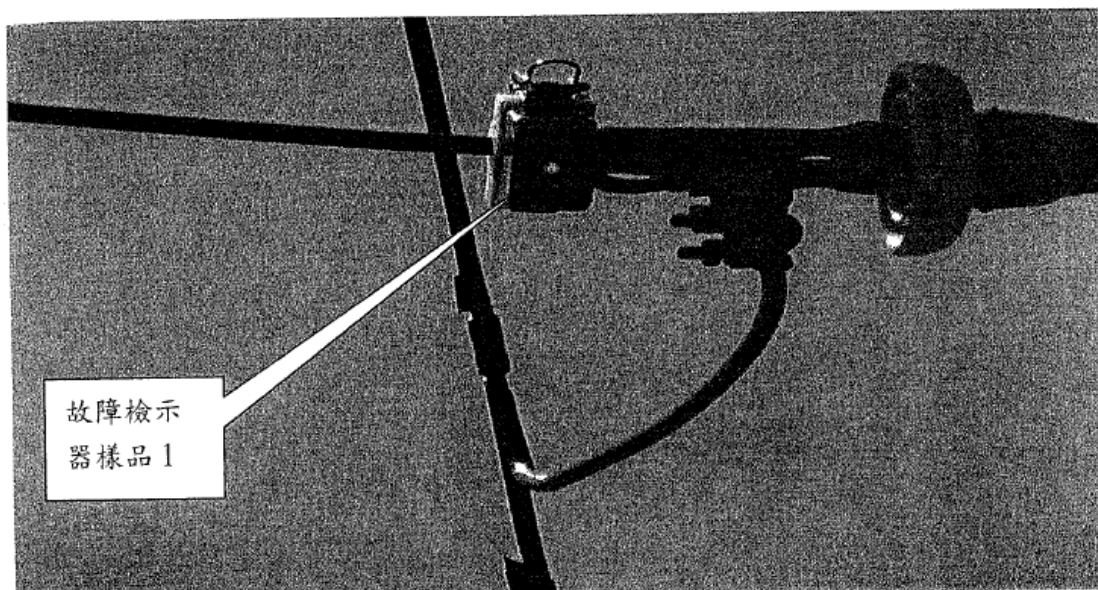


圖 5-4 架空線路裝設故障指示器情形(a)

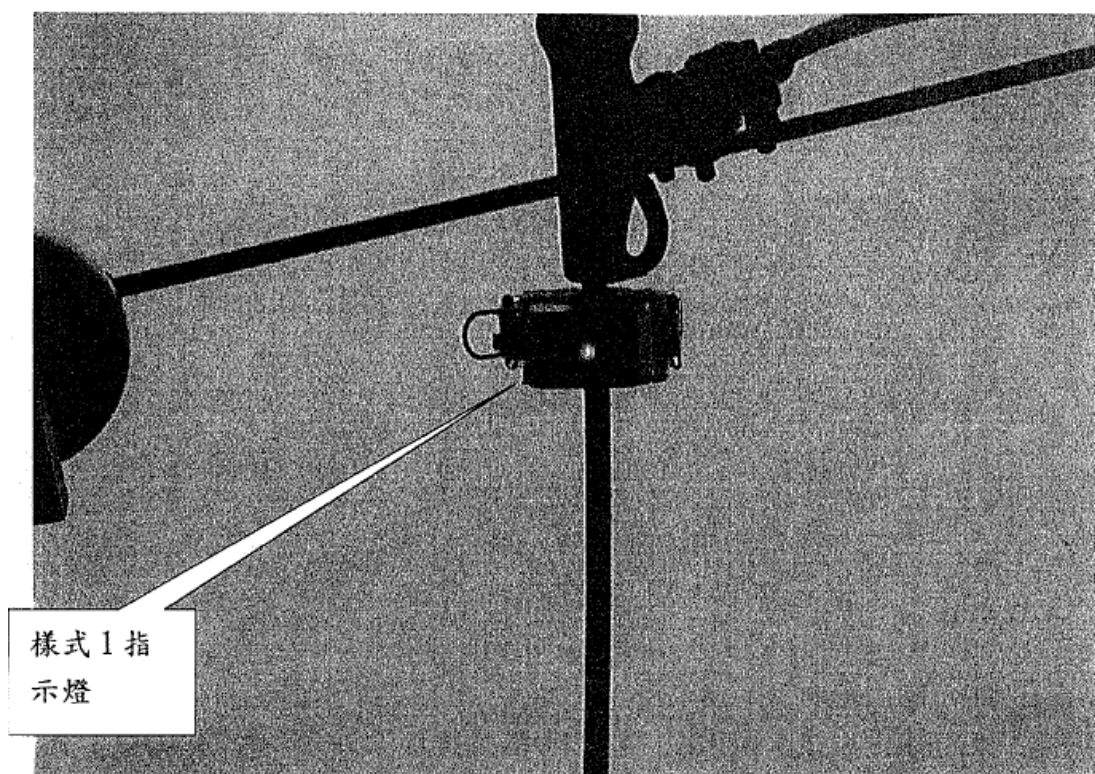


圖 5-5 架空線路裝設故障指示器情形(b)

裝置故障指示器應妥為整體規劃，考量線路自動化區段，因可在饋線調度中心監視、遙控、隔離、轉供線路開關及運轉資料擷取，傳輸等功能，建議饋線自動化系統區段免再裝設故障指示器。實施線路自動化區段之 11.4kV/6.6kV 及 22.8kV/13.2kV 高壓架空配電系統之主幹線上(架空線路兩端皆為雙終端裝置)裝設故障指示器，即於密封型桿上變壓器一次側端裝設密封型桿上變壓器用之故障指示器。

### 5.3 故障指示器之材料特性

#### 5.3.1 故障指示器材料之耐候性

故障指示器外殼材質須採用符合 ANSI/IEEE 495-2007 最新版規定 [89]，具有優良之耐候性。在採購規範內應列明符合下列特性試驗，本項特性試驗均屬定型試驗，通過試驗後才能確保故障指示器安裝於現場後具耐候性，可正常運作。

##### (一) 溫度循環試驗(Temperature Cycling Test)

作本項試驗之目的，在確保長期裝用後仍能正常動作；故障指示器須能承受 $-40^{\circ}\text{C}$ 、 $+25^{\circ}\text{C}$ 、及 $+85^{\circ}\text{C}$ 的 5 個程序的熱循環試驗，通常應符合下

列標準：

- (1) 容許誤差不得超過 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。
- (2) 環境溼度需介於 0%~90%，未凝結。
- (3) 溫度上升率不得快於每小時  $10^{\circ}\text{C}$ 。
- (4) 測試順序依序為 $+25^{\circ}\text{C}$ 、 $+85^{\circ}\text{C}$ 、 $+25^{\circ}\text{C}$ 、 $-40^{\circ}\text{C}$ 、 $+25^{\circ}\text{C}$ 。
- (5) 每一溫度測試停留時間最少於 2 小時。

經上述測試後，指示器應無任何異狀。

## (二) 浸水試驗(Water Submersion Test)

將通過溫度循環試驗之故障指示器，再依下列順序作浸水試驗：

- (1) 浸入溫度  $20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 、深度 4.5 公尺(15 呎)以下之水中最少 48 小時。
- (2) 浸入溫度  $70^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$  以上、深度 4.5 公尺以下之水中最少 48 小時。
- (3) 恢復浸入溫度至  $20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 、深度 4.5 公尺以下之水中最少 2 小時。
- (4) 浸入溫度  $5^{\circ}\text{C}$ 、深度 4.5 公尺以下之水中最少 48 小時。
- (5) 恢復浸入溫度至  $20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 、深度 4.5 公尺以下之水中最少 2 小時。

[註：深度 4.5 公尺(15 呎)亦可以水壓 6.5PSI 替代]

經過上述(1)~(5)浸水循環試驗後，故障指示器所有介面不得有水份或濕氣進入其內部。

- (6) 完成上述測試後繼續依規範規定，能通過置於不同溫度環境中 3 小時後，施作觸發範圍及復歸電流試驗各 10 次。

上述第(一)項及第(二)項試驗係參照 IEEE Std 495-2007 [89]規定辦理。

## (三) 腐蝕試驗(Immersion Corrosion Test)

將故障指示器浸置在模擬環境酸雨之試劑(如環保署所公告之事業廢棄物毒性特性溶出程序(TCLP NIEA R201.12C)之萃出液)中 18 小時，取出後檢視外觀不得有任何腐蝕現象。

## (四) 耐風壓試驗

將故障指示器分別夾置於#1 AWG 高壓交連 PE 電纜或 477MCM 高壓交連 PE 風雨線上，在風速 40m/s (13 級風)中測試至少 10 分鐘後，該故障指示器不得有位移 5 公分、變形、脫落、被觸發等不良情形。本項試驗係參照台電公司高壓架空配電線路裝用之高壓被覆蓋材規[90]之耐風壓試驗項目而訂定。

## (五) 戶外氣候試驗

將故障指示器裝置於符合 CNS11231 日光碳燈式耐候試驗器內，實施耐候試驗，時間最少為 96 小時；試驗後故障指示器功能保持正常，且不得有生鏽、裂痕、剝落、變色、變形、被觸發等不良狀況發生，以證明故障指示器在裝用後經陽光直接曝曬或風吹雨淋下，在預期使用壽命內，可維持正常運作。

#### (六) 鹽霧試驗(Salt Spray Test)

將故障指示器依現場裝置方式設置於符合 CNS3627 規定之鹽霧試驗裝置內，依規定實施鹽霧試驗時間最少為 48 小時；試驗後故障指示器之功能要維持正常，且不得有生鏽、裂痕、剝落、變色、變形、被觸發等不良狀況發生，以證明故障指示器裝用在鹽霧害嚴重侵蝕下情況下，在預期使用壽命內，可維持正常運作。

台電公司台北南區營業區在民國 97 年 9 月至 10 月間，曾試裝故障指示器於文山地區架空配電線路，其防水耐候性能等均甚良好。

### 5.3.2 故障指示器之安全性

有關故障指示器裝用後之安全性，在採構規範上應考慮下列事項：

- (一) 種類：可選用單相用電流觸發電流復歸型或手動復歸型者。
- (二) 額定部分：
  - (1) 電流復歸型之觸發電流：100A (適用於密封型桿上變壓器)。
  - (2) 觸發電流允許誤差： $\pm 10\%$ 。
  - (3) 電流復歸型之最小復歸電流：3A (適用於密封型桿上變壓器觸發電流 100A)。
  - (4) 最大連續負載電流：25.3A (適用於密封型桿上變壓器)。
  - (5) 電流復歸型之最大復歸時間：120 秒。
  - (6) 自動復歸時間(僅限工作電源為電池之線路故障指示器)： $4\pm 10\%$ 小時。
- (三) 材料及構造方面：

材料：故障指示器外殼材質須採用符合 ANSI/IEEE 495 [89]規定之材質，例如可採用主要成份為耐熱、耐水、耐腐蝕性、耐臭氧性及耐老化性等優良之三元乙丙橡膠(EPDM)或其同等品製成，其所有之相關組配件(含夾件)亦須符合前述條件。

構造及主要功能特性：

- (1) 線路故障指示器：須包含感應元件及指示元件。
- (2) 當線路發生故障時，指示元件之動作應有明顯易見之顯示，如使用 LED 燈等。
- (3) 線路故障指示器之動作時間-電流特性須符合下列規定：
  - (a) 須與台電公司線路保護設備協調：觸發電流 100A 者，應以 167KVA 密封型桿上變壓器保護熔絲最小熔斷曲線考量。
  - (b) 須具備抑制線路湧入電流的功能：觸發電流 100A 者，湧入電流以 630A、0.01 秒，300A、0.1 秒考量。
  - (c) 動作時間-電流範圍應符合台電公司配電系統保護協調曲線，選擇可與其上游過電流保護設備取得協調者，但宜選用反應時間但宜選用反應時間較快者為宜。
- (4) 感應元件及指示元件應具防水性、耐腐蝕性及容易、可重複安裝使用及配合活電操作棒安裝及拆卸等作業。
- (5) 故障指示器須能牢固安裝密封型桿上變壓器一次側電纜肘型端頭下方處或電纜終端接頭下方處。
- (6) 故障指示器為電流觸發型者，線路電流未達觸發電流時，不得發生觸發動作。
- (7) 故障指示器使用之電源為線路電流或故障指示器本身之電池。
- (8) 工作電源為電池之故障指示器，若於觸發 4 小時 $\pm$ 10%後，線路仍未恢復供電，必須能自動復歸，並可以手動復歸。
- (9) 工作電源為電池之故障指示器，電池容量經計算在觸發模式下(指示元件動作)必須能供應 400 小時以上，其使用壽命須達 10 年以上。
- (10) 須有電池低電量指示功能。

### 5.3.3 故障指示器之使用壽命、維護週期、成本

依據台電公司台北南區營業區在民國 97 年 9 月至 10 月間於文山地區架空配電線路試裝故障指示器，經過 60 日的試用，歷經辛樂克及蕃密二次強烈颱風侵襲，LED 燈持續觸發亮燈 1440 小時；初步評估工作電源為電池之故障指示器，可符合要求使用至少 10 年之估計值。另參考國外相關製造廠 Cooper 及 SEL (Schweitzer Engineering Laboratories)所提供電業的裝用經驗，可達 20 年之久，符合配電設備使用壽命之基本要求。

在安裝前，應檢視「故障指示器」器材外觀良否？有無破損？配件是否齊全？並依施工說明書正確裝用，以利事故時能確時顯示。安裝後應即建檔管控，依製造年月排定優先檢查順序，或配合線路巡檢週期，檢測、汰換，並於管控表內註明檢測結果，且將其裝置位置及產品資訊標註於配電電腦圖資系統(DMMS)或饋線操作圖內等相關圖資上，以利搶修作業時之運用。此外，應配合密封型桿變或線路之拆遷或異動，施工部門(含承攬商)須將拆除之線路故障指示器送交維護部門，以便重新檢討裝用，並依「配電圖資制度手冊」之相關規定更新相關圖資，俾便「故障指示器維護週期」之追蹤及掌控。

在未實施線路自動化區段之 11.4/6.6kV 及 22.8/13.2kV 高壓架空配電線路及在密封型桿上變壓器之一次側，裝設故障指示器作為判斷線路及密封型桿上變壓器是否正常運作，現階段不失為檢出線路及密封型桿上變壓器是否發生故障之有效方法；可避免操作人員對線路及已有內部故障之變壓器再行試送電，造成對人員傷害及設備之損害，且可減少試送電次數，對研判並掌控縮少停電範圍及減少停電時間，加速修復線路上故障設備，具有實質上的效益。目前亦有不少國外的電力公司都廣為裝用。考量台電公司整體營運成本，僅些微增加故障指示器之單項材料、施工及維護費用而已，如選用合適之故障指示器，除具有形效益外，對提升台電公司之形象，裨益甚大。

## 5.4 故障指示器之結論與建議

有關適用於密封型桿上變壓器之故障指示器型式，因密封型桿上變壓器與普通型桿上變壓器不同，其主要不同點係普通型桿上變壓器一次側使用帶電體露出的套管；而密封型桿上變壓器一次側係使用套管插頭配合肘型端頭及高壓電纜引接於架空線，帶電體不露出，其與亭置式變壓器一次側結構相同。因此如要加裝故障指示器，可比照亭置式變壓器方式，建議如下：

- (1) 故障指示器之復歸型式有時間復歸型、電流復歸型、電壓復歸型及手動復歸型，經檢討上述四種復歸型均可適用於亭置式變壓器，密封型桿上變壓器可比照辦理。但電流復歸型、電壓復歸型及時間復歸型較適用於高壓架空或地下線路，因供電線路故障停電修妥後再復電，線

路上所有故障指示器均依所要求的電流值或電壓值或時間內自動復歸；而如密封型桿上變壓器故障停電，經修妥復電，故障指示器即可由現場搶修人員予以復歸。建議使用手動復歸型或肘型端頭測試點電壓復歸型之故障指示器；但使用時間復歸型亦可，因其附有手動復歸按鈕。另要考慮的是測試點電壓復歸型之故障顯示燈較不易看見。

- (2) 觸發電流額定之選用有兩種方式，一種係依現場負載電流大小自動選擇適當的觸發電流值，其價格較貴，密封型桿上變壓器不宜選用；另一種可依需要自行選用電流值，再由廠家設定觸發電流值。密封型桿上變壓器之一次額定全載電流較小(最大容量 167kVA 為 25.3A)，而觸發電流額定之選用，一般為滿載負載電流之 2~4 倍(50.6~101.2A)，所以觸發電流額定，建議選用 100A。至於故障指示器之觸發反應時間(1~200ms)選用，得依觸發電流之電流與時間曲線與上游過電流保護設備之動作曲線取得協調；反應時間較快者，較易協調。
- (3) 密封型桿上變壓器使用之故障指示器，如變壓器修妥復電時，變壓器鐵心激磁會產生湧入電流，而使故障指示器誤動作，因此建議故障指示器應具有湧入電流抑制功能，以防止誤動作。至於湧入抑制反應時間(1~300ms)，可依選用故障指示器類型，選擇可與其上游過電流保護設備取得協調者；但宜選用反應時間較快者。
- (4) 故障指示器具有復歸抑制功能，其可消除因回饋電壓而引起線路已故障之誤復歸；因其對高壓地下電纜系統較有需要，密封型桿上變壓器不需考慮。
- (5) 電纜相鄰中如有一條電纜故障，會使相鄰電纜產生磁場效應，而引起相鄰電纜上之故障指示器誤觸發，須予預防；因其對高壓地下電纜系統較有需要，密封型桿上變壓器不需考慮。
- (6) 故障指示器之指示元件，建議使用 LED 燈顯示方式。至於正常或修妥復電後、故障停電之 LED 燈顯示顏色或不顯示建議依台電維護現場人員之決議定之。
- (7) 附熔絲之肘型端頭安裝於測試點之故障指示器

熔絲肘型端頭係於肘型端頭內部增加限流熔絲，如圖 5-6 所示，有兩處測試點分別於熔絲電源側及負載側，可於該處裝置感應式 LED 故障指示器，此種故障(電壓)指示器與其內套之外觀，如圖 5-7 所示，

其實是一種電壓指示器(Voltage Indicator)，美國不同製造廠家亦皆稱其為電壓指示器。

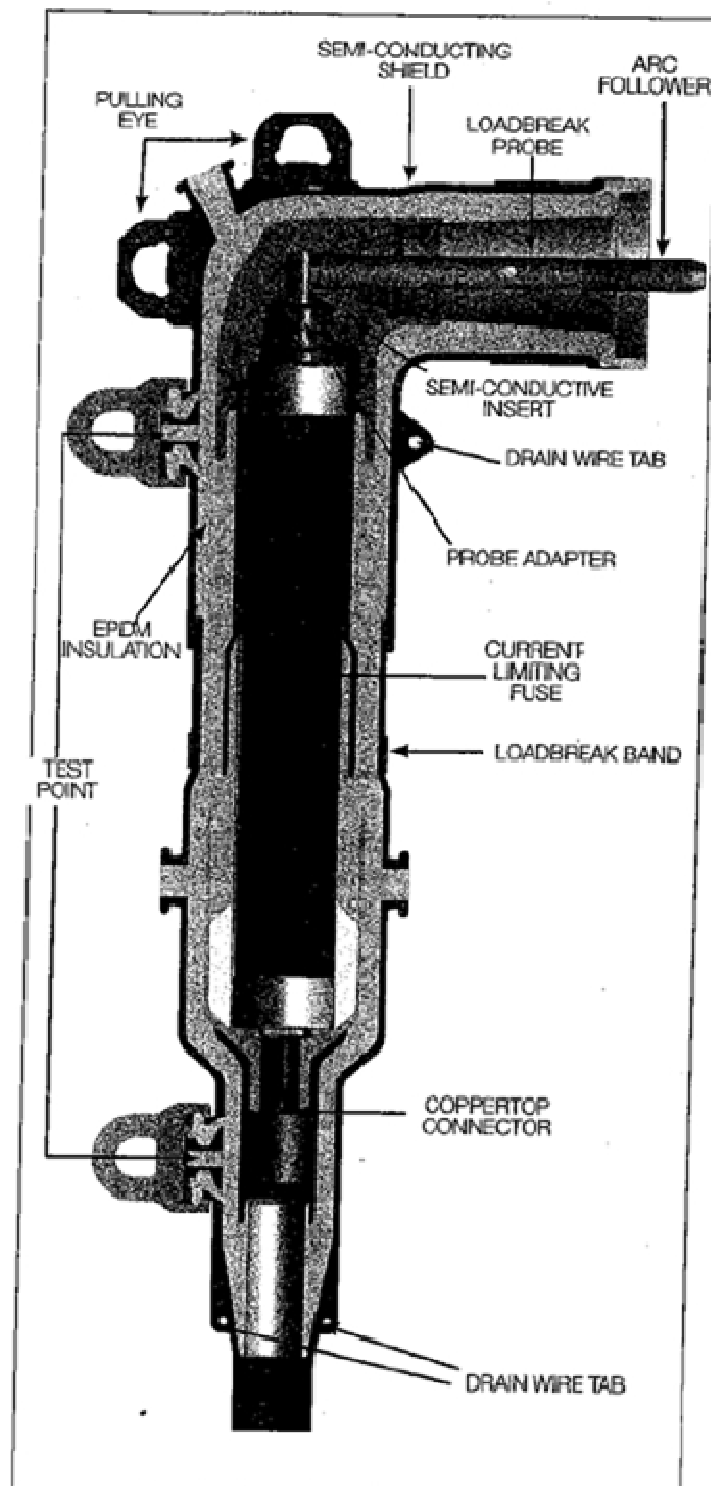


圖 5-6 熔絲肘型端頭

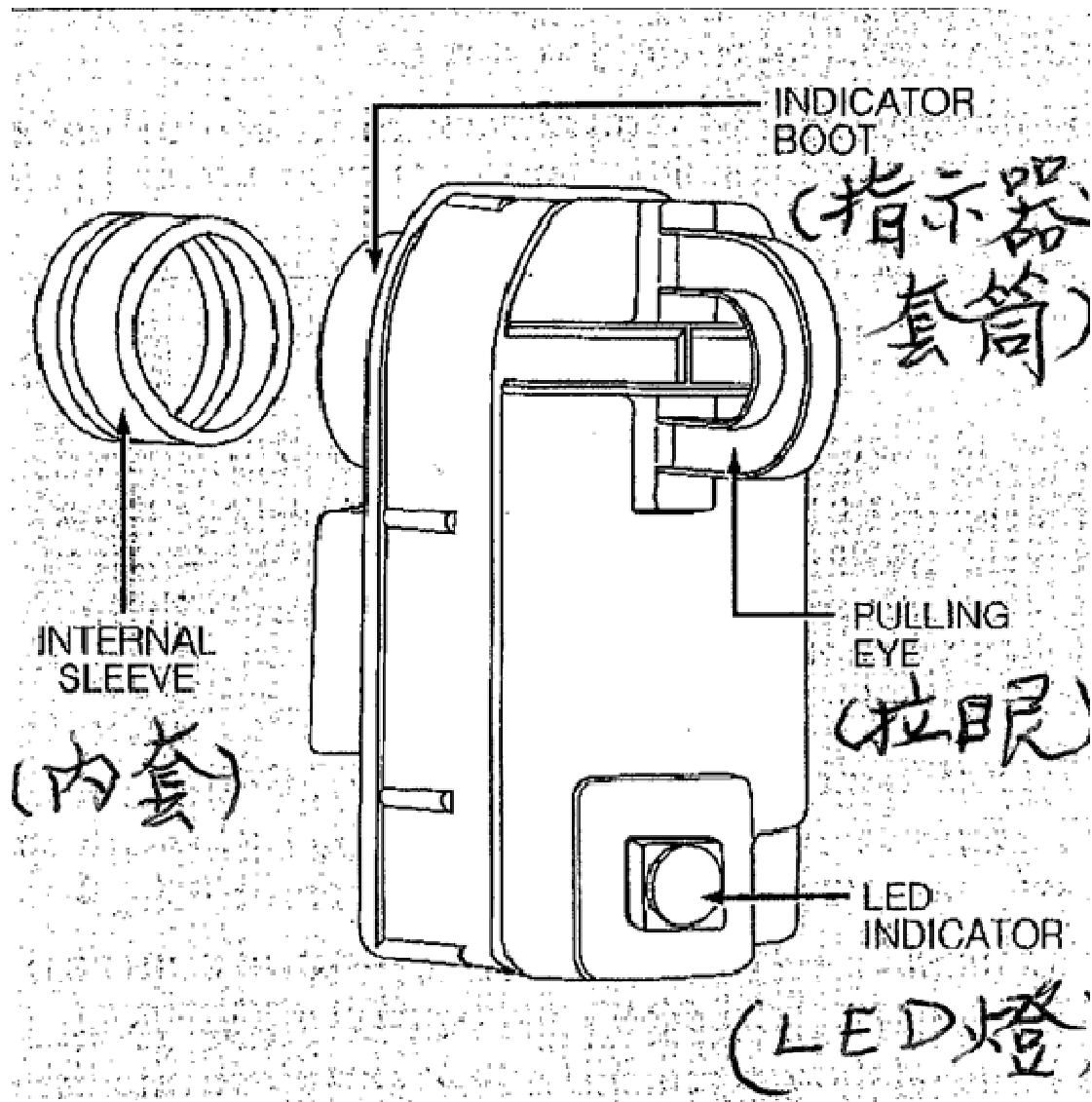


圖 5-7 熔絲肘型端頭故障(電壓)指示器

熔絲肘型端頭故障(電壓)指示器因電容性測試點可感應出帶電電纜之電場強度，當電場強度累積到一定電壓後，安裝於測試點上之電壓指示器，其感知器(Sensor)之高強度 LED 燈即會被接通而產生閃爍現象；利用這個原理可據以確認電纜線路有無帶電。若熔絲於正常供電中，則兩側測試點之電壓指示器均會顯示有電，電壓指示器上之高強度 LED 燈即會發生閃爍，表示有電壓存在；當熔絲熔斷時，電源側測試點之電壓指示器會閃爍，表示有電，其負載側測試點之電壓指示器則因斷電而顯示無電壓，即電壓指示器 LED 燈不會亮。因此，可輔助事故處理之判斷。當系統斷電時，電壓指示器之 LED 燈即不會閃爍，表示停電。透過指示器 LED 燈之閃爍情況，即時提供運轉

維護人員判斷電纜線路是否帶電之參考，以及輔助事故處理之判斷。

此等電壓指示器係由一體成型之外盒包封而成，具全密封、全絕緣、耐腐蝕、可浸入水中等適應各種惡劣環境之特性，其規格符合或超越 ANSI/IEEE 規範之規定；結構卓越、堅固及可靠；為求迅速找出線路故障點，進而縮減故障停電時間，此種附熔絲之可切肘型端頭安裝於測試點之電壓指示器不失為一種經濟實惠的工具。

此等電壓指示器可使用操作桿活線安裝在 6 至 35kV 多種廠牌，施工作業時，使用操作桿操作電壓指示器之拉眼(Pulling eye)，很容易即可進行安裝。

至於正常或修妥復電後、故障停電之 LED 燈顯示顏色或不顯示建議依台電維護現場人員之決議定之。

#### **熔絲肘型端頭評估分析：**

- (1) 高壓側肘型端頭加裝保護熔絲，其熔絲係包覆於肘型端頭內，外覆 EPDM 全絕緣熔絲筒，抗 UV；全絕緣設計，避免人員、動物誤觸感電危險。
- (2) 熔絲肘型端頭之功能可取代現行之熔絲鏈開關+限流熔絲+肘型端頭，甚至可取代遮斷開關，並有故障指示器功能；整組成本應些許便宜或相當，包括：變壓器移出限流熔絲及遮斷開關後，不鏽鋼變壓器筒尺寸可縮小約 1/6，減少成本約 NT\$2,500/台；變壓器尺寸縮小，絕緣油使用量可減少約 30 公升，降低成本約 NT\$1,800/台。
- (3) 安裝熔絲肘型端頭後，變壓器外觀尺寸縮小，重量減輕，方便搬運及安裝，並可減輕電桿的承重力。
- (4) 熔絲肘型端頭具有測試點線路故障指示器，能簡單快速找出故障點。
- (5) 熔絲肘型端頭安裝與一般肘型端頭施工法無異，施工簡便，產品安裝可與電纜施工一併完成後，整組與高壓套管接合即可，大幅減少人員空中作業的時間，降低變壓器的安裝成本。維護或變壓器發生熔絲熔斷時，可直接於現場檢測維護，直接於變壓器外部迅速安裝更換，無需拆卸/安裝變壓器，節省拆裝費用約 NT\$1,500/次 x2 次(拆、裝各一次)；且不需切開變壓器，更節省搬運與維護成本。
- (6) 熔絲肘型端頭使用限流型熔絲，熔斷時不會有任何聲響，不致驚嚇

鄰近住戶，又可降低變壓器溢油之危害；因原桿上密封型變壓器內之熔絲熔斷時有溢油之可能。而熔絲鏈開關熔斷時會產生火花伴隨巨大聲響，以致驚嚇居民，引起民怨。

- (7) 台電公司計畫並已準備將架空系統升級為 11.4kV/22.8kV 雙電壓，未來在做 11.4kV 或 22.8kV 電壓等級更換時，只要直接在現場抽換熔絲肘型端頭內的限流熔絲即可，不需將變壓器送回維修廠開蓋漏油後才能更換熔絲，可大幅節省人力及成本。
- (8) 安裝熔絲肘型端頭後，每年可大幅節省變壓器採購預算。為縮短停電時間，各區處會保持變壓器年使用量的 5-10%作為安全庫存，當變壓器因熔絲熔斷造成停電時，維修人員會直接將變壓器拆下，先以庫存的變壓器更換安裝。安裝熔絲肘型端頭後，可減少安全庫存；若每一區處將安全庫存減半，僅保留年使用量的 2.5-5%作為庫存，以平均每台約 NT\$ 50,000，年採購量約 40,000 台估算，整年約可節省預算 NT\$ 50,000,000 ( $\$50,000/\text{台} \times 40,000 \text{ 台/年採購量} \times 2.5\%$ ) ~ NT\$ 100,000,000。

## 第六章 檢討計算饋線上下游之保護協調關係

檢討計算饋線上、下游之保護協調關係，檢討範圍含二次變電所饋線電源側、主幹線分段(隔離)開關、分歧線熔絲鏈開關、密封型桿上變壓器之遮斷開關、全域型限流熔絲，以及密封型桿上變壓器二次側電路。本章主要探討針對設備的保護協調方式，如熔絲、遮斷開關與斷路器之間的保護協調方式進行說明；並透過實際的情形進行保護協調設計與繪製協調圖，最後提出相關之建議。

### 6.1 饋線設備保護協調概念

隨著時代的發展，電力系統所使用的設備與元件也愈來愈多元，更精密的設備也陸續開發並應用在市場上。因此，各項設備在使用上，安全上與成本上的考量也逐漸是電力公司主要的衡量項目；近年來，綠能概念的興起，各種設備之使用性與使用週期也受到關注。為了讓系統的設備能得到完善的使用，並減低破壞性的操作所造成的設備損壞，各種過電流保護設備的出現與相關保護應用之原則也陸續建立，這些方式皆是針對所要進行重要設備之保護或相關性之設備進行設計與考量。一般而言，進行保護操作之設備在需求上，至少都有一個關鍵的系統元件需要進行保護操作，透過這樣的操作保護，得以確保設備在使用上除了延長其使用壽命之外，更可以保障相關人員之安全。

電力系統保護協調的目的在於當故障發生時，各過電流保護設備之動作時間能取得良好的協調，原則上靠近故障點的過電流保護設備應先動作，清除並隔離故障，在電源側的保護設備應較慢動作，亦即後者作為前者的後衛保護。保護協調亦即在進行故障電路與系統隔離的操作，透過如此的操作來避免不必要的停電區域出現。但是，若要進行長期的保護協調，在此協調方式下所採用的保護協調設備，只允許一個保護裝置動作，以確定最小範圍內的故障得以隔離；因此，選擇保護設備與設備間的協調操作是用來表示正常的整個保護範圍內，隔離可能產生的故障電流，並保證電力系統中的其他部分不會受到影響。這些設備的位置依照接近故障點的遠近有不同的名稱，最接近故障點之保護稱之為主保護(Protecting Device)，而

離故障點較遠的稱之為後備/後衛保護(Protected or Backup Device)，如圖 6.1 所示[91]。

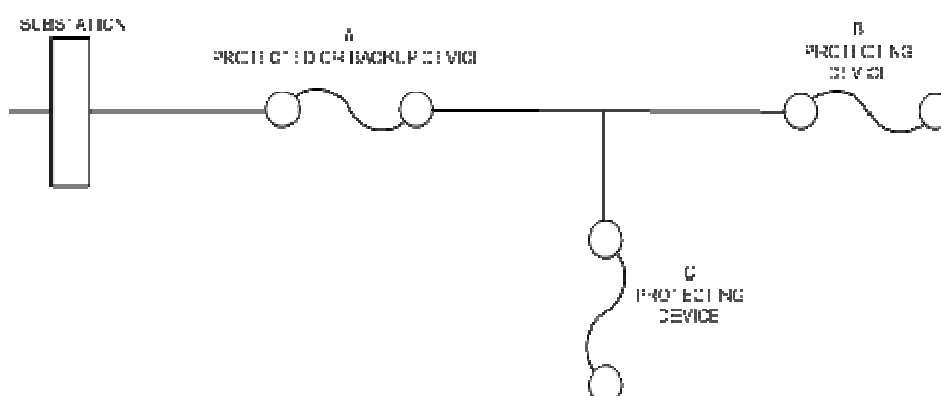


圖 6-1 傳統主保護與後備保護設備之定義(依安裝位置而定) [91]

適當之保護協調選擇與安裝設備都是依據配電保護基本規則來達成：

- (1) 大部份(高於 70-80%)的故障為暫時性故障。
- (2) 只針對永遠性故障進行鎖定(中斷電力)。
- (3) 只移除最小可能的部份區域。

更複雜的保護方式遠比圖 6-1 複雜，許多設備同時俱有主保護與後備保護的角色，端看發生故障的位置而定。因此，有自動復閉能力的設備，如復閉電驛與線路復閉器等可以提供更合適的保護(於暫時故障時進行)。

圖 6-2 所示為傳統的電力系統保護協調圖，顯示變電所從高電壓傳輸線的系統接收之電力，並逐步降低電壓到 11.4/22.8kV 的過電流協調過程，電力傳送給消費者是靠 7200V-120V/240V 變壓器(Distribution Transformer)來進行。圖 6-2 的系統中，設備 A 是位於變電所的饋線斷路器；B 為設置於分歧點的電力熔絲；C 和 H 則為位於饋線上的電力熔絲；D 則是位於配電變壓器一次側電力熔絲；最後 E、F 和 G 則是安裝在配電變壓器二次側的電力熔絲。保護設備必須於正常狀況下不可動作，而於故障時，依照其保護協調的設計動作[91]。以圖 6-2 的系統為例：

- (1) 針對故障點 1，設備 H 必需熔斷且 C 不能損壞(開始熔化)。
- (2) 針對故障點 2，保護設備為 C，並在 A 動作前熔斷。
- (3) 針對故障點 3，保護設備為 B，並在 A 動作前熔斷。
- (4) 針對故障點 4，只有設備 A 動作。

- (5) 針對變壓器一次側故障發生在點 5，設備 D 應中斷故障電流。
- (6) 若變壓器二次側故障發生在點 6，設備 E 應中斷電路，因此位於變壓器二次側的其他用戶仍可以供電。

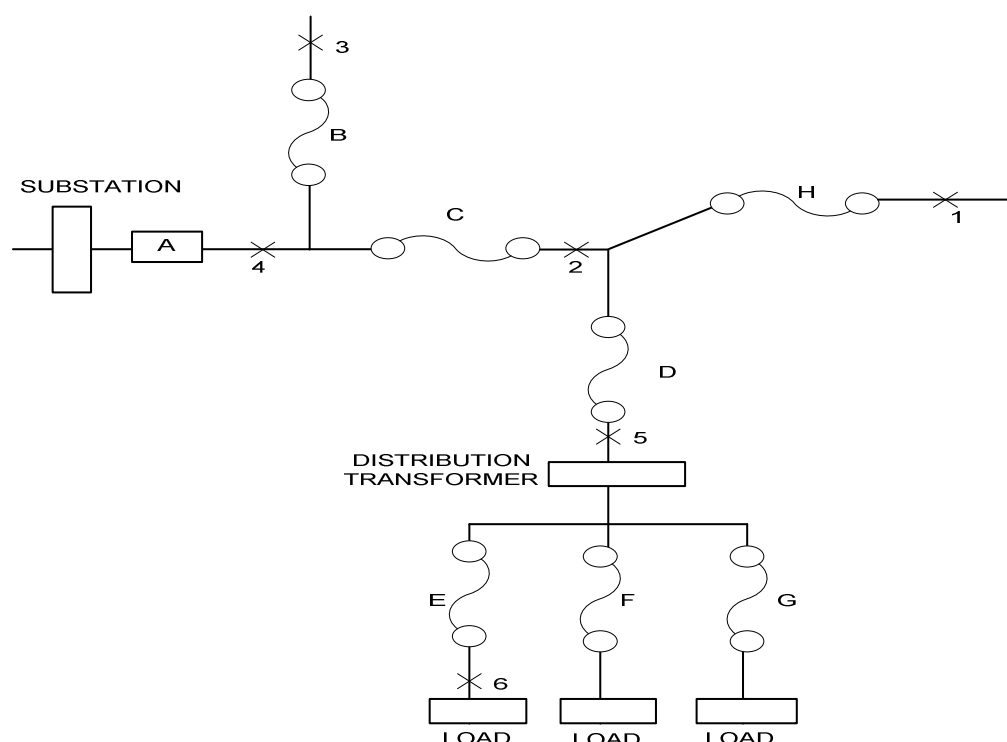


圖 6-2 傳統的電力系統保護協調圖[91]

### 6.1.1 熔絲-熔絲之協調

假設所發生的故障是永久性之故障，在最少可能的故障點可以移除之條件下進行熔絲間之保護協調規劃。一般而言，兩個或三個以上的熔絲規劃是設計處理系統故障條件之方式之一；主保護熔絲之最大清理時間設計是以後備保護熔絲之最小熔化時間的 75% 為原則，此設計可以確定故障可以清除並確保後備保護設備不會動作，大部份的保護協調實例中，是參考特定型式熔絲的時間-電流特性曲線進行設計。保護協調之操作則要確定電源與被保護設備連接之安全性，考慮因素包含有[91]:

- (1) 誤差容許度(tolerance)
- (2) 溫度(ambient temperature)
- (3) 空載效應(preloading effects)
- (4) 先前損壞效應(pre-damage effects)

實際上，這些因素考慮後所決定數值通常是直接降低 75% 之值來使

用，此設定期望可以達到最適合的協調(避免保護設備之間連結所發生的危險)，並保證保護設備間經過互相之連結後，其最大主保護熔絲清除時間並不會超過後備保護熔絲最小熔化時間的 75%。

而且，時間-電流特性的容許誤差(tolerance)通常會納入考慮，覆蓋曲線和保護設備間的最大清理時間與最小之熔化時間則是納入連接保護的評估項目。大部份的時間-電流特性都是在攝氏 25 度的環境溫度下進行建置，高溫環境會降低熔絲的熔化時間；相反的，環境溫度愈低則熔絲的熔化時間會相對的增加，如圖 6-3 所示[91]。

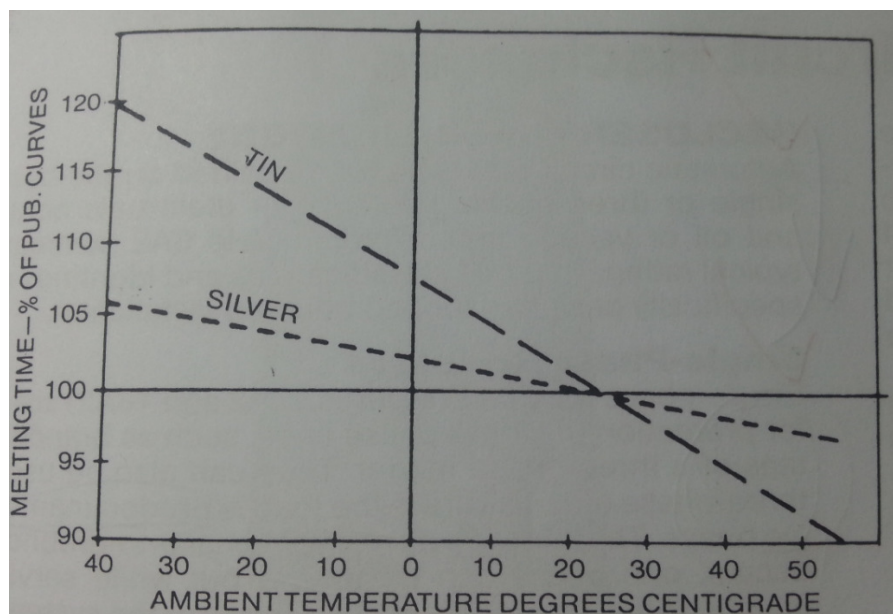


圖 6-3 說明熔絲的熔化時間與環境溫度有密切關係，而流經熔絲的電流所引起的溫度提昇，同樣會減少熔絲的熔化時間。實務上，熔絲的特性會影響到保戶協調的要求，但時間-電流特性曲線並不會考慮這些因素；然而為了避免這樣設計所造成的影響，連接的保護設備必需限制經過的電流在最小熔化曲線的 90% 以下[91]。

圖 6-4 所示為典型的保護協調設計，整個系統含饋線熔絲 A，分歧線上的熔絲 B 與 C，最大與最小故障電流資訊皆顯示在每個保護設備上。圖 6-5 中，針對系統上可能的事故點 C，顯示為熔絲 15T 的最大清除時間與最小熔化-時間曲線。在 1550 安培的故障電流下，提供最大清理時間 0.021 秒。若沒有其他設備需要協調或設備為分歧線上的最後一個熔絲時，則最小熔化時間就不是關鍵因素。對於 B 點，在 36 安培的連續電流下，中斷電流為

1630 安培且與 15T 的下游熔絲進行協調；由於 20T 熔絲只能在連續電流 30 安培下操作，因此不適用，需選擇可操作於 38 安培連續電流之 25T (1550 安培)熔絲在此點上，其最小熔化時間為 0.016 秒。

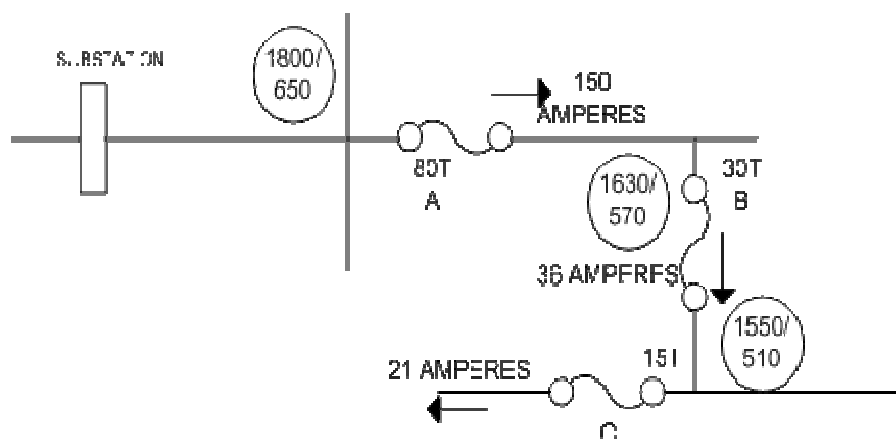


圖 6-4 透過時間-電流曲線進行熔絲協調方式

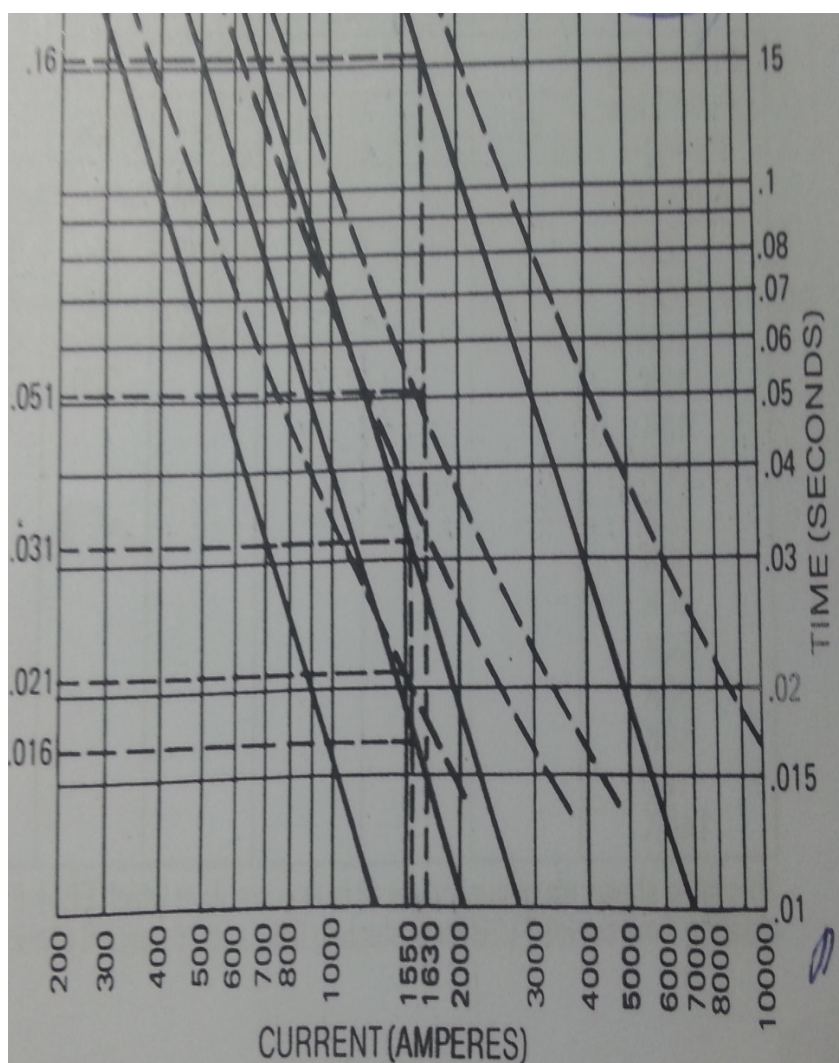


圖 6-5 熔絲鏈之時間-電流曲線[91]

### 6.1.2 電驛-熔絲協調

電驛-熔絲協調操作之應用包含電驛與電源側熔絲之保護協調與電驛與負載側器熔絲之保護協調兩種，在這兩種的應用中，電驛都是扮演斷路器控制之角色，但是兩個應用的協調方式則完全不同。電驛與電源側熔絲之保護協調的應用目標是透過斷路器之操作程序進行而不造成熔絲熔斷或損壞情況之發生；而電驛與負載側熔絲之保護協調之目標是設定電驛動作曲線，使其反應動作比熔絲曲線的反應動作慢，進而達到熔絲操作與隔離故障區之行為，此為較常見作法。電力系統使用的電驛，在全系統中必須有完整協調計劃，過電流電驛也不例外。過電流電驛之保護協調，必須考慮的項目如下[92-94]：

- (1) 於用戶內系統之短路、過負載事故均能確實動作。(假設事故點，繪製阻抗圖並計算出故障電流。)
- (2) 限流熔絲與遮斷器間之工作分擔必須適切。
- (3) 分歧線熔絲或過電流電驛間之動作協調。
- (4) 過電流電驛之限時要素之動作時間不得超出負載變壓器之熱特性曲線。
- (5) 對遮斷器動作時之變壓器激磁電流，過電流電驛 瞬時元件不得動作。
- (6) 發生事故時，變壓器、遮斷器、電纜及 CT (比流器)等設備需充分承受短時間強度或過負載耐量並審慎選用比流器。

## 6.2 故障電流分析

配電系統中因設備或線路絕緣不良，或其他原因所造成之故障，會產生很大的故障電流，此時，保護設備必須迅速地將故障之設備或線路切離，以阻止故障電流的繼續流通，使停電的範圍減至最少。在進行故障電流分析前，必須事先計算獲得電源側等效阻抗、變壓器與線路的等效阻抗[95]。

### 一、傳輸線阻抗(Impedance of transmission/distribution lines)

許多連接各設備間的電線長度是短線，是可以被忽略的，亦即在電線各點同一時刻的電壓可認為是相同的。但是，當電壓的變化和信號沿電線傳送的時間接近時，必須考慮電線長度，此時電線就必須被處理成傳輸線；如果傳輸線在長度範圍內是均勻的，其特性可以只用一個參數描述阻抗。

## 二、變壓器阻抗(Impedance of transformers)

變壓器阻抗是指變壓器裡的線圈的繞組的阻抗，包括：電阻、感抗、容抗等。變壓器的標準對阻抗、損耗都有明確規定，變壓器的阻抗通常由廠商依據變壓器的容量提供阻抗標么值(per unit, p.u.)。

## 三、電源阻抗(Source Impedance)

電源阻抗的含義即是變壓器一次側至電源的戴維寧等效阻抗，通常透過短路容量的提供可以獲得電源側阻抗。

## 四、故障阻抗(Fault Impedance)

在故障點，故障相導線與地間或與幾個故障相導線間發生的非正常連接的阻抗，如故障電弧電阻等。

配電系統中因設備或線路絕緣不良，或其他原因所造成之故障，會產生很大的故障電流(Fault-Current Magnitude)。保護設備啟斷故障電流的能力，稱為啟斷容量；若啟斷容量不足將無法啟斷故障電流，結果會損壞設備及線路，甚至造成更大災害。短路電流的大小，與電源、線路阻抗、變壓器阻抗及短路接地阻抗有密切關係，而與負載大小無直接關係。配電系統某一點發生短路故障時，其故障電流為  $I_f = V/Z$ ， $I_f$  為故障電流、 $V$  為電源電壓、 $Z$  為自電源到故障點的阻抗，包括發電機、變壓器、導線等的阻抗。短路故障，可分為三相短路故障，線間短路故障，二相短路接地故障及一相接地故障等。假設  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_0$  分別為發電機、變壓器或線路的正相序、負相序、零相序阻抗，則各式的故障電流計算可以由下面的算式獲得：

三相短路故障電流： $I_{3\phi} = V/Z_1$

單相接地故障電流： $I_{1\phi} = 3V/(Z_1 + Z_2 + Z_0)$

兩相短路的故障電流值，一般為三相短路故障電流的 87%；單相接地故障電流(指三相接地系統)，視零相序阻抗的大小而定，約為三相故障電流的 60-120%。

短路電流計算步驟如下：

- (1) 繪製單線圖
- (2) 繪製等效阻抗圖
- (3) 計算各電機(發電機與變壓器)及線路的阻抗標么值(p.u.)
- (4) 計算發電機戴維寧等效阻抗
- (5) 計算短路電流

### 6.3 保護協調

完整之配電系統中，自負載側至電源側是透過層層過電流保護設備串接而成；而控制保護設備動作之元件(熔絲、電驛、斷路器等)之時間-電流特性未必均相同，故須針對不同元件的動作時間，繪製系統上所有保護設備之時間-電流曲線，以確保系統能獲致良好的保護協調。本節中，針對三個不同容量的變壓器，繪製其保護協調曲線，並以變壓器之破壞曲線及熔絲熔段時間之相互關係圖來表示遮斷開關能夠在變壓器被破壞前跳脫，達到保護變壓器效果。圖 6-6 與圖 6-7 顯示遮斷開關與電力熔絲分別介於變壓器破壞曲線的左右側，且沒有產生交點，顯示此設備的保護裝置設計正確；圖 6-8 顯示遮斷開關位於變壓器破壞曲線的左側，但電力熔絲與破壞曲線在約 180A 到 300 間產生交點，顯示此設備的保護裝置設計與前兩例不同。

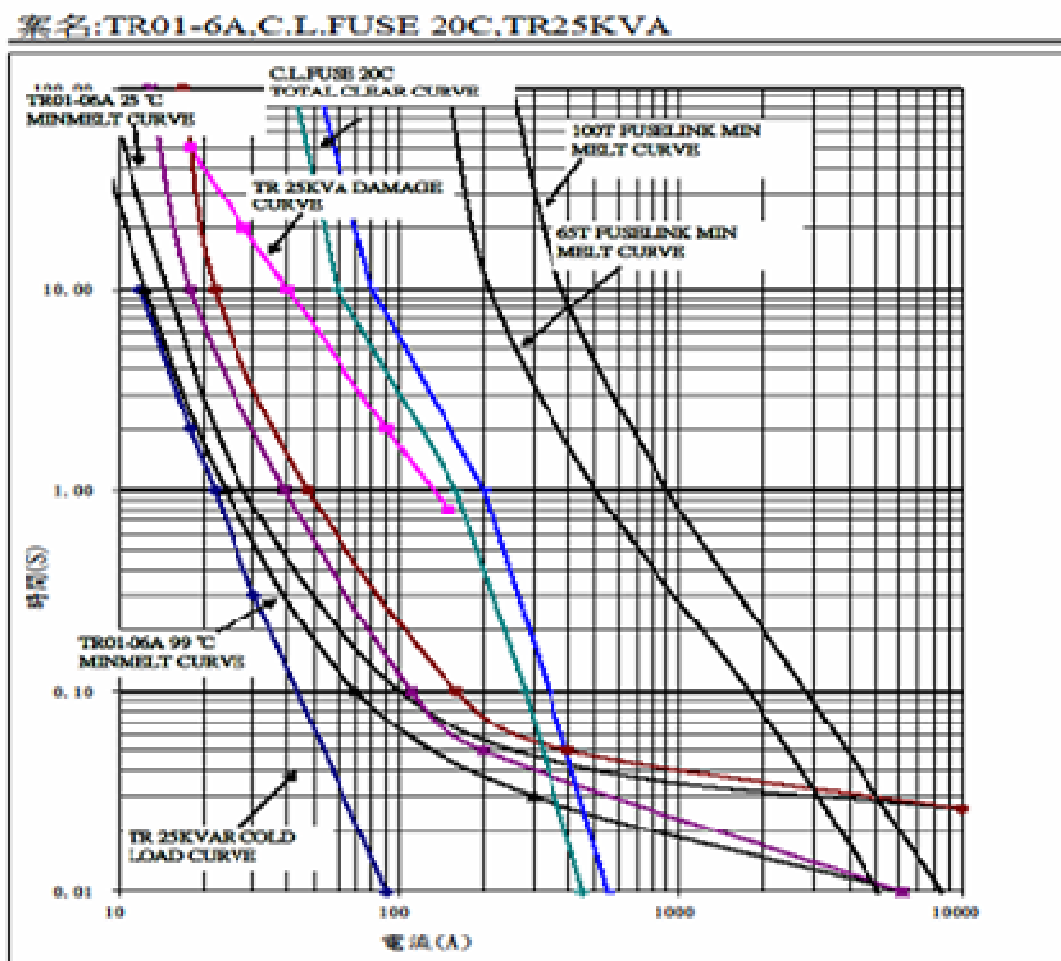


圖 6-6 TR01-6A, C.L.F.FUSE 20C, TR25kVA 保護協調曲線

案名:TR01-12A,C.L.FUSE 40C,TR50KVA

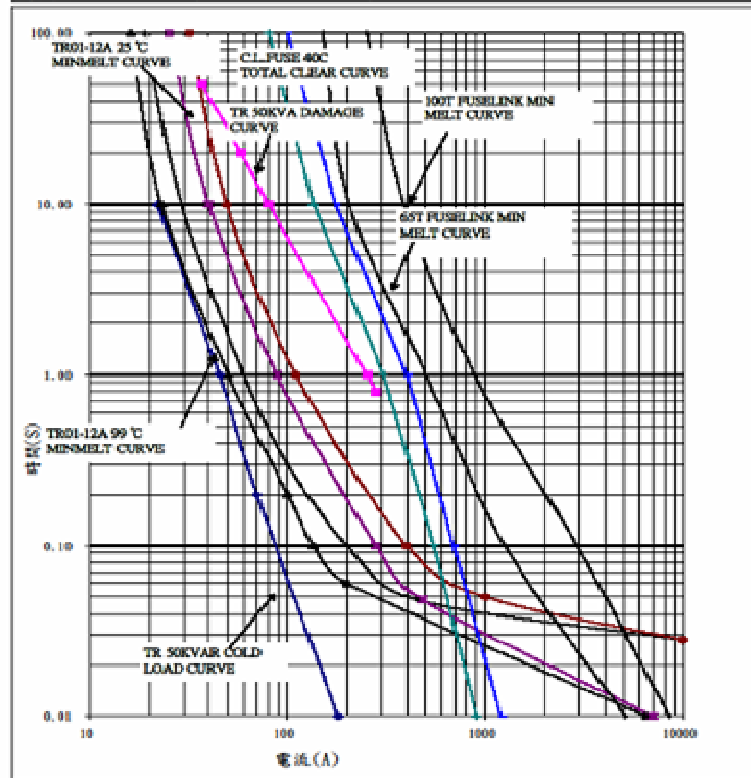


圖 6-7 TR01-12A, C.L.F.FUSE 40C, TR50kVA 保護協調曲線

案名:TR01-24A,C.L.FUSE 40C,TR100KVA

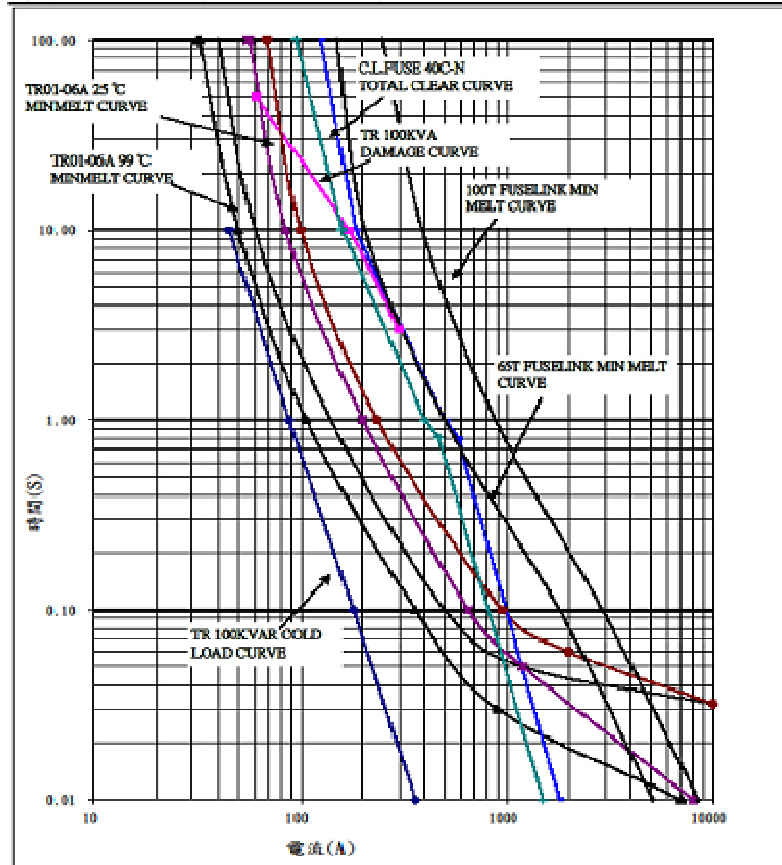


圖 6-8 TR01-24A, C.L.F.FUSE 40C, TR100kVA 保護協調曲線

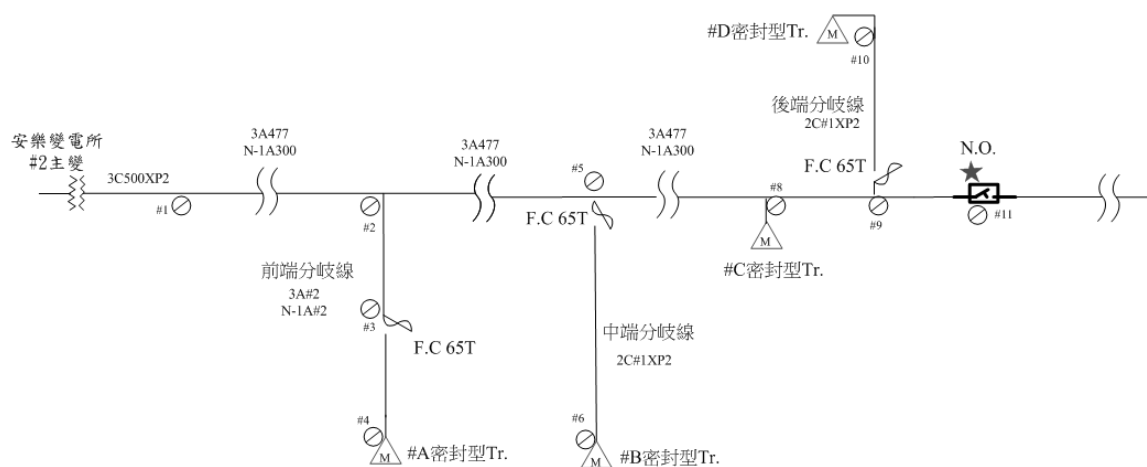
由於遮斷開關與熔絲均位於變壓器內，且兩者間距離甚近，因此兩者可以視為一保護設備；在低電流時由遮斷開關對變壓器進行保護，在高電流時，則由全域熔絲保護。以 TR01-06A 25°C 與 40-CN 熔絲為例，故障電流低於約 700A 時，遮斷開關動作；當故障電流高於 700A 時，40-CN 熔絲動作，對變壓器進行保護。如此設計既可兼顧變壓器二次側故障反映到一次側的較小的故障電流，也可以對變壓器一次側短路造成的故障電流進行保護。此外，此設計方式也可以與上游的分歧線熔絲達到協調的效果。

## 6.4 保護協調案例分析

本節依據台電公司所提供之資料，進行故障電流計算之說明，與變壓器保護協調曲線之繪製。

### 案例一(基隆區營業處)

(一) 饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖，如圖 6-9。



CC38 饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖

圖 6-9 案例一饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖

### (二) 故障電流計算所需資料

在進行故障電流計算之前，需先將相關資訊(變電所，變壓器，與故障點之間的參數)等蒐集完整，如表 6-1~表 6-3 所示。

表 6-1 案例一變電所與主幹線/分歧線線路相關資料

1.變電所相關資料	填報資料	備註
變電所主變容量(MVA)	25 MVA	
變電所主變一次側電壓(kV)	69 kV	
變電所主變一次側短路容量(Bus Duty)	323 MVA	
變電所主變百分阻抗 (ZT%)	9.40%	

2.主幹線/分歧線線路長度(km)	線徑	填報資料	備註
變電所主變-#1 線路長度(km)	3C500	0.69 km	
#1-#2 線路長度(km)	3A477	0.42 km	
#2-#3 線路長度(km)	3A#2	0.016 km	
#3-#4 線路長度(km)	3A#2	0.084 km	
#2-#5 線路長度(km)	3A477	0.177 km	
#5-#6 線路長度(km)	2C#1XP2	0.04 km	
#5-#8 線路長度(km)	3A477	0.062 km	
#8-#9 線路長度(km)	3A477	0.0125 km	
#9-#10 線路長度(km)	2C#1XP2	0.028 km	
#9-#11 線路長度(km)	3A477	0.1 km	

表 6-2 案例一變電所保護設備設定參數/分歧線保護設備-熔絲鏈開關型式

斷路器保護電驛		型式	Tap	Lever	備註
MCB	CO	SEL-351A	4	1	ANSI U3
	LCO	無	無	無	無
Tie CB	CO	SEL-351A	3	0.5	ANSI U3
	LCO	SEL-351A	1	2	ANSI U3
FCB	CO	SEL-351A	4	2	ANSI U4
	LCO	SEL-351A	1	3	ANSI U4
其他保護設備或設定		型式	設定值		備註
復閉電驛		SEL-351A	一段 15sec		
瞬時跳脫元件(IIT)			無		
其他保護設備			無		
熔絲鏈開關安裝處		熔絲鏈型式(如 65T 或 40T 等)			備註
前端分歧線(如範例#3 F.C)		65T			
中端分歧線(如範例#5 F.C)		65T			
後端分歧線(如範例#9 F.C)		65T			

表 6-3 案例一密封型桿上變壓器容量

密封型桿變安裝處	供電方式	容量
前端分歧線(如範例#A)	3 相 3 線	25kVA/25kVA
中端分歧線(如範例#B)	3 相 3 線	100kVA/25kVA
主幹線(如範例#C)	1 相 3 線	50kVA
後端分歧線(如範例#D)	1 相 3 線	50kVA

### (三) 故障電流計算

主變壓器容量與一次側的電壓如下：

MVA Base = 25MVA，KV Base = 69kV

則計算基值電流與阻抗如下：

$$I_{base} = I_b = \frac{25MVA/3}{69kV/\sqrt{3}} = 209A$$

$$Z_{base} = Z_b = \frac{69kV/\sqrt{3}}{I_b} = 190\Omega$$

同理，由主變壓器之二次側電壓計算基值電流與阻抗如下：

KV Base = 11.4kV

$$I_{base} = I_b = \frac{25MVA/3}{11.4kV/\sqrt{3}} = 1266A$$

$$Z_{base} = Z_b = \frac{11.4kV/\sqrt{3}}{I_b} = 5.2\Omega$$

計算為電源側阻抗之標么值為：

$$Z_s = \frac{V_{pu}^2}{\frac{MVA_{3\phi, fault}}{MVA_{3\phi, base}}} = \frac{1.0^2}{323MVA/25MVA} = 0.0774 pu$$

首先，計算由主變壓器到故障點#1 之阻抗值，其傳輸線相關資料為導體：3C500 (15kV 500MCM)，長度：0.69km

正序/負序單位長度阻抗：0.1084+j0.1369  $\Omega/km$

零序單位長度阻抗：0.5461+j0.1415  $\Omega/km$

透過導體線路長度與正/負/零序單位長度阻抗，即可計算出阻抗標么值：

正序/負序阻抗：

$$Z_{1pu}^{0-1} = Z_{2pu}^{0-1} = \frac{0.07480 + j0.09446}{5.2} = 0.01438 + j0.0186$$

零序阻抗：

$$Z_{0pu}^{0-1} = \frac{0.3768 + j0.0937}{5.2} = 0.07246 + j0.00349$$

同理，得以計算各故障點間之正/負/零序之阻抗標么值，結果如表 6-4 所示。

其中#1->#2，#2->#3，#3->#4 的正/負/零序之阻抗標么值分別計算如下：

#1->#2 的正/負/零序之阻抗標么值：

導體：3A477，長度：0.42km

正序/負序單位長度阻抗：0.131+j0.360 Ω/km

零序單位長度阻抗：0.055+j0.244 Ω/Km

$$Z_{1pu}^{1-2} = Z_{2pu}^{1-2} = \frac{0.0550 + j0.1512}{5.2} = 0.01058 + j0.02908$$

$$Z_{0pu}^{1-2} = \frac{0.0231 + j0.1025}{5.2} = 0.0044 + j0.0197$$

表 6-4 案例一各線段阻抗標么值

主幹線/分歧線 線路長度(km)	線徑	填報資料	正序/負序阻抗	零序阻抗
主變-#1	3C500	0.69 km	0.0144+j0.0182	0.0725+j0.0188
#1-#2	3A477	0.42 km	0.0106+j0.0291	0.0044+j0.0181
#2-#3	3A#2	0.016 km	0.0029+j0.0016	0.0005+j0.0011
#3-#4	3A#2	0.084 km	0.0153+j0.0082	0.0024+j0.0058
#2-#5	3A477	0.177 km	0.0045+j0.0123	0.0019+j0.0076
#5-#6	2C#1XP2	0.04 km	0.0046+j0.0039	0.0010+j0.0024
#5-#8	3A477	0.062 km	0.0016+j0.0043	0.0007+j0.0027
#8-#9	3A477	0.0125 km	0.00003+ j0.0008	0.0001+ j0.0005
#9-#10	2C#1XP2	0.028 km	0.0032+j0.0027	0.0007+j0.0017
#9-#11	3A477	0.1 km	0.0025+j0.0069	0.0011+j0.0043

#2->#3 的正/負/零序之阻抗標么值：

導體：3A2，長度：0.016km

正序/負序單位長度阻抗：0.945+j0.507 Ω/km

零序單位長度阻抗：0.149+j0.356 Ω/km

$$Z_{1pu}^{2-3} = Z_{2pu}^{2-3} = \frac{0.01512 + j0.0081}{5.2} = 0.002908 + j0.00156$$

$$Z_{0pu}^{2-3} = \frac{0.0024 + j0.0057}{5.2} = 0.00046 + j0.0011$$

#3->#4 的正/負/零序之阻抗標么值：

導體：3A2，長度：0.084km

正序/負序單位長度阻抗：0.945+j0.507 Ω/km

零序單位長度阻抗：0.149+j0.356 Ω/km

$$Z_{1pu}^{3-4} = Z_{2pu}^{3-4} = \frac{0.007938 + j0.0426}{5.2} = 0.01526 + j0.00819$$

$$Z_{0pu}^{3-4} = \frac{0.0125 + j0.0299}{5.2} = 0.0024 + j0.00575$$

在計算完成各線路間之阻抗標么值之後，即可以計算各點的三相故障電流如表 6-5 所示。

表 6-5 案例一各故障點之故障電流

位置	三相短路故障電流
#3	3293
#4	3145
#5	3140
#6	3081
#8	3081
#9	3070

#### (四) FCB/分歧線熔絲/25kVA 變壓器協調曲線計算

如圖 6-10 所示，本例各保護設備在故障電流 100A 到 4000A 間協調。

#### (五) FCB/分歧線熔絲/50kVA 變壓器協調曲線計算

如圖 6-11 所示，本例中饋線保護電驛 CO 設定曲線、分歧線熔絲 65T 與變壓器熔絲 40C 保護協調正確。

#### (六) FCB/分歧線熔絲/100kVA 變壓器協調曲線計算

如圖 6-12 所示，本例中饋線保護電驛 CO 設定曲線、分歧線熔絲 65T 與變壓器熔絲 40C 保護協調正確。

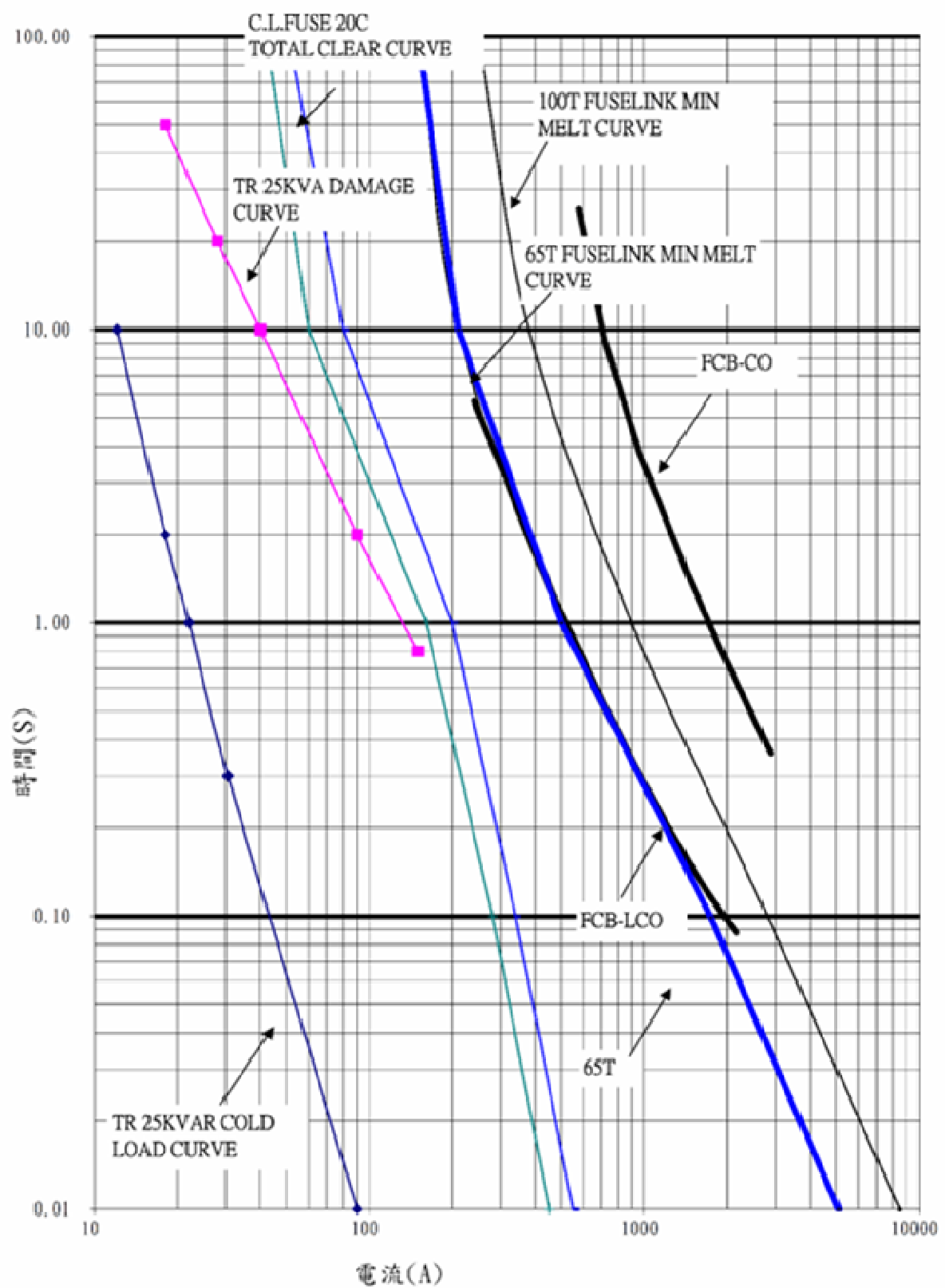


圖 6-10 案例一 FCB/分歧線熔絲/25kVA 變壓器協調曲線計算

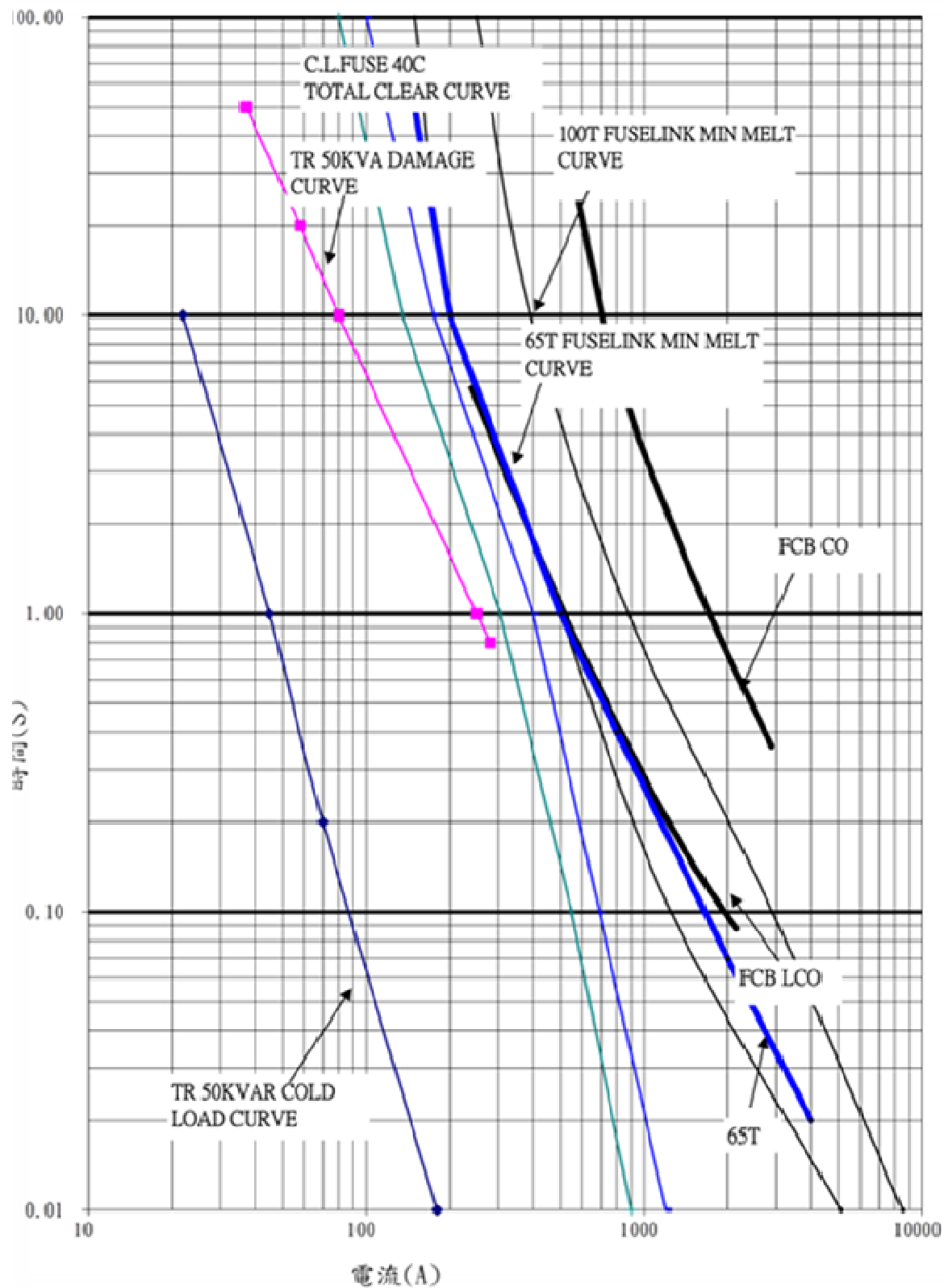


圖 6-11 案例一 FCB/分歧線熔絲/50kVA 變壓器協調曲線計算

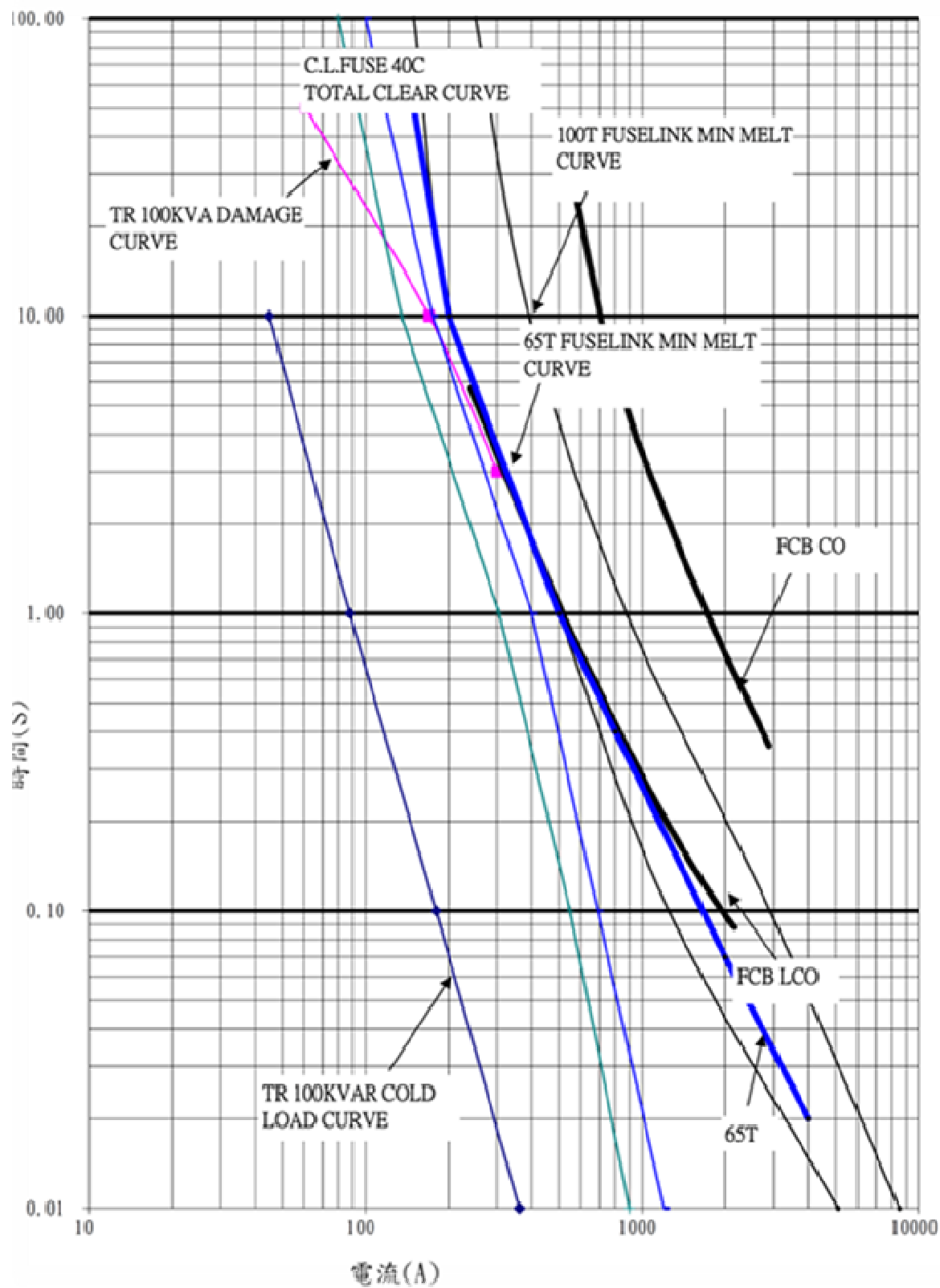


圖 6-12 案例一 FCB/分歧線熔絲/100kVA 變壓器協調曲線計算

## 案例二(新竹區營業處)

(一) 饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖，如圖 6-13。

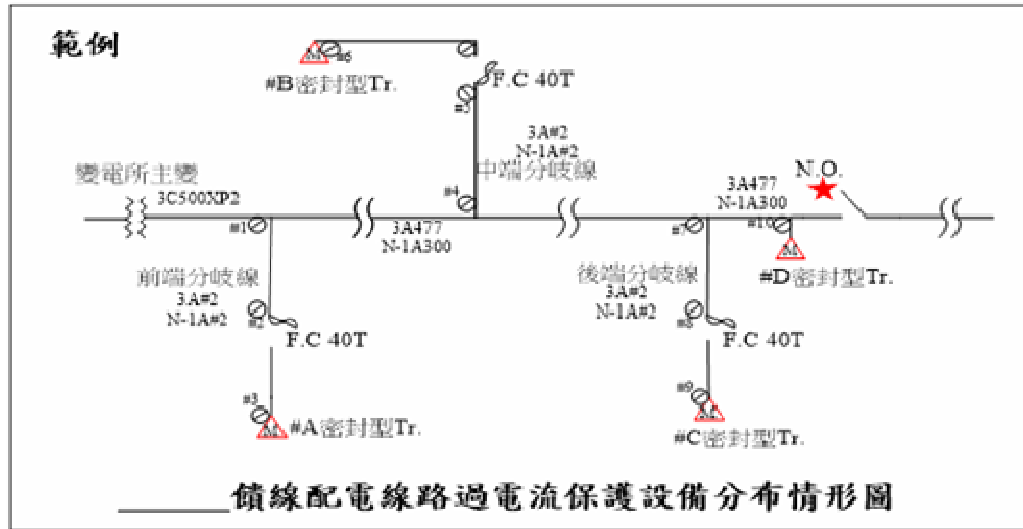


圖 6-13 案例二饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖

## (二) 故障電流計算所需資料

故障電流計算所需資料(變電所，變壓器，與故障點之間的參數)如表 6-6~表 6-8 所示。

表 6-6 案例二變電所與主幹線/分岐線線路相關資料

變電所相關資料		填報資料	備註
變電所主變容量(MVA)		25 MVA	#2
變電所主變一次側電壓(kV)		69 kV	
變電所主變一次側短路容量(Bus Duty)		1607 MVA	
變電所主變百分阻抗 (ZT%)		8.94%	
主幹線/分岐線線路長度(km)	線徑	填報資料	備註
變電所主變-#1 線路長度(km)	3C500	2.8 km	
#1-#2 線路長度(km)	2A#2	0.06 km	
#2-#3 線路長度(km)	2A#2	0.15 km	
#1-#4 線路長度(km)	3A477	0.5 km	
#4-#5 線路長度(km)	3A#2	0.05 km	
#5-#6 線路長度(km)	3A#2	0.04 km	
#4-#7 線路長度(km)	3A477	0.7 km	
#7-#8 線路長度(km)	3A#2	0.08 km	
#8-#9 線路長度(km)	2A#2	0.3 km	
#7-#10 線路長度(km)	3A477	0.1 km	

表 6-7 案例二變電所保護設備設定參數/分歧線保護設備-熔絲鏈開關型式

(1)斷路器保護電驛		型式	Tap	Lever	備註
MCB	CO	7SJ64(SIEMENS)	4	1.7	MI-CT:2000/5
	LCO	7SJ64(SIEMENS)	1.5	2.6	
Tie CB	CO	7SJ64(SIEMENS)	4	1.2	MI-CT:2000/5
	LCO	7SJ64(SIEMENS)	1.5	1.9	
FCB	CO	7SJ64(SIEMENS)	5	2	VI-CT:600/5
	LCO	7SJ64(SIEMENS)	1.25	8	EI-CT:600/5
(2)其他保護設備或設定		型式	設定值		備註
復閉電驛		7SJ64(SIEMENS)	1 次		10sec
瞬時跳脫元件(IIT)		7SJ64(SIEMENS)	未使用		
熔絲鏈開關安裝處		熔絲鏈型式(如 65T 或 40T 等)			備註
前端分歧線(如範例#2 F.C)		Fuse:40T			
中端分歧線(如範例#5 F.C)		Fuse:40T			
後端分歧線(如範例#8 F.C)		Fuse:40T			

表 6-8 案例二密封型桿變容量

密封型桿變安裝處	供電方式	容量
前端分歧線(如範例#A)	三相三線	A50kVA C25kVA
中端分歧線(如範例#B)	三相四線	A50kVA B50kVA C50kVA
後端分歧線(如範例#C)	三相三線	A50kVA B25kVA
主幹線(如範例#D)	單相二線	B25kVA(路燈)

### (三) 故障電流計算

主變壓器容量與一次側的電壓如下：

MVA Base = 25MVA，KV Base = 69kV

則計算基值電流與阻抗如下：

$$I_{base} = I_b = \frac{25MVA/3}{69kV/\sqrt{3}} = 209A$$

$$Z_{base} = Z_b = \frac{69kV/\sqrt{3}}{I_b} = 190\Omega$$

同理，主變壓器之二次側電壓與基值電流與阻抗得以計算如下：

KV Base = 11.4kV

$$I_{base} = I_b = \frac{25MVA/3}{11.4kV/\sqrt{3}} = 1266A$$

$$Z_{base} = Z_b = \frac{11.4kV/\sqrt{3}}{I_b} = 5.2\Omega$$

換算為電源側阻抗之標么值：

$$Z_s = \frac{V_{pu}^2}{\frac{MVA_{3\phi, fault}}{MVA_{3\phi, base}}} = \frac{1.0^2}{1607MVA/25MVA} = 0.0156pu$$

同案例一之計算方法，各故障點間之正/負/零序之阻抗標么值計算結果如表 6-9 所示，各點的三相故障電流計算結果如表 6-10 所示。

表 6-9 案例二各線段阻抗標么值

主幹線/分歧線 線路長度(km)	線徑	填報資料	正序/負序阻抗	零序阻抗
變電所主變-#1	3C500	2.8 km	0.0584+j0.0737	0.2941+j0.0762
#1-#2	2A#2	0.06 km	0.0109+j0.0059	0.0017+j0.0041
#2-#3	2A#2	0.15 km	0.0027+j0.0015	0.0004+j0.0010
#1-#4	3A477	0.5 km	0.0126+j0.0346	0.0053+j0.0215
#4-#5	3A#2	0.05 km	0.0091+j0.0049	0.0014+j0.0034
#5-#6	3A#2	0.04 km	0.0073+j0.0039	0.0011+j0.0027
#4-#7	3A477	0.7 km	0.0176+j0.0485	0.0074+j0.0302
#7-#8	3A#2	0.08 km	0.0145+j0.0078	0.0023+j0.0055
#8-#9	2A#2	0.3 km	0.0545+j0.0293	0.0086+j0.0205
#7-#10	3A477	0.1 km	0.0025+j0.0069	0.0011+j0.0043

表 6-10 案例二各故障點之故障電流

位置	三相短路故障電流
#2	3866A
#3	3814A
#4	3386A
#5	3262A
#6	3168A
#8	2607A
#9	2201A
#10	2661A

#### (四) FCB/分歧線熔絲/25kVA 變壓器協調曲線計算

如圖 6-14 所示，本例各保護設備在故障電流 100A 到 4000A 間協調。

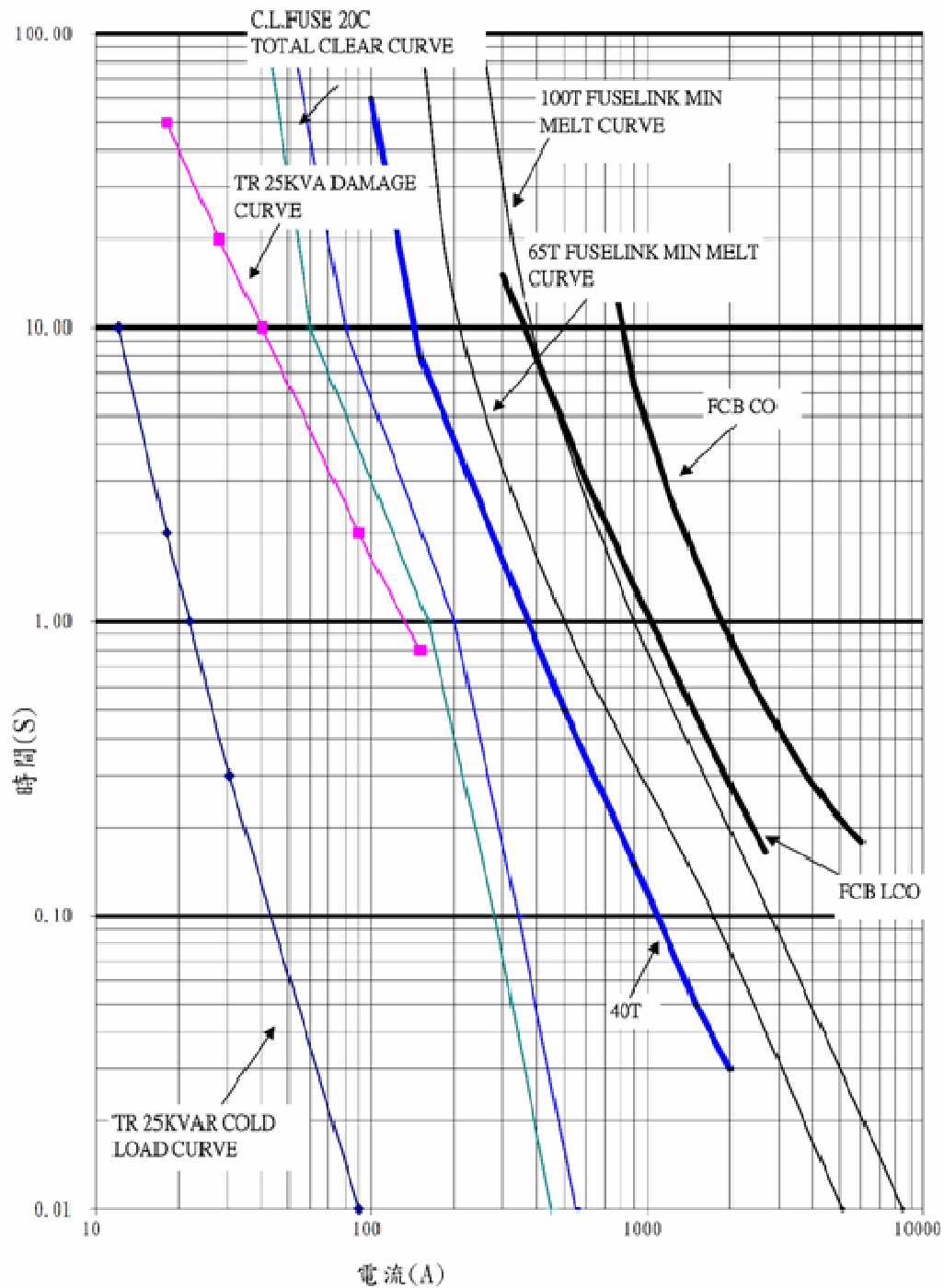


圖 6-14 案例二 FCB/分歧線熔絲/25kVA 變壓器協調曲線計算

#### (五) FCB/分歧線熔絲/50kVA 變壓器協調曲線計算

如圖 6-15 所示，#B 變壓器與上游分歧線、饋線斷路器過 CO 與 LCO 電驛動作曲線，本例中饋線保護電驛 CO 設定曲線與分歧線熔絲 40T 保護協調正確。雖然分歧線熔絲 40T 與變壓器熔絲 40C 於 450A 位置產生交點，表示變壓器熔絲下游如果產生故障電流小於 450A 的故障，可能導致分歧線熔絲先行動作。然而參考圖 4-77 以及圖 6-6 與圖 6-7 變壓器保護協調曲線範例，顯示當考慮遮斷開關時，整體保護設備對變壓器與饋線間之協調仍可正常達到保護範圍。

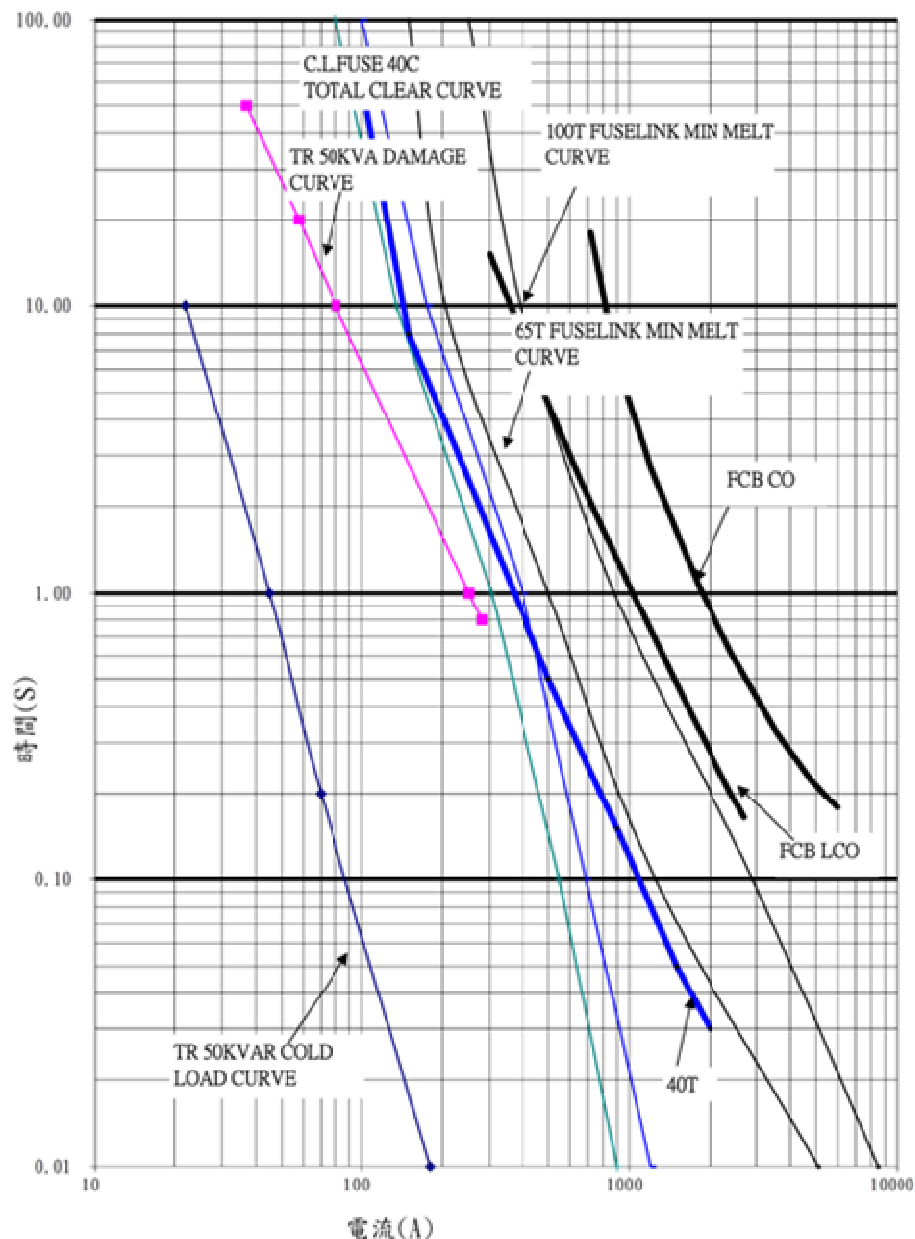


圖 6-15 案例二 FCB/分歧線熔絲/50kVA 變壓器協調曲線計算

案例三(彰化區營業處)

(一) 饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖，如圖 6-16。

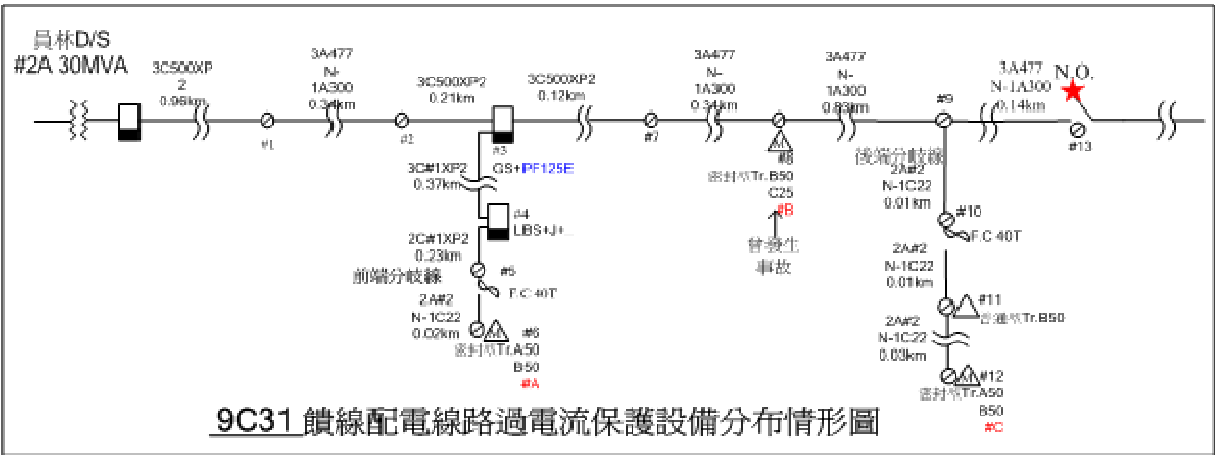


圖 6-16 案例三饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖

(二) 故障電流計算所需資料

故障電流計算所需資料(變電所，變壓器，與故障點之間的參數)如表 6-11~表 6-13 所示。

表 6-11 案例三變電所與主幹線/分歧線線路相關資料

1.變電所相關資料		填報資料	備註
變電所主變容量(MVA)		60 MVA	#2A
變電所主變一次側電壓(kV)		161 kV	
變電所主變一次側短路容量(Bus Duty)		7183 MVA	
變電所主變百分阻抗 (ZT%)		16.917%	
2.主幹線/分歧線線路長度(km)	線徑	填報資料	備註
變電所主變-#1 線路長度(km)	3C500	0.96 km	
#1-#2 線路長度(km)	3A477	0.34 km	
#2-#3 線路長度(km)	3C500	0.21 km	
#3-#4 線路長度(km)	3C#1XP2	0.37 km	
#4-#5 線路長度(km)	2C#1XP2	0.23 km	
#5-#6 線路長度(km)	2A#2XPW	0.02 km	
#3-#7 線路長度(km)	3C500	0.12 km	
#7-#8 線路長度(km)	3A477	0.34 km	
#8-#9 線路長度(km)	3A477	0.83 km	
#9-#11 線路長度(km)	2A#2XPW	0.05 km	
#9-#13 線路長度(km)	3A477	0.14 km	

表 6-12 案例三變電所保護設備設定參數/分歧線保護設備-熔絲鏈開關型式

(1)斷路器保護電驛		型式	Tap	Lever	備註
MCB	CO	AEC-SEL351	4	2.5	VI(U3)-CT:2000/5
	LCO	AEC-SEL351	1.25	5	VI(U3)-CT:2000/5
Tie CB	CO	AEC-SEL351	4	2.5	VI(U3)-CT:2000/5
	LCO	AEC-SEL351	1.25	4	VI(U3)-CT:2000/5
FCB	CO	SEL351A-AEC	5	1	EI(U4)-CT:600/5
	LCO	SEL351A-AEC	1	5	EI(U4)-CT:600/5
(2)其他保護設備或設定		型式	設定值		備註
復閉電驛		SEL351A-AEC	1 次		
瞬時跳脫元件(IIT)		SEL351A-AEC	FCB-IIT=30A		
熔絲鏈開關安裝處		熔絲鏈型式(如 65T 或 40T 等)			備註
前端分歧線(如範例#5 F.C)		Fuse:40T			
中端分歧線(如範例#5 F.C)		無			
後端分歧線(如範例#10 F.C)		Fuse:40T			

表 6-13 案例三密封型桿上變壓器容量

密封型桿變安裝處	供電方式	容量
前端分歧線(如範例#A)	三相三線	A50kVA B50kVA
主幹線(如範例#B)	三相三線	B50kVA C25kVA
後端分歧線(如範例#C)	三相三線	A50kVA B50kVA

### (三) 故障電流計算

主變壓器容量與一次側的電壓如下：

MVA Base = 60MVA，KV Base = 161kV

則計算基值電流與阻抗如下：

$$I_{base} = I_b = \frac{60MVA/3}{161kV/\sqrt{3}} = 215.2A$$

$$Z_{base} = Z_b = \frac{161kV/\sqrt{3}}{I_b} = 432\Omega$$

同理，主變壓器之二次側電壓與基值電流與阻抗得以計算如下：

KV Base = 11.4kV

$$I_{base} = I_b = \frac{60MVA/3}{11.4kV/\sqrt{3}} = 3038A$$

$$Z_{base} = Z_b = \frac{11.4kV / \sqrt{3}}{I_b} = 2.2\Omega$$

換算為電源側阻抗之標么值：

$$Z_s = \frac{V_{pu}^2}{\frac{MVA_{3\phi, fault}}{MVA_{3\phi, base}}} = \frac{1.0^2}{7183MVA/60MVA} = 0.0084 pu$$

同前案例之計算方法，各故障點間之正/負/零序之阻抗標么值計算結果如表 6-14 所示，各點的三相故障電流計算結果如表 6-15 所示。

表 6-14 案例三各線段阻抗標么值

主幹線/分歧線 線路長度(km)	線徑	填報資料	正序/負序阻抗	零序阻抗
變電所主變-#1	3C500	0.96km	0.0013+j0.0017	0.0066+j0.0017
#1-#2	3A477	0.34 km	0.0006+j0.0015	0.0002+j0.0009
#2-#3	3C500	0.21 km	0.0003+j0.0003	0.0014+j0.0004
#3-#4	3C#1XP2	0.37 km	0.0028+j+.0023	0.0006+j0.0014
#4-#5	2C#1XP2	0.23 km	0.0017+j0.0015	0.0004+j0.0009
#5-#6	2A#2XPW	0.02 km	0.0003+j0.0001	0.0004+j0.0009
#3-#7	3C500	0.12 km	0.0002+j0.0002	0.0008+j0.0002
#7-#8	3A477	0.34 km	0.0006+j0.0015	0.0002+j0.0009
#8-#9	3A477	0.83 km	0.0014+j0.0038	0.0006+j0.0023
#9-#11	2A#2XPW	0.05 km	0.0006+j0.0003	0.0009+j0.0002
#9-#13	3A477	0.14 km	0.0002+j0.0006	0.0009+j0.0004

表 6-15 案例三各故障點之故障電流

位置	三相短路故障電流	位置	三相短路故障電流
#3	5517	#9	3289
#4	4048	#10	3183
#5	3443	#11	3144
#6	3388	#12	1235
#7	5367	#13	1213
#8	4535		

#### (四) FCB/分歧線熔絲/25kVA 變壓器協調曲線計算

如圖 6-17 所示，本例各保護設備在故障電流 100A 到 4000A 間協調。

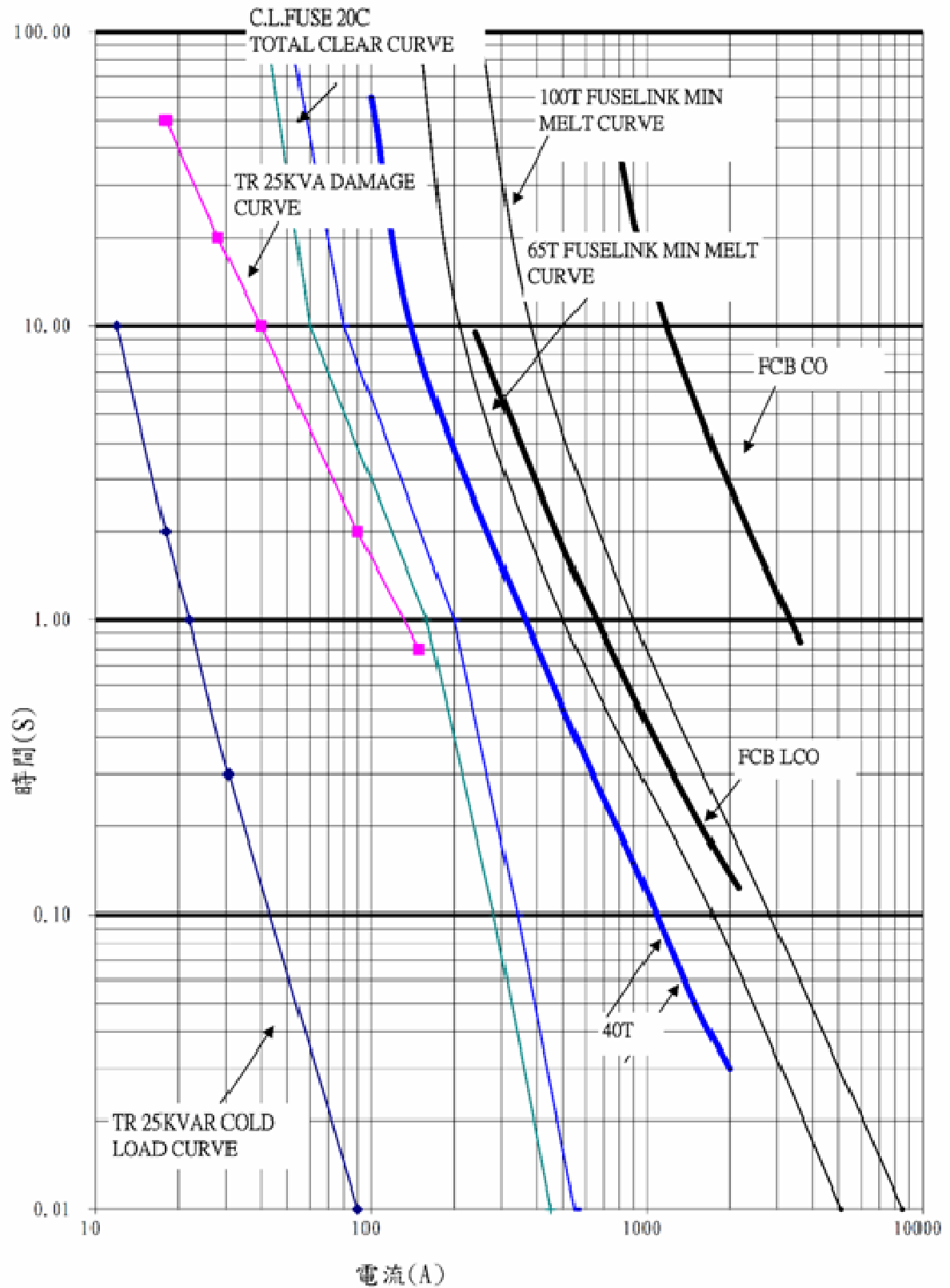


圖 6-17 案例三 FCB/分歧線熔絲/25kVA 變壓器協調曲線計算

#### (五) FCB/分歧線熔絲/50kVA 變壓器協調曲線計算

如圖 6-18 所示，本例中饋線保護電驛 CO 設定曲線與分歧線熔絲 40T 保護協調正確。雖然分歧線熔絲 40T 與變壓器熔絲 40C 於 450A 位置產生交點，表示變壓器熔絲下游如果產生故障電流小於 450A 的故障，可能導致分歧線熔絲先行動作。然而參考圖 4-77 以及圖 6-6 與圖 6-7 變壓器保護協調曲線範例，顯示當考慮遮斷開關時，整體保護設備對變壓器與饋線間之協調仍可正常達到保護範圍。

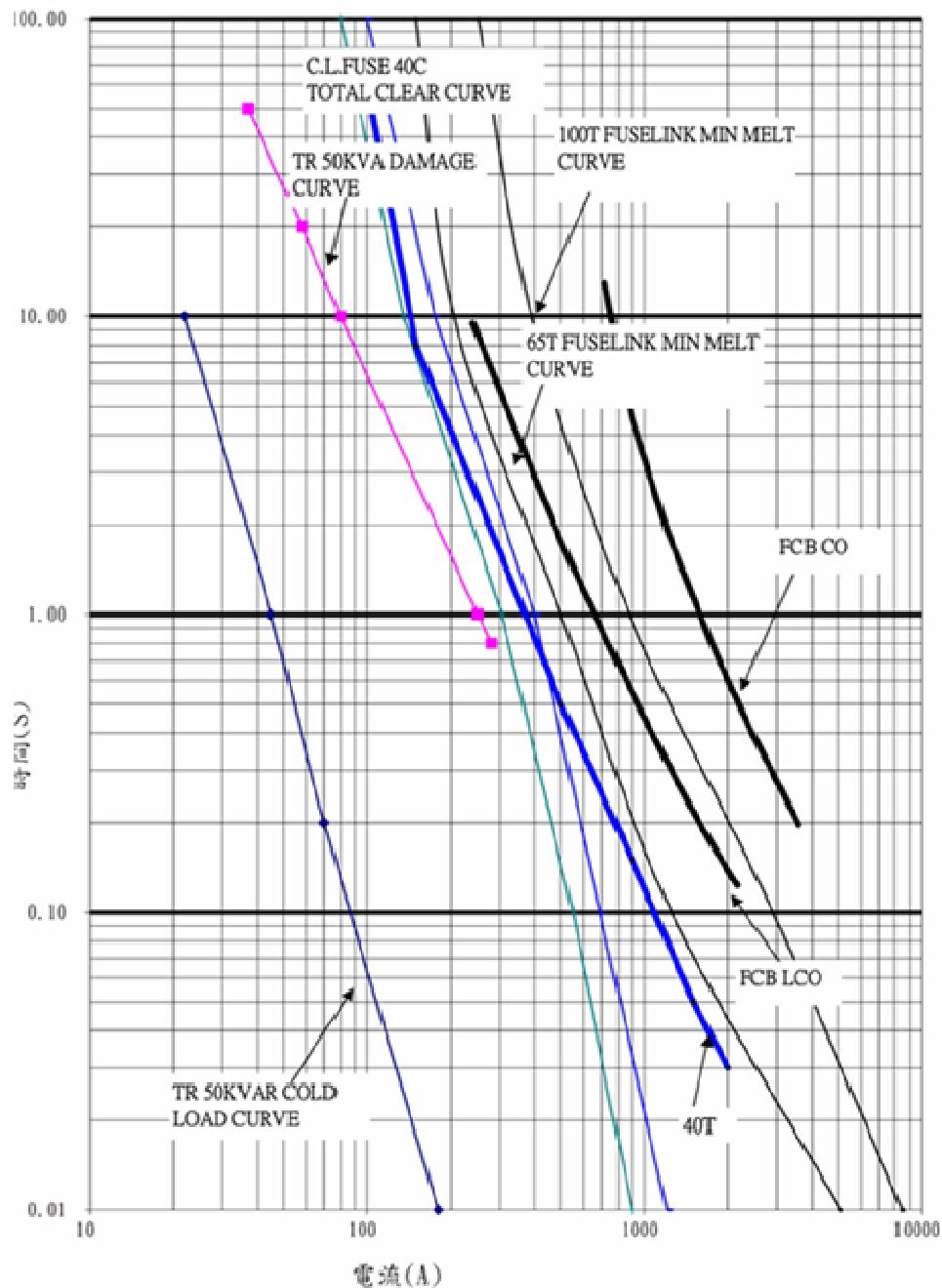
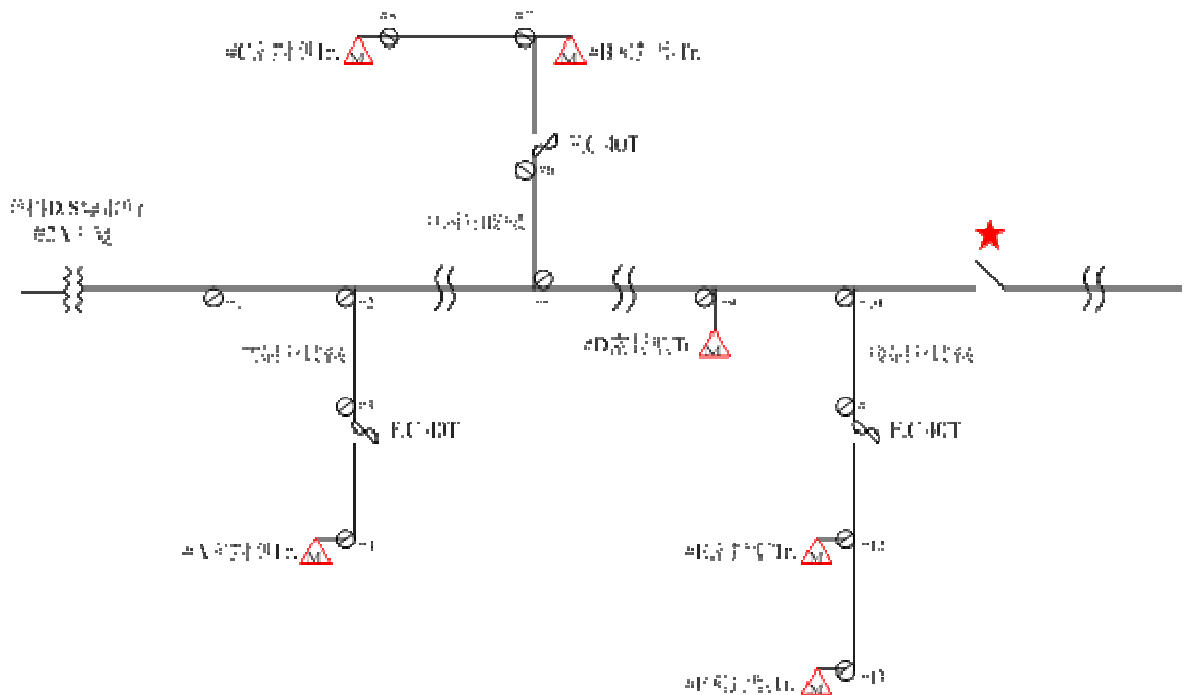


圖 6-18 案例三 FCB/分歧線熔絲/50kVA 變壓器協調曲線計算

#### 案例四(雲林區營業處)

(一) 饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖，如圖 6-19。



科十三(X033) 饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖

圖 6-19 案例四饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖

(二) 故障電流計算所需資料

故障電流計算所需資料(變電所，變壓器，與故障點之間的參數)如表 6-16~表 6-18 所示。

(三) 故障電流計算

主變壓器容量與一次側的電壓如下：

MVA Base = 60MVA，KV Base = 161kV

則計算基值電流與阻抗如下：

$$I_{base} = I_b = \frac{60MVA/3}{161kV/\sqrt{3}} = 215.2A$$

$$Z_{base} = Z_b = \frac{161kV/\sqrt{3}}{I_b} = 432\Omega$$

同理，主變壓器之二次側電壓與基值電流與阻抗得以計算如下：

KV Base = 11.4kV

表 6-16 案例四變電所與主幹線/分歧線線路相關資料

1.變電所相關資料		填報資料	備註
變電所主變容量(MVA)		60 MVA	#2A
變電所主變一次側電壓(kV)		161 kV	
變電所主變一次側短路容量(Bus Duty)		4905.15 MVA	
變電所主變百分阻抗 (ZT%)		16.04%	
2.主幹線/分歧線線路長度(km)	線徑	填報資料	備註
變電所主變-#1 線路長度(km)	3C500MCM	4.194 km	
#1-#2 線路長度(km)	3A477XPW	1.200 km	
#2-#3 線路長度(km)	2A#2XPW	0.040 km	
#3-#4 線路長度(km)	2A#2XPW	0.219 km	
#2-#5 線路長度(km)	3A477XPW	0.366 km	
#5-#6 線路長度(km)	2A#2XPW	0.031 km	
#6-#7 線路長度(km)	2A#2XPW	0.079 km	
#7-#8 線路長度(km)	2A#2XPW	0.227 km	
#5-#9 線路長度(km)	3A477XPW	0.189 km	
#9-#10 線路長度(km)	3A477XPW	2.900 km	
#10-#11 線路長度(km)	3A#2XPW	0.030 km	
#11-#12 線路長度(km)	3A#2XPW	0.260 km	
#12-#13 線路長度(km)	3A#2XPW	0.064 km	

表 6-17 案例四變電所保護設備設定參數/分歧線保護設備-熔絲鏈開關型式

(1)斷路器保護電驛		型式	Tap	Lever	備註
MCB	CO	ABB-REF541	1.0In	0.15	2000/5
	LCO	ABB-REF541			2000/5
Tie CB	CO	ABB-REF541	0.8In	0.16	2000/5
	LCO	ABB-REF541	0.12In	0.6	2000/5
FCB	CO	ABB-REF541	1.0In	0.9	500/5
	LCO	ABB-REF541	0.2In	1.0	500/5
(2)其他保護設備或設定		型式	設定值		備註
復閉電驛			1 次		
瞬時跳脫元件(IIT)			10In		
熔絲鏈開關安裝處		熔絲鏈型式(如 65T 或 40T 等)			備註
前端分歧線(如範例#3 F.C)		F.C-40T			
中端分歧線(如範例#6 F.C)		F.C-40T			
後端分歧線(如範例#11 F.C)		F.C-40T			

表 6-18 案例四密封型桿上變壓器容量

密封型桿變安裝處	供電方式	容量
前端分歧線(如範例#A)	三相三線	A50kVA/B25kVA
中端分歧線(如範例#B)	三相三線	A25kVA/C25kVA
中端分歧線(如範例#C)	三相三線	A100kVA/C50kVA
主幹線(如範例#D)	單相三線	C25KVA
後端分歧線(如範例#E)	三相三線	A25kVA/B25kVA
後端分歧線(如範例#F)	三相三線	A50kVA/B50kVA

$$I_{base} = I_b = \frac{60MVA/3}{11.4kV/\sqrt{3}} = 3038A$$

$$Z_{base} = Z_b = \frac{11.4kV/\sqrt{3}}{I_b} = 2.2\Omega$$

換算為電源側阻抗之標么值：

$$Z_S = \frac{V_{pu}^2}{\frac{MVA3\phi, fault}{MVA3\phi, base}} = \frac{1.0^2}{4905.15MVA/60MVA} = 0.0122pu$$

同前案例之計算方法，各故障點間之正/負/零序之阻抗標么值計算結果如表 6-19 所示，各點的三相故障電流計算結果如表 6-20 所示。

表 6-19 案例四各線段阻抗標么值

主幹線/分歧線 線路長度(km)	線徑	填報資料	正序/負序阻抗	零序阻抗
變電所主變-#1	3C500MCM	4.194 km	0.0057+j0.0072	0.0289+j0.0075
#1-#2	3A477XPW	1.200 km	0.0020+j0.0054	0.0008+j0.0034
#2-#3	2A#2XPW	0.040 km	0.0005+j0.0003	0.0008+j0.0002
#3-#4	2A#2XPW	0.219 km	0.0026+j0.0014	+0.0004+j0.0009
#2-#5	3A477XPW	0.366 km	0.0006+j0.0017	0.0003+j0.0010
#5-#6	2A#2XPW	0.031 km	0.0003+j0.0002	0.0006+j0.0001
#6-#7	2A#2XPW	0.079 km	0.0009+j0.0005	0.0001+j0.0004
#7-#8	2A#2XPW	0.227 km	0.0027+j0.0015	0.0004+j0.0010
#5-#9	3A477XPW	0.189 km	0.0003+j0.0009	0.0001+j0.0005
#9-#10	3A477XPW	2.900 km	0.0048+j0.0132	0.0020+j0.0082
#10-#11	3A#2XPW	0.030 km	0.0004+j0.0002	0.00006+j0.0001
#11-#12	3A#2XPW	0.260 km	0.0031+j0.0017	0.0005+j0.0012
#12-#13	3A#2XPW	0.064 km	0.0007+j0.0004	0.0001+j0.0003

表 6-20 案例四各故障點之故障電流

位置	三相短路故障電流	位置	三相短路故障電流
#2	2517	#8	1952
#3	2461	#9	2207
#4	2187	#10	1342
#5	2303	#11	1330
#6	2267	#12	1235
#7	2179	#13	1213

#### (四) FCB/分歧線熔絲/25kVA 變壓器協調曲線計算

如圖 6-20 所示，本例各保護設備在故障電流 100A 到 4000A 間協調。

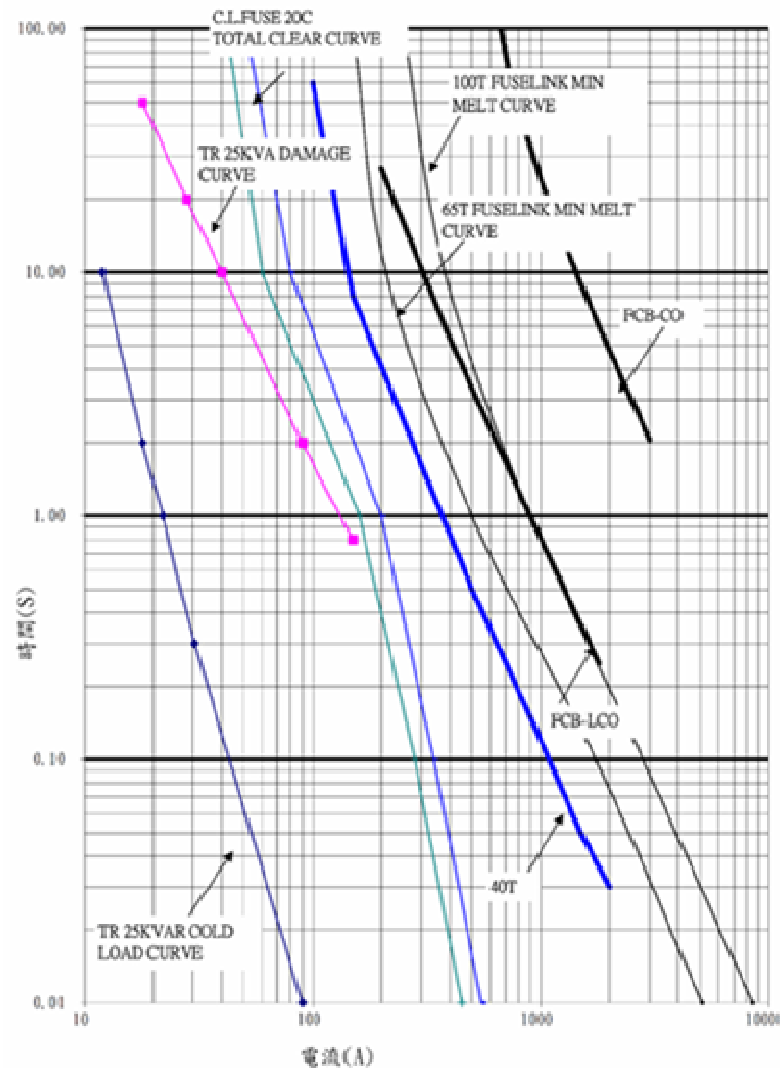


圖 6-20 案例四 FCB/分歧線熔絲/25kVA 變壓器協調曲線計算

#### (五) FCB/分歧線熔絲/50kVA 變壓器協調曲線計算

如圖 6-21 所示，本例中饋線保護電驛 CO 設定曲線與分歧線熔絲 40T 保護協調正確。雖然分歧線熔絲 40T 與變壓器熔絲 40C 於 450A 位置產生交點，表示變壓器熔絲下游如果產生故障電流小於 450A 的故障，可能導致分歧線熔絲先行動作。然而參考圖 4-77 以及圖 6-6 與圖 6-7 變壓器保護協調曲線範例，顯示當考慮遮斷開關時，整體保護設備對變壓器與饋線間之協調仍可正常達到保護範圍。

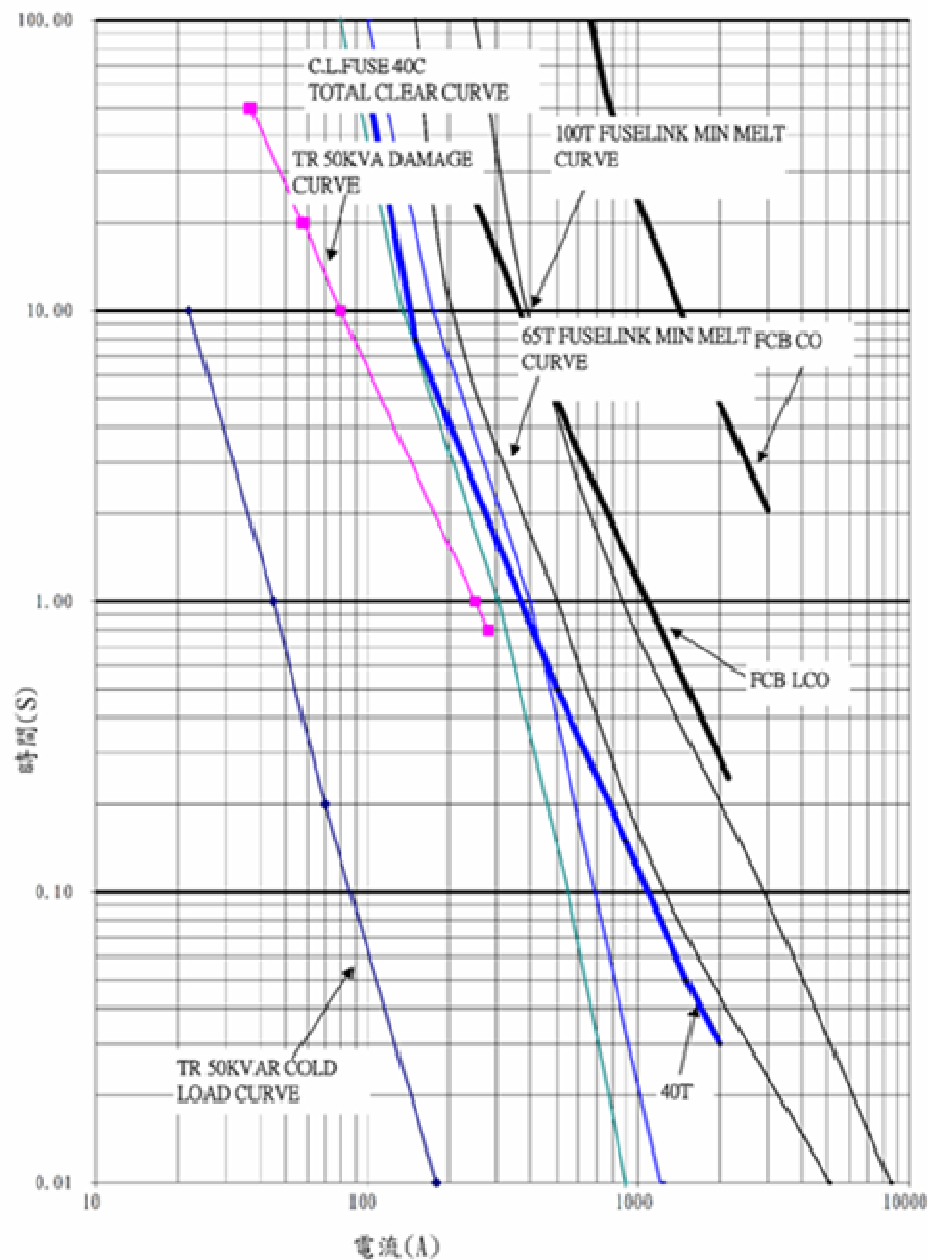


圖 6-21 案例四 FCB/分歧線熔絲/50kVA 變壓器協調曲線計算

#### (六) FCB/分歧線熔絲/100kVA 變壓器協調曲線計算

如圖 6-22 所示，本例中饋線保護電驛 CO 設定曲線與分歧線熔絲 40T 保護協調正確。雖然分歧線熔絲 40T 與變壓器熔絲 40C 於 450A 位置產生交點，表示變壓器熔絲下游如果產生故障電流小於 450A 的故障，可能導致分歧線熔絲先行動作。然而參考圖 4-77 以及圖 6-6 與圖 6-7 變壓器保護協調曲線範例，顯示當考慮遮斷開關時，整體保護設備對變壓器與饋線間之協調仍可正常達到保護範圍。

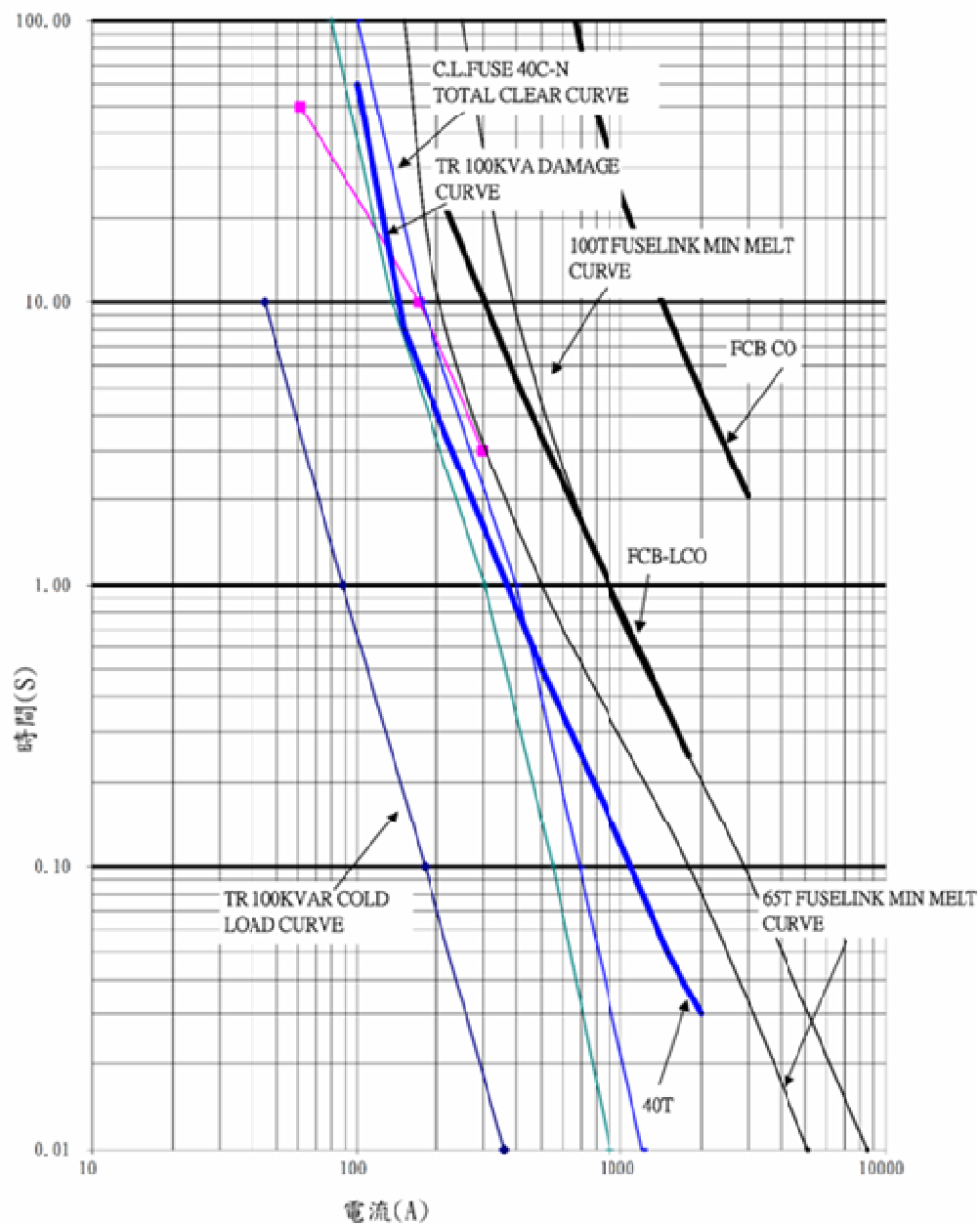
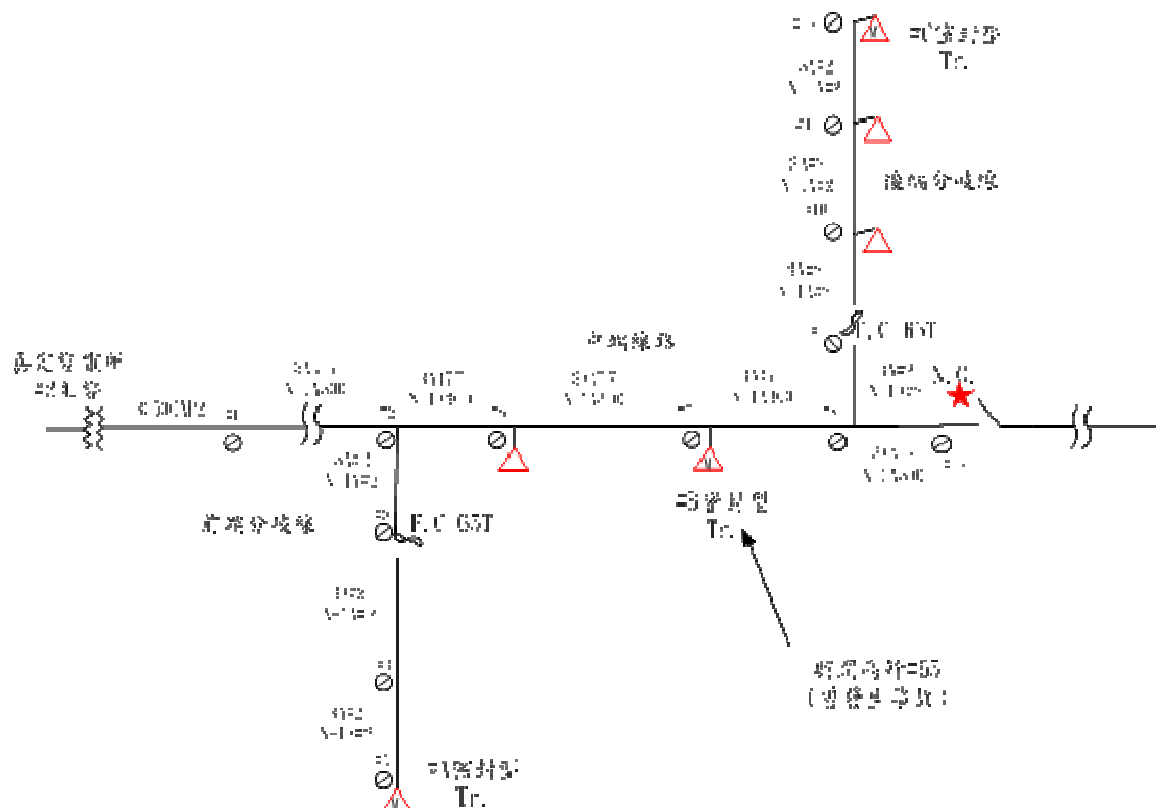


圖 6-22 案例四 FCB/分歧線熔絲/100kVA 變壓器協調曲線計算

(一) 饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖，如圖 6-23。



### LX37饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖

圖 6-23 案例五饋線配電線路過電流保護設備分布情形圖

故障電流計算所需資料(變電所，變壓器，與故障點之間的參數)如表 6-21~表 6-23 所示。

主變壓器容量與一次側的電壓如下：

MVA Base = 25MVA , KV Base = 69kV

則計算基值電流與阻抗如下：

$$I_{base} = I_b = \frac{25MVA/3}{69kV/\sqrt{3}} = 209A$$

$$Z_{base} = Z_b = \frac{69kV / \sqrt{3}}{I_b} = 190\Omega$$

表 6-21 案例五變電所與主幹線/分歧線線路相關資料

1.變電所相關資料		填報資料	備註
變電所主變容量(MVA)		25 MVA	
變電所主變一次側電壓(kV)		69 kV	
變電所主變一次側短路容量(Bus Duty)		825.47 MVA	
變電所主變百分阻抗(ZT%)		9.28%	1989.8(長興)
2.主幹線/分歧線線路長度(km)	線徑	填報資料	備註
變電所主變-#1 線路長度(km)	3C500	1.880km	
#1-#2 線路長度(km)	3A477	0.425km	
#2-#3 線路長度(km)	3A#2	0.015km	
#3-#4 線路長度(km)	3A#2	0.030km	
#4-#5 線路長度(km)	3A#2	0.020km	
#2-#6 線路長度(km)	3A477	0.100km	
#6-#7 線路長度(km)	3A477	0.275km	
#7-#8 線路長度(km)	3A477	0.100km	
#8-#12 線路長度(km)	3A#2	0.160km	
#8-#13 線路長度(km)	3A477	0.075km	

表 6-22 案例五變電所保護設備設定參數/分歧線保護設備-熔絲鏈開關型式

(1)斷路器保護電驛		型式	Tap	Lever	備註
MCB	CO	SIEMENS	4	0.8	7SJ62/VI 曲線
	LCO	SIEMENS	1	3.5	7SJ62/VI 曲線
Tie CB	CO	SIEMENS	4	0.5	7SJ62/VI 曲線
	LCO	SIEMENS	1	2	7SJ62/VI 曲線
FCB	CO	SIEMENS	5	1	7SJ62/EI 曲線
	LCO	SIEMENS	0.8	3	7SJ62/EI 曲線
(2)其他保護設備或設定		型式	設定值		備註
復閉電驛		SIEMENS	O--05--CO		
瞬時跳脫元件(IIT)			無		
熔絲鏈開關安裝處		熔絲鏈型式(如 65T 或 40T 等)			備註
前端分歧線(如範例#3 F.C)		65T			
中端分歧線					
後端分歧線(如範例#9 F.C)		65T			

表 6-23 案例五密封型桿上變壓器容量

密封型桿變安裝處	供電方式	容量
前端分歧線(如範例#A)	單相三線	100kVA
中端分歧線(如範例#B)	單相三線	50kVA
後端分歧線(如範例#C)	三相三線	25kVA/100kV A
主幹線(如範例#D)		

同理，主變壓器之二次側電壓與基值電流與阻抗得以計算如下：

$$KV \text{ Base} = 11.4kV$$

$$I_{base} = I_b = \frac{25MVA/3}{11.4kV/\sqrt{3}} = 1266A$$

$$Z_{base} = Z_b = \frac{11.4kV/\sqrt{3}}{I_b} = 5.2\Omega$$

換算為電源側阻抗之標么值：

$$Z_s = \frac{V_{pu}^2}{\frac{MVA_{3\phi, fault}}{MVA_{3\phi, base}}} = \frac{1.0^2}{825.47MVA/25MVA} = 0.0303 pu$$

同前案例之計算方法，各故障點間之正/負/零序之阻抗標么值計算結果如表 6-24 所示，各點的三相故障電流計算結果如表 6-25 所示。

表 6-24 案例五各線段阻抗標么值

主幹線/分歧線 線路長度(km)	線徑	填報資料	正序/負序阻抗	零序阻抗
變電所主變-#1	3C500	1.880km	0.0392+j0.0495	0.1975+0.0512
#1-#2	3A477	0.425km	0.0107+j0.02964	0.0045+j0.0183
#2-#3	3A#2	0.015km	0.0027+j0.0015	0.0004+j0.0010
#3-#4	3A#2	0.030km	0.0055+j0.0029	0.0009+j0.0021
#4-#5	3A#2	0.020km	0.0036+j0.0020	0.0006+j0.0014
#2-#6	3A477	0.100km	0.0025+j0.0069	0.0011+j0.0043
#6-#7	3A477	0.275km	0.0069+j0.0190	0.0029+j0.0118
#7-#8	3A477	0.100km	0.0025+j0.0069	0.0001+j0.0004
#8-#12	3A#2	0.160km	0.0291+j0.0156	0.0046+j0.0110
#8-#13	3A477	0.075km	0.0019+j0.0052	0.0008+j0.0032

表 6-25 案例五各故障點之故障電流

位置	三相短路故障電流	位置	三相短路故障電流
#3	3478	#7	3102
#4	3409	#8	3009
#5	3363	#12	2743
#6	3393	#13	2942

(四) FCB/分歧線熔絲/25kVA 變壓器協調曲線計算

如圖 6-24 所示，本例各保護設備在故障電流 100A 到 4000A 間協調。

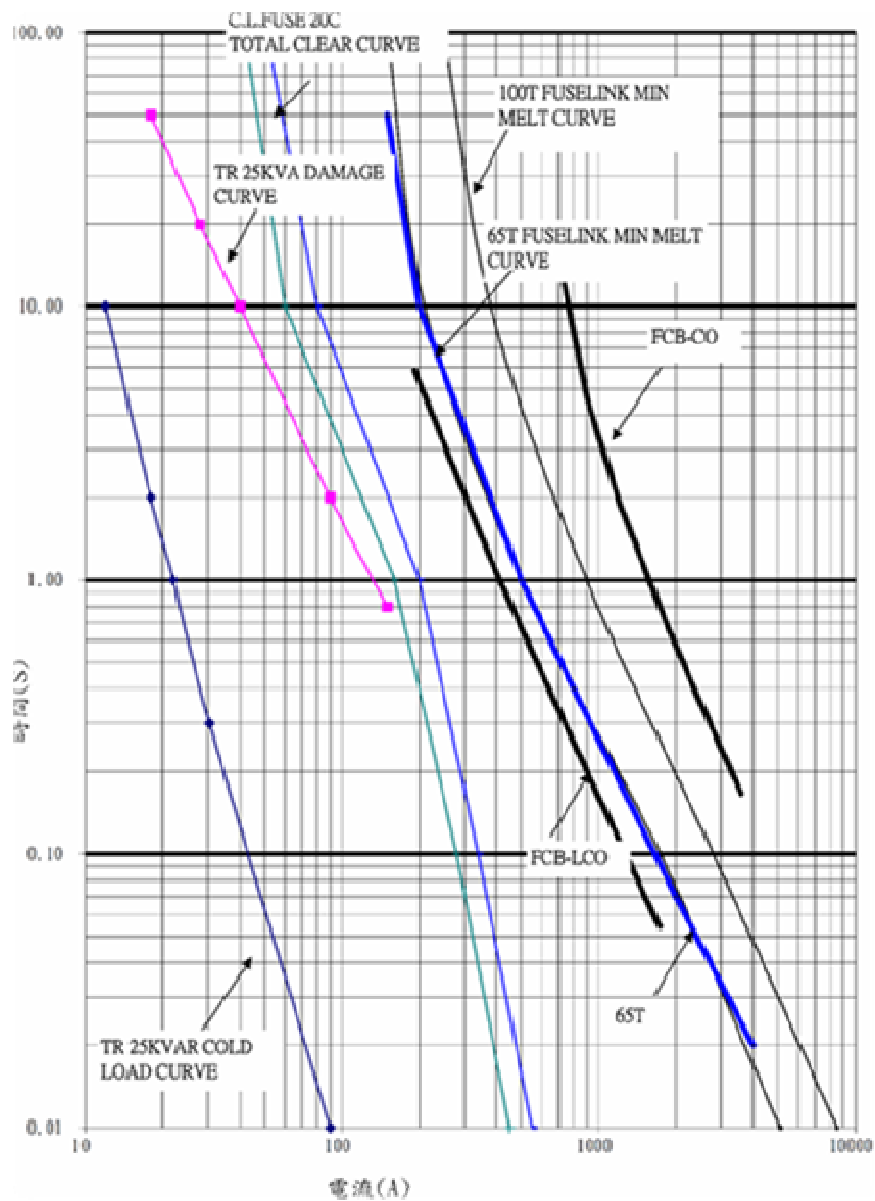


圖 6-24 案例五 FCB/分歧線熔絲/25kVA 變壓器協調曲線計算

#### (五) FCB/分歧線熔絲/50kVA 變壓器協調曲線計算

如圖 6-25 所示，本例中饋線保護電驛 CO 設定曲線、分歧線熔絲 65T 與變壓器熔絲 40C 保護協調正確。

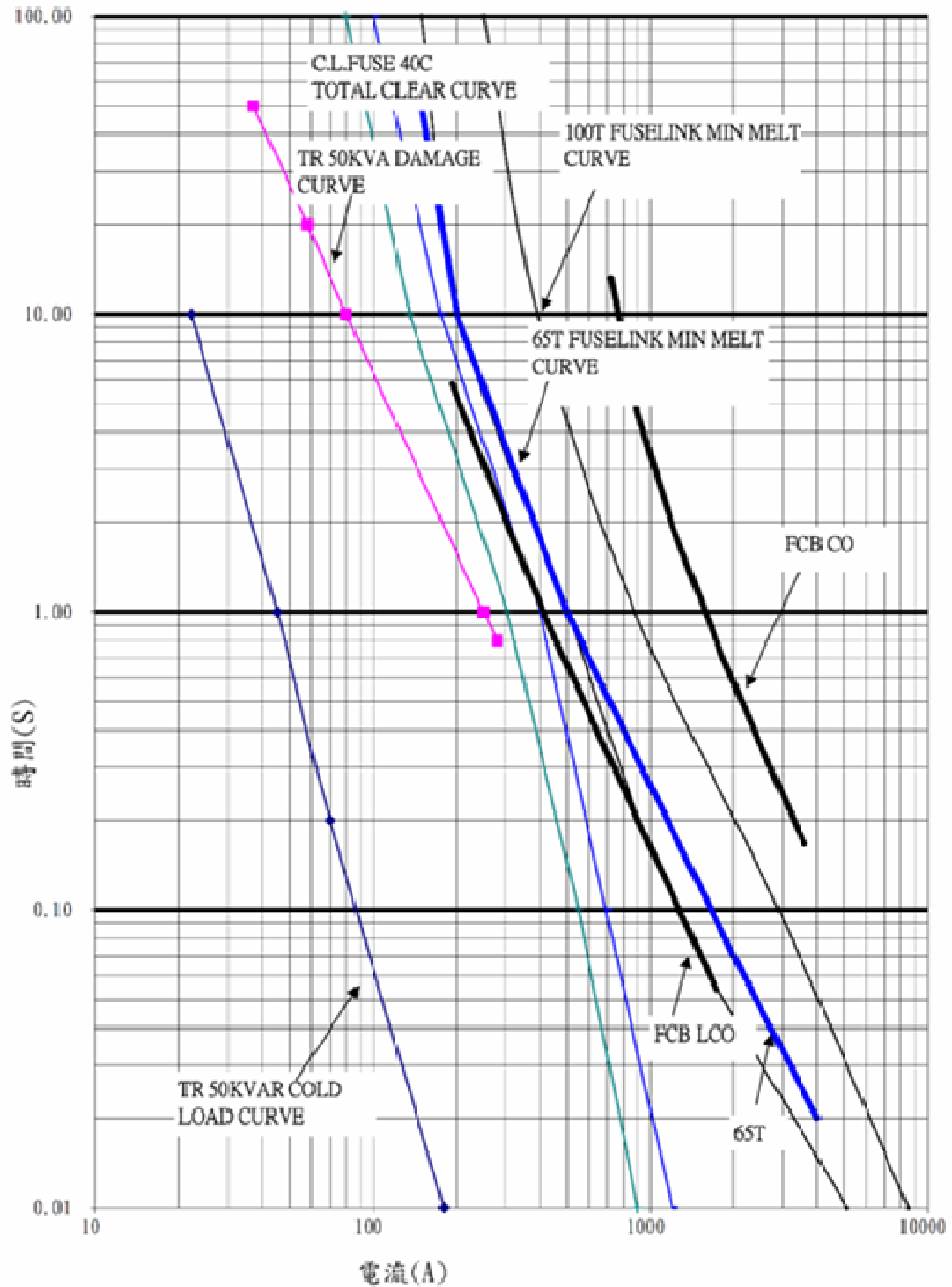


圖 6-25 案例五 FCB/分歧線熔絲/50kVA 變壓器協調曲線計算

#### (六) FCB/分歧線熔絲/100kVA 變壓器協調曲線計算

如圖 6-26 所示，本例中饋線保護電驛 CO 設定曲線、分歧線熔絲 65T 與變壓器熔絲 40C 保護協調正確。

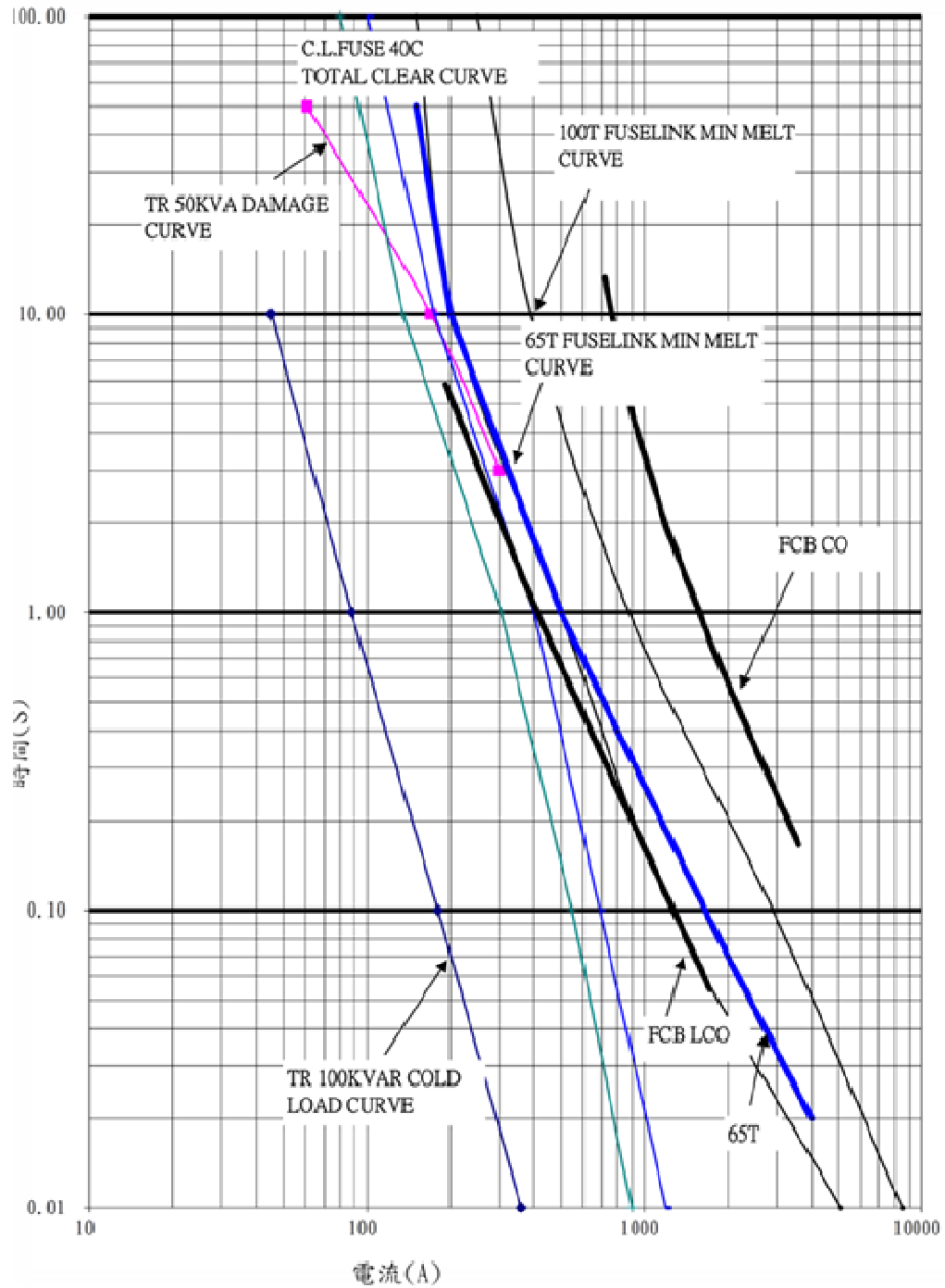


圖 6-26 案例五 FCB/分歧線熔絲/100kVA 變壓器協調曲線計算

## 6.5 本章結論

供電服務過程中，一旦電力系統發生故障，所有相關的保護設備都應快速且準確的發揮功能；系統上的各保護設備透過這樣的保護協調下，得以使得停電區域的範圍能夠降至最低。正確的保護協調方式，對電力系統運轉之強韌性與安全度提升與改善佔有不可或缺的重要功能。一個有效且準確的保護設備協調作法，主要是適當選擇欲進行保護之保護設備，當被保護的線路及設備發生故障時，得以在最佳的時間內清除或隔離故障來保護配電系統設備與網路，並將故障區域減少至最小範圍。因此，合適的保護協調方式，不但可以確保人員安全，同時也能夠減少設備的損害。本章針對保護設備之協調曲線和協調規則，進行一整合性的說明與討論，對於配電系統網路之保護工程之規劃和評估，提供保護協調的最佳曲線，預期達到最佳系統保護協調的目的，提升系統整體供電可靠度與品質。

綜合基隆、新竹、彰化、雲林、高雄區營業處五案例之分析，基隆與高雄區處案例保護協調正確。對於新竹、彰化、雲林區處案例，各保護設備在故障電流 100A 到 4000A 間協調；在未考慮變壓器端另有其餘開關設備(遮斷開關)對其進行保護下，發現在 50kVA 與 100kVA 變壓器中單獨考慮 40C 電力熔絲的情況，如果分歧線使用 40T 電力熔絲，可能導致在故障電流低於 450A 時，分歧線上的 40T 熔絲先行熔斷；然而當遮斷開關與全域熔絲共同考量時，依據第六章之分析與圖 4-77 以及圖 6-6 與圖 6-7 變壓器保護協調曲線範例，顯示整體保護設備對變壓器與饋線間之協調可正常達到保護範圍。

目前密封型桿上變壓器的設計方式係將遮斷開關與熔絲都置於變壓器桶內，可以對變壓器一次側與二次側提供保護。但是變壓器套管井位於熔絲的上游，故內部的熔絲無法對套管井進行保護，而須由位於分歧線的電力熔絲鏈進行保護。惟在套管井絕緣劣化初期，由於屬於高阻抗短路，其短路電流並不足以讓分歧線的熔絲動作，可能導致事故發生。如果將置於桶內的熔絲移到桶外，則可以對套管井提供就近的保護。由於僅將熔絲移到桶外，其與內部遮斷開關的距離不致太遠，故仍可與內部遮斷開關視為一體，此方式並不會造成保護協調的問題。

## 第七章 結論與建議

依附錄一預定進度甘梯圖，本期末報告(至民國 102 年 10 月)已完成所有研究項目，並獲得結論與建議如下。

### 7.1 密封型桿上變壓器故障肇因分析

綜合密封型桿上變壓器故障類型、數量等資料，分析肇因與建議如下：

- (一) 線圈燒損之主要原因：變壓器內部受潮、長期過載運轉、線圈繞製不良或絕緣不良、絕緣油內有雜物。

建議研討製定負載管理制度，儘量避免變壓器長期超載運轉。

- (二) 限流熔絲故障與一次斷線之主要原因：限流熔絲至套管井間之引線係採用(加套紙套管)裸銅線連接，絕緣不良。

限流熔絲所附裝之引線，建議參考引用具有耐油、耐壓、耐溫等性能之專用引線。另建議採用附裝熔絲之可切負載型肘型端頭(The Fused Loadbreak Elbow Connector)裝設於變壓器外殼體外，將全域型限流熔絲包封於肘型端頭內部，以保護整個變壓器及其二次系統之故障。熔絲肘型端頭有兩處測試點分別於熔絲電源側及負載側，可裝置感應式 LED 故障指示器，有熔絲熔斷顯示功能，可輔助事故處理之判斷。

### 7.2 C035 材料規範完整性

#### 一、擬定箱體氣密及入油規範

1. 對耐油襯墊，原未詳訂規範細節。建議明訂變壓器各組件所使用之襯墊，須符合 CNS 3550 CII-610 種類之防潮耐油襯墊，加列襯墊試驗方法及合格標準，如表 3-1 (參考 Y065 (100-11)「改良套管型桿上變壓器」表 7)；並注意安裝之施作過程及使用適當之施工工具，且在定型試驗中要求提出襯墊試驗報告。
2. 為防止一次套管井在桶內側因缺油而降底絕緣性能，建議在套管井內側可加裝有開口(向上)之絕緣封套，於正常使用時封套內充滿絕緣油，遇桿變傾斜或少量缺油時，套管井內側仍可充滿絕緣油，而不致降低絕緣性能。

3. 絕緣油試驗項目及品質，建議依表 3-1 絕緣油試驗項目及標準辦理，此規範較為嚴謹，並加列抗氧化劑一項，以確保變壓器絕緣油性能。
4. 二次套管組通過材規 C035 中規定的各項試驗。
5. 釋壓閥結構及性能，建議在變壓器外殼上之釋壓閥上方加裝防雨罩或半蓋板裝置(如一次分接頭切換器)，則對釋壓閥有多一層防水侵蝕的保護功能。
6. 為確保變壓器性能，絕緣油仍採用符合材規 I002 特性之新油，並使用真空灌油法，灌入量在常溫時(25°C)須達到標準油位線以上。

## 二、擬定絕緣紙材質規範及管制方案

1. 密封型桿上變壓器用絕緣紙材質規範，仍以目前透過絕緣紙的絕緣強度(絕緣破壞強度)及密封型桿上變壓器性能鑑定的方式，如電氣特性之絕緣耐電壓強度或感應電壓等來判定較為單純。
2. 變壓器製造廠對絕緣紙的進料管控甚為重要，絕緣紙製造廠對絕緣紙進料前之包裝，須以不致引起污損、傷害、吸濕且適於輸送之方法施行，並須有明顯之標示：包括名稱、種類、尺度(厚度 x 寬)、淨重、製造廠名稱或商標、製造年月或簡稱、製造號碼或捲筒號碼。在購料驗收時，應檢查其外觀及量測厚度及相關尺寸，並針對前述物理及電氣特性作抽樣試驗，合格後，始可進料。對驗收合格後絕緣紙應妥適保存。

## 三、變壓器一、二次側繞組短路及繞組層(匝)間短路之檢測試驗方法及準則

建議引用 CNS 599，IEEE C57.12.00，IEEE C57.12.90，IEEE C57.12.91 等相關標準與檢測試驗方法實施各項試驗：匝比試驗、繞組之電阻測定、開路試驗(無負載電流及無負載損測定)、耐電壓試驗、感應電壓試驗、衝擊電壓試驗、溫昇試驗、絕緣電阻試驗。

## 四、鐵心磁通密度，渦流損於工廠試驗之檢測方法

建議依 CNS 7214 C3117 (2010 年 11 月 18 日修訂)之「電磁鋼片及鋼帶試驗法」，鐵心磁通密度及鐵損試驗的量測設備須使用 25cm Epstein 試驗器。變壓器無負載損(鐵損)則依 CNS599 C3003 第五節「無負載電流及無負載損測定(開路試驗)」或 IEEE Std. C57.12.90-2010 第 8.2 節「No-Load Loss Test」測試其無負載損失，再依磁滯損與渦流損所佔之比例，算出其渦流損。

## 五、套管井沿面距離與閃絡關聯性

1. 變壓器桶內的油面高度，建議比照改良套管型桿上變壓器【材規 Y065 (100-11)】油位線之規定：變壓器內側須明顯壓出最低油位、25°C 標準油位及 140°C 最高油位線，並分別於壓出之油面線上塗以紅色(最低油位線及 140°C 最高油位線)及黃色(標準油位線)標示，各油位線寬度以不大於 4mm 為原則，其位置須經台電公司審查認可。
2. 變壓器套管井沿面距離與閃絡關聯性，為達到一次套管井單獨就能通過 60 赫乾燥耐電壓 1 分鐘(有效值) 40kV (在空氣中，非絕緣油中)，如不附裝絕緣封套(罩)，則勢必要增加套管沿面距離(增加 16 毫米(mm)的沿面距離到 78 毫米(mm))；不僅增加變壓器的尺寸，在重量上及形體上亦相對增加，在運搬及安裝上也增加困難度。為使變壓器能正常運轉，建議一次套管井末端附裝開口(向上)絕緣封套，防止因缺油所造成的沿面絕緣距離不足。

## 六、高壓套管井耐候性及部分放電檢測方法與準則

### (一)高壓套管井耐候性及其材料規範 C035 增修訂

參考表 7-1 綜合建議 C035(99-07)材料規範條文。

### (二) 在工廠及現場執行部分放電檢測方法

1. 為防範密封型桿上變壓器之一次套管井劣化施工不良，建議在工廠及在施工後或桿變故障後，須以 X 光檢測器檢查；另一次套管井施工送電後，亦建議需定期以紅外線測溫器或紅外線熱顯影像儀器，量測一次套管井有否異常溫度，及有否超過台電公司之預知劣化檢測實施原則標準值。

### 2. 部分放電檢測方法及準則

#### (1) 部分放電檢測方法

- A. 在工廠之部分放電檢測方法與試驗程序，建議依 IEEE C57.12.00 或/及 IEC60270 標準實行，詳如 3.6.2 節三之(一)所述。
- B. 現場部分放電檢測方法建議採用超音波檢測法(或無線電波頻率干擾電壓感測法)，並將檢測儀器靠近一次套管井檢測。

#### (2) 部分放電量測準則

如採用無線電干擾電壓感測法，可採用 IEEE C57.12.90 標準值；業務處之配變電設備不停電預知劣化檢測實施原則之標準值，可適用

於現場密封型桿上變壓器之部分放電檢測。

## 七、變壓器中間檢查

1. 變壓器之中間檢查項目，應從進料開始製完成製品之各階段作業均應列入檢查，且製造廠之品質管理系統亦須列入中間檢查。另建議訂定製品中間檢查實施要點(詳如 3.6.7 節之四所述)。有關材規 C035 第 6.2.2 節(中間檢查範圍)，建議增修訂(詳如 3.6.7 節之二所示、參考表 7-1)。
2. 建議製造廠應具有 ISO-9001 品質管理系統登錄證書，且應依 ISO-9001 品質管理系統之要求，從進料製造，完成品之流程，建立變壓器之進料、製造、品管、試驗、監督查對、及完成品等各項品質管理機制。另製造廠亦應嚴格執行品質管理，於報驗時，需將自行品管之出廠試驗報告送台電公司用料單位及試驗單位備查。

綜合建議 C035(99-07)材料規範條文如表 7-1。

表 7-1 綜合建議 C035(99-07)材料規範條文

項目	原 C035 條文	建議條文
一次套管井	4.6.1 套管井應固定於變壓器上，並應完全密接，以防水份侵入或絕緣油滲出，交貨時應以護套套住，且其構造、尺寸及試驗標準應符合 ANSI/IEEE 386 之標準。 [原訂定之構造、尺寸及試驗標準應符合 IEEE 386 之標準，改列入材規 4.6.2。]	4.6.1 一次套管井須為環氧樹脂(Epoxy Resin)或更佳之材質，其油中端若加裝絕緣套須為耐油、耐熱及絕緣良好之橡膠材質，且用押鐵及襯墊完全密接於變壓器外殼上，以防止水份浸入或絕緣油滲出，並須能由外部更換。交貨時應以護套套住，以防灰塵雜物進入。
一次套管井	4.6.2 額定電壓：15.2 kV (相對地)。額定電流：200 A。	4.6.2 一次套管井額定電壓為 15.2kV (相對地)，額定電流為 200A，其構造、尺寸、試驗項目、方法及標準應符合 IEEE386 標準。套管井應可適合配裝本公司材料規範 A008「預鑄型高壓電纜接頭及配件」之 200A 套管插頭。試驗項目如下： (1) 部分放電試驗 (2) 交流耐電壓試驗 (3) 直流耐電壓試驗 (4) 衝擊耐電壓試驗 (5) 短時間電流試驗 (6) 循環電流試驗 (7) 加速密封老化試驗 (8) 構造及尺寸檢查

一次套管井	4.6.4 套管井押鐵之厚度應為 6 公厘以上，押鐵表面不得塗裝。	4.6.4 套管井押鐵厚度應為 6 公厘以上之 SUS304 不鏽鋼製成，押鐵表面及螺栓、螺帽接觸處不得塗裝。
一次套管井	4.6.5 套管井須能外部更換。	(併入材規 4.6.1 節(套管井須能外部更換))
設計圖面	5.2 (4) 一次套管井裝配圖(含組立)。	5.2 (4) 一次套管井之規格、特性試驗、廠牌型號及裝配組立圖。
定型試驗	5.3.1 定型試驗應實施項目如下： 註：1.(1)~(7)項以同一具變壓器實施。 2.(11)~(15)得檢附依「台灣電力股份有限公司受理試驗機構辦理電力設備器材定型試驗須知」方式辦理之試驗報告。	5.3.1 定型試驗應實施項目如下： (16)一次套管井特性試驗 註：1.(1)~(7)項以同一具變壓器實施。 2.(11)~(16)得檢附依「台灣電力股份有限公司受理試驗機構辦理電力設備器材定型試驗須知」方式辦理之試驗報告。
耐電壓試驗	5.7.1 除高壓側線圈不施行此項試驗外，變壓器之各個線圈均須按表 8 之規定值加 60 赫近似正弦波有效電壓 1 分鐘而不發生任何異狀，試驗時未加壓之線圈、鐵心、外殼等均須予以接地。	5.7.1 繞組耐電壓：除高壓側線圈不施行此項試驗外，變壓器之各個線圈均須按表 8 之規定值加 60 赫近似正弦波有效電壓 1 分鐘而不發生任何異狀，試驗時未加壓之線圈、鐵心、外殼等均須予以接地。
耐電壓試驗	5.7.2 將變壓器內絕緣油抽出，直至油面低於套管井下緣，使高壓套管井未浸泡於絕緣油中，將限流熔絲負載端之引線拆離，由高壓套管井施加 24kV、60 赫近似正弦波有效電壓 1 分鐘高壓套管井及高壓套管井至限流熔絲間之接線不得發生任何異狀。	5.7.2 套管井耐電壓：將變壓器內絕緣油抽出，直至油面低於套管井下緣，使高壓套管井未浸泡於絕緣油中，將限流熔絲負載端之引線拆離，由高壓套管井施加 40kV，60 赫近似正弦波有效電壓 1 分鐘，高壓套管井及高壓套管井至限流熔絲間之接線不得發生任何異狀。
套管特性	5.10 套管特性：變壓器一次套管井及二次套管之特性須符合表 9 之規定值。	5.10 套管特性：變壓器一次套管井及二次套管之特性試驗須分別符合表 9 與表 10 之規定。 ([表 9 一次套管井之特性試驗項目及試驗標準值]即本文表 3-5、[表 10 二次套管之特性試驗項目及試驗標準值]即原條文表 9)
品質管制	6.1.3 廠商自行品管之出廠試驗報告至少應包括： (4)至少抽一具依次實施溫昇、油密(緊接溫昇後)、衝擊電壓、耐電壓及感應電壓等試驗(溫昇試驗應附紀錄及詳細計算值)。	6.1.3 廠商自行品管之出廠試驗報告至少應包括： (4)至少抽一具依次實施溫昇、油密(緊接溫昇後)、衝擊電壓、繞組與套管井耐電壓及感應電壓等試驗(溫昇試驗應附紀錄及詳細計算值)。 (8)至少抽一具實施一次套管井之電暈放電、交流耐電壓、短時間電流及加速密封老化等特性試驗。
中間	6.2.2 中間檢查範圍：至中檢日期前製	6.2.2 中間檢查範圍：至中檢日期前製

檢查	<p>造完成或半成品裝妥項目均列為中檢範圍，如構造尺寸、組合及接線、外殼材質與厚度、焊接、塗裝、心體固定、絕緣紙、及第 5.5 節~第 5.20 節各項特性試驗等均屬。</p>	<p>造完成或半成品裝妥項目均列為中檢範圍，如：</p> <p>A. 構造尺寸</p> <p>B. 鐵心(含材質、組立、固定及熱處理)</p> <p>C. 線圈(含材質、捲繞、絕緣紙及熱處理)</p> <p>D. 心體組合(含鐵心與線圈組立、固定、配結線及熱處理)</p> <p>E. 外殼(含材質、厚度、焊接及塗裝)</p> <p>F. 保護設備入殼組裝(含限流熔絲、遮斷開關及避雷器之規格，配結線及與外殼間距)</p> <p>G. 附屬配件組裝(含一次套管井及二次套管組之材質、引接線與絕緣、襯墊、被覆及防水套)</p> <p>H. 總組合(含鐵心體與保護設備入殼、配結線、絕緣油、真空注油方式、鐵心接地及外殼接地)</p> <p>I. 材規 C035 第 5.5 節至第 5.20 節各項特性試驗</p> <p>J. 製造廠之 ISO-9001 品質管理系統相關管制程序書及作業說明書、進料檢驗之查對。</p>
驗收	<p>2.6 特性試驗</p> <p>(9) 瞬時短路、二次套管組、壓力釋放裝置、一次分接頭切換器、一次套管井、外殼(含配件)材質及襯墊等試驗，本公司得視需要予以抽試。</p>	<p>2.6 特性試驗</p> <p>(9) 瞬時短路、二次套管組、壓力釋放裝置、一次分接頭切換器、外殼(含配件)材質及襯墊等試驗，本公司得視需要予以抽試。</p> <p>(10)隨機取樣一具實施一次套管井之電暈(部分)放電試驗及交流耐電壓試驗。</p>

### 7.3 附屬配件結構、開關設備動作特性及保護協調

#### 一、有限元素法模擬分析檢討

##### (一) 避免導體形成尖端

高壓套管接線末端為圓筒導體，使得電場聚集於此，將接線末端改成球型導體，電場從原本聚集於圓筒尖端移至球型導體上，可以改善電場集中的現象。

##### (二) 高壓引線與桶壁距離

高壓引線與桶壁間的距離會影響電場強度，包覆絕緣的高壓引線與桶壁間的距離至少為 20mm，且須在絕緣油位線之下。

### (三) 防止變壓器漏油

變壓器桶內的正常油面高度，應使高壓套管全部浸泡在絕緣油當中。缺油時桶內絕緣油的油面降低到高壓套管下緣，高壓套管未浸泡於絕緣油中，高套管接線端子暴露於空氣，使得絕緣的能力下降。建議：

#### (1) 加裝絕緣套

在高壓套管加裝開口朝上的絕緣套，正常變壓器充滿油時，高壓套管於絕緣油之中，當油位下降時，高壓套管內部仍充滿絕緣油，提供高壓帶電體良好的絕緣，防止因缺油造成沿面絕緣距離的不足。

#### (2) 裝設缺油感測裝置

當變壓器絕緣油下降時，能藉缺油感測裝置啟斷變壓器，避免缺油使高壓套管裸露於空氣，造成沿面絕緣距離不足。

### (四) 二次套管

須通過材規 C035 (99-07)中規定的各項試驗，以確保設備的品質。

### (五) 熔絲與電位為零帶電體的距離

熔絲置放於變壓器夾件的上方，彼此之間有支撐架固定熔絲，且具備足夠的安全絕緣距離。以熔絲某製造廠家為例，帶電體中心與接地夾件距離為 80mm，若以 80mm 為安全絕緣的標準，則在正常運轉情況下，仍有 10 倍以上的安全裕度。因此，建議熔絲與電位為零的帶電體(如夾件、桶壁、避雷器等)間的距離至少為 80mm。

### (六) 壓力釋放裝置

(1) 需有防水或半蓋板裝置(如一次分接頭切換器)，避免水分由壓力釋放裝置進入變壓器內(天氣或其他因素)，而使絕緣油劣化。

(2) 變壓器運轉溫度上升時，絕緣油因熱漲冷縮原理使油面上升，為防止變壓器內之絕緣油洩漏到空氣中，建議計算出最高運轉溫度的油位線後，將壓力釋放裝置置於最高運轉溫度時之油位線上方；避免壓力釋放時，將絕緣油噴到桶外。

## 二、內置遮斷開關之啟閉特性與試驗及絕緣油溫昇之影響

(一) 基本上台電材料規範 C035(99-07)對遮斷開關之規定是比照 ANSI/IEEE C37.41 Table 3 (1981 年版)規定，該規定是針對驅弧型熔絲之規定而非斷路器之規定。IEEE 與 IEC 兩大國際標準對驅弧型熔絲試驗之 TRV 及 RRRV 規定類似，至於斷路器方面 IEEE 及 IEC 的

TRV 及 RRRV 規定也頗為一致，均遠高於驅弧型熔絲。因此，若遮斷開關試驗標準改適用斷路器之標準，其預期的 TRV 及 RRRV 須再提高。

- (二) 絕緣油溫度愈高對遮斷開關的耐電流能力愈低；目前台電規範遮斷開關過載保護跳脫時的油面最高溫度限制值僅規定為 120°C，對於遮斷開關各組件溫度限制並未規定，且遮斷開關可正常啟斷大電流的油溫限制亦未規定。若將遮斷開關視為油斷路器，則依斷路器標準規定，其允許週溫(或過載能力)以及絕緣油溫度均應配合下修。

### 三、全域型熔絲之啟斷特性及保護區域與協調

依據密封型桿上變壓器之材料標準 C035(99-07)中對於全域型限流熔絲之規定，顯示全域型限流熔絲僅需符合現行 IEEE Std. C37.41 (2008) Table 14，此表格僅規定全域型限流熔絲之啟斷能力，對於熔絲之其他性能如耐衝擊電壓(BIL)、交流耐壓、溫昇…等皆未限制。建議全域型限流熔絲之規定需符合標準如下：

1. 熔絲之其他性能測試參數需參照 IEEE Std. C37.47 (2011)；測試波形與量測方法參照 IEEE Std. 4 (1995)；溫昇測試及一般工作條件參照 IEEE Std. 37.40。
2. 熔絲之協調需參照 IEEE Std. C37.48；熔絲之應用、動作及構造需參照 IEEE Std. C37.48.1。
3. 變壓器之破壞曲線需參照 IEEE Std C57.109。

### 四、避雷器動作特性及保護區域與協調

依據 IEEE C62.22 之 6.5 節計算絕緣協調保護裕度  $P_{M1}$ 、 $P_{M2}$ ，以 JK 廠家定型試驗報告數據代入計算，保護裕度均有大於 20%。如在雷擊的分析中使用 35kA 雷電流作模擬，電流上升率為 35kA/ $\mu$ s 計算保護裕度  $P_{M1}$ 、 $P_{M2}$ ，保護裕度  $P_{M1}$  並不大於 20%，在此絕緣協調的能力可能須考慮過大的雷擊電流上升率；根據  $P_{M1}$  式中所需保護裕度須大於 20%，數學式最能改變的因子如縮短引線之長度，或者是對整體變壓器加強絕緣強度予以改善。

依 IEEE Std. C62.11 量測於 8/20  $\mu$ s 放電電壓-電流曲線中，依序量測為 1.5、3、5、10、20kA 之放電電壓，CP 與 JK 兩廠家，在此方面量測需探討是否符合 IEEE Std. C62.11 標準規定。

針對避雷器裝設於不同位置，雷擊時對限流熔絲的影響。當雷擊發生

時，避雷器裝於一次電源側較利於保護限流熔絲避免過大的雷擊電流損壞熔絲與熔斷的情形；但因避雷器裝設於一次電源側須暴露於空氣中，需考慮避雷器與變壓器的引線長度，與外在環境下如溫度、水器、灰塵等影響。

對於避雷器水平與垂直置放 4 種案例之分析結果，避雷器水平置放時之熔絲電場強度值均小於避雷器垂直置放者，建議仍使用避雷器水平置放方式(參考附錄三)。

## 7.4 密封型桿上變壓器之故障指示器

有關適用於密封型桿上變壓器之故障指示器型式，可比照亭置式變壓器方式，建議如下。

- (1) 使用手動復歸型或肘型端頭測試點電壓復歸型之故障指示器。故障指示器之指示元件，使用 LED 燈顯示方式；至於正常或修妥復電後、故障停電之 LED 燈顯示顏色或不顯示建議依台電維護現場人員之決議定之。

- (2) 使用附熔絲之肘型端頭安裝於測試點之故障指示器

熔絲肘型端頭係於肘型端頭內部增加限流熔絲，有兩處測試點分別於熔絲電源側及負載側，可於該處裝置感應式 LED 故障指示器，是一種電壓指示器(Voltage Indicator)。若熔絲於正常供電中，則兩側測試點之 LED 電壓指示器均會亮顯示有電；當熔絲熔斷時，電源側測試點之 LED 電壓指示器會亮表示有電，其負載側測試點之 LED 電壓指示器則因斷電而不亮顯示無電壓；當系統斷電時，二電壓指示器之 LED 燈均不會亮，表示停電。透過 LED 電壓指示器之亮燈情況，即時提供運轉維護人員判斷電纜線路是否帶電之參考，以及輔助事故處理之判斷。

- (3) 熔絲肘型端頭評估分析：

- (a) 高壓側肘型端頭加裝保護熔絲，其熔絲係包覆於肘型端頭內，外覆 EPDM 全絕緣熔絲筒，抗 UV；全絕緣設計，避免人員、動物誤觸感電危險。
- (b) 熔絲肘型端頭之功能可取代現行之熔絲鏈開關+限流熔絲+肘型端頭，甚至可取代遮斷開關，並有故障指示器功能；整組成本應些許便宜或相當，包括：變壓器移出限流熔絲及遮斷開關後，不鏽

鋼變壓器筒尺寸可縮小，絕緣油使用量亦可減少，降低成本。

- (c) 安裝熔絲肘型端頭後，變壓器外觀尺寸縮小，重量減輕，方便搬運及安裝，並可減輕電桿的承重力。
- (d) 熔絲肘型端頭具有測試點線路故障指示器，能簡單快速找出故障點。
- (e) 熔絲肘型端頭安裝與一般肘型端頭施工法無異，施工簡便，產品安裝可與電纜施工一併完成後，整組與高壓套管接合即可，大幅減少人員空中作業的時間，降低變壓器的安裝成本。維護或變壓器發生熔絲熔斷時，可直接於現場檢測維護，直接於變壓器外部迅速安裝更換，無需拆卸/安裝變壓器，節省拆裝費用，且不需切開變壓器，更節省搬運與維護成本。
- (f) 熔絲肘型端頭使用限流型熔絲，熔斷時不會有任何聲響，不致驚嚇鄰近住戶，又可降低變壓器溢油之危害。
- (g) 台電公司未來在做 11.4kV 或 22.8kV 電壓等級更換時，只要直接在現場抽換熔絲肘型端頭內的限流熔絲即可，不需將變壓器送回維修廠開蓋漏油後才能更換熔絲，可大幅節省人力及成本。
- (h) 安裝熔絲肘型端頭後，每年可大幅節省變壓器安全庫存採購預算。為縮短停電時間，各區處會保持變壓器年使用量的 5-10% 作為安全庫存，當變壓器因熔絲熔斷造成停電時，維修人員會直接將變壓器拆下，先以庫存的變壓器更換安裝。安裝熔絲肘型端頭後，可減少安全庫存。

註：台電材料標準 A008 (2010-3)「預鑄型高壓電纜接頭及配件」需配合增修(參考附錄四)。

## 7.5 饋線上下游之保護協調

第六章針對保護設備之協調曲線和協調規則，進行一整合性的說明與討論，對於配電系統網路之保護工程之規劃和評估，提供保護協調的最佳曲線，達到最佳系統保護協調的目的，提升系統整體供電可靠度與品質。

綜合基隆、新竹、彰化、雲林、高雄區營業處五案例之分析，基隆與高雄區處案例保護協調正確。對於新竹、彰化、雲林區處案例，各保護設備在故障電流 100A 到 4000A 間協調；在未考慮變壓器端另有其餘開關設

備(遮斷開關)對其進行保護下，發現在 50kVA 與 100kVA 變壓器中單獨考慮 40C 電力熔絲的情況，如果分歧線使用 40T 電力熔絲，可能導致在故障電流低於 450A 時，分歧線上的 40T 熔絲先行熔斷；然而當遮斷開關與全域熔絲共同考量時，依據第六章之分析與圖 4-77 以及圖 6-6 與圖 6-7 變壓器保護協調曲線範例，顯示整體保護設備對變壓器與饋線間之協調可正常達到保護範圍。

目前密封型桿上變壓器的設計方式係將遮斷開關與熔絲都置於變壓器桶內，可以對變壓器一次側與二次側提供保護。但是變壓器套管井位於熔絲的上游，故內部的熔絲無法對套管井進行保護，而須由位於分歧線的電力熔絲鏈進行保護。惟在套管井絕緣劣化初期，由於屬於高阻抗短路，其短路電流並不足以讓分歧線的熔絲動作，可能導致事故發生。如果將置於桶內的熔絲移到桶外，則可以對套管井提供就近的保護。由於僅將熔絲移到桶外，其與內部遮斷開關的距離不致太遠，故仍可與內部遮斷開關視為一體，此方式並不會造成保護協調的問題。

## 參考文獻

- [1] 台灣電力公司材料標準 C035「密封型桿上變壓器」，2007-07，台灣電力股份有限公司。
- [2]「台電公司各區處最近五年桿上變壓器故障統計表」，2012，台灣電力股份有限公司。
- [3] 鄭奕成，油浸式變壓器之溫度抑制與壽命診斷，電機月刊第三卷第五期，1993 年 5 月號。
- [4] 鄭強，變壓器故障解析與診斷技術，機電現場技術 2011-04。
- [5] GE Power Distribution Systems Course ("Current-Limiting Fuses on Distribution Systems", Reprinted from DISTRIBUTION, spring 1974, and "Concept Alternatives and Application Considerations in the use of Current-Limiting Fuses for Transformer Protection", Reprinted from IEEE Conference Record 1974), General Electric.
- [6] Cooper Power System, "Fused Load break Elbow Connector (熔絲肘型端頭)"。
- [7] ASTM B3-01 (2007), "Standard Specification for Soft or Annealed Copper Wire".
- [8] ASTM D149-09, "Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power frequencies".
- [9] 台灣電力公司材料標準 Y065「改良型桿上變壓器」，2011-11，台灣電力股份有限公司。
- [10] IEEE Std. 386, "Standard for Separable Insulated Connector Systems for Power Distribution Systems Above 600V ", 2006.
- [11] CNS 599 C3003「配電用變壓器檢驗法」，1996-11-23。
- [12] IEEE Std. C57.12.00-2010, "General Requirements for Liquid Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers".
- [13] IEEE Std. C57.12.90-2010, "Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers".
- [14] IEEE Std. C57.12.91-2011, "Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage regulators".
- [15] CNS 7214 C3117「電磁鋼片及鋼帶試驗法」，2010-11-18 修訂版。

- [16] 山下和久、淺井博文，「電子計測、磁性材料合同研究會資料」，EM-75-30, MAG-75-37，總研電氣，1975-12-01，社團法人電氣學會。
- [17] 大同公司技術委員會電力技術分會，「大同變壓器的特性與構造 第三章變壓器的鐵心」，大同技術手冊電力技術篇第 1 冊。
- [18] 大同公司技術委員會電力技術分會，「大同變壓器的製造與試驗 第五章 5-2 矽鋼片材料試驗」，大同技術手冊電力技術篇第 2 冊。
- [19] 「高雄茄萣鄉密封型桿上變壓器故障噴油事故調查報告」，2010-11-03，台灣電力股份有限公司。
- [20] J.R. Hickman, "Seattle City Light Dept. X rays Help Detect Potential Elbow Failures", T&D World, Oct. 1976, pp.80-83.
- [21] 台灣電力公司材料標準 C001「亭置式變壓器」，2011-08，台灣電力股份有限公司。
- [22] 台灣電力公司材料標準 A008「預鑄型高壓電纜接頭及配件」，2010-03，台灣電力股份有限公司。
- [23] 邱敏彥，應用 UHF 技術檢測高壓設備局部放電，機電現場技術，2011-04，pp.98-99。
- [24] Dirk Busswurn, "On-site Partical Discharge Monitoring Using the Differential Lamke Probe LDP-5 and its Accessories", HV Technologies, Inc., pp.8-1~8-10.
- [25] Doble Engineering Company, "Partial Discharge Surveyor (PDS-100) Uuser Guide".
- [26] IEC 60270, "High Voltage Test Technigues — Partical Discharge Measurements", 2000-12, pp.53-54.
- [27] IEEE Std. C57.113-2010, "Recommeded Practical for Partial Discharge Measurement in Liquid Filled Power Transformers and Shunt Reactors", pp.8-11.
- [28] IEEE Std. 454-1973, "Recommeded Practical for Detection and Measurement of Partial Discharges (Corona) During Dielectric Tests".
- [29] IEEE Std. C63.2-2009, "Electromagnetic Noise and Field Strength Instrumentation, 10Hz to 40GHz — Specifications".
- [30] IEEE Std. C57.19.00-2004 (R2010), "General Requirements and Test Procedure for Outdoor Power Apparatus Bushings".
- [31] IEEE Std. C57.12.11-1980, "Guide for Installation of Oil-Immersed

Transformers (10MVA and Larger, 69-287kV Rating)".

- [32] 「配變電設備不停電預知劣化檢測實施原則」，台灣電力公司業務處，pp.6。
- [33] CNS 13390 C4468 「樹脂型乾式變壓器」，2001-01-30。
- [34] JIS C4306-1999 「配電用 6kV モールド式變壓器」。(モールド模鑄)
- [35] 「桿上變壓器中間檢查標準作業程序簡介」，台電公司業務處九十九年度配電技術發展報告，pp.152。
- [36] 「變壓器製程簡介」，電力變壓器技術資料，士林電機，p.11。
- [37] 李文耀，「配電變壓器設計實務」，機電現場技術，2010-08, pp.30。
- [38] 張文英，高電壓工程，臺北市，中國電機技術出版社，1979。
- [39] 顏世雄，高電壓工程，臺北市，新學識文教出版中心，1990。
- [40] CNS 1327 C3025 「電絕緣用油檢驗法」，1994-06-27，修訂版。
- [41] IEC 60052, "Voltage Measurement by means of Standard Air Gaps", 2002-10.
- [42] Halliday David and Resnick Robert, Fundamentals of Physics, New York: Wiley, 1988.
- [43] 王明經，「電機設備基本絕緣概念(上)」，電機月刊，第十三卷，第十期，2003，第 200-219 頁。
- [44] 黃昌圳，有限元素法在電機工程的應用，臺北市，全華科技圖書股份有限公司，2005。
- [45] Ansoft Maxwell User's Guide v.12, 2009, Ansoft Corporation.
- [46] 劉國強、趙凌志、蔣繼姪，Ansoft 工程電磁場有限元分析，北京市，電子工業出版社，2005。
- [47] 賴俊鴻，「電力變壓器絕緣設計」，電機月刊，第二十一卷，第十期，2011，第 124-148 頁。
- [48] C. Hosticka, "Dependence of Uniform/Nonuniform Field Transformer Oil Breakdown on Oil Composition", IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol EI-14, No. 1, 1979, pp.43-50.
- [49] T.V. Oommen, "Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 18, no. 1, 2002, pp. 6-11.
- [50] S. Okabe, et al., "Common insulating properties in insulating materials," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 13, no. 1,

2006, pp. 327-335.

- [51] 「密封型桿上變壓器保護設備及零組件整合服務」，2011，傑克電機股份有限公司。
- [52] 王明經，「電機設備基本絕緣概念」，電機月刊，第十三卷，第十一期，2003，第 238-250 頁。
- [53] George Lubin, Handbook of Fiberglass and Advanced Plastics Composites, New York: Van Nostrand Reinhold, 1969.
- [54] Harris Benson, University Physics, New York: John Wiley, 1996.
- [55] CNS 9969 B2742 「防止超壓之安全裝置-第 1 部：安全閥」，2012-09-14，修訂版。
- [56] 曹大鵬，應用電磁學，臺北市:全華科技圖書股份有限公司，1990。
- [57] 游明輝，「變壓器絕緣設計注意要項－防止楔形間隙」，電機月刊，第十一卷，第二期，2001，第 138-143 頁。
- [58] 顏世雄，避雷工程講義，臺北縣，羣禾文化事業有限公司，2007。
- [59] 曾國雄、譚旦旭，配線設計，臺北市:高立圖書有限公司，2006。
- [60] Hyun-Mo Ahn, Ji-Yeon Lee, Joong-Kyoung Kim, Yeon-Ho Oh, Sang-Yong Jung, and Sung-Chin Hahn, "Finite-Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force in Power Transformer", IEEE Transactions on Industry Applications, vol 47, no. 3, 2011, pp. 1267-1272.
- [61] 台灣電力公司材料標準 C035 「密封型桿上變壓器」，2010-07，台灣電力股份有限公司。
- [62] IEEE Std. C37.41-2008 “Design Tests for High-Voltage (>1000 V) Fuses, Fuse and Disconnecting Cutouts, Distribution Enclosed Single-Pole Air Switches, Fuse Disconnecting Switches, and Fuse Links and Accessories Used with These Devices”.
- [63] 「遮斷開關特性試驗報告」，台灣大電力研究試驗中心。註：試樣係由傑克電機製造。
- [64] IEEE Std. C37.48.1-2011 “IEEE Guide for the Application, Operation, and Coordination of High-Voltage (>1000V) Current-Limiting Fuses”.
- [65] IEEE Std. C37.011-2011 “IEEE Guide for the Application of Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers”.
- [66] IEEE Std. C37.04-1999 “IEEE Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers”.

- [67] IEEE Std. C37.04b-2008 “IEEE Standard for Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis”.
- [68] IEEE Std. C37.06-2009 “IEEE Standard for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis — Preferred Ratings and Related Required Capabilities for Voltages Above 1000 V”.
- [69] IEC 62271-100 “High-Voltage Switchgear and Control Gear— Part 100: Alternating-Current Circuit-Breakers”.
- [70] IEC 60282-2 “High-Voltage Fuses— Part 2: Expulsion Fuses”.
- [71] IEEE Std. C37.010-1999 “IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis”.
- [72] IEEE Std. C57.104-2008 “IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers”.
- [73] IEEE Std. C37.47™-2011, “IEEE Standard Specifications for High-Voltage (>1000V) Distribution Class Current-Limiting Type Fuses and Fuse Disconnecting Switches.”
- [74] IEEE Std. 4-1995, “IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing.”
- [75] IEEE Std. C57.109™-1993, “IEEE Guide for Liquid-Immersed Transformer Through-Fault-Current Duration.”
- [76] IEEE Std. 242-2001™, “IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems.”
- [77] IEEE Std. C37.48™-2005, “IEEE Guide for the Application, Operation, and Maintenance of High-Voltage Fuses, Distribution Enclosed Single-Pole Air Switches, Fuse Disconnecting Switches, and Accessories.”
- [78] IEEE Std. C37.40-2003, “IEEE Standard Service Conditions and Definitions for High-Voltage Fuses, Distribution Enclosed Single-Pole Air Switches, Fuse Disconnecting Switches, and Accessories (Revision of IEEE Std C37.40-1993).”
- [79] IEEE Std. C62.11-1999, “IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (> 1 kV). ”
- [80] IEEE Std. C62.2™-1987 (R1994), “IEEE Guide for the Application of Gapped Silicon-Carbide Surge Arresters for Alternating Current Systems”
- [81] IEEE Std. C62.22-2009, “IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems.”
- [82] Cooper Power System, “VariSTARR Type Composite Heavy-duty Underoil (CHU) MOV Arrester.”

- [83] 陳世榮，「氧化鋅避雷器之維護及線上監測技術」，中原大學，94 年 12 月。
- [84] Fault Indicators 型錄，Cooper Power Systems 網站資料，USA。
- [85] 故障指示器型錄，傑克電機股份有限公司。
- [86] Fault Indicators 型錄，SEL Company 網站資料，USA。
- [87] 線路故障指示器材規 Y231 (101-01)，台電公司業務處。
- [88] Short Circuit and Earth Fault Indicators 型錄。
- [89] IEEE Std. 495-2007, “Guide for Testing Fault Circuit Indicators.”
- [90] 高壓被覆罩材規 E057 (97-04)，台電公司業務處。
- [91] Cooper Power Systems, “Electrical Distribution System Protection”, Chap1-Chap3.
- [92]. Ground Fault Protection, Cooper Bussmann, 2005
- [93].王順清、李永祥，「高壓器材－電力熔絲及熔絲鏈開關的認識」，PEW-EIW082，中華民國職業訓練研究發展中心，90 年 12 月。
- [94] 王順清、李永祥，「保護電驛的設定－過電流電驛」，PEW-EIW0820，中華民國職業訓練研究發展中心，90 年 12 月。
- [95] 王順清、李永祥，「保護電驛的設定－電壓電驛」，PEW-EIW0821，中華民國職業訓練研究發展中心，90 年 12 月。

## 附錄一 預定進度甘梯圖

### 預定進度甘梯圖

((1)甘梯圖、工作項目欄請填寫重點工作細項，並設定查核點，且於查核點完成事項說明欄內詳列查核內容(例如應完成之文件、樣品或雛型等)，俾便評核。  
(2)一年期以上之計畫，請按曆年制分年列表。  
(3)各工作項目累計進度全程為 100%。

工作項目	工作 比 重 %	預 定 進 度 %	100 年 11 月~101 年 11 月												查核點完成 事項說明
			100	100	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	
			年	年	年	年	年	年	年	年	年	年	年	年	
			11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
			月	月	月	月	月	月	月	月	月	月	月	月	
1. 蒐集密封型桿上變壓器標準與文獻，檢討密封型桿上變壓器故障類型、數量，分析肇因並統計故障率	6	預定進度	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1					預定 101 年 6 月底前提出檢討報告、改善建議。  提出密封型桿上變壓器故障分類、肇因及故障率。
		累計進度	0.5	1	1.5	2	3	4	5	6					
2. 檢討 C035 材料規範完整性。 (1)擬定箱體氣密及入油規範。	2	預定進度		0.5	0.5	0.5	0.5								101 年 3 月底前完成密封型桿上變壓器箱體氣密檢驗及入油規範之報告。
		累計進度		0.5	1	1.5	2								
(2)擬定絕緣紙材質規範及管制方案。	2	預定進度			0.5	0.5	0.5	0.5							101 年 4 月底前完成密封型桿上變壓器絕緣紙規格分析、適用性規範及進料管制方案之報告。
		累計進度			0.5	1	1.5	2							

(3)探討密封型桿上變壓器一、二次側繞組短路及繞組層(匝)間短路之檢測試驗方法及準則。	2	預定進度					0.5	0.5	0.5	0.5				101年6月底前初步完成密封型桿上變壓器一、二次側繞組間及繞組層間短路之檢測方法及準則報告。
		累計進度					0.5	1	1.5	2				
第1次中間報告	5	預定進度						5						101年4月底前完成第1次中間報告。
		預定進度						5						
(4)研擬鐵心磁通密度、渦流損於工廠試驗之檢測方法。	2	預定進度							0.5	0.5	0.5	0.5		101年8月底前完成依密封型桿上變壓器鐵心磁通密度、渦流損設計值，提出工廠試驗之檢測方法報告。
		累計進度							0.5	1	1.5	2		
(5)依據現行套管井裝置規格及變壓器油面高度，探討變壓器套管井沿面距離與閃絡關聯性，並依饋線保護結構檢討套管井故障檢測靈敏度，據以提出套管井弱點之規範建議事項及檢測方法。	4	預定進度					0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	101年10月底前完成依套管井沿面距離與閃絡關聯性，及套管井檢測方法之報告。
		累計進度					0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
(6)探討密封型桿上變壓器高壓套管井等附屬配件耐候性，及於工廠及現場執行部分放電試驗檢測方法及其準則。	3	預定進度									1	1	1	101年9月底前完成提出套管井耐候性及電容式、電感式部分放電試驗檢測方法及現場檢測準則之報告。
		累計進度									1	2	3	

(7)研議變壓器中間檢查之項目、執行時機、要點及成效評估。	3	預定進度										1	1	1	101 年 10 月底前完成密封型桿上變壓器中間檢查之項目、執行時機及成效評估之報告。
		累計進度										1	2	3	
3. 探討密封型桿上變壓器附屬配件結構、開關設備動作特性及保護協調。(1) 以有限元素模擬軟體依均勻及非均勻場分析檢討高壓套管井、遮斷開關、全域型限流熔絲、避雷器等帶電體之最小間距及其適當配置處所(如置於桶內或其他處所),並檢討釋壓裝置出口排放位置等改善建議事項。	6	預定進度							1	1	1	1	1	1	依變壓器附屬配件如高壓套管井、遮斷開關、全域型限流熔絲、避雷器等帶電體結構、間距等參數,建立分析模型。以有限元素分析軟體模擬結果,提出附屬配件配置原則之改善建議事項。釋壓裝置出口排放位置改善建議事項。
		累計進度							1	2	3	4	5	6	
(2)依斷路器標準文獻檢討密封型桿上變壓器內置遮斷開關試驗報告之啟閉特性及絕緣油溫昇對啟閉性能之影響。	10	預定進度							1	1	2	2	2	2	提出密封型桿上變壓器內置遮斷開關之激磁電流、故障電流啟閉特性及絕緣油溫昇對啟閉性能影響。
		累計進度							1	2	4	6	8	10	
第 2 次中間報告	5	預定進度												5	101 年 10 月底前完成第 2 次中間報告。
		累計進度												5	
合 計	50	預定進度	0.5	1	1.5	1.5	3	7.5	4.5	4.5	5	6	5.5	9.5	
		累計進度	0.5	1.5	3	4.5	7.5	15	19.5	24	29	35	40.5	50	

工作項目	工作 比 重 %	預 定 進 度 %	101 年 11 月~102 年 11 月												查核點完成 事項說明
			101	101	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	
			年	年	年	年	年	年	年	年	年	年	年	年	
			11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
			月	月	月	月	月	月	月	月	月	月	月	月	
3. 探討密封型桿上變壓器附屬配件結構、開關設備動作特性及保護協調。(1) 以有限元素模擬軟體依均勻及非均勻場分析檢討高壓套管井、遮斷開關、全域型限流熔絲、避雷器等帶電體之最小間距及其適當配置處所(如置於桶內或其他處所)，並檢討釋壓裝置出口排放位置等改善建議事項。	4	預定進度	1	1	1	1									變壓器附屬配件結構、開關設備之有限元素建模。  有限元素分析、最佳化配置、及動作特性。  釋壓裝置出口排放位置改善建議事項。
		累計進度	1	2	3	4									
(3) 全域型熔絲之啟斷特性、保護區域、協調及改善建議事項。	10	預定進度			1	1	2	2	2	2					依全域型熔絲之啟斷特性、保護區域，檢討保護協調及改善建議事項。
		累計進度			1	2	4	6	8	10					
(4) 避雷器動作特性及保護區域、協調及改善建議事項。	10	預定進度				1	1	2	2	2	2				依密封型桿上變壓器 BIL 耐壓等級、避雷器裝設位置及放電特性，提出絕緣協調檢討及改善建議事項
		累計進度				1	2	4	6	8	10				
撰寫第 3 次中間報告	5	預定進度		1	1	1	1	1							完成第 3 次中間報告。
		累計進度		1	2	3	4	5							

4. 探討適用於密封型桿上變壓器之故障指示器型式，檢討裝設方式及地點(如：桿上變壓器、架空幹線、分歧線或接地線)，指示器材料(如：耐候性、安全性、使用壽命、維護週期、成本)及其對人員施工維護之工安影響因素。	7	預定進度			1	1	1	1	1	1	1				提出故障指示器器材規範、IP等級、裝設方式及地點、施工維護方法等建議事項。
		累計進度			1	2	3	4	5	6	7				
5. 檢討計算饋線上、下游之保護協調關係，檢討範圍含二次變電所饋線電源側、主幹線分段(隔離)開關、分歧線熔絲鏈開關、密封型桿上變壓器之遮斷開關、全域型限流熔絲，以及密封型桿上變壓器二次側電路。	7	預定進度					1	1	1	1	1	1	1		依據饋線電源側、主幹線、分歧線、桿密變壓器等各區間保護元件之時間曲線，提出饋線上、下游之保護協調之改善建議事項。
		累計進度					1	2	3	4	5	6	7		
撰寫期末報告	7	預定進度						1	1	1	1	1	1	1	完成期末報告
		累計進度						1	2	3	4	5	6	7	
合 計	50	預定進度	1	2	4	5	6	8	7	7	5	2	2	1	
		累計進度	51	53	57	62	68	76	83	90	95	97	99	100	

## 附錄二 工作會議與參訪時程

### (一) 與台灣電力股份有限公司開會時程

項次	開會日期	開會地點	會議名稱	出席人員
1	100年12月05日〈一〉	台電綜合研究所公館所區204會議室	期初說明會	主席：劉志放 綜研所：彭士開、鄭強、沈政毅、陳柏江、呂盈岱 業務處：郭芳楠、蔡緒良、許嘉發、陳煥文 艾爾：郭宗益、吳博安、馮輝正、呂梅毓、葉朝義、黃湘芸 台北科大：陳昭榮、蔡孟仲
2	101年02月20日〈一〉	台電綜合研究所樹林所區高壓室四樓會議室	第一次工作進度會議	主席：彭士開 綜研所：范振理、鄭強 艾爾：郭宗益、馮輝正、呂梅毓、葉朝義、唐勝、黃湘芸
3	101年03月12日〈一〉	台電綜合研究所公館所區204會議室	第一次工作進度說明會	主席：彭士開 綜研所：鄭強、陳柏江、呂盈岱 業務處：蔡緒良、陳煥文、陳信延 艾爾：郭宗益、馮輝正、呂梅毓、葉朝義、唐勝、黃湘芸 台北科大：蔡孟仲
4	101年05月21日〈一〉	台電綜合研究所樹林所區高壓室四樓會議室	第二次工作進度會議	主席：范振理 綜研所：鄭強、陳柏江 艾爾：郭宗益、吳博安、呂梅毓、葉朝義、唐勝、謝佩珊
5	101年08月31日〈五〉	台電綜合研究所樹林所區高壓室四樓會議室	第三次工作進度會議	主席：鄭強 綜研所：林彥廷、蔡秉欣 艾爾：郭宗益、吳博安、呂梅毓、葉朝義、唐勝、謝佩珊
6	101年11月26日〈一〉	台電綜合研究所樹林所區高壓室四樓會議室	第四次工作進度會議	主席：范振理 綜研所：鄭強、陳柏江、蔡秉欣 艾爾：郭宗益、吳博安、呂梅毓、葉朝義、謝佩珊 台北科大：蔡孟仲、陳昭榮、林書賢、洪佳仁
7	102年03月04日〈一〉	台電綜合研究所樹林所區高壓室四樓會議室	第五次工作進度會議	主席：范振理 綜研所：鄭強、陳柏江、蔡秉欣 業務處：蔡緒良、陳正源、解子祥 艾爾：郭宗益、馮輝正、呂梅毓、葉朝義、唐勝、謝佩珊

				台北科大：陳昭榮、蔡孟伸、林書賢、洪佳仁、丁年平
8	102年05月27日〈一〉	台電綜合研究所樹林所區高壓室四樓會議室	第六次工作進度會議	主席：鄭強 綜研所：陳柏江、蔡秉欣 艾爾：郭宗益、馮輝正、呂梅毓、唐勝、謝佩珊 台北科大：蔡孟伸、林書賢、洪佳仁、丁年平
9	102年11月06日〈三〉	台電綜合研究所樹林所區高壓室四樓會議室	第七次工作進度會議	主席：鄭強 艾爾：郭宗益、唐勝、謝佩珊 台北科大：蔡孟伸、陳昭榮

## (二) 參訪時程

項次	參訪日期	參訪地點	參訪內容	出席人員
1	100年12月05日〈一〉	台電北南配電中心(景美)	五具有漏油現象的密封型桿上變壓器等	綜研所：鄭強、陳柏江 艾爾：馮輝正、呂梅毓、葉朝義、唐勝
2	101年03月22日〈一〉	COOPER 桃園中壢廠	COOPER 變壓器等	艾爾：吳博安、馮輝正、呂梅毓、葉朝義
3	101年05月16日〈三〉	華城電機股份有限公司	避雷器、遮斷開關、熔絲鏈配置、電場問題、出廠試驗項目等	綜研所：鄭強、陳柏江 艾爾：唐勝 台北科大：陳昭榮、蔡孟伸、林書賢、張景閔

## (三) 本團隊內部開會時程

項次	開會日期	開會地點	開會內容	出席人員
1	100年10月31日(一)	台北科技大學自動化科技研究所會議室	第一次內部會議	艾爾：郭宗益、馮輝正、呂梅毓、葉朝義、唐勝、黃湘芸 台北科大：陳昭榮、蔡孟伸
2	100年11月07日(一)	艾爾基金會台北辦公室會議室	第二次內部會議	艾爾：郭宗益、馮輝正、呂梅毓、唐勝、黃湘芸
3	100年12月08日(四)	艾爾基金會台北辦公室會議室	第三次內部會議	艾爾：郭宗益、吳博安、馮輝正、呂梅毓、葉朝義、唐勝、黃湘芸

4	101年03月 16日〈五〉	台北科技 大學自動 化科技研 究所會議 室	第四次內部 會議	艾爾：郭宗益、吳博安、馮輝正、呂 梅毓、葉朝義、唐勝、黃湘芸
5	101年05月 21日〈一〉	台電綜合 研究所樹 林所區高 壓室四樓 會議室	第五次內部 會議	艾爾：郭宗益、吳博安、呂梅毓、葉 朝義、唐勝、謝佩珊
6	101年08月 28日〈四〉	台北科技 大學自動 化科技研 究所會議 室	第六次內部 會議	艾爾：郭宗益、吳博安、呂梅毓、葉 朝義、唐勝、謝佩珊 台北科大：陳昭榮、林書賢
7	101年11月 26日〈一〉	台電綜合 研究所樹 林所區高 壓室四樓 會議室	第七次內部 會議	艾爾：郭宗益、吳博安、呂梅毓、葉 朝義、謝佩珊 台北科大：蔡孟伸、陳昭榮、林書賢、 洪佳仁
8	102年03月 14日〈四〉	台北科技 大學自動 化科技研 究所會議 室	第八次內部 會議	艾爾：郭宗益、吳博安、馮輝正、呂 梅毓、葉朝義、唐勝、謝佩珊 台北科大：陳昭榮、蔡孟伸、林書賢 洪佳仁、丁年平
9	102年06月 18日〈一〉	台電綜合 研究所公 館所區 1113會議 室	第九次內部 會議	艾爾：郭宗益、馮輝正、呂梅毓、唐 勝、謝佩珊 台北科大：陳昭榮、周至如、朱政杰、 林書賢、張家豪、張景閔、 丁年平
10	102年09月 18日〈三〉	台北科技 大學電機 系主任會 議室	第十次內部 會議	艾爾：郭宗益、呂梅毓、唐勝 台北科大：陳昭榮、蔡孟伸、周至如

### 附錄三 避雷器水平與垂直置放分析

將避雷器以水平和垂直置放的方式，以及避雷器與熔絲的不同距離，分析比較變壓器油中熔絲電場強度的變化。

#### 1. 避雷器水平置放方式：

當避雷器與熔絲兩者帶電體中心距離為 120mm 時，油中最大電場強度發生於熔絲最外層的玻璃纖維表面，如附圖 1 所示，其電場強度為  $2.028 \times 10^5$  (V/m)。熔絲與接地夾件間的距離較短，受到的影響較大；反之，熔絲與避雷器間的距離較遠，受到的影響較小。隨著避雷器與熔絲距離的縮短電場強度愈大，距離從 120mm 縮短到 90mm 的模擬分析，如附圖 1~附圖 4 所示；當距離縮短到 90mm 時，如附圖 4 所示，避雷器與熔絲表面的電場強度皆增大。

#### 2. 避雷器垂直置放方式：

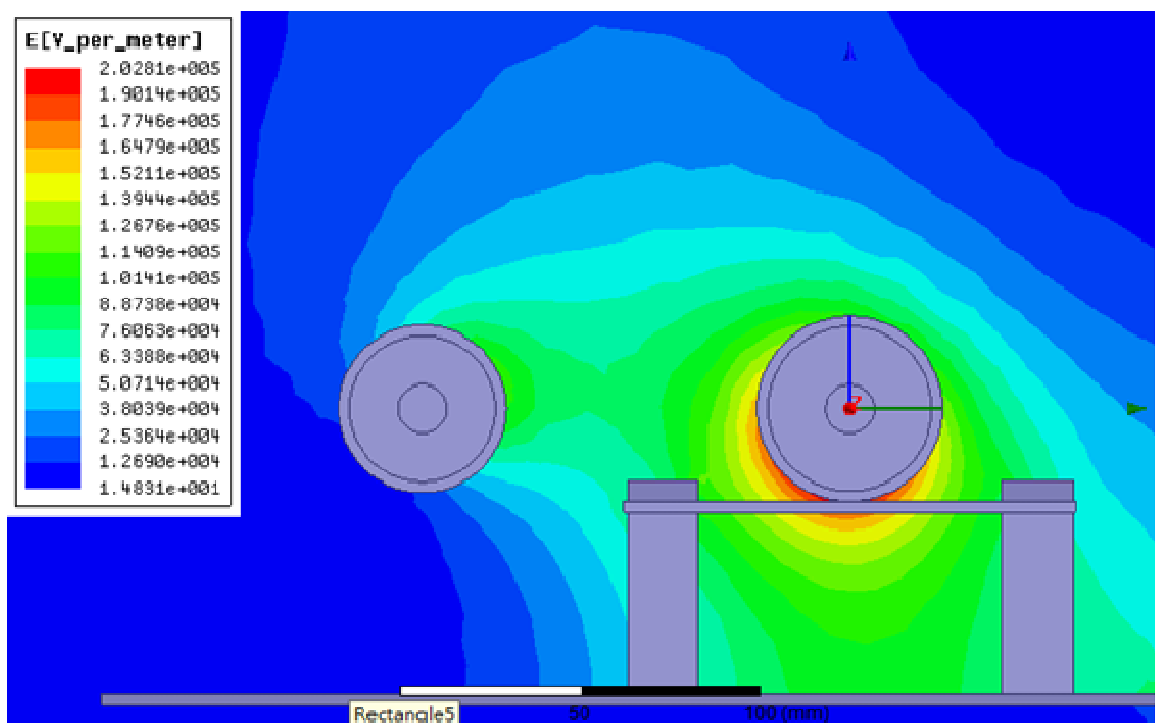
當避雷器與熔絲兩者帶電體中心距離為 120mm 時，油中最大電場強度同樣發生於熔絲最外層的玻璃纖維表面，如附圖 5 所示，其電場強度為  $2.041 \times 10^5$  (V/m)，較避雷器水平置放時大但增加的幅度不大。相同的是隨著避雷器與熔絲距離的縮短電場強度愈大，距離從 120mm 縮短到 90mm 的模擬分析，如附圖 5~附圖 8 所示。

#### 3. 結論

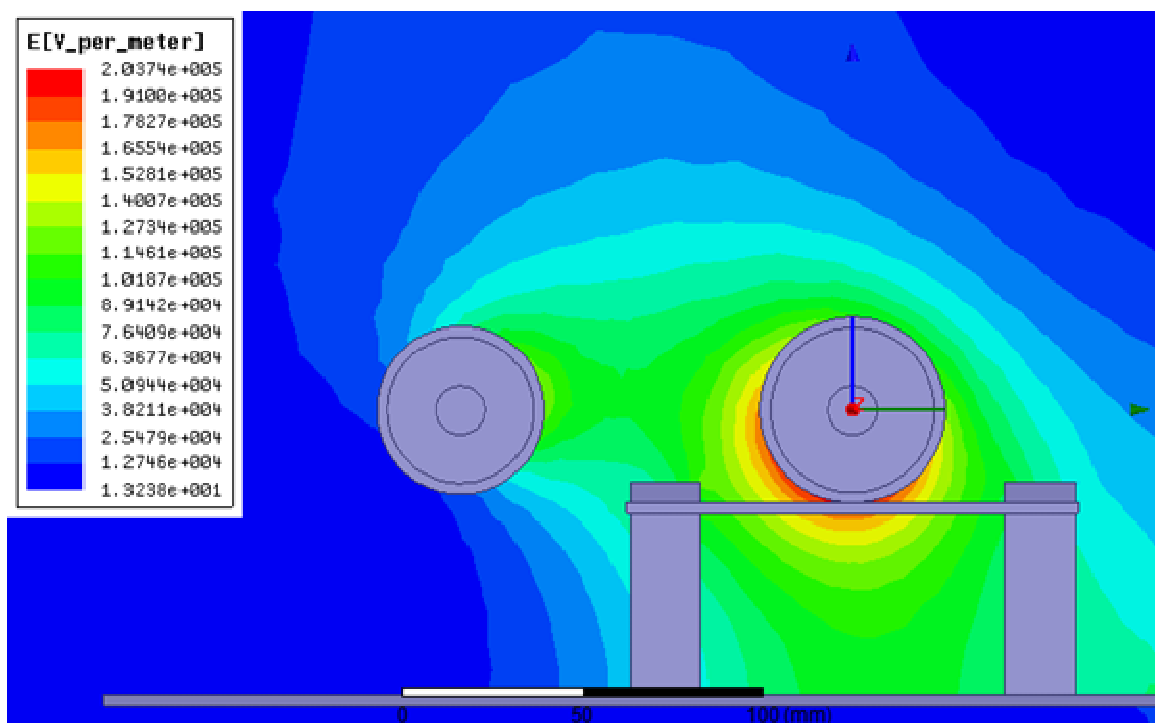
將避雷器水平與垂直兩種置放方式以及與熔絲隨距離改變的電場強度值整理成附表 1，顯示避雷器水平置放時熔絲電場強度值均小於避雷器垂直置放者，建議仍使用避雷器水平置放方式。

附表 1 避雷器水平與垂直置放時油中熔絲電場強度變化

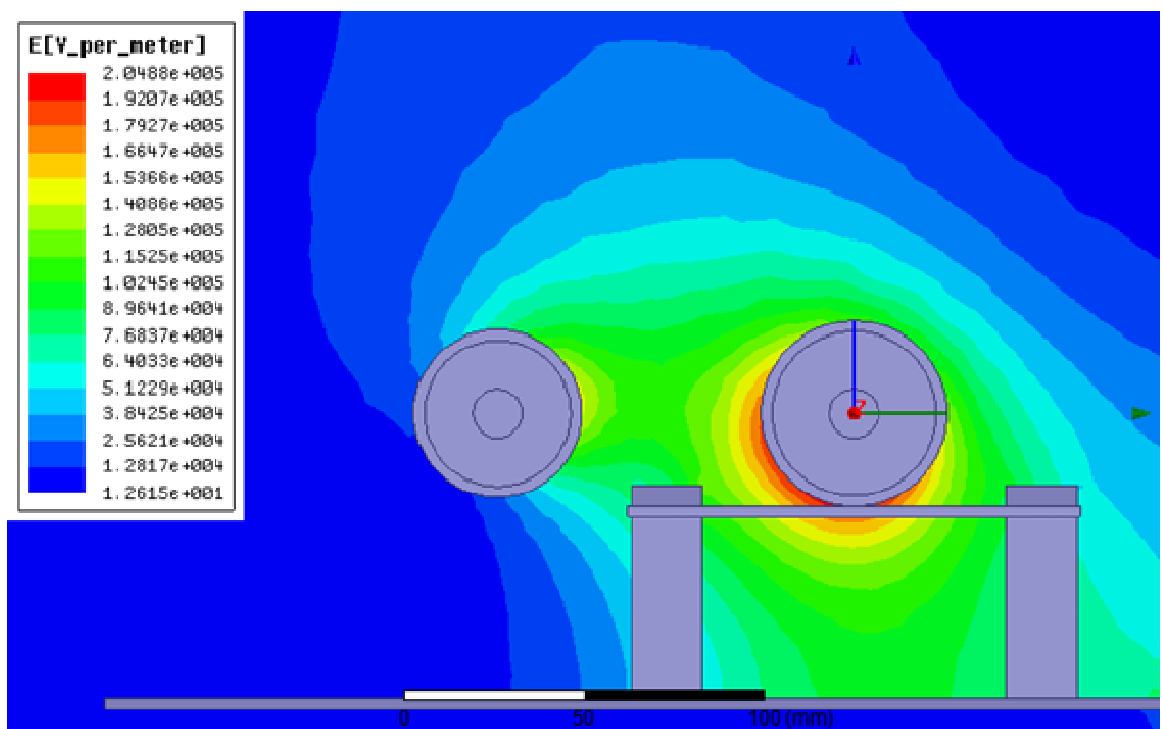
案例	施加電壓(V)	距離(mm)	水平置放電場強度 E(V/m)	垂直置放電場強度 E(V/m)
1	$6.9\sqrt{2}$	120	$2.028 \times 10^5$	$2.041 \times 10^5$
2	$6.9\sqrt{2}$	110	$2.037 \times 10^5$	$2.053 \times 10^5$
3	$6.9\sqrt{2}$	100	$2.049 \times 10^5$	$2.068 \times 10^5$
4	$6.9\sqrt{2}$	90	$2.065 \times 10^5$	$2.114 \times 10^5$



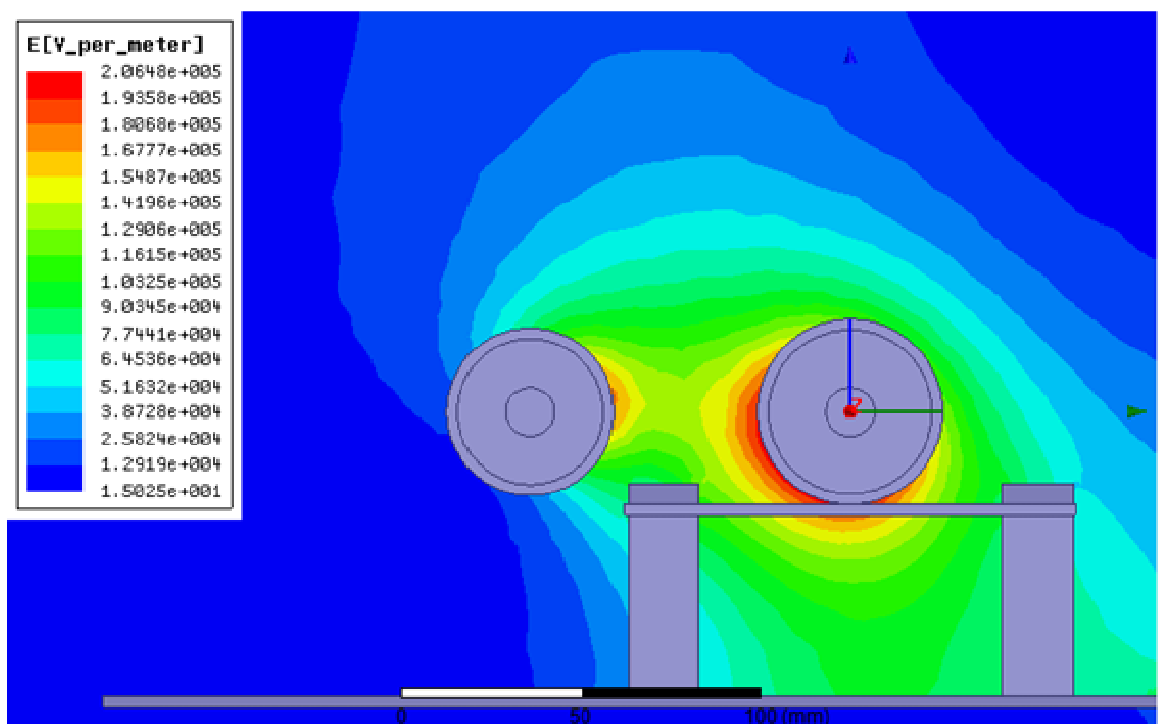
附圖 1 避雷器(水平置放)與熔絲中心距離為 120mm 時之電場強度



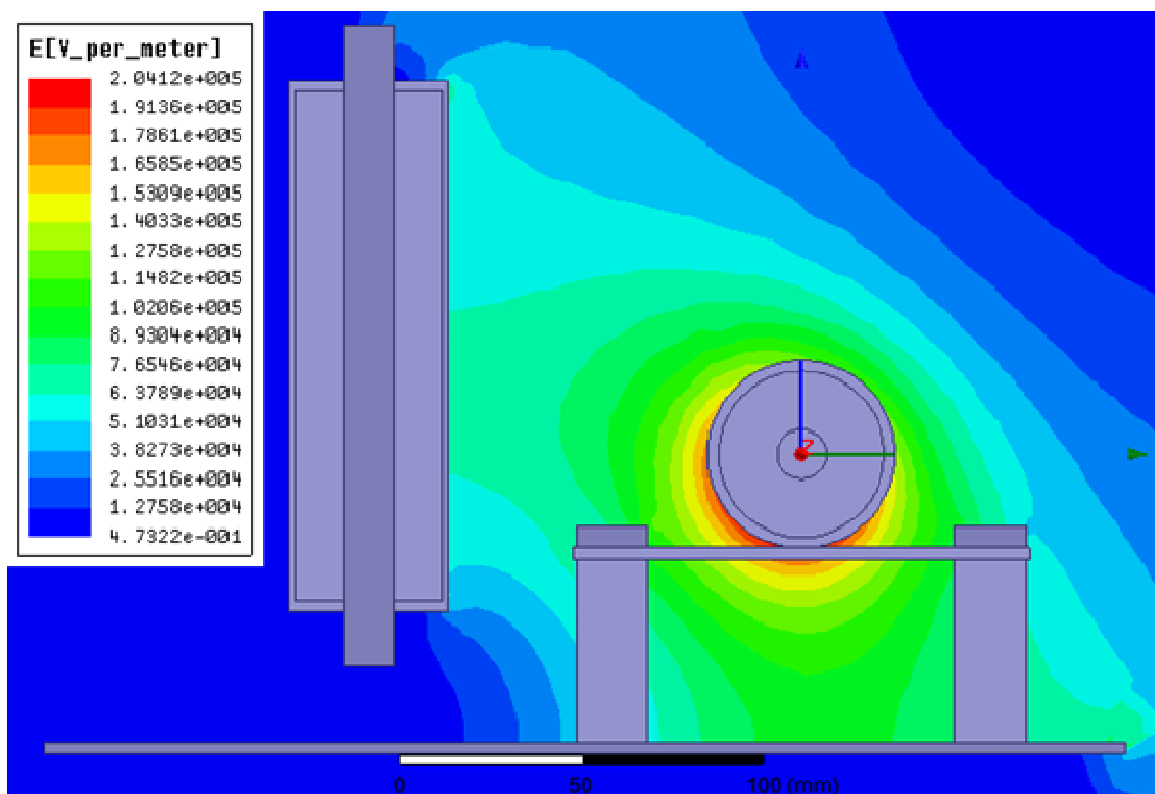
附圖 2 避雷器(水平置放)與熔絲中心距離為 110mm 時之電場強度



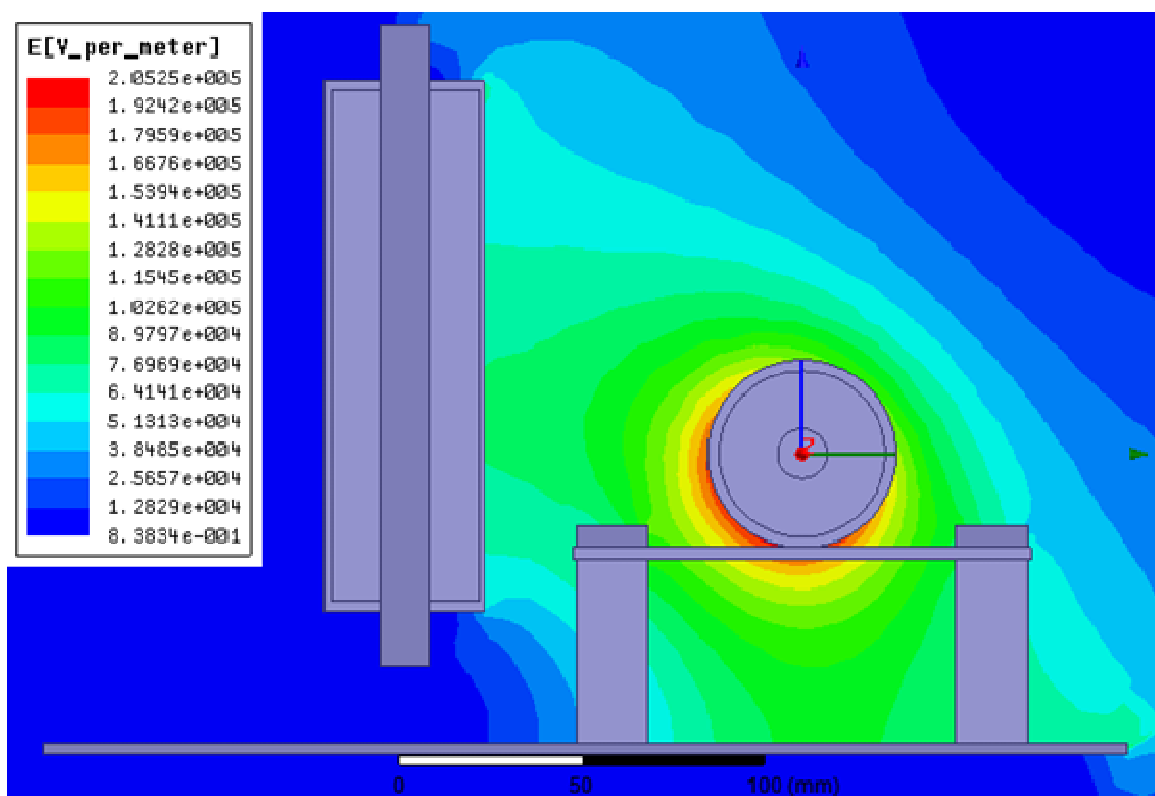
附圖 3 避雷器(水平置放)與熔絲中心距離為 100mm 時之電場強度



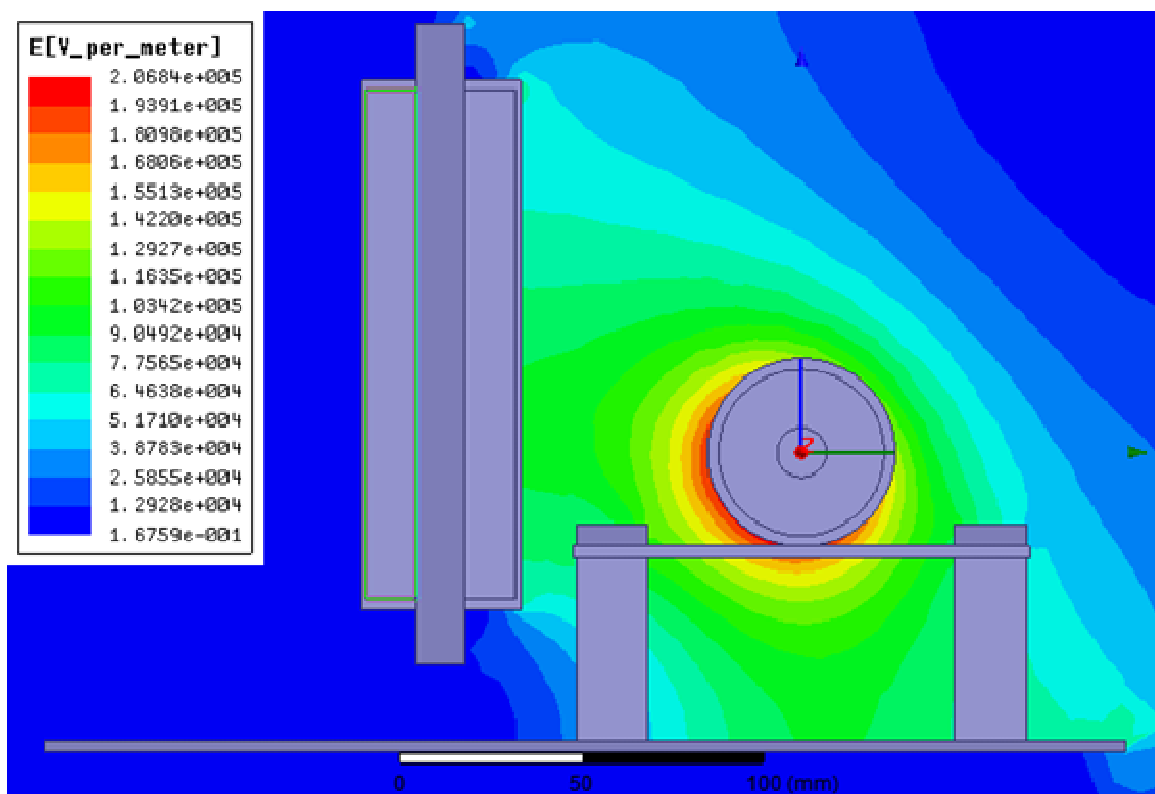
附圖 4 避雷器(水平置放)與熔絲中心距離為 90mm 時之電場強度



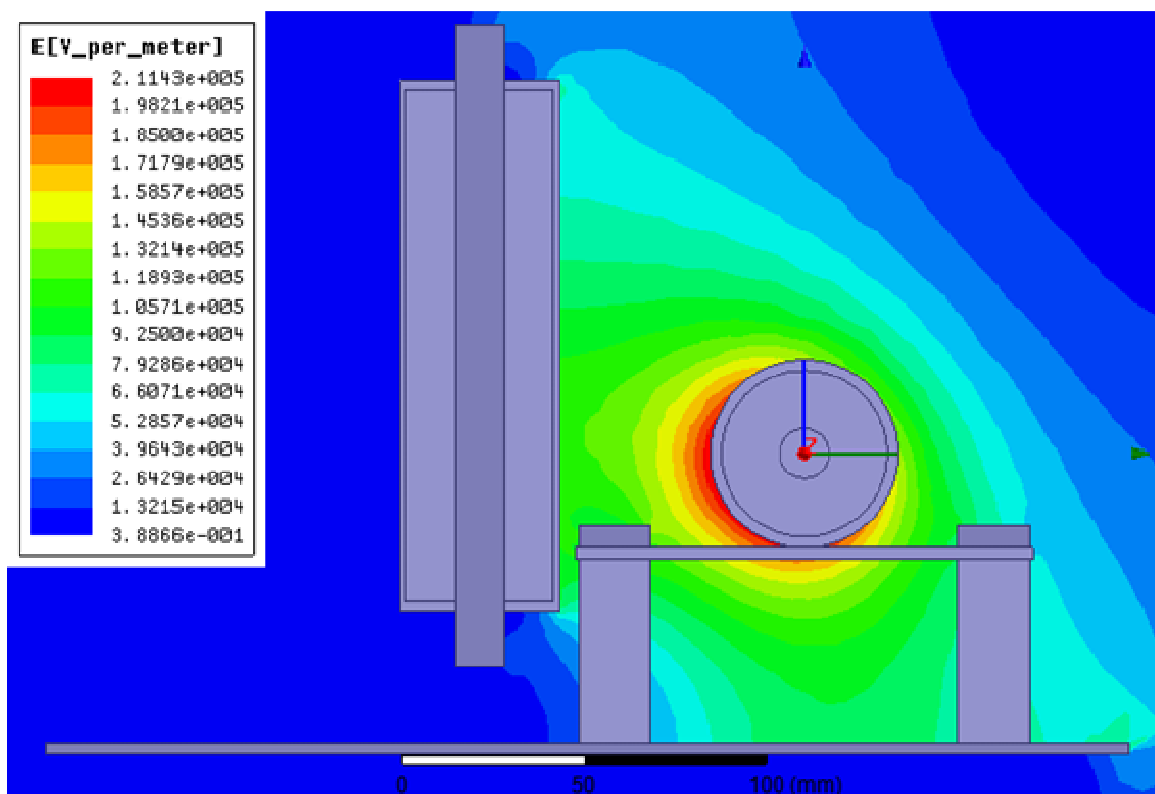
附圖 5 避雷器(垂直置放)與熔絲中心距離為 120mm 時之電場強度



附圖 6 避雷器(垂直置放)與熔絲中心距離為 110mm 時之電場強度



附圖 7 避雷器(垂直置放)與熔絲中心距離為 100mm 時之電場強度



附圖 8 避雷器(垂直置放)與熔絲中心距離為 90mm 時之電場強度

## 附錄四 台電材料標準 A008 (2010-3)

### 「預鑄型高壓電纜接頭及配件」增修條文

項目	原 A008 條文	建議條文
種類	3.1 種類：分為終端接頭、直線接頭、可分離型接頭及遮蔽型避雷器等 4 種。	3.1 種類：分為終端接頭、直線接頭、可分離型接頭、遮蔽型避雷器及負載可切限流熔絲型肘型端頭等 5 種。
型式	(無)	3.2.4 負載可切限流熔絲型肘型端頭 (The Fused Loadbreak Elbow Connector) 之型式及示意圖如表 4。 表 4 負載可切限流熔絲型肘型端頭型式及示意圖(以廠家設計圖面為準)
材料	4.1.1 各型式終端接頭、直線接頭、可分離型接頭及遮蔽型避雷器等器材…	4.1.1 各型式終端接頭、直線接頭、可分離型接頭、遮蔽型避雷器及負載可切限流熔絲型肘型端頭等器材…
構造	4.2.2 直線接頭、可分離型接頭及肘型端頭避雷器等之模鑄體外部，除接頭及配件之開口端、接合隱蔽部分以外，均應為全遮蔽設計(Deadfront)，且須有適當可供接地之裝置(接地眼)。	4.2.2 直線接頭、可分離型接頭、肘型端頭避雷器及負載可切限流熔絲型肘型端頭等之模鑄體外部，除接頭及配件之開口端、接合隱蔽部分以外，均應為全遮蔽設計(Deadfront)，且須有適當可供接地之裝置(接地眼)。
可分離型接頭	4.2.6.2.1 200A 負載可切肘型端頭	4.2.6.2.1 200A 負載可切肘型端頭及負載可切限流熔絲型肘型端頭
可分離型接頭	4.2.6.2.1.5 每組 200A 負載可切肘型端頭至少須包含表 8 之組配件。	4.2.6.2.1.5 每組 200A 負載可切肘型端頭至少須包含表 8 之組配件，每組 200A 負載可切限流熔絲肘型端頭至少須包含表 8-1 之組配件。
定型試驗	5.2.1(3)(b) 200A 負載可切肘型端頭。	5.2.1(3)(b) 200A 負載可切肘型端頭及負載可切限流熔絲型肘型端頭。
定型試驗	5.2.2 定型試驗樣品隨機取樣數量及施行程序，終端接頭按 IEEE Std 48 規定辦理，直線接頭類按 IEEE Std 404 規定辦理，可分離型接頭類按 IEEE Std 386 規定辦理，遮蔽型避雷器按 IEEE Std 386 及按 IEEE Std C62.11 規定辦理。	5.2.2 定型試驗樣品隨機取樣數量及施行程序，終端接頭按 IEEE Std 48 規定辦理，直線接頭類按 IEEE Std 404 規定辦理，可分離型接頭類按 IEEE Std 386 規定辦理，限流熔絲型肘型端頭內含之熔絲需為非驅狐型之全域型限流熔絲並符合 ANSI C37.41 Table 4 之標準、遮蔽型避雷器按 IEEE Std 386 及按 IEEE Std C62.11 規定辦理。
定型試驗	5.2.3(3)可分離型接頭：	5.2.3(3)可分離型接頭及限流熔絲型肘型端頭(不含限流熔絲及熔絲筒)：
試驗	5.5.1 (1) 終端接頭、直線接頭及可分離型接頭	5.5.1 (1) 終端接頭、直線接頭、可分離型接頭及限流熔絲型肘型端頭(不含限

		流熔絲及熔絲筒)
試驗	5.5.4 (3)可分離型接頭	5.5.4 (3)可分離型接頭及限流熔絲型肘型端頭(不含限流熔絲及熔絲筒)
試驗	5.5.5 (3)可分離型接頭	5.5.5 (3)可分離型接頭及限流熔絲型肘型端頭(不含限流熔絲及熔絲筒)
驗收 試驗	2.4(4)肘型端頭：電纜拉出試驗、1 分鐘乾式交流耐壓試驗、衝擊電壓試驗、電暈試驗、測試點電壓試驗。	2.4(4)肘型端頭及限流熔絲型肘型端頭(不含限流熔絲及熔絲筒)：電纜拉出試驗、1 分鐘乾式交流耐壓試驗、衝擊電壓試驗、電暈試驗、測試點電壓試驗。

表 4 負載可切限流熔絲型肘型端頭型式及示意圖(以廠家設計圖面為準)


型式	責務電壓(Duty Voltage)	15kV & 25kV
限流熔絲型肘型端頭 (Fused Elbow)		

表 8-1 200A 負載可切限流熔絲肘型端頭之組配件

配 件	數量	單位
(1) 肘型端頭	1	只
(2) 消弧插入棒	1	支
(3) 扳手	1	支
(4) 壓接端子(附螺牙)	1	只
(5) #15 AWG 鍍錫軟銅線 1.2 公尺以上	1	條
(6) 潤滑膏	1	包
(7) 無塵紙	1	張
(8) 測試點封蓋	1	只
(9) 中文施工說明書及量測紙尺(含消弧插入棒定位標尺)	1	份
(10) 15kV or 25kV 級限流熔絲	1	只
(11) 全絕緣限流熔絲筒	1	只
(12) 電壓測試點安裝型帶電指示器	2	只