

出國報告（出國類別：實習）

# 深入瞭解氣體絕緣開關及相關故障檢測及運用

服務機關：台灣電力公司輸變電工程處

姓名職稱：陳偉捷 電機工程師

派赴國家：德國 瑞士

出國期間：105 年 6 月 8 日至 105 年 6 月 16 日

報告日期：105 年 8 月 9 日

# 摘要

氣體絕緣開關設備(GIS)之特點係以金屬外殼內包封導體及各開關設備及利用絕緣性能良好之氣體 SF<sub>6</sub> 當絕緣與消弧介質，因此可大幅減少設備體積及提昇可靠度。由於 GIS 設備發展之技術已逐漸成熟且有穩定運轉之實績，現階段發展趨勢朝向應用於設備之故障監測裝置，相關裝置如局部放電與內部閃絡監測含故障位置定位及斷路器自我診斷，這些裝置其目的為當因設備老化、劣化或異物等因素所引起之故障時，減少故障發生之影響範圍，隨之可衍生以條件式檢修(CBM)方式使維護工作更具合理。

本文共分四個章節，第一、二章說明出國目的及行程，第三章說明國外開關設備廠商實習故障檢測發展、運用技術及相互交流開關設備之知識，第四章為出國實習計劃心得分享與建議事項。

關鍵詞：

氣體絕緣開關設備(Gas Insulated Switchgear，GIS)

局部放電(Partial Discharge，PD)

六氟化硫(Sulfur hexafluoride，SF<sub>6</sub>)

條件式維護(Condition Based Maintenance，CBM)

# 目錄

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 實習目的.....           | 1  |
| 第 2 章 實習行程.....           | 2  |
| 第 3 章 實習心得.....           | 3  |
| 第 1 節 氣體絕緣開關設備故障監測裝置..... | 3  |
| 第 2 節 HVDC 介紹.....        | 10 |
| 第 3 節 GIS 熱效應.....        | 13 |
| 第 4 章 心得與建議.....          | 15 |

## 圖目錄

|   |    |
|---|----|
| 圖 2-1 參訪照片 .....                        | 2  |
| 圖 3-1 可能造成 GIS 局放之缺陷示意圖 .....           | 4  |
| 圖 3-2 IEC 測試迴路示意圖(出處 IEC 標準) .....      | 5  |
| 圖 3-3 GIS 聲波 PD 示意圖 .....               | 5  |
| 圖 3-4 比較各局放檢測技術信噪比(出處 CIGRE) .....      | 6  |
| 圖 3-5 UHF 偵測示意圖(SIEMENS 提供) .....       | 7  |
| 圖 3-6 UHF 感測器置入於設備示意圖(SIEMENS 提供) ..... | 8  |
| 圖 3-7 極高頻飛時距離原理示意圖(出處 IEC 標準) .....     | 9  |
| 圖 3-8 UHF 整體架構示意圖(ABB 提供) .....         | 9  |
| 圖 3-9 HVDC 架構圖(ABB 提供) .....            | 10 |
| 圖 3-10 HVDC 與 HVAC 成本比較(ABB 提供) .....   | 11 |
| 圖 3-11 交直流波形 .....                      | 12 |
| 圖 3-12 GIS 可連續載流與室溫關係 .....             | 14 |

## 表目錄

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 表 2-1 實習行程.....         | 2  |
| 表 3-1 各類局部放電偵測方法.....   | 6  |
| 表 3-2 銅導體各接點形式之溫昇值..... | 13 |

## 第1章 實習目的

斷路器之種類可依所用之消弧介質種類來區名，例如以油(OCB)、空氣(ACB)、SF<sub>6</sub>(GCB)為介質及近年常來用於中低壓開關上以真空為介質之 VCB，本公司現行國產化開關設備除少數 23kV 等級斷路器之消弧採用真空技術外，其餘均使用 SF<sub>6</sub> 為絕緣及消弧介質，因 SF<sub>6</sub> 氣體在相同壓力下相較於其它絕緣介質有更佳絕緣能力，利用此特點可大幅減少開關設備之體積，惟因所有設備如 CB、DS、ES、CT 及 PT 等包封於金屬外殼內不易由外部檢視設備運轉及故障發生之情形。

由於氣體開關設備設計之特性均仰賴 SF<sub>6</sub> 良好之介電強度，運轉時具備足夠氣體壓力(密度)為最重要及基本之要數，因此在本公司各電壓等級氣體開關設備均裝設有監測 SF<sub>6</sub> 氣體壓力(密度)之裝置，當壓力不足時會產生警報並閉鎖設備開關動作，但足夠的 SF<sub>6</sub> 壓力卻無法保證不會發生因設備老化、劣化或異物等因素所引起之內部閃絡與局部放電等故障。若能增加故障監測裝置可事先達到故障預警效果，減少設備故障影響之範圍，對設備及電網之可靠及穩定度應能有效提昇。

本次出國實習至 ABB 瑞士分公司及 SIEMENS 德國分公司，實習開關設備故障檢測裝置之發展並蒐集相關技術資料，另行彙整近期有關開關設備之議題，順道於實習期間與國外廠商相互交流，其內容包含開關設備短時間過載之計算與應用於高壓直流傳輸(HVDC)之開關設備介紹等。

## 第2章 實習行程

本次出國行程及實習內容如表 2-1 所示：

表 2-1 實習行程

| 題目：深入瞭解氣體絕緣開關廠家及相關故障測及運用 |            |         |
|--------------------------|------------|---------|
| 日期                       | 行程         | 地點      |
| 105 年 6 月 8 日            | 往程         | 台北－法蘭克福 |
| 105 年 6 月 9 日~11 日       | SIEMENS 公司 | 柏林      |
| 105 年 6 月 12 日           | 移動日        | 柏林－蘇黎世  |
| 105 年 6 月 13 日~15 日      | ABB 公司     | 蘇黎世     |
| 105 年 6 月 16 日           | 返程         | 法蘭克福－台北 |



圖 2-1 參訪照片

## 第3章 實習心得

本章簡介實習題目及與廠商相互交流之心得，內容包括氣體絕緣開關之故障監測、設備短時間超載之計算及高壓直流傳輸之開關設備等。

### 第1節 氣體絕緣開關設備故障監測裝置

氣體壓力(密度)、局部放電(Partial Discharge, PD)及斷路器動作係常用於氣體絕緣開關設備(Gas Insulated Switchgear, GIS)之檢測目標，現行公司各電壓等級之開關設備在各氣室均裝設壓力(密度)錶及斷路器操作計數器；另 23kV 等級設備以智慧電子裝置(IED)功能來監控斷路器控制迴路，然而局部放電(以下簡稱局放)檢測裝置，目前尚無全面推廣用於開關設備上。經研究證實局放偵測，為最有效的指標來診斷 GIS 絕緣狀態，通常 GIS 內產生局放現象，亦可能代表設備絕緣已產生破壞，若能安裝可用於線上設備之局放檢測裝置，能即時將所偵測到局放訊號，作為預警及評估設備絕緣狀態，應能有效地避免因絕緣問題所造成開關設備故障。

局部放電係指發生在電極之間但並未貫穿電極的放電，它是因設備絕緣內部存在瑕疵或生產中造成之缺陷，在高電場強度作用下會產生局放之重複擊穿和熄滅的現象。在電機馬達發生低能量局放可被視為正常，然而原則上 GIS 是不被允許局放產生，因此當局放現象發生時，可視為設備內絕緣已產生破壞。經彙整可能造成 GIS 發生局放現象之因素可分為三大類，其示意圖如圖 3-1 所示：

#### 1. 金屬微粒：

這是在 GIS 最常見之缺陷，通常在設備組裝過程，無良好環境落塵保護及控管，易使環境中粒子進入金屬外殼內，另開關之可動接觸子與固定接觸子若有機械上偏差情況，在開關啟閉時也有可能產生金屬粒子。因金屬粒子所引起局放在初期能量非常小且不易被偵測。



## 2. 浮動元件：

當導體之連結件(螺絲或鞘)有鬆脫情況，所造成之浮動電壓亦可能使局放產生，這類型局放在初期放電能量非常小且會間歇地發生。

## 3. 間隔器缺陷：

通常製造過程及後續品管控管所造成的瑕疵，常見為礙子及間隔器內空隙(Void)。以現今間隔器之設計與製造技術已經鮮少發生這類缺陷，然而設備運轉與開關操作所衍生不正常之外部應力及熱應力，也可能造成間隔器破壞。

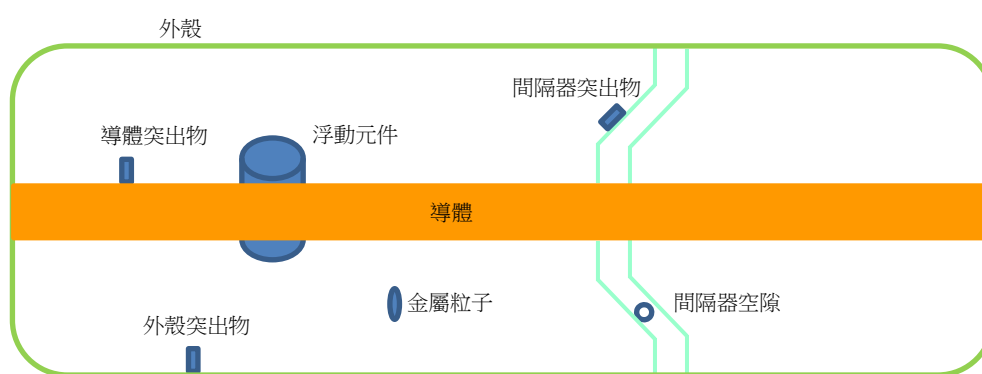


圖 3-1 可能造成 GIS 局放之缺陷示意圖

研究局放已被視為可評估高壓設備之絕緣狀態最有效指標，近年來依局放所衍生之物理、電氣及化學現象，例如聲光電及游離氣體等，發展出各類型局放檢測技術，以特定感測器來擷取局放訊號，各技術主要開發目標係朝可線上監測、較佳偵測靈敏度及後端訊號處理及專家系統解析為主，藉由即時得知局放發生及造成故障之原因及位置，減少設備故障所影響範圍及俾利維護單位安排後續檢修工作。

局放偵測技術可被歸納為傳統及非傳統兩類，傳統偵測技術亦為現行各電壓等級開關設備定型及例行試驗所採用方式，其原理係以加壓方式來量測設備放電強度，測試迴路(圖 3-2 所示)與試驗步驟及校正方式係依 IEC 60270 標準來執行，且以放電強度 $\leq 5\text{pC}$ 為合格基準。雖使用傳統技術可輕易地量測設備局放所產生能量，惟缺點為量測所使用頻率( $\leq 1\text{MHz}$ )易受環境背景雜訊干擾，因此試驗時為了得到最佳偵測靈敏度，須對試驗周圍環境進行遮蔽，導致花費較久試驗時間，且一般電力設備內不會放置試驗所需耦合電容，另該技術無法對局放位置定位，故不適用於線上監測。

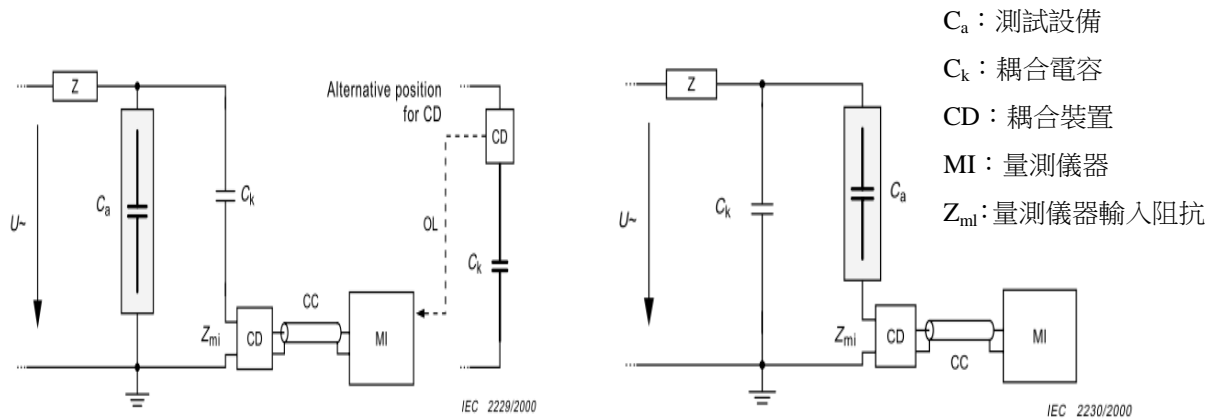


圖 3-2 IEC 測試迴路示意圖(出處 IEC 標準)

非傳統局放偵測技術發展，主要特點係可有效地抑制環境雜訊及有良好信噪比 (Signal-to-Noise Ratio)，以突破過去傳統局放量測技術之限制，其中以可用於線上連續監測之聲波(Acoustic)及極高頻(Ultra High Frequency, UHF)技術被廣為應用。

聲波局放檢測原理是基於局放發生時，在設備內產生聲波源，這些聲波可經由設備的內部結構傳播到達外殼表面，再將感測器(加速計，電容式麥克風或光聲感測器)置放於設備外殼上，將所偵測到聲波轉換成電器訊號，其偵測示意圖如圖 3-3 所示。由於聲波訊號之衰減強度會隨著不同傳播路徑、介質、反射、折射等因素而改變，因此在使用上為得到較佳訊號靈敏度，需安裝多個感測器來進行量測。

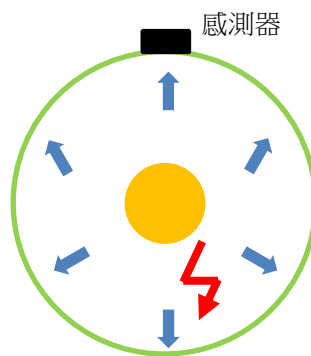


圖 3-3 GIS 聲波 PD 示意圖

各類型之局放檢測技術特性整理如表 3-1 所示：

表 3-1 各類局部放電偵測方法

| 檢測原理     | 監測裝置  | 線上連續偵測 | 相關標準      | 感測器位置 |
|----------|-------|--------|-----------|-------|
| 加壓測試     | 耦合電容  | /      | IEC 60270 | 外部    |
| 氣體分析     | 化學儀器  |        | 無         |       |
| 壓力       | 聲波偵測器 | V      | IEC 62478 | 內或外部  |
| 極高頻(UHF) | 天線    |        | (草稿中)     |       |

過去國際大電力會議(CIGRE)工作小組(15-03)，曾就傳統式及非傳統局放檢測技術進行比較，其方式是以可造成局放之人造缺陷於 420kV GIS 設備上進行試驗，試驗結果得到各局放檢測技術之信噪比如圖 3-4 所示。

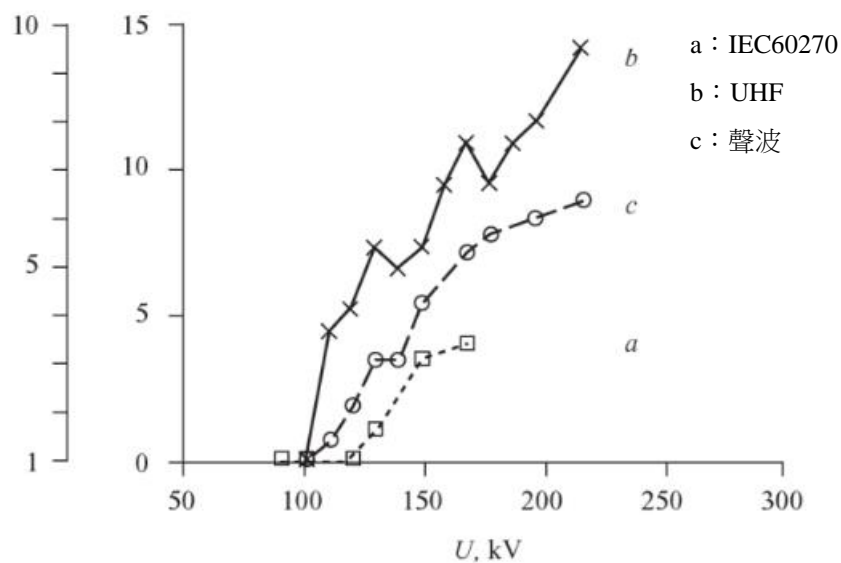


圖 3-4 比較各局放檢測技術信噪比(出處 CIGRE)

從 CIGRE 試驗結果及所得結論，可知極高頻檢測技術在偵測局放時，所表現之性能最為均衡，另也是唯一較適合用於線上檢測技術，因此目前被各 GIS 設備廠商所採納及使用，以下內容將針對極高頻技術進行簡介。

以極高頻技術檢測 GIS 設備局放，其動作原理可分為三個過程，如下所述及圖 3-5 所示：

- 激磁(Excitation)

局放所產生放電電流有上昇時間極短( $\approx 1\text{ns}$ )之特性，並與設備可激磁出 $\geq 2000\text{MHz}$ 之電磁波訊號，通常放電電流之波形會影響極高頻訊號之特性。

- 傳播 (Propagation)

雖然放電電流所產生時間極短，但因 GIS 內銅導體之架構為同軸配置，可將所產生之電磁訊號維持至微秒(Microsecond)時間，另同軸架構對電磁訊號有低損失之特點，一般電磁訊號在 GIS 內播傳如不考慮間隔器之影響，其訊號衰減強度大約  $3\sim 5\text{dB/km}$ 。

- 擷取(Extraction)

將頻寬位於  $300\text{MHz}\sim 3\text{GHz}$  之感測器(天線)放置於設備上，以擷取電磁波訊號，同時將電磁訊號放大並輸出為電壓訊號，且用來當做局放發生之指標。

簡言之，極高頻檢測之動作原理類似收音機天線，利用調整特定頻率，使天線可接收廣播電台訊號。

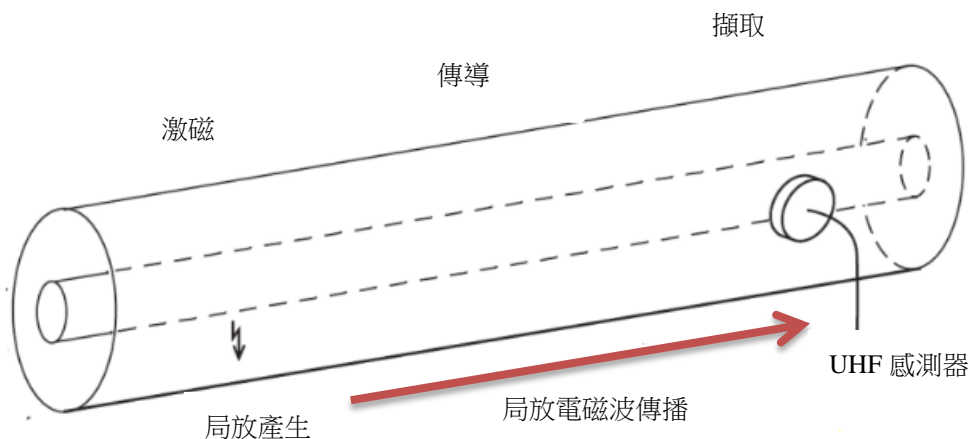


圖 3-5 UHF 偵測示意圖(SIEMENS 提供)

利用極高頻局放檢測技術，可將感測器置於 GIS 金屬外殼內或外部，外置式感測通常用於手提式檢測器或既有設備需安裝局放檢測時用，可將感測器安裝於設備外殼之檢視窗上，但相較於內置式所偵測訊號有較低靈敏度，因此一般新採購設備主要以內置式感測器為較合適方案，惟在設計內置式感測器外觀時須注意不可影響設備絕緣能力，其中以圓盤形狀(Circular Plate)之感測器因不會產生電場之電應力集中現象，已被證實為在偵測靈敏度及不影響設備絕緣系統兩者間取得最佳平衡之形狀，圓盤形狀感測器及安裝圖如圖 3-6 所示。

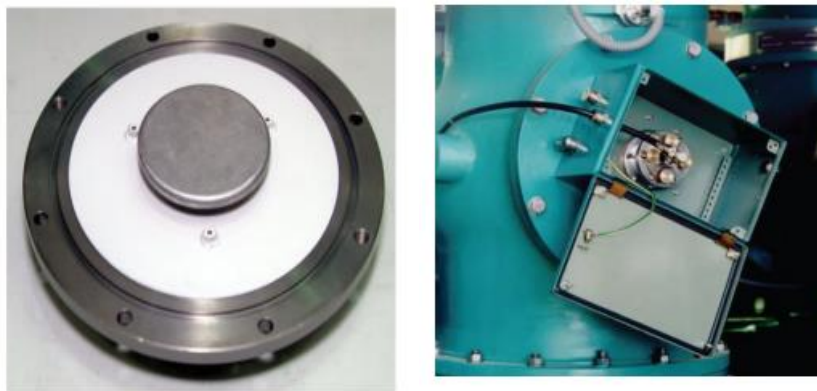


圖 3-6 UHF 感測器置入於設備示意圖(SIEMENS 提供)

目前有關極高頻技術國際標準，以 IEC 62478 為主，惟該標準目前仍在草稿階段尚未正式發佈，對於極高頻感測器之靈敏度定義，在 IEC 標準係以輸出訊號(V)除以局放所產生電場強度(V/mm)之比值，單位以有效高度(mm)來表示。

另有別於傳統局放檢測技術(IEC 60270)，係以量測放電能量 5pC 為基準，來判定量測設備內是否有局放產生，且在 IEC 標準內有製定相關校正迴路，然而對於極高頻檢測技術，如何確認感測器能有效地偵測局放發生(放電能量 > 5pC 以上)，目前在 IEC 62478 有相關驗證步驟說明，其可分為工廠驗證及現場驗證，這部份在未來如需採購這類設備，應請廠商依標準提供試驗報告，以確認感測器靈敏度。

局放之檢測技術發展迄今，已具備局放發生位置定位功能，原理係依據飛時距離原理(Time of Flight)，如圖 3-7 所示，以下列計算式利用軟體計算，即可得知局放發

生之位置。

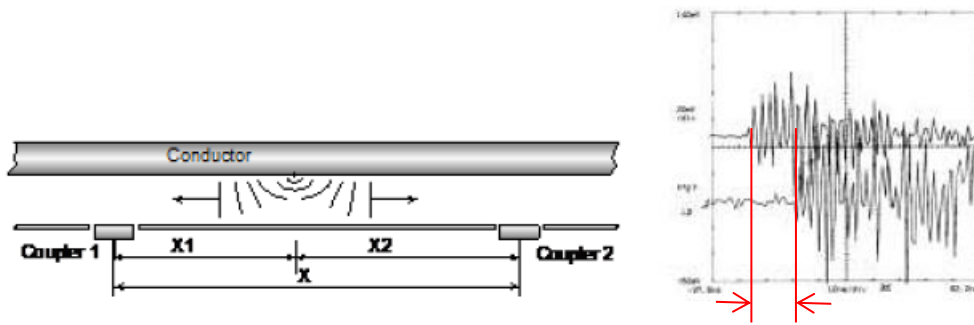


圖 3-7 極高頻飛時距離原理示意圖(出處 IEC 標準)

$$X_1 = \frac{X - (X_2 - X_1)}{2} = \frac{X - V_c \Delta t}{2}$$

$X_1$  : 感測器 1 與 2 偵測到局放訊號之時間差值

$V_c$  : 訊號傳播速度 30cm/ns

極高頻局放檢測技術，已突破過去傳統 IEC 60270 方式不適用於線上監測之限制，現今已有許多廠商投入開發，且多數電力設備廠商也將此技術應用於設備上，未來如 GIS 設備安裝極高頻局放檢測裝置，事先需依設備架構及最有可能生局發放之位置，評估感測器之數量及位置，以促使感測器靈敏度到達最佳化，如圖 3-8 所示。

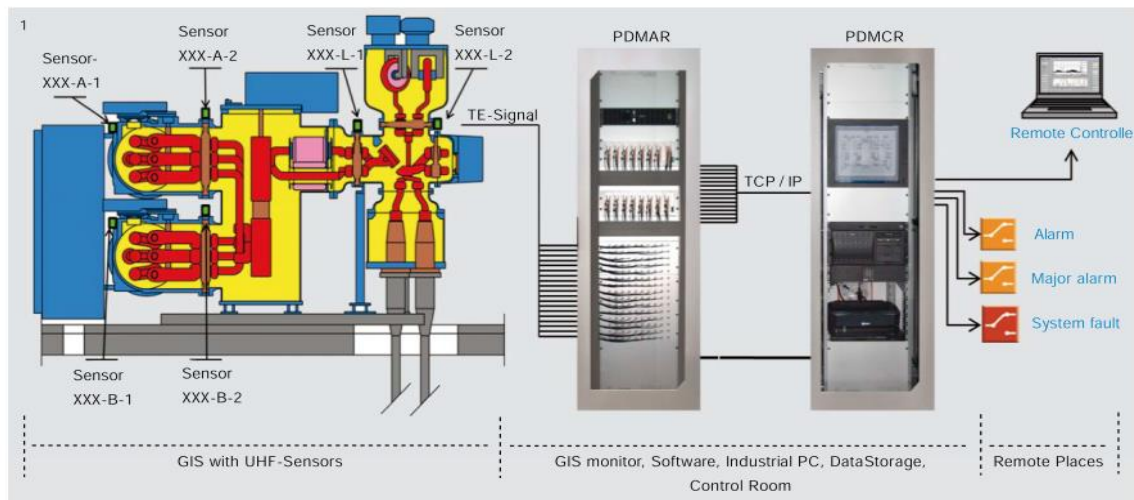


圖 3-8 UHF 整體架構示意圖(ABB 提供)

## 第2節 HVDC 介紹

過去直流輸電受限於昇壓技術，以致不適用於遠距離電力傳輸，然而隨電力電子技術之發展，已克服過去之限制，且經研究發現，在長距離輸電過程中，使用直流電技術損耗低於傳統交流輸電技術，同時直流傳輸需要的傳輸電纜更少，亦可能減少線路設備所需土地面積。

第一套 HVDC(High Voltage Direct Current, HVDC)系統係由瑞典 ASEA 公司(目前隸屬 ABB 集團)所開發，近年來於國外已有許多使用高壓直流輸電技術來輸送電力之實績。例如中國向家壩水電站(位於四川省與雲南省交界的金沙江下游)至上海輸電迴路，傳輸電壓 800kV、容量 6.4GW、距離 2,071 公里。

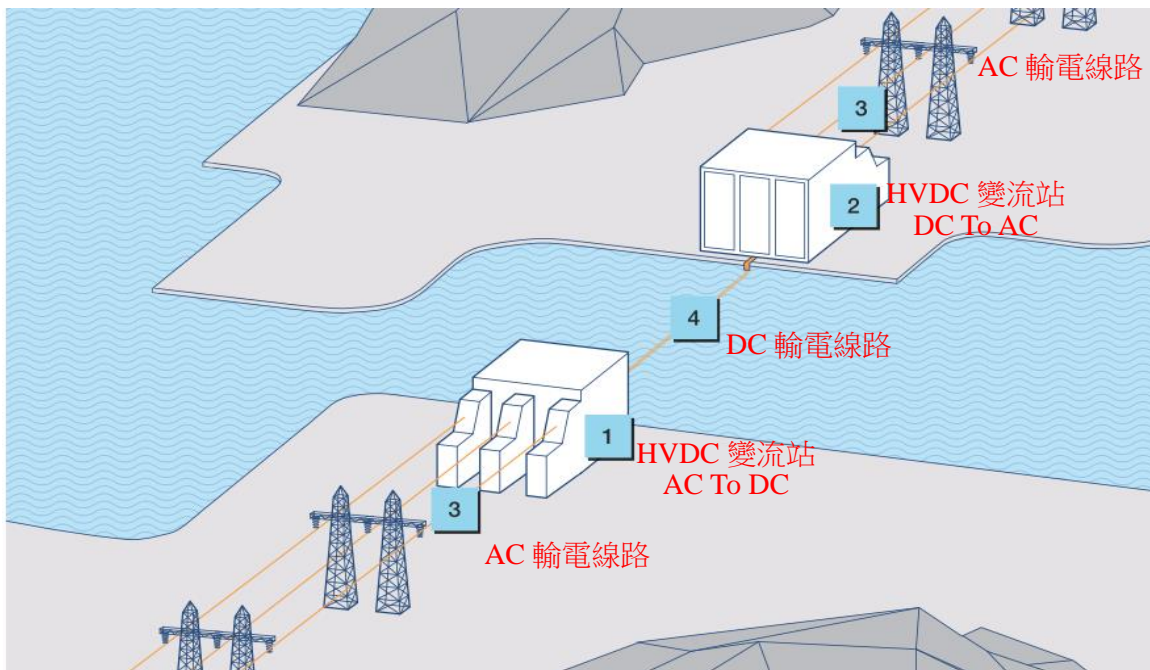


圖 3-9 HVDC 架構圖(ABB 提供)

使用 HVDC 之架構包含三個核心原件，AC To DC、DC To AC 變流站及傳輸線路，輸電示意圖如圖 3-9 所示。因直流電與交流電之電氣特性不相同，因此在長距離輸電情形，使用 HVDC 技術相較於高壓交流傳輸(HVAC)有其優勢如下：

- 一 電網互聯衝擊：因直流電並無交流電有頻率、相角等之特性，在相異電網互聯運轉時，無須進行同步動作，可有效地互聯各電網及降低互聯時對輸電兩端所造成之衝擊。

- 二 經濟效益：雖使用 HVDC 初期須建置變流站，所花費設備成本較高，然而當輸電距離架空線大於 600 公里及海底電纜大於 50 公里時，相較於交流輸電，因所用之線路數量少( $2 < 3$ )、線路損失較低( $5\% < 7\%$ )及後續維護成本較低等因素，使用 HVDC 總體經濟效益會優於 HVAC 技術。在不同傳輸距離下兩種傳輸方式之成本比較如圖 3-10 所示。
- 三 傳輸容量：HVDC 並不會如交流電傳輸會產生無效電力潮流且線路損失較低，因此 HVDC 可傳輸容量會大於 HVAC。

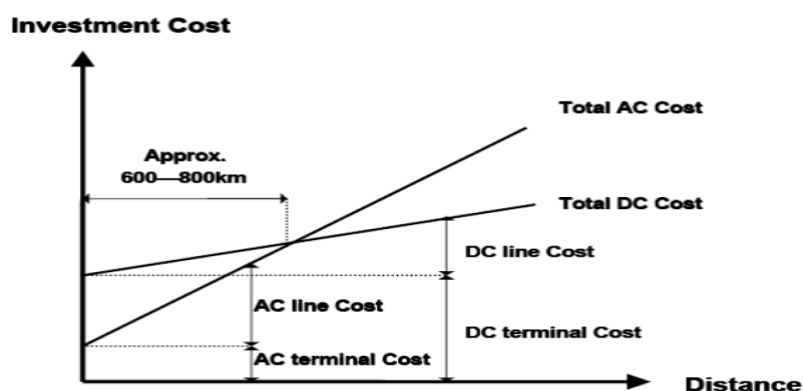


圖 3-10 HVDC 與 HVAC 成本比較(ABB 提供)

綜上，雖然 HVDC 相較於 HVAC 有著更好的傳輸容量、成本較低之優勢，那麼是否有專用於 HVDC 之開關設備？經詢問廠商後得知以現階段開關發展技術，尚無開發出專用於此高壓直流之開關設備，其主要原因可由交直流電之不同電氣特性可知，因直流電流(壓)之波形無類似交流電有隨時間改變之弦波，兩者差異點如圖 3-11 所示，即意味著在交流斷路器執行啟斷電流時之關鍵，電流零點時刻在直流電路無法預期可見，因此斷路器無法有效地啟斷大能量之直流電。

因此若直流傳輸線路發生事故，故障排除之重責，就必須仰賴交流端之開關設備來排除。所以可從現有 HVDC 應用實績可發現一共通點，因無直流專用開關設備，故其應用被侷限於點對點線路之傳輸，無法像 HVAC 可多點傳輸。



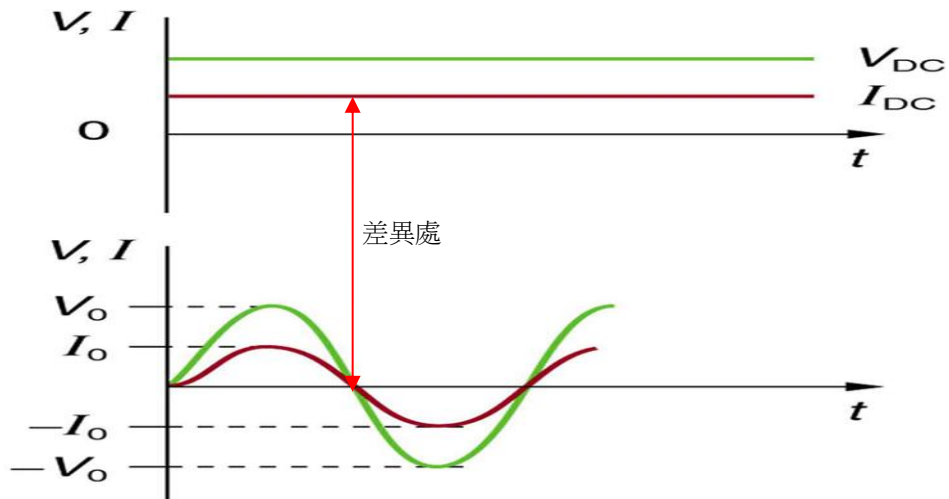


圖 3-11 交直流波形

對於 HVDC 之技術應用於國內電網之案例，過去於台澎海纜建造工程，曾考慮採用高壓直流輸電系統，但因該海纜距離不長及傳輸容量不高，經評估後，其經濟效益不大，故仍採用傳統 161kV 交流傳輸。然而由於國內電網形態係屬孤島型系統，在面臨核電發展不如預期、發電燃料價格及供應不確定性及再生能源發電有不穩定等因素下，未來是否缺電仍屬未知數，屆時若需發展跨國電力傳輸以克服電力短缺問題時，應可將高壓直流輸電之技術納入評估。

### 第3節 GIS 熱效應

GIS 額定電流之定義，於 IEEE 及 IEC 標準係指在室溫最高 40°C 及日均溫不超過 35°C 之環境條件下，設備承載額定電流時，內部各零件之溫昇不超過規範所制定限制值；以 SF<sub>6</sub> 絕緣設備之銅導體，接點各型式塗層之溫昇與總溫度(室溫+溫昇)限制如表 3-2 所示。另國際標準為了統一各製造商對額定電流標示，製定一組 10 個額定電流 (1000、1250、1600、2000、2500、3150、4000、5000、6300 及 8000A)供標示參考。

表 3-2 銅導體各接點形式之溫昇值

| 銅接點之塗層 | 最大值             |       |
|--------|-----------------|-------|
|        | 溫度(°C)室溫 40°C 下 | 溫昇(K) |
| 純銅     | 105             | 65    |
| 鍍銀/鍍鎳  |                 |       |
| 鍍錫     | 90              | 40    |

GIS 設備在正常運轉下，運轉電流不可超過額定電流，以避免設備溫昇超過標準限制，然而在某些運轉情況下，設備可連續運轉電流可超過額定電流；由前述額定電流定義可知，其係以室溫 40°C 為基準，因此當過載運轉時室溫( $\theta_a$ )小於 40°C 時，GIS 可連續運轉電流會大於額定電流，其電流值及過載時設備溫度由下列計算公式可得，其關係圖如圖 3-12 示：

$$I_s = I_r \left[ \frac{\theta_{max} - \theta_a}{\Delta\theta_r} \right]^{1/n} \quad \text{出處 IEC}$$

$$\theta_s = \Delta\theta_r \left( \frac{I_s}{I_r} \right)^n e^{-t/\tau} + \theta_r$$

$\theta_{max}$  : 允許最大溫度值  $\theta_a$  : 環境溫度  $\theta_s$  : 過載時設備溫度

$\Delta\theta_r$  : 額定電流下之溫昇 (由溫昇試驗得知)

$I_r$  : 額定電流  $I_s$  : 過載電流

$n$  : 過載指數(2)  $\tau$  : 熱時間常數

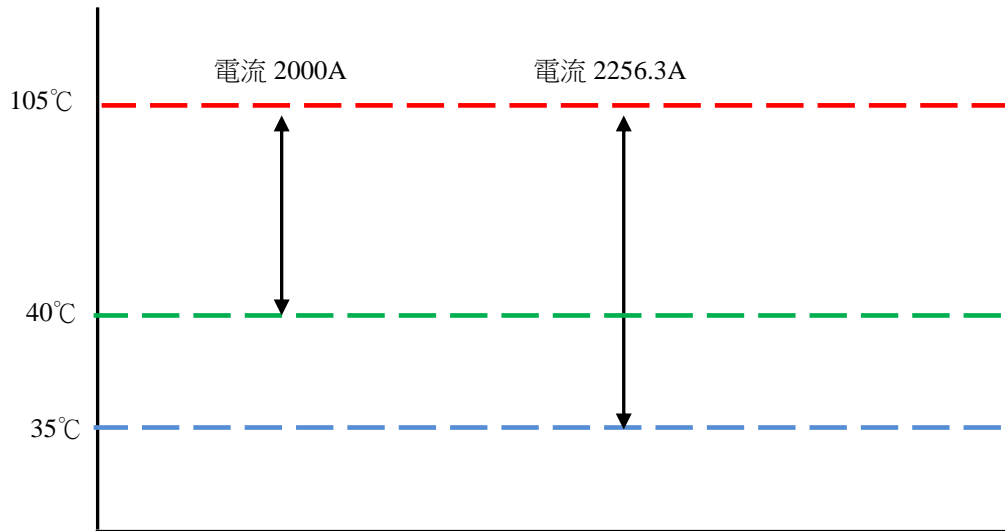


圖 3-12 GIS 可連續載流與室溫關係

利用上述公式，假設 161kV 額定電流 2000A( $I_r$ )之 GIS 及定型試驗時所量測最大溫昇 55K( $\Delta\theta_r$ )之狀況，若當設備運轉於室溫 35°C( $\theta_a$ )時，設備可連續運轉電流將提昇至 2256.3A( $I_s$ )，且各零件之總溫度不超過規範總溫度之限制。

然而評估當過載電流已超過 GIS 溫昇限制時對設備之影響，對設備內之開關及導體而言，大多數零件為金屬材料所組成，因金屬有熔點較高之特性並不會立即造成損壞，惟須注意過電流所造成高溫，可能使貫穿式比流器外層所包覆 A 級環氧樹脂 (EPOXY)之絕緣材料燒毀。

## 第4章 心得與建議

- 一 本次奉派前往德國及瑞士實習 GIS 設備相關故障檢測應用，非常感謝過程中每個曾經幫助我之同仁及長官，GIS 目前已屬國產化設備，其實已甚少有機會與國外廠家交流，利用參訪實習機會可與國外廠商相互交流並蒐集相關資料，對工作上具有相當程度上幫助。
- 二 本次實習是職第一次踏訪歐洲大陸，很明顯感受社會氛圍與本國有明顯不同，印象最深處，係在德國搭鐵路時，感受其對於乘客購票之信任，在各車站均無閘門設計，乘客可自由進出車站搭乘列車，僅在列車上會有檢驗人員不定時查票。另實習期間正逢法國舉行歐洲足球國家盃比賽，無論是街頭或投宿地點，均可見賽事轉播及人潮聚集觀看，可見足球在歐洲之風靡程度如國內棒球一般。
- 三 極高頻局放檢測裝置現已附屬在 345kV 油式變壓器新購案內，對於該裝置是否需推廣至開關設備上?職認為以這兩種設備在電網所扮演角色來看，開關設備之屬性與重要性不如變壓器，且過去經驗發現，開關設備之運轉穩定性高，因此推廣局放裝置於開關設備上之效益可能不及變壓器高;另於實習中有廠商經驗分享，雖然理論上使用頻高頻檢測局放相較其它方式，具備有效抑制雜訊干擾及可線上偵測之優點，但實際使用經驗，仍有警報誤動作之情形發生，且以氣體絕緣開關設備之特性，運轉時只要監控並維持絕緣氣體(SF<sub>6</sub>)壓力在所需之工作壓力下，設備應可穩定運轉，並無裝設局放檢測裝置之迫切需要。