

□ 高壓用電設備檢測技術諮詢

主題: 改進電力變壓器之廠內及現場驗收的局放電量測

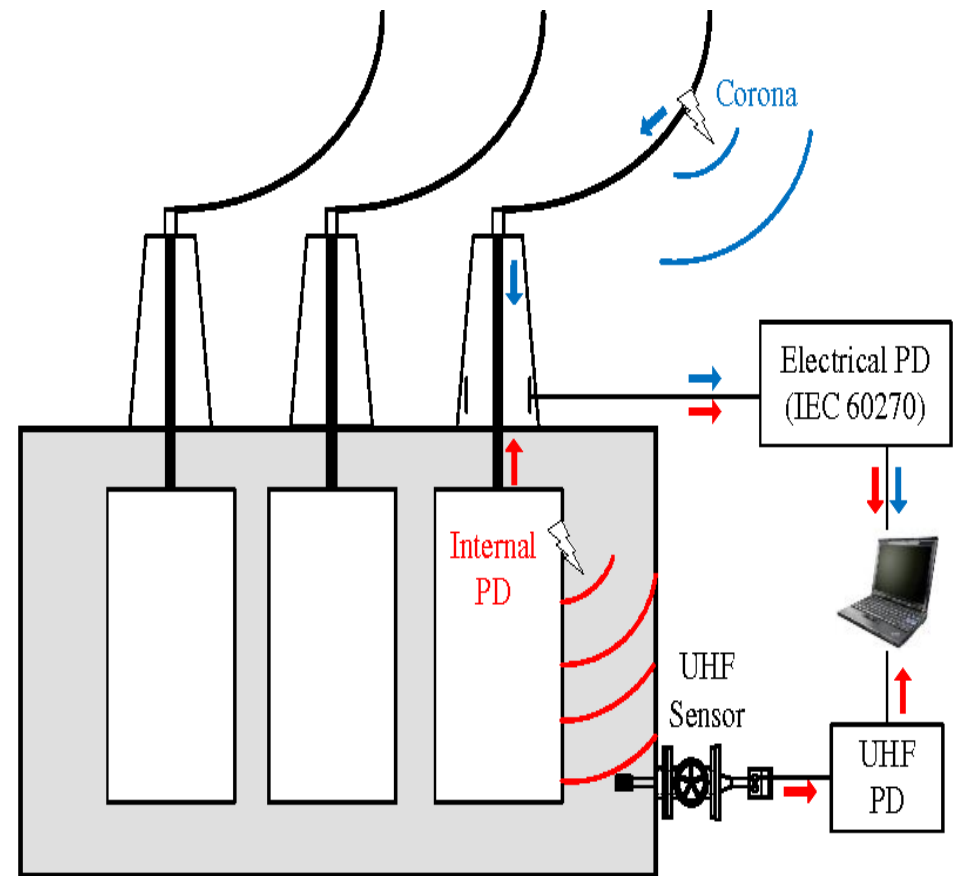
壹、背景

- ◆ 變壓器故障解析
- ◆ 局部放電與量測

貳、Cigre量測方法改進研究

- ◆ 研究動機/目的
- ◆ IEC 60270電氣量測/校準之回顧
- ◆ UHF電磁量測法/校準
- ◆ FAT與SAT PD 量測改進/建議

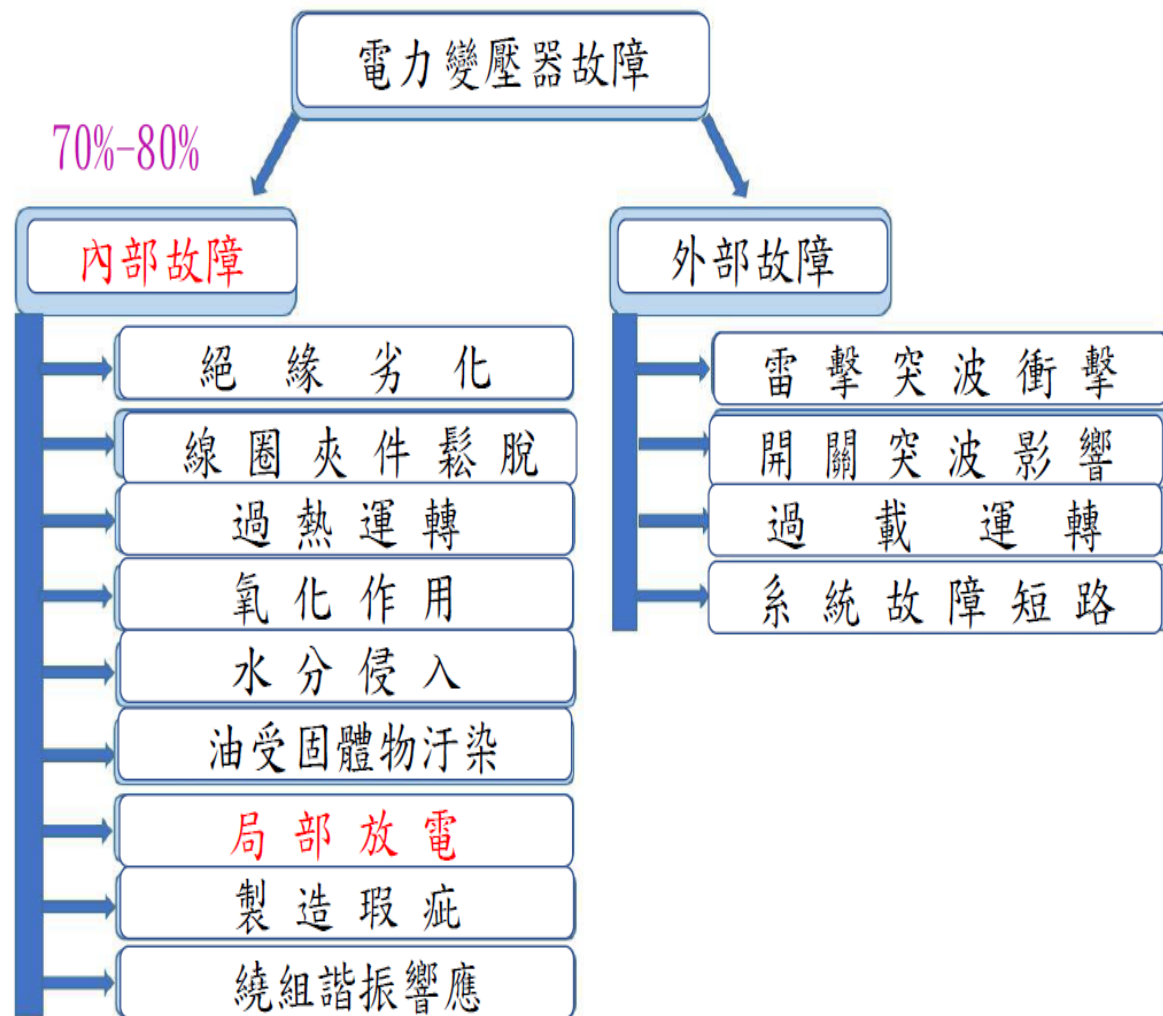
參、未來展望



壹、背景

◆ 電力變壓器故障解析

- 電力變壓器暴露在不同的電氣、機械、環境和熱等應力。這些不同的壓力是造成內部和外部故障的潛在來源。
- 內部故障佔比達70%-80%，大部分是因絕緣系統惡化而產生。
- 內部故障始於內部微不足道的絕緣放電，這是一種瞬態。

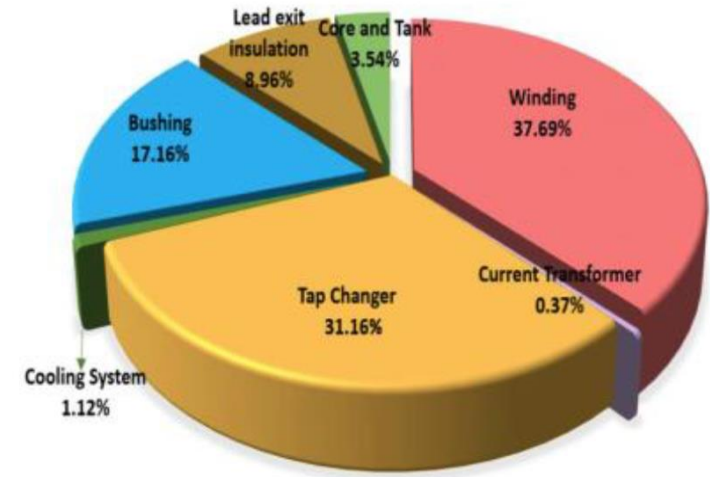


壹、背景

◆ 電力變壓器故障解析

- 與絕緣問題相關故障佔比較高。
- 由於不適當FAT、運輸以及現場加壓送電而發生早期故障。
- 由於高負載、雷擊或開關突波或溫度狀況造成隨機性故障。
- 多數套管與線圈問題可藉由局部放電量測而發現。

- 2010年Cigre 研究120kV-735kV電力變壓器服役統計：
 - 故障率:0.5-2.5% / 服役年，平均: 1 % / 服役年
 - 火災風險:0.05-0.25% / 服役年，平均: 1 % / 服役年



摘自 Article in IEEE Access · April 2021

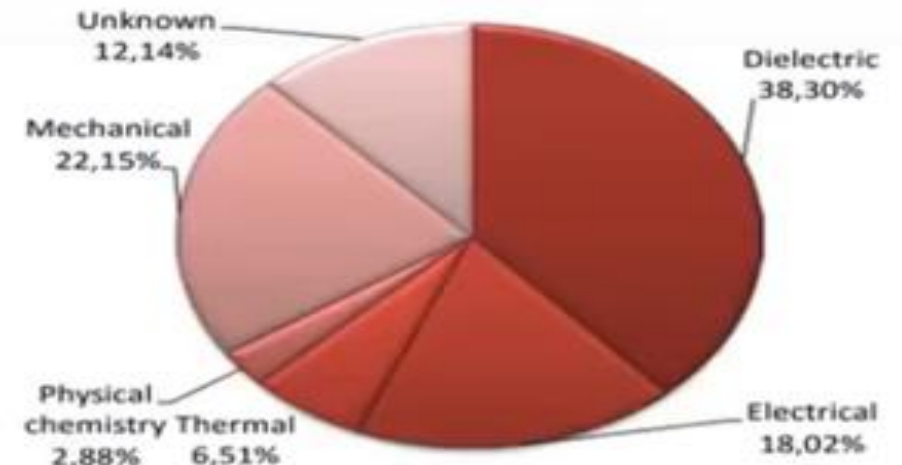


FIGURE 43: FAILURE MODE ANALYSIS OF 799 SUBSTATION TRANSFORMERS

Ref.: Cigre TB642, WG A2.37

壹、背景

◆局部放電與量測

➤ 什麼是局部放電？

- IEC 60270 將術語『局部放電』定義為：『一個小區域性電氣放電』，該放電僅部分橋接可能或不可能發生在鄰近導體間的絕緣』。

IEC 60270 defines the term “partial discharge” as: “a localized electrical discharge that only partially bridges the insulation between conductors and which can or can not occur adjacent to a conductor”.

- 電氣和電子工程師協會 (IEEE) 的 IEEE 100 對 PD 的定義是：局部放電 (PD) 是一種僅部分橋接可能會或可能不會與導體相鄰兩者導體之間絕緣放電。

The definition of PD from IEEE 100 [3] of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) is: Partial discharge (PD) is an electric discharge which only partially bridges the insulation between conductors, and which may or may not occur adjacent to a conductor.

- 當高壓環境中的小面積絕緣無法應對電應力並被擊穿時，就會發生局部放電 (PD)。它不會跨越兩個絕緣電極之間的整個距離——這就是它被稱為“部分”的原因。

壹、背景

◆局部放電與量測

➤局部放電發生的原因：

電力變壓器的局部放電可分為五種類型：內部放電、表面放電、電暈放電、電樹和屏蔽放電。內部放電是由於製造過程或老化使絕緣體內部形成空腔有氣隙。

- **製造過程中**—製造過程中可出現缺陷，從而在絕緣體中產生小的空腔或空隙。
- **設備安裝時**—工廠組裝或現場安裝發生錯誤，損壞削弱絕緣層。
- **老化和變質**—隨著內部化學鍵的分解，絕緣材料會隨時間的推移而自然變質。
- **運轉過應力**—短路故障或雷電脈衝因故障電流或過電壓而對絕緣施加應力。
- **使用中損壞**—使用中因外部因素而受到物理損壞。

壹、背景

◆局部放電與量測

- 存在於電力變壓器內部油紙絕緣，不同類型的瑕疵導致的PD：
 - 由於紙層分離而形成包紮繞組的空隙，其中沒有油浸漬。
 - 絕緣油中的金屬顆粒移動（由於金屬箱體的老化過程和製造瑕疵）。
 - 由於環境影響、濕度和突波電壓造成套管空隙。
 - 絕緣油因老化、油中雜質或夾帶水分而產生氣泡。
 - 製造過程中固體絕緣物之水分滯留。
 - 油的流動產生局部靜電電荷，引致電場的增加而使PD 啟動。
 - 固體絕緣物裂痕。

壹、背景

◆變壓器局部放電量測

- 近年來，已經開發了用於 PD 測量的替代方法，例如聲學和電磁超高頻（UHF）測量。
- 這些方法已被證明在檢測 PD 方面很敏感，並且可以幫助確定 PD 故障的位置。與電氣測量方法相比，UHF 方法在大多數現場應用中更能抵抗外部噪音和干擾。因此，它允許更容易區分外部和內部 PD。這使得 UHF 方法既適用於製造商的測試實驗室（低環境噪音，例如屏蔽和噪音阻隔），也適用於運輸和安裝後的現場變壓器（通常是升高環境的噪音位準）。

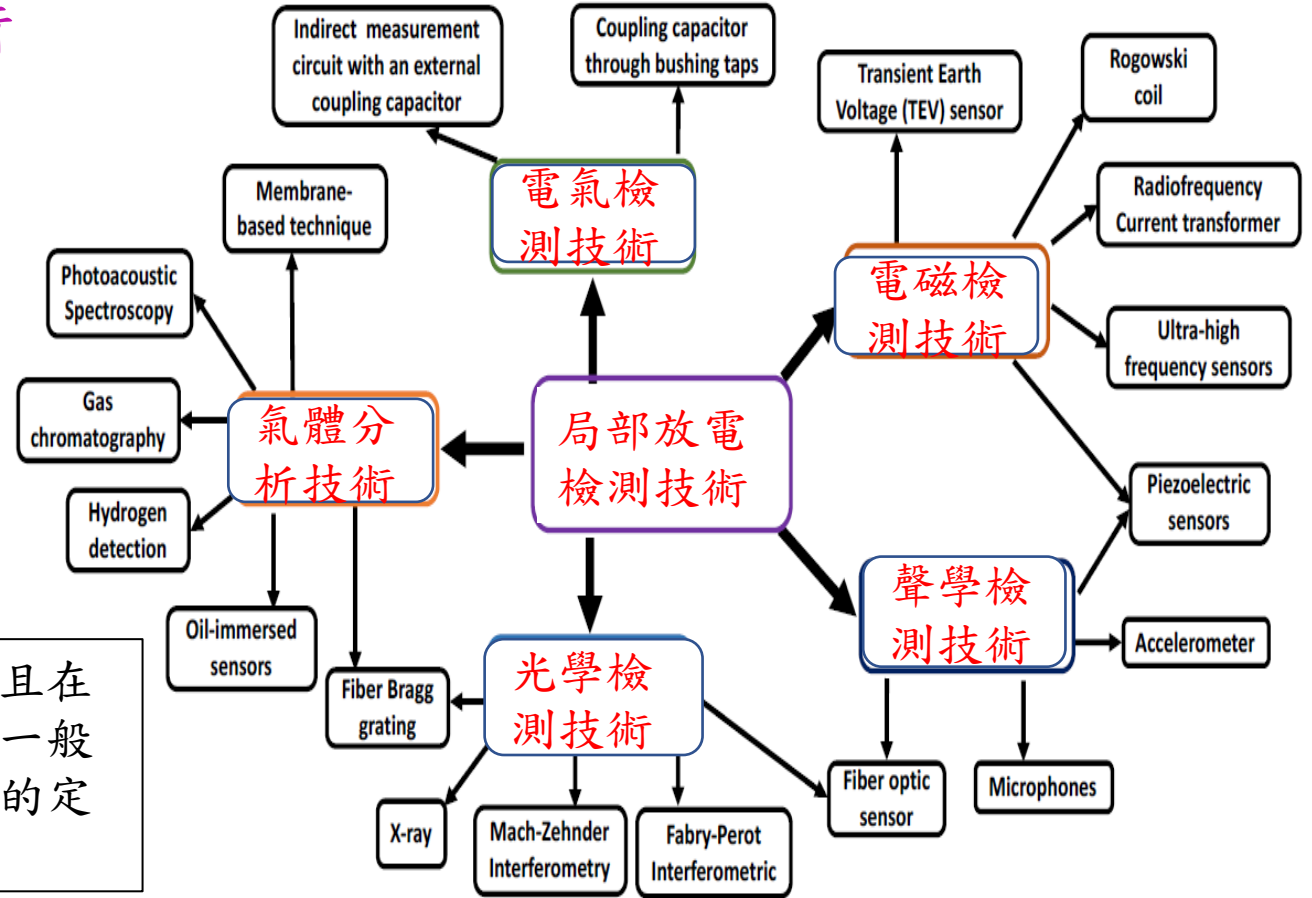
壹、背景

◆局部放電與量測/不同的量測方法

▶不同類型的變壓器PD 檢測技術

- 電氣檢測→電荷傳輸
- 化學檢測→氣體分析
- 聲學檢測→聲音釋放
- 光學檢測→光發射
- UHF檢測→電磁波輻射

□ 非電氣檢測PD方法包括聲學、光學和化學方法，並且在可行的情況下，隨後觀察任何在測試對象上放電。一般來說，這些方法不適用於本標準定義的局部放電量的定量測量，但它們主要用於檢測和/或定位放電。

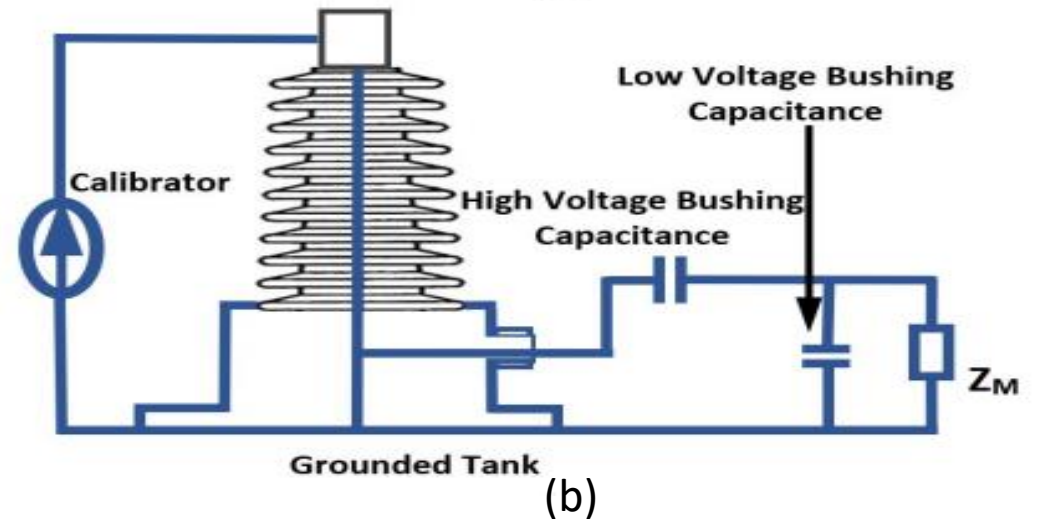
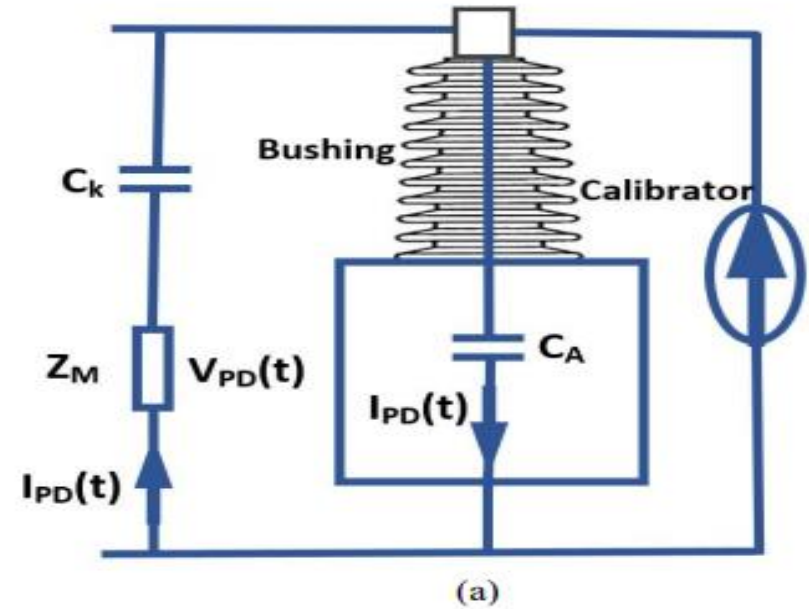


壹、背景

◆局部放電與量測/不同量測方法

➤ 電氣 (EE) 檢測方法

- EE 檢測方法係應用產生的電流脈衝信號檢測，測試電路直接連接到有檢測到脈衝存在 PD 活動的測試區域，量測電路如右圖(a)(b)所示。
- 常見用於電力變壓器狀態監測的的電氣檢測方法，是間接量測外部電路耦合電容和通過套管水龍頭的耦合電容，其中耦合電容器 (C_k) 保持與測試絕緣系統的電容 (C_A) 並聯配置，視在電荷則是由 PD量測裝置加附測量阻抗 (Z_M) 計算而得。

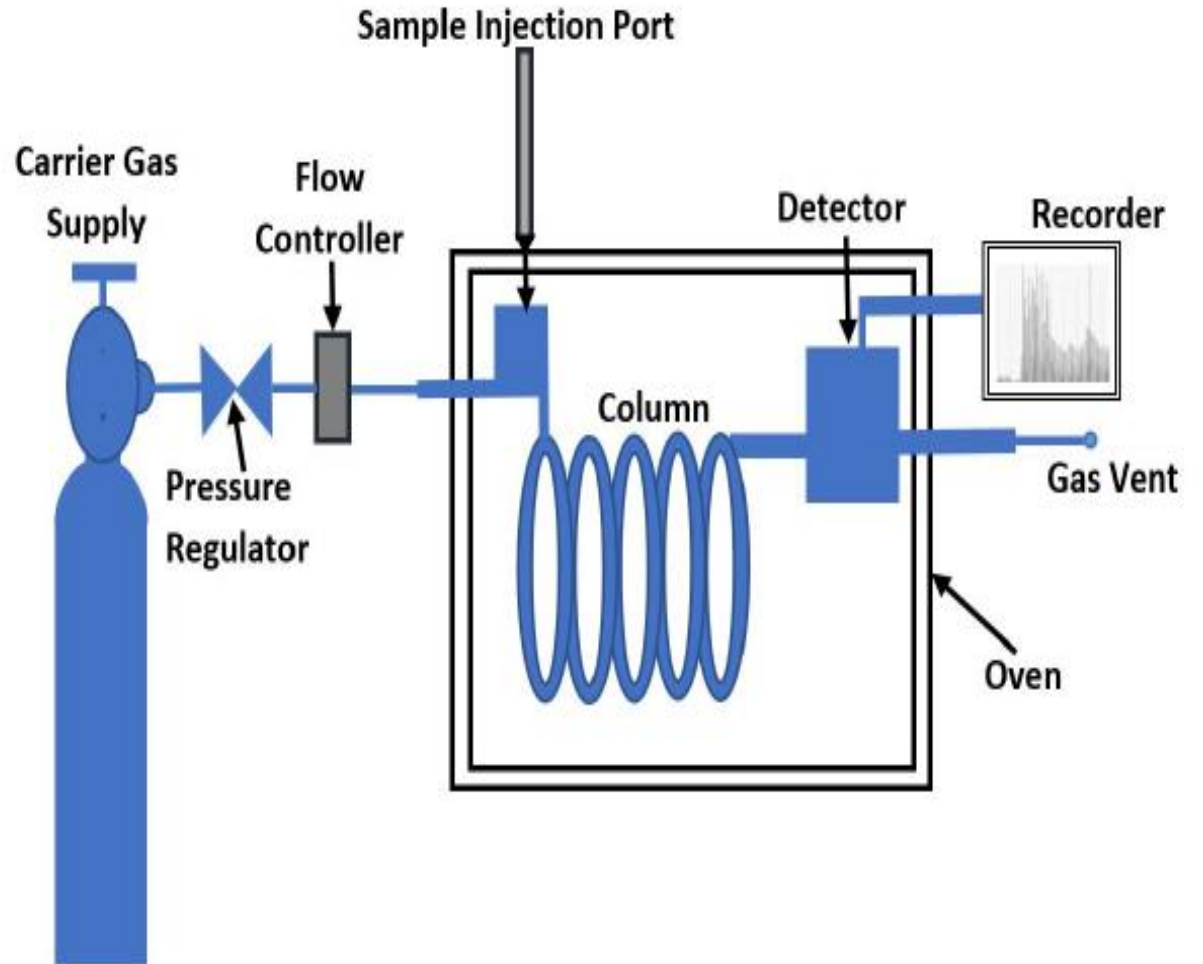


壹、背景

◆局部放電與量測/不同量測方法

➤ 氣體(DGA)量測法

- 溶解氣體分析利用檢測的概念變壓器絕緣油變質釋放的氣體和纖維素。變壓器絕緣油老化會釋放出氫氣型式的氣體(H_2)、甲烷(CH_4)、乙烷(C_2H_6)、乙炔(C_2H_2)和乙烯(C_2H_4)，而纖維素絕緣主要釋放一氧化碳(CO)和二氧化碳等氣體(二氧化碳)。
- 變壓器組通常在年和周之時間間隔執行溶解氣體分析(DGA)，取決於預期故障的嚴重程度或變壓器相對應的重要性。DGA分析結果通常會顯示變壓器內部故障情況，同時觸發進一步的診斷方法運用，例如PD測量。



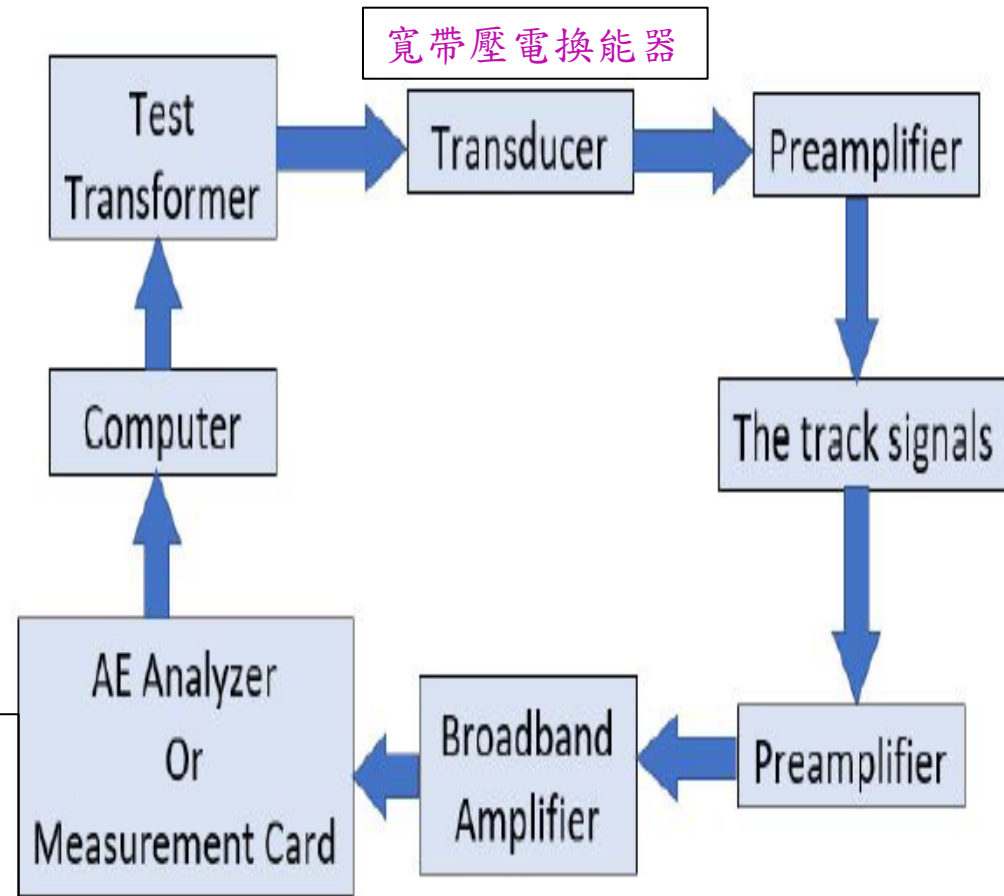
壹、背景

◆局部放電與量測/不同量測方法

➤ 聲學檢測(AE)方法

- 聲學 PD 信號會受到高頻信號的影響，但可經由去噪技術而消除。沒有電磁干擾，同時具有經濟友好的技術，推動 AE 方法作為電力變壓器量測亦是適用的技術。
- 右圖為正常運轉電力變壓器PD量測之AE信號檢測紀錄框圖。寬帶壓電換能器是許多超音波常用的轉換元件系統，它們被固定在變壓器油箱上並經由磁性支架以檢測 AE 信號。AE 信號經過進一步放大、過濾過程，最後由 AE 分析儀饋送並記錄。

□ 在低噪音房間中進行的聽覺觀察可用作檢測局部放電的一種手段。非主觀聲學測量，通常使用麥克風或其他聲學換能器結合放大器和合適的顯示單元進行，也可能是有用的，特別是用於定位放電。具有高於可聽頻率範圍的高靈敏度的定向選擇性麥克風可用於定位空氣中的電暈放電。聲學傳感器也可用於定位氣體絕緣開關設備或油浸設備（如變壓器）中的放電；它們可能在外殼內部或外部。



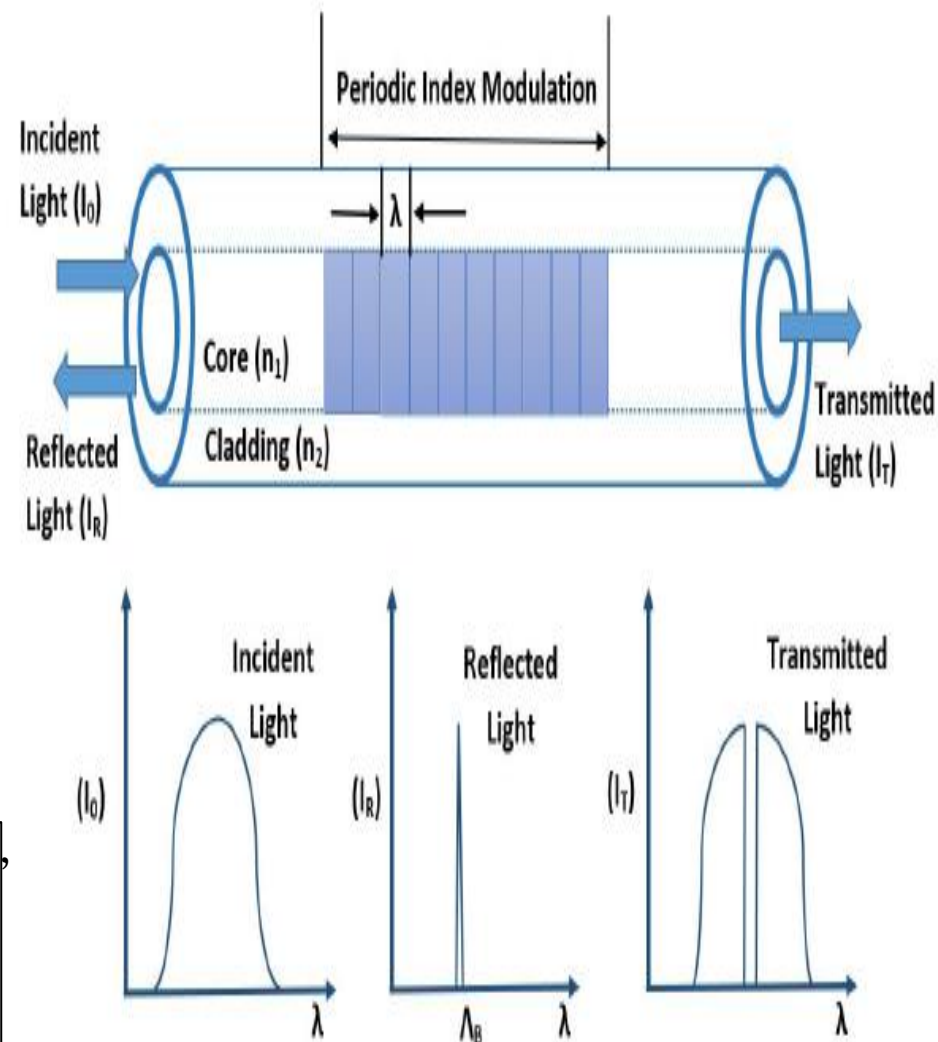
壹、背景

◆局部放電與量測/不同量測方法

➤ 光學(OP)檢測法

- 常見的 PD 光學檢測傳感器包括馬赫-曾德干涉法 (MZI)、法布里-珀羅干涉儀 (EFPI) 和光纖布拉格光柵 (FBG)。目前，FBG傳感器用於電力變壓器可以直接保存在油中，具有強介電性能和抗擾度的好處免受電磁干擾。
- FBG的工作原理如右圖，FBG 用作窄帶反射式光學傳感器，其中單波長的光被光柵反射，和其他波長被傳輸。
- 光學測量對於電暈放電等外部 PD 非常有用，並且用於控制 PD 活動的 HV 測量設置。由於絕緣油會吸收發射光，因此無法在變壓器內進行光學測量。

□ 在眼睛適應黑暗後，可以在黑暗的房间裡進行目視觀察，如有必要，可藉助大光圈雙筒望遠鏡進行。或者，可以製作照片記錄，但通常需要相當長的曝光時間。出於特殊目的，有時會使用光電倍增管或圖像增強器。

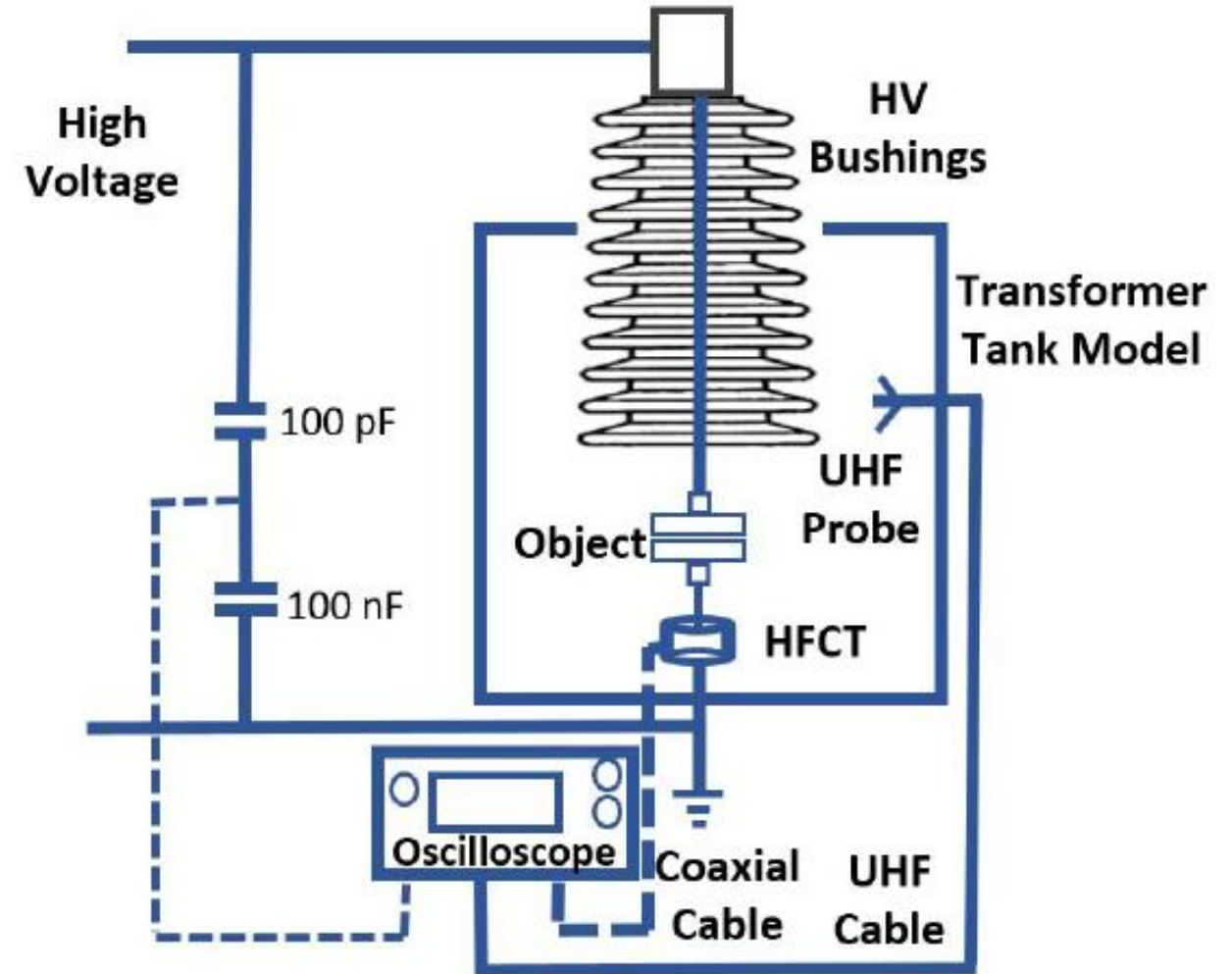


壹、背景

◆局部放電與量測/不同量測方法

➤ 電磁超高頻(UHF)檢測法

- 初始階段的電磁 (EM) 方法調查表明，在固定的 PD 位置和恆定EM信號傳播，PD之間的線性相關電荷和可能的信號源可以得到。
- UHF 傳感器具抵抗低頻信號優點，對於變壓器內部結構產生之噪音影響，可經由去噪技術、消除白噪音，以及無電暈脈衝而忽略。
- 實施UHF傳感器最大挑戰是校準過程，因量測的幅度取決於各種元素。



貳、Cigre 量測方法改進研究

◆研究動機/目的

- 有關 PD 測量的 FAT 驗收標準，目前僅適用於 IEC 60270 測量結果，況且量測的視在電荷(apparent charge)尚未被認同是實際 PD 源所翻轉而成的實際電荷，因此它也無法提供證明測量的 PD 是否為關鍵量測。
- 在 FAT 失敗後，聲學和/或電磁方法 (UHF)可用於支持診斷和定位之目的，以啟動有效的修復過程或糾正措施。值得注意的是，聲學量測和 UHF 量測也是不被認同實際電荷是由確實PD 源翻轉推測出結果。
- 讓 UHF PD 測量既可適用於製造商的測試實驗室（低環境噪音，例如屏蔽和噪音阻隔），也可適用於運輸和安裝後的現場變壓器（通常是升高環境的噪音位準）。

貳、Cigre 量測方法改進研究

◆研究動機/目的

- 為將來改進的 PD FAT 和 SAT 測試提供建議。
- 補充使用之電磁方法以幫助在 FAT 量測可能。
- 理由：
 - 有效區分內部和外部來源（針對 FAT 和 SAT 條件）。
 - 電氣測量驗證（結合 DGA 測量）。
 - 經由閘控改進電氣量測結果。
 - 僅進行電氣量測的 SAT 可能會因噪音大而出現某些測量瑕疵。
 - 使FAT 的 UHF PD 認證量測可應用於 SAT 量測，突破現有SAT 的 UHF量測僅限於 GIS 系列框架。
 - 為局部放電監測和局部放電定位的診斷工具預做準備（可通過觸發聲學量測）。

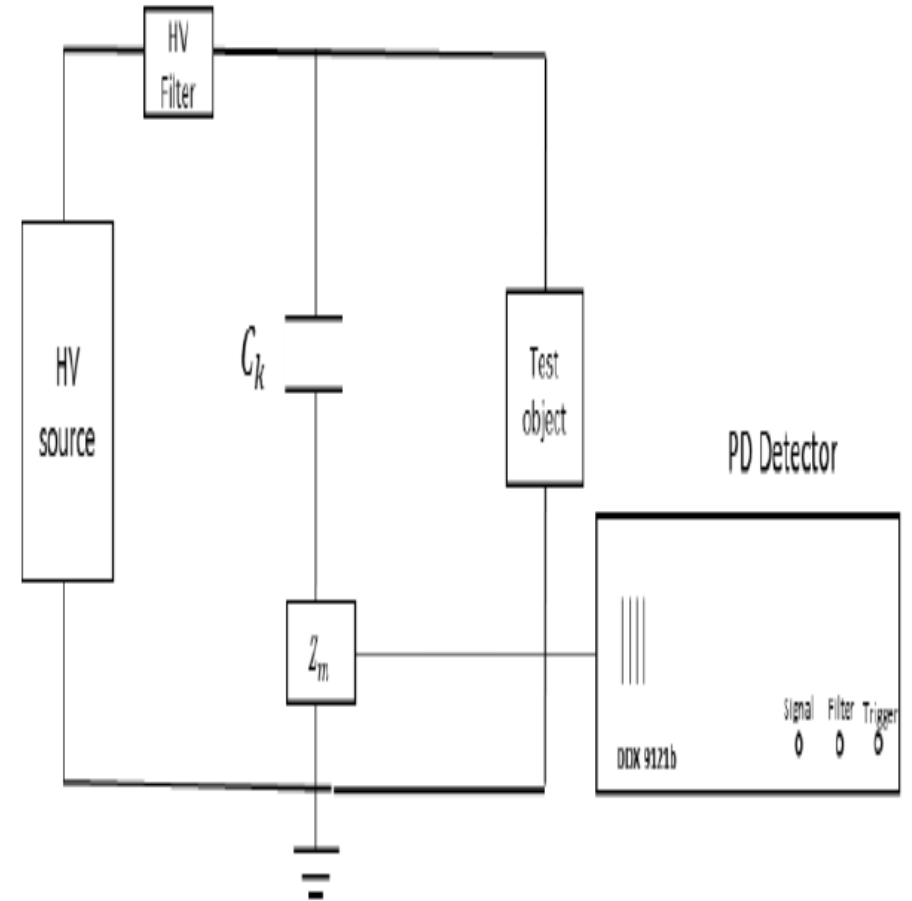
貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ IEC 60270 電氣量測與校準之回顧

➤ 依據 IEC 60270 的 PD 量測指南

➤ 測量電路確認(如右圖)

- 高壓濾波器—也稱為阻塞阻抗，將來自測試對象的高頻 (HF) 局部放電信號限制在測量迴路中，避免信號通過電源電容洩漏，從而提高測量的靈敏度。**建議使用阻塞阻抗 HV 濾波器**，正確選擇阻塞電感對於局部放電測試的結果至關重要。
- 耦合電容器 (C_k 或 C_c) -- 為 HF 放電電流循環提供低阻抗路徑。**耦合電容(C_k) 與測試對象電容(C_t) 的比值決定了 PD 測量的靈敏度經由增加耦合電容的值，可以實現更高的測量靈敏度和 SNR (信噪比比率)。**
- 測量阻抗--測量阻抗將局部放電的輸入電流信號轉換為輸出電壓信號，同時**有效阻斷或隔離工頻信號**。這樣可以確保測得的 PD 電壓信號中沒有工頻 (50/60 Hz) 信號或其諧波，**測量阻抗必須配備過電壓或閃絡保護**，以防擊穿。
- 局放檢測器--PD 檢測器用作信號採集單元，它必須滿足 IEC 60270 定義的規定。除了 PD 幅度計算 (以 pC 為單位) 之外，還必須在檢測器中正確和精確地實現允許的濾波器範圍。

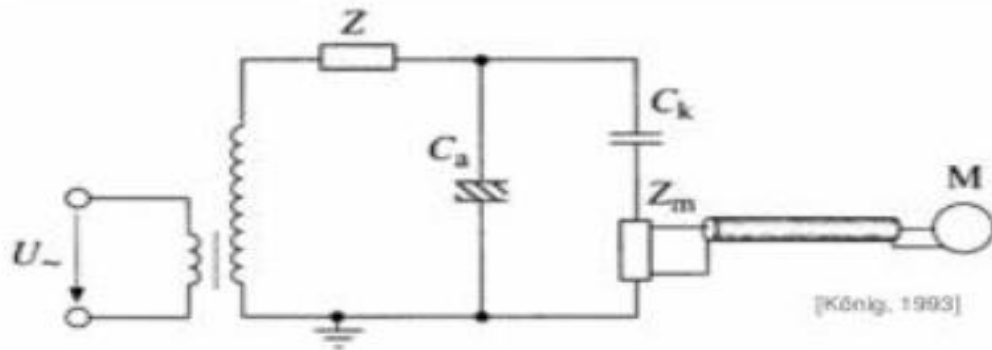


貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ IEC 60270 電氣量測與校準之回顧

PD measuring circuits according to IEC 60270

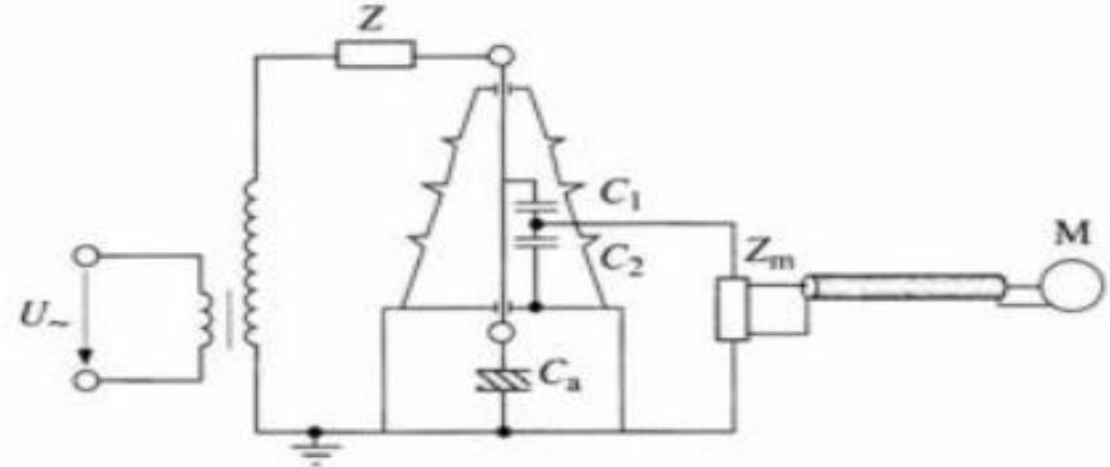
frequently used circuit in test laboratories



[König, 1993]

a) coupling device in series with the coupling capacitor

often applied in on-site/on-line PD investigations



b) measurement at a bushing tap

Components:

AC voltage source U , optional blocking impedance Z , coupling capacitor C_k , measuring impedance Z_m , a measuring instrument M and generalized test object C_a .

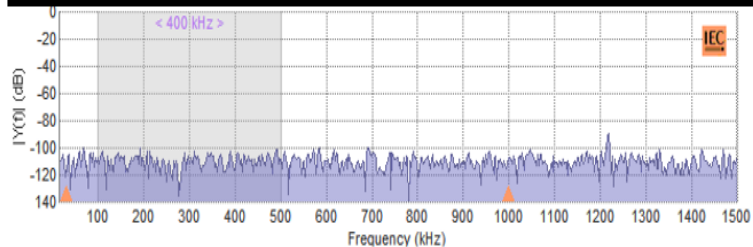
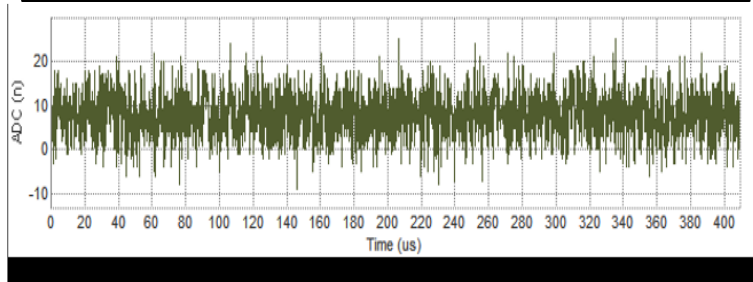
貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ IEC 60270 電氣量測與校準之回顧

➤ 校準步驟

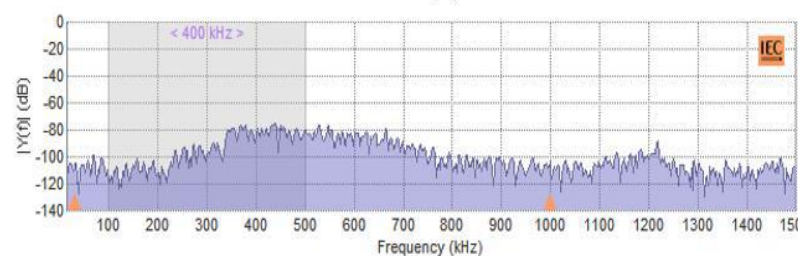
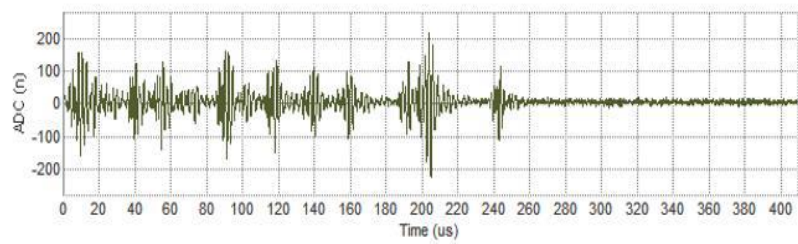
- step 1: 檢查雜訊頻譜(有隨機噪音、開關噪音、正弦波噪音等三型)

隨機噪音也稱為白噪音，是隨機變化的噪音其平均值為零。這種噪音的 FFT/頻譜的特點是不斷為低分貝，在特定頻率下沒有明顯的峰值。



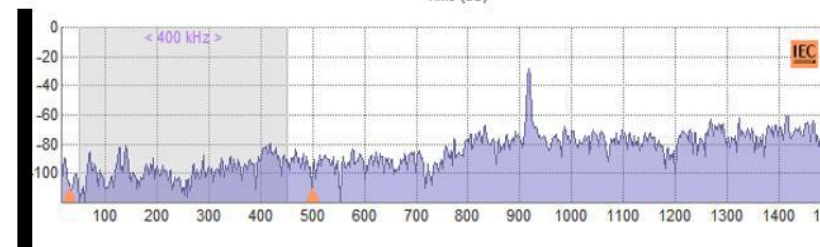
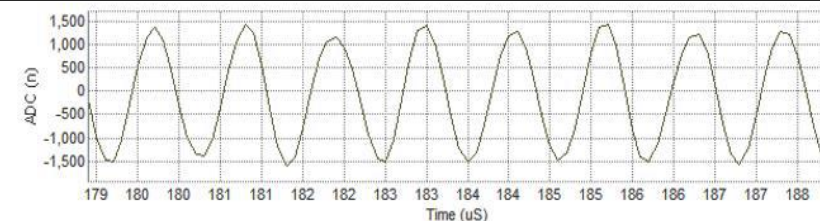
(a) White noise (top) and its FFT (bottom)

開關噪音是一種高頻輻射噪音。對大型測試對象或帶有繞組的測試對象（如變壓器）進行測試時，開關脈衝的 FFT 類似於 PD 事件的 FFT。這些脈衝與 50 或 60 Hz 電源週期同步，並以特定頻率發生（通常幾 kHz 的開關頻率）。



(b) Switching noise (top) and its FFT (bottom)

正弦波噪音是另一類可能阻礙 PD 測試的噪音。它是一種連續波，可能源自輻射的 AM 和 FM 信號或其他通信頻段。如果不識別這種噪音，會對 PD 測試結果產生強烈的負面影響。正弦噪音在噪音頻譜中反映為非常特定頻率的窄峰。



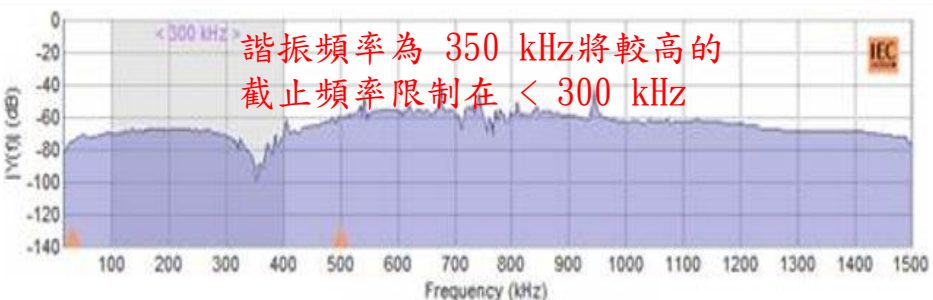
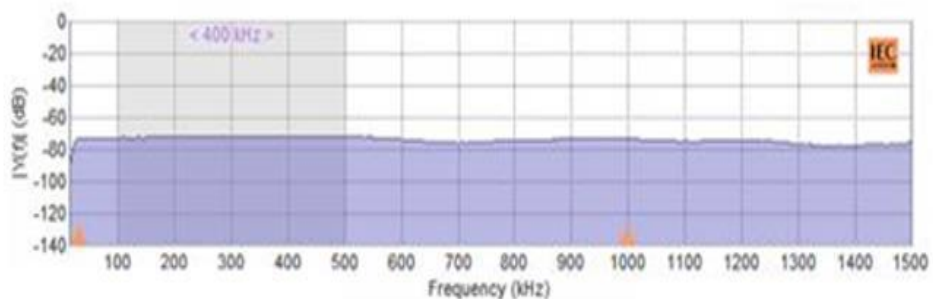
(c) Sinusoidal noise (top) and its FFT (bottom)

貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ IEC 60270 電氣量測與校準之回顧

- **step 2: 檢查校準頻譜** (校準器連接於測試對象，註入一個已知電荷值的 PD 脈衝，然後校準探測器)。

如果頻譜在設置的濾波器頻帶上不平坦，則校準無效。



The frequency spectrum of an ideal calibration pulse (top) and with resonance at 350kHz (bottom)

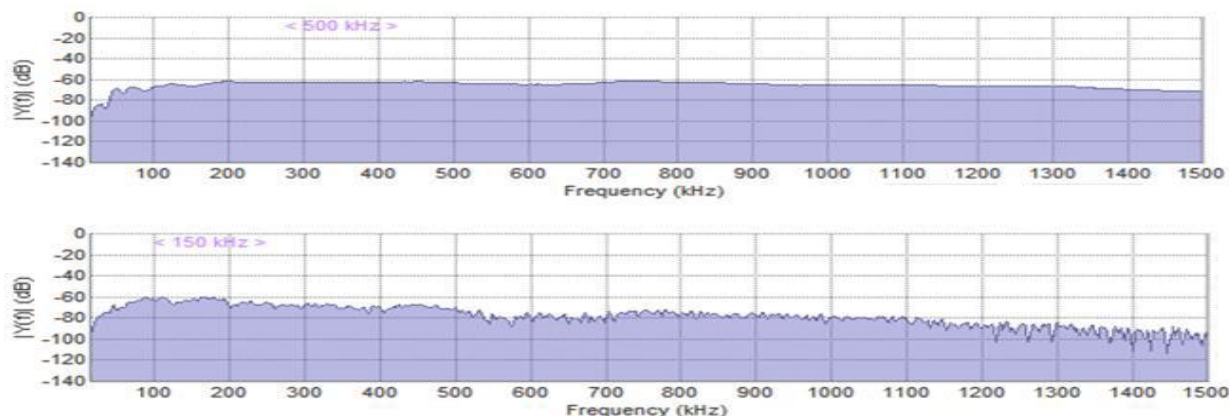
- 如果頻譜在設置的濾波器頻帶上不平坦，則校準無效。在這種情況下，準積分過程無效，產生錯誤的電荷值。在測試大型測試對象或帶有繞組的測試對象時，此類錯誤更有可能發生，這些測試對象由複雜的 RLC 網絡組成，在規定的測量範圍內產生諧振。左圖顯示了一個這樣的示例，其諧振頻率為 350 kHz。此校準的濾波器設置的正確選擇是將較高的截止頻率限制在 < 300 kHz。
- 在電荷估計的時域方法中，濾波器響應的峰值與 PD 脈衝的視在電荷值成正比。在 PD 測量期間，通過在校準期間首先註入一個已知的電荷值來計算比例常數。然而，這種比例僅在濾波器提取光譜密度恆定的 PD 脈衝能量時才有效，這個過程被稱為準積分。測量中如出現設置/測試對象發生共振，選擇的頻譜有時會落在非平坦區域，使電荷估計無效。

貳、Cigre 量測方法改進研究

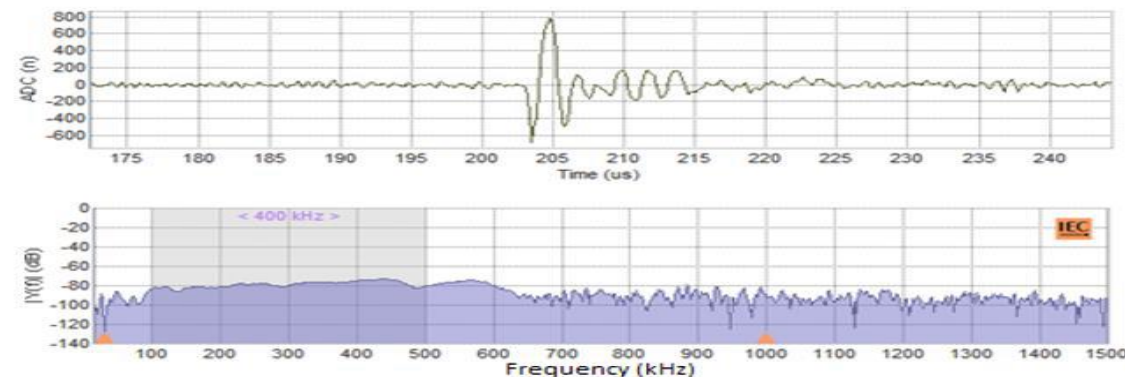
◆ IEC 60270 電氣量測與校準之回顧

➤ step 3: 分析真實的局放脈衝頻譜

- 查檢放電脈衝頻譜目的是確認校準的有效性。PD 測試標準 IEC 60270 是一個基本標準（“水平”標準），定義了最高 1 MHz 的基本允許量測頻帶。但是，應用標準 IEEE Std. 處理電力變壓器 PD 量測的 C57.113-2010 建議最大頻率上限為 300 kHz，以便以足夠的精度執行電荷估計（積分）。
- 以額定電壓為 80 kV 的電力變壓器進行的 PD 測試(如下圖b所示)它清楚地顯示 PD 脈衝的能量僅限於較低頻率，並且沒有明顯的理由在較高頻率下進行量測。
- 對於大型測試對象和帶有繞組的測試對象建議保持在較低的頻率範圍內，並藉交叉檢查真實的頻譜來確認量測電荷值的正確性。



(a) The calibration pulse spectrum (top) and spectrum of the real PD (bottom) measured on a stator winding



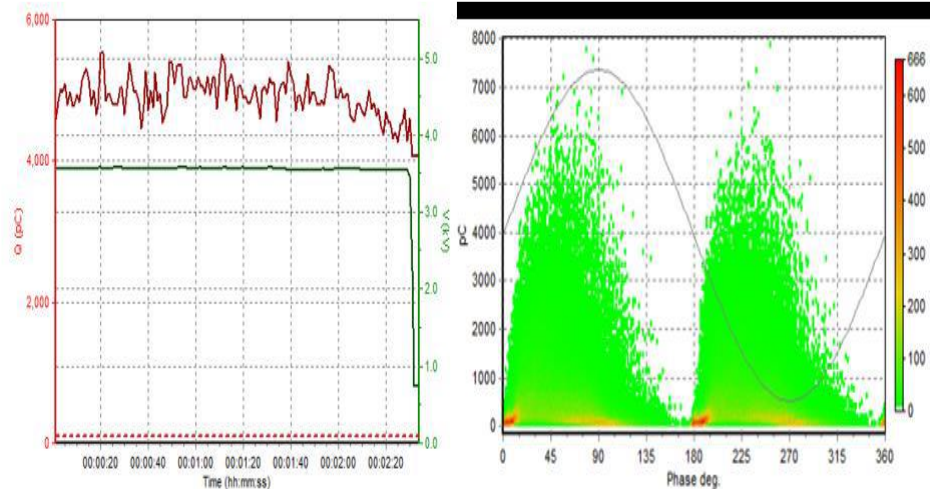
(b) The real PD pulse (top) and its frequency spectrum (bottom) measured on a power transformer

貳、Cigre 量測方法改進研究

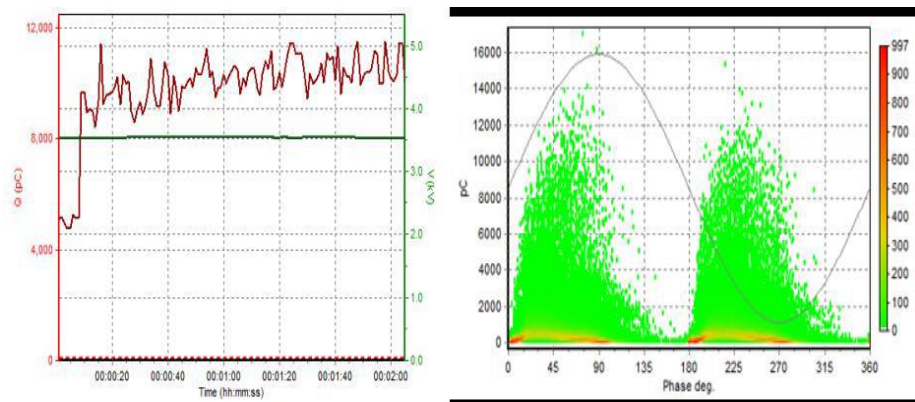
◆ IEC 60270 電氣量測與校準之回顧

➤ 現場實際量測案例

- 選擇 100 - 600 kHz 的量測帶寬以達到良好的信噪比 (SNR)。依建議步驟 2：查檢校準頻譜，發現所選頻率範圍內平坦(如下圖上部)。
- 依推薦的第 3 步驟：分析真實 PD 脈衝頻譜，如下圖底部頻譜在頻率上逐漸減小，100~600 kHz 之間的幅度差異約為 20dB。這導致無效的準積分過程，因此產生錯誤的電荷讀數(圖a)。
- 將頻率測量範圍調整到正確的範圍 (平坦的頻譜響應 100~250 kHz) 後，可以看到電荷幅度 Q_{iec} 增加了 2 倍(圖b)。



(a) $Q(t)$ & $U(t)$ diagram (left) and PRPD pattern (right) @ 100 - 600 kHz



(b) $Q(t)$ & $U(t)$ diagram (left) and PRPD pattern (right) @ 100 - 250 kHz

貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ IEC 60270 電氣量測與校準之回顧

➤ 校準的一般提示

- 將校準脈衝注入測試對象的引線而不是耦合電容器。
- 確保所有電路元件都已連接，並且在進行校準之前電路是最終型式。
- 校準後對電路所做的任何更動都需要重新校準。
- 對 PD 檢測器設置（頻率範圍設置等）所做的任何更改都需要重新校準。
- 為避免校準錯誤，請從電路中移除接地棒。
- 校準前務必檢查噪音頻譜。
- 通過注入原始注入電荷值的倍數來檢查校準的線性度，例如 50% 和 200%。
- 建議在施加電壓的 10-20 % 時檢查噪音程度。原因：一旦施加電壓，噪音程度/特性就會改變。

貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ IEC 60270 電氣量測與校準之回顧

➤ IEC 60270 校準程序總結

- 對於大型測試對象和帶有繞組的測試對象，建議在較低頻率範圍內量測（上限頻率 < 200 至 300 kHz）。
- 測試對象的性質/幾何形狀會產生因導電元件上的雜散電容而導致分流路徑和旁路，PD 脈衝的 LF 分量以盡可能小的衰減出現在測試對象端子上。
- 由於測試連接和測量迴路的頻率響應將 PD 脈衝的最大頻率縮減到小於幾 MHz（~2 MHz），因此在較高頻率下進行常規 PD 測量意義不大。
- PD 測量波段中的共振使以準積分的校準無效。
- IEC 標準化過程的主要目的是定義提供可重複性和相互比較的測試程序。
- 在 IEC 頻譜之外的頻率範圍內進行量測會帶來更大誤差的風險，並違背標準化的目的。
- 強烈建議檢查真實局放脈衝的頻譜，因為它可以提高量測的可靠性。
- IEC 60270 定義的術語“視在電荷”反映了實際電荷（在 PD 原點）和量測電荷（在測試對象終端），可以考慮將術語“視在電荷”重命名為“感應電荷”

貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ IEC 60270 電氣量測與校準之回顧

➤ IEC 60270 量測校準器的性能測試

- 如右圖A.1a所示，在被測校準器的輸出端加載一個電阻 R_m ，電壓 $u_m(t)$ 可用不小於50MHz帶寬的校準器之數字型示波器量測。 R_m 的值應在 50 Ω 和200 Ω 。校準器和 R_m 以及示波器之間的連接應該很短。示波器的輸入電阻會影響 R_m 的值。
- 含測量電阻器 R_m 在內的測試電路在於積分的時間內，使振盪的記錄波形衰減到小於2%平均幅度。測試結果應確定為至少 10 次測量的平均值。
- 量化 q 的準確性與積分過程的準確性和 R_m 值的準確性有關。
- 在圖 A.1b 中， $C_0 = 141$ pF 和 $R_m = 33 \Omega$ 和 $R_m = 200 \Omega$ 的校準器提供了 $u_m(t)$ 的兩個典型記錄。

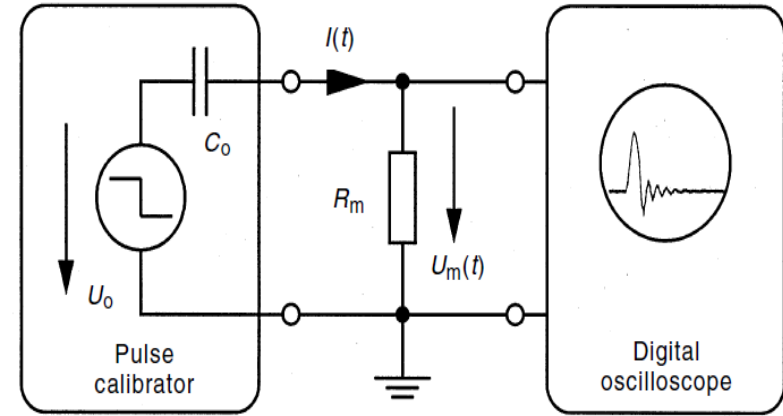
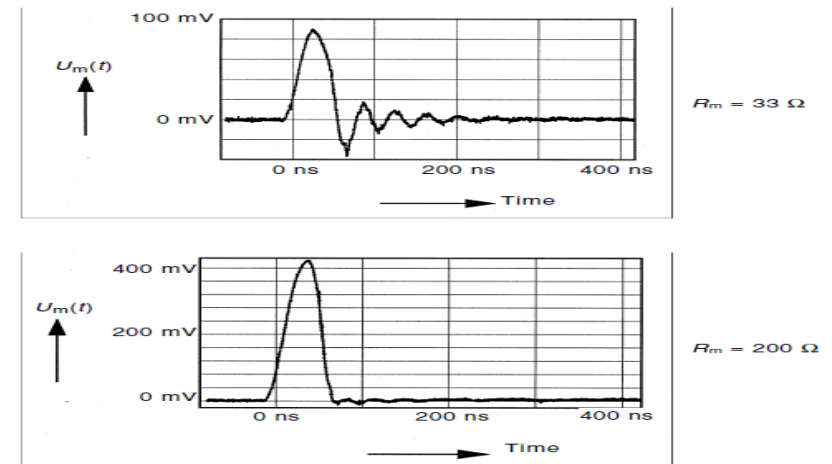


Figure A.1a - Measuring circuit



ure A.1b - Calibration pulses $u_m(t)$ of a typical calibrator which is fed to measuring resistances $R_m = 33 \Omega$ and $R_m = 200 \Omega$ respectively ($q = 100$ pC)

貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ UHF 電磁量測/校準之探討

- UHF 測量系統需要進行校準，包括驗證 UHF 傳感器的靈敏度。手冊推薦一種校準程序，以實現可重複且可比較的 UHF 測量，而不受使用過的測量設備（包括電纜、附件和傳感器）的型號和製造商的影響。
- 在變壓器上安裝 UHF 傳感器通常使用兩種不同的方法：
 - UHF 傳感器使用放油閥安裝，越來越多安裝在新變壓器上，專門用於狀態監測。
 - 在主油箱或可拆卸的艙口蓋板上準備一個安裝孔和一個堅固的絕緣窗附在其上以保持油封。

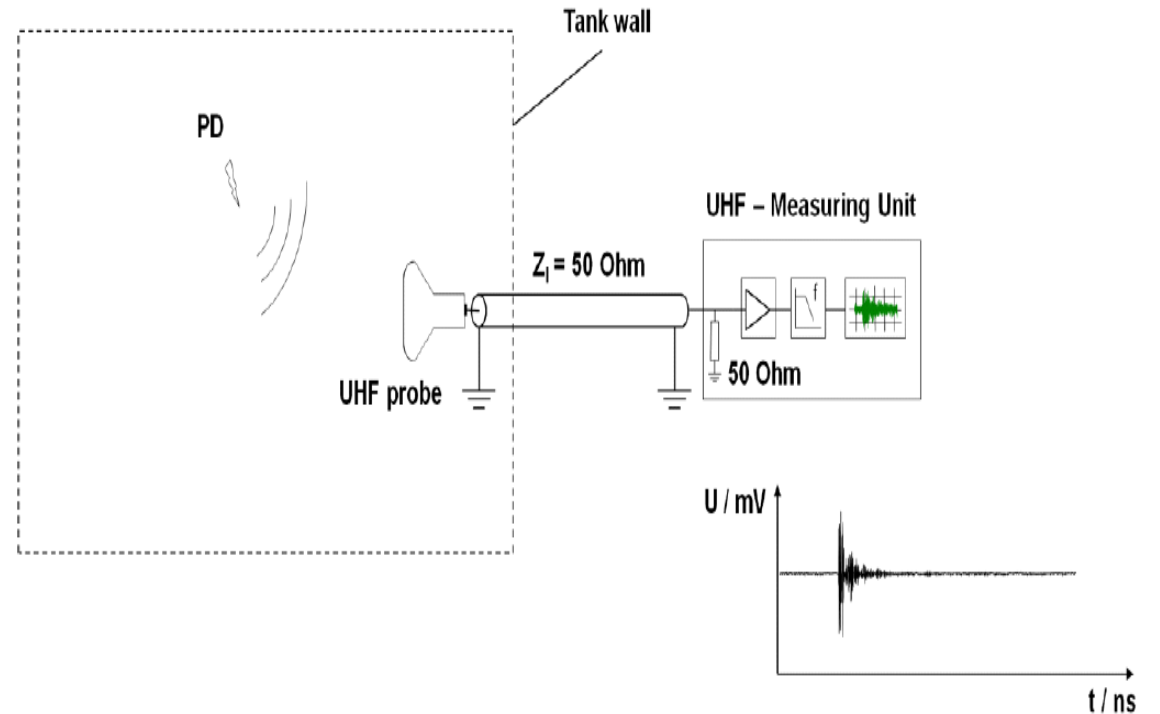


Figure 4-1 Principal of UHF PD Measurements in power transformers [5]

貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ UHF 電磁量測/校準之探討

➤ 超高頻閥門傳感器開發

- 大多數可用的 UHF 傳感器設計用於標準化的 DN50 或 DN80 閘閥，通常稱為“排水閥”。傳感器也適用於斷頭台和球閥。在某些情況下，可能需要轉接法蘭。其他沒有直通開口的閥門類型（例如，截止閥、蝶閥和隔膜閥）不適用於這些超濾傳感器。
- 如右圖AB 分別顯示了適合和不適合 UHF 閥門傳感器安裝的閥門類型。
- 用於例如 DN50 或 DN80 閘閥（包括其他直通排油閥）的閥門 UHF 傳感器如右圖C可用於在運行期間對變壓器進行改造。

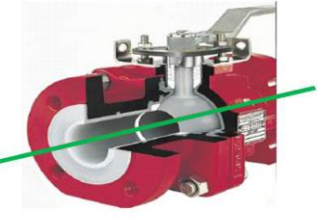
Gate-Valve-Type



Guillotine-Valve-Type



Ball-Valve-Type



A.Potential valve types for retrofit of UHF sensors; valves with straight-through opening/duct

Globe-Valve



Butterfly-Valve-Type



Diaphragm-Valve-Type



B.Oil valves without straight opening/duct; retrofit of valve-type UHF sensors not possible



C.Example of an UHF sensor for DN50/DN80 gate valves

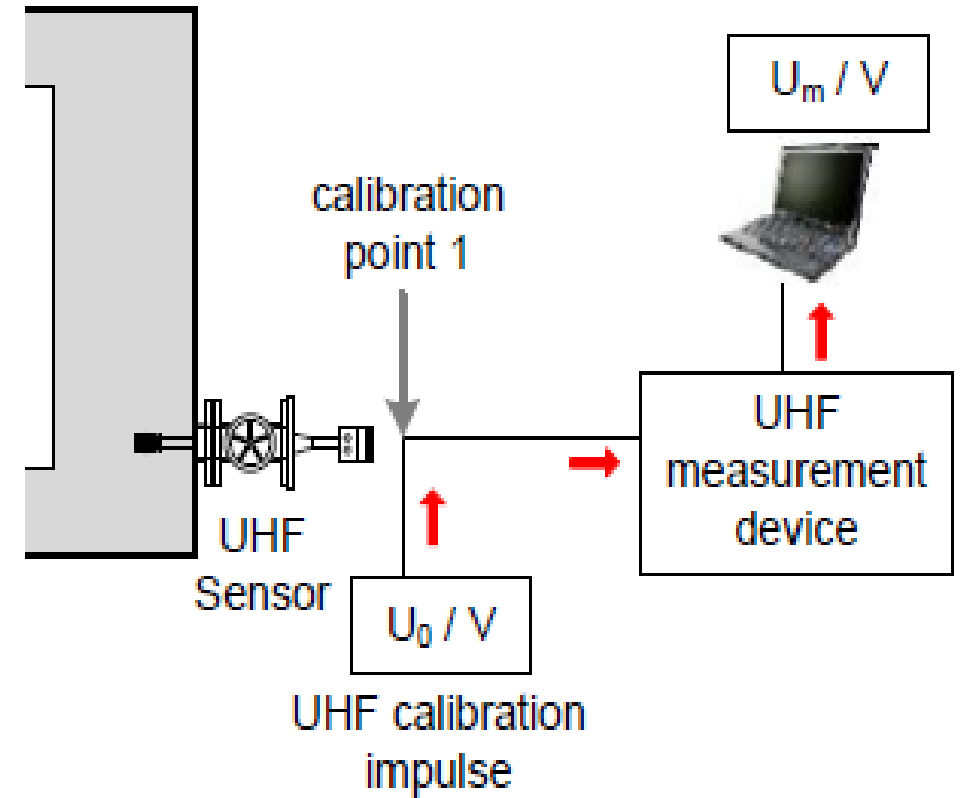
貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ UHF 電磁量測/校準之探討

➤ 測量設備和電纜校準程序

- 一個已知的 UHF 校準脈衝被注入到沒有 UHF 傳感器的測量設置，以校準電纜和測量設備本身如右圖。
- 根據校準測量，校準係數 K_1 可以方程式計算而得
- K_1 補償所有在電纜中損失、測量設備的不準確性和不同設備之間的差異。校準脈衝必須包含足夠的頻譜以覆蓋整個測量範圍。

$$K_1 = \frac{U_0}{U_m} \quad AF_s = \text{mean}_{300MHz \leq f \leq 1GHz} AF(f)$$



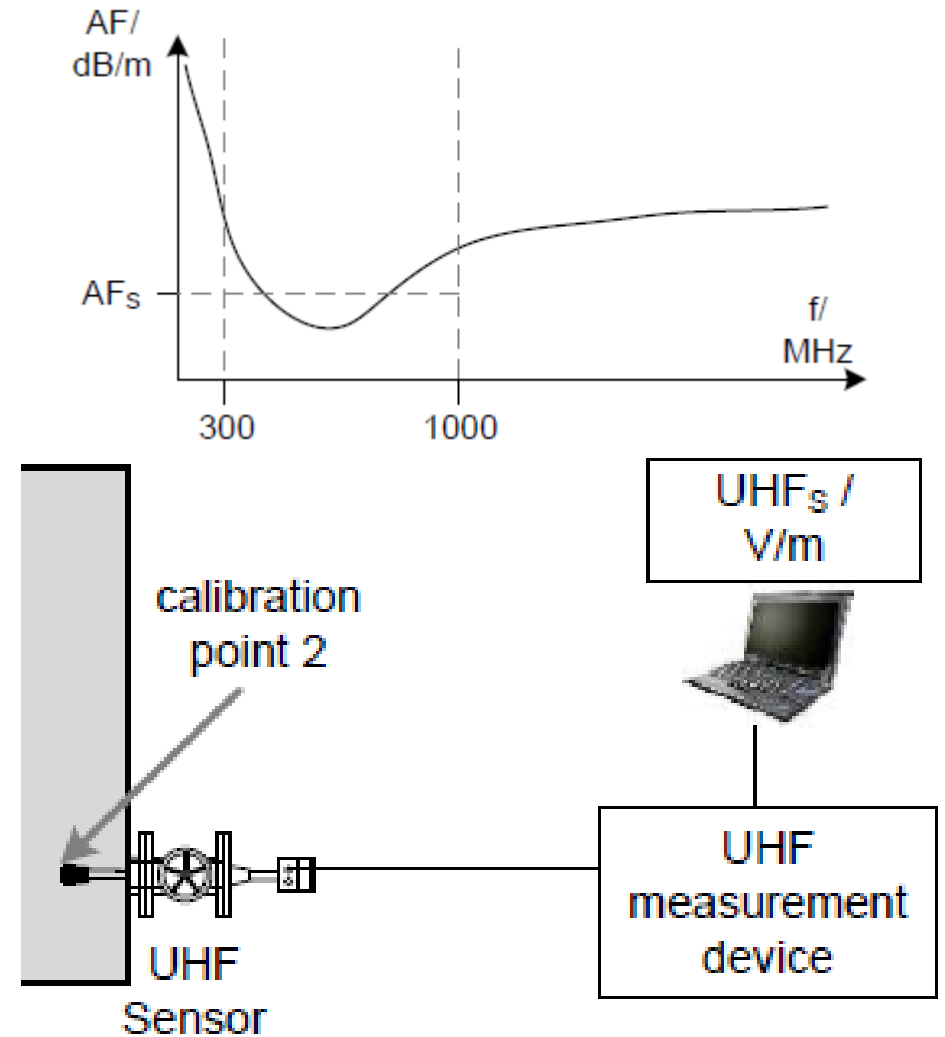
貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ UHF 電磁量測/校準之探討

➤ UHF 傳感器的校準程序

- 為了將傳感器的特性包含在校準路徑，使用其 $AF(f)$ 。要確定 AF 和 UHF 測量實際插入深度相同（此處：50 毫米）。
- 為了簡化校準程序，頻率相關的 $AF(f)$ 可以簡化為標量校正代表最常見的 UHF PD 的因子 AF_S ，將 $AF(f)$ 簡化為平均，建議使用從 300 MHz 到 1 GHz 的平均 $AF(f)$ 作為標量。右上圖顯示了頻率相關 $AF(f)$ 和計算出的簡化天線因子 $Afs = KS$ (校準係數)。
- 變壓器內部偏移的校準點 UHF 天線如右下圖，生成的 AF 以 K_2 去對數以校正時間域信號，以方程式計算而得。

$$AF_S = \text{mean}_{300\text{MHz} \leq f \leq 1\text{GHz}} AF(f) \quad K_2 = 10^{\frac{AF_S}{20}}$$



貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ UHF 電磁量測 / 校準之探討

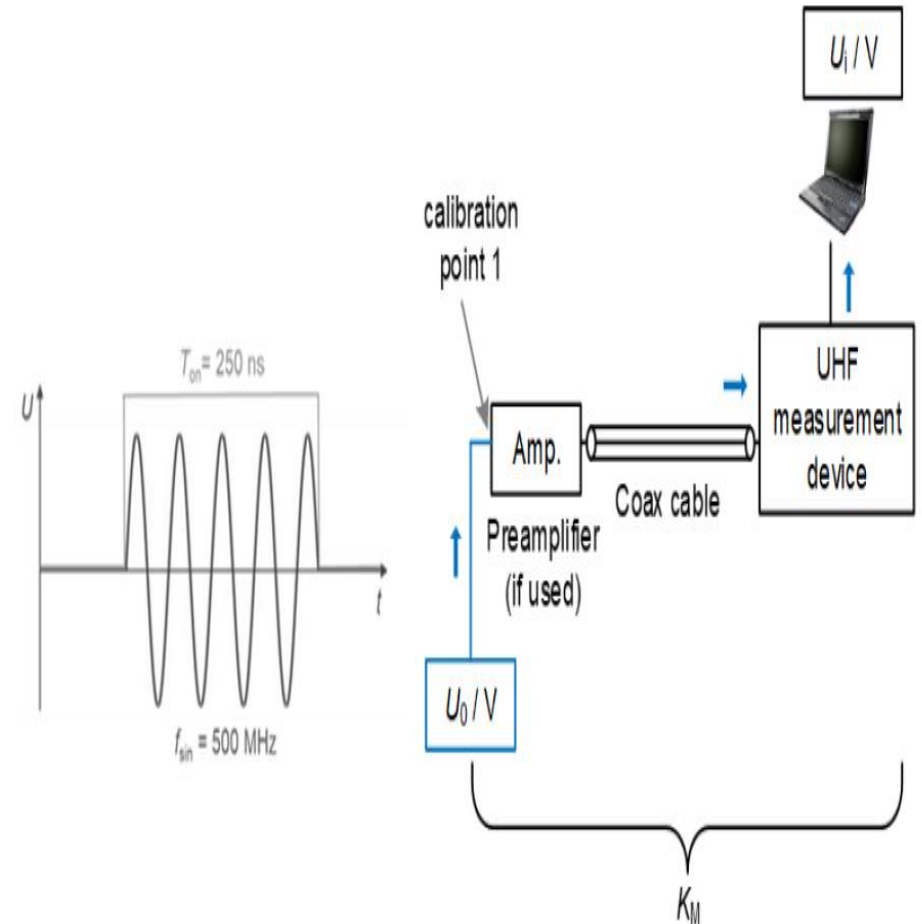
➤ 測量設備的校準方法：KM-FACTOR

- 測量裝置包括記錄儀和連接的電纜、前置放大器和其他附件暴露在定義的校準脈衝下。
- 信號直接注入天線和天線之間的連接器(在未連接天線的電纜/前置放大器)。
- 通過該設備校準，可以計算校準係數 K_M 。
- 通過引入 K_M 校準因子，使用不同的測量設備之間的可比性可以實現任意電纜和附件。

$$K_M = \frac{U_0}{U_m}$$

U_0 ... sinusoidal reference amplitude

U_m ... voltage reading provided by device



貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ UHF 電磁量測/校準之探討

➤ UHF 傳感器校準方法：KS-FACTOR

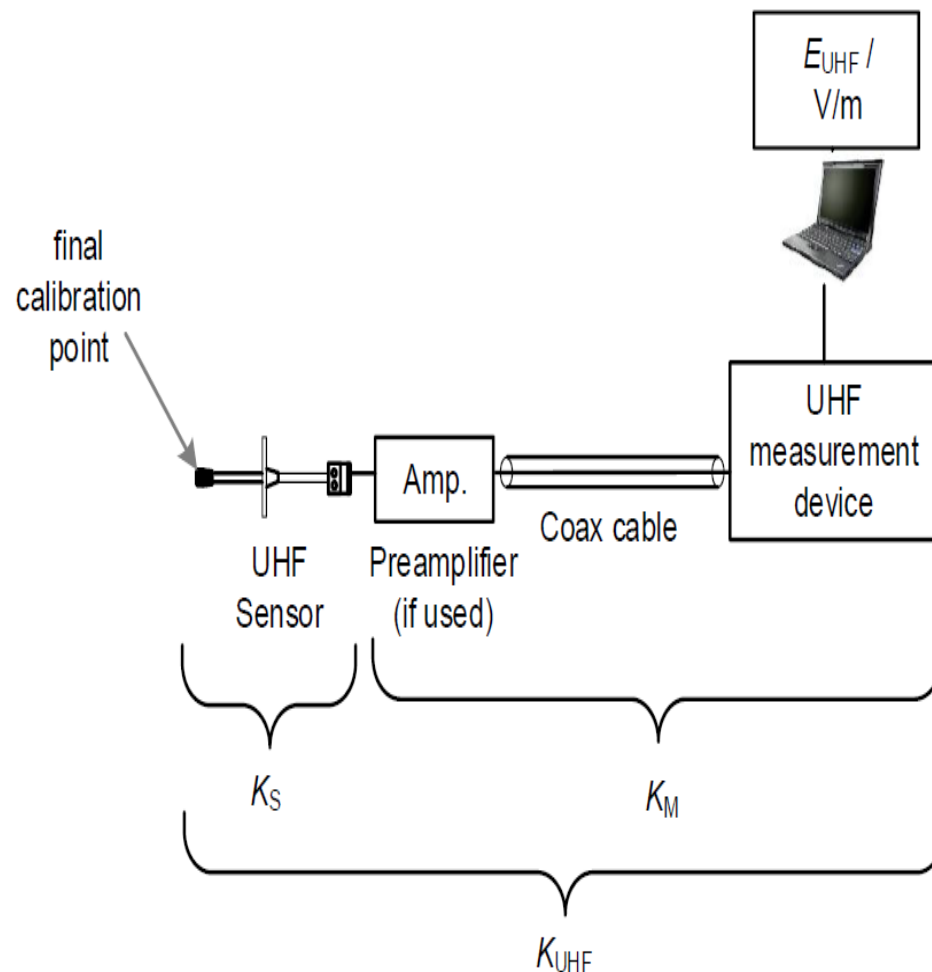
- 為了將傳感器的特性納入校準路徑，其頻率依賴天線因子 $AF(f)$ 是需要的。 AF 描述了外加電場強度與 UHF 傳感器產生的輸出電壓之間的轉換。**低 AF 會產生天線高靈敏度**如下方程式定義。
- 製造商提供的包含傳感器 $AF(f)$ 的“校準表”或“常規測試報告”被視為 UHF 校準的先決條件，沒有已知 $AF(f)$ 的 UHF 傳感器不能用於校準的電磁 PD 測量。

$$AF(f) = \frac{E(f)}{U(f)}$$

$U(f)$... voltage at the antenna terminals

$E(f)$... electrical field strength at the antenna of the incident electromagnetic wave generated by PD

(PD 產生的入射電磁波在天線處的電場強度)

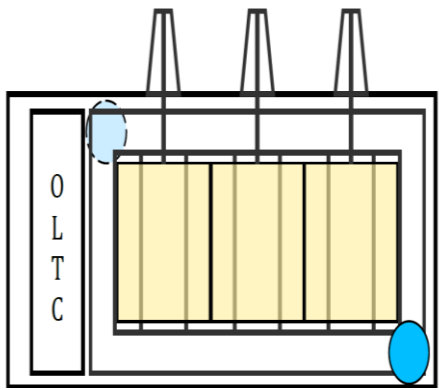


貳、Cigre 量測方法改進研究

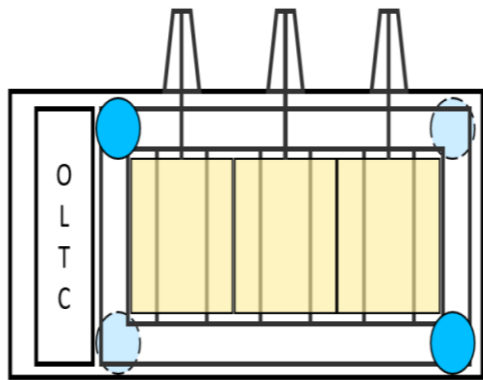
◆ UHF 電磁量測/校準之探討

➤ 變壓器電源上放置 UHF 傳感器的建議

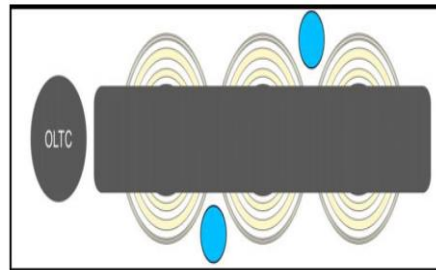
- PD UHF 傳感器應分別放置在繞組最高點和最低點的上方和下方



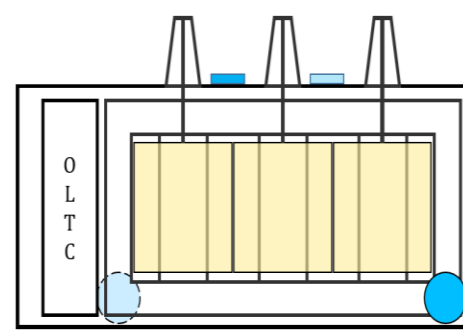
PD偵測傳感器



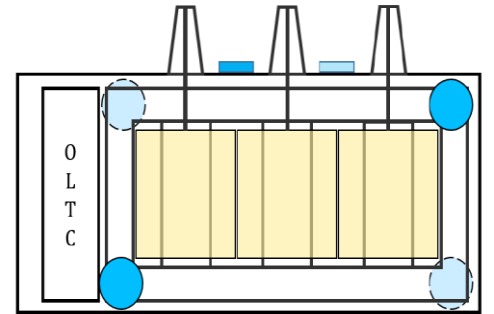
PD定位傳感器



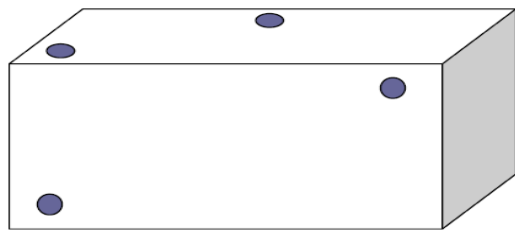
傳感器放置箱頂



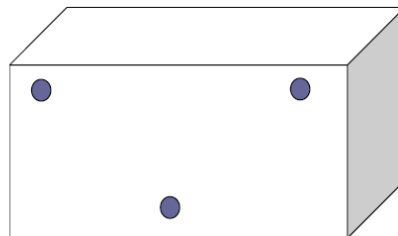
4支傳感器放置
箱頂及油槽壁



6支傳感器放置
箱頂及油槽壁

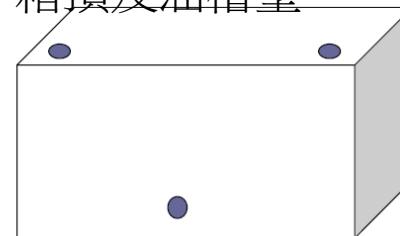


4支傳感器放置
箱體角落



6支傳感器放置箱體角落

OR



貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ FAT 與 SAT PD 量測之改進/建議

➤ 工廠驗收測試 (FAT) 的定義

- 一般來說，工廠驗收測試 (FAT) 和現場驗收測試 (SAT) 的目的是檢查變壓器是否滿足契約要求。
- FAT 通常發生在製造商的工廠於生產過程結束時，**驗證製造的產品是否符合內部和外部質量標準**以及特定訂單的契約要求，例如保證損失。
- 由於電力變壓器通常根據客戶的特定要求進行設計，**因此 FAT 通常由型式測試和例行測試組成，以驗證變壓器的設計和製造品質。**

貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ FAT 與 SAT PD 量測之改進/建議

➤ 現場驗收測試 (SAT) 的定義

- SAT 旨在驗證變壓器自出廠後經由運輸與安裝過程，變壓器的狀況沒有發生變化。
- SAT在最終位置執行現場 PD 量測驗收，視為加壓送電程序的一部分。
- IEEE C57.152-2013 定義：現場變壓器測試主要針對運輸、安裝和服役老化、維護等兩類變壓器壓力源造成損害之確認。

貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ FAT與SAT PD 量測之改進/建議

➤ UHF量測範圍內影響噪音源收集

□ 影響測試電壓的干擾源：

- 鄰近高壓電電暈
- 電路中的開關操作
- 帶有換向器或晶閘管功率控制的機器
- 無線電發射器、移動通信信號
- 測量裝置的自生噪音
- ETC

□ 高壓測試時的干擾源：

- 送電中的局部放電
- 測試電壓中的諧波
- 高壓端子上的 PD
- 接觸不良引發噪音
- ETC

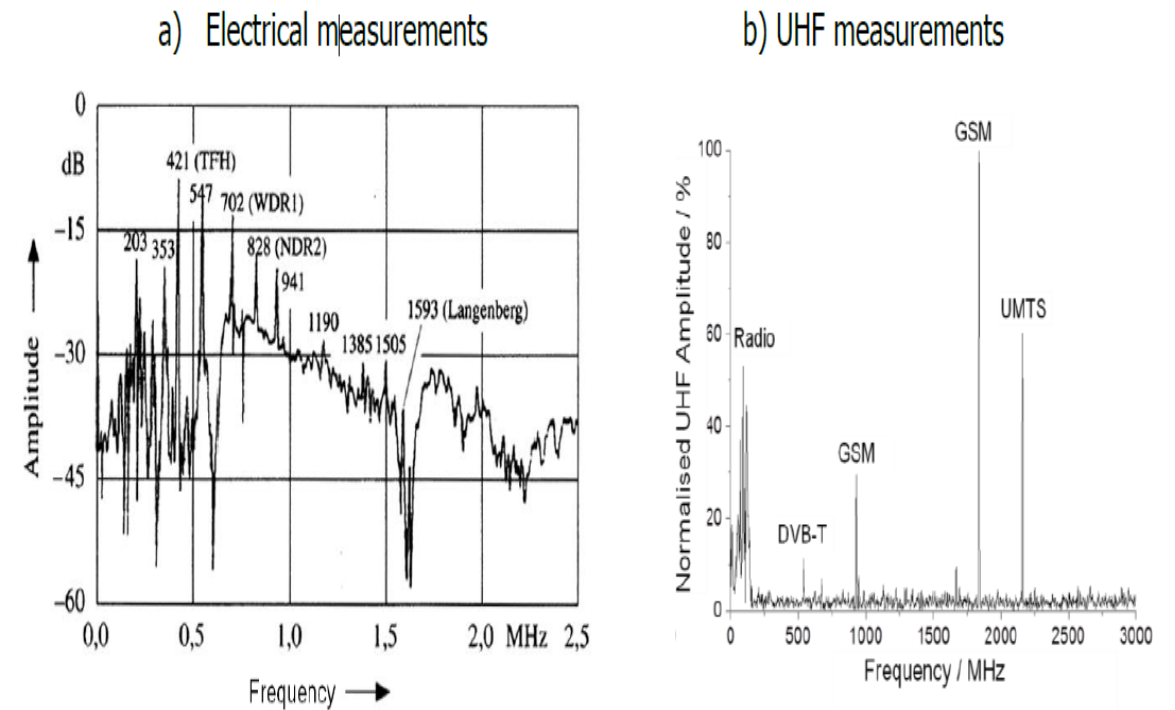


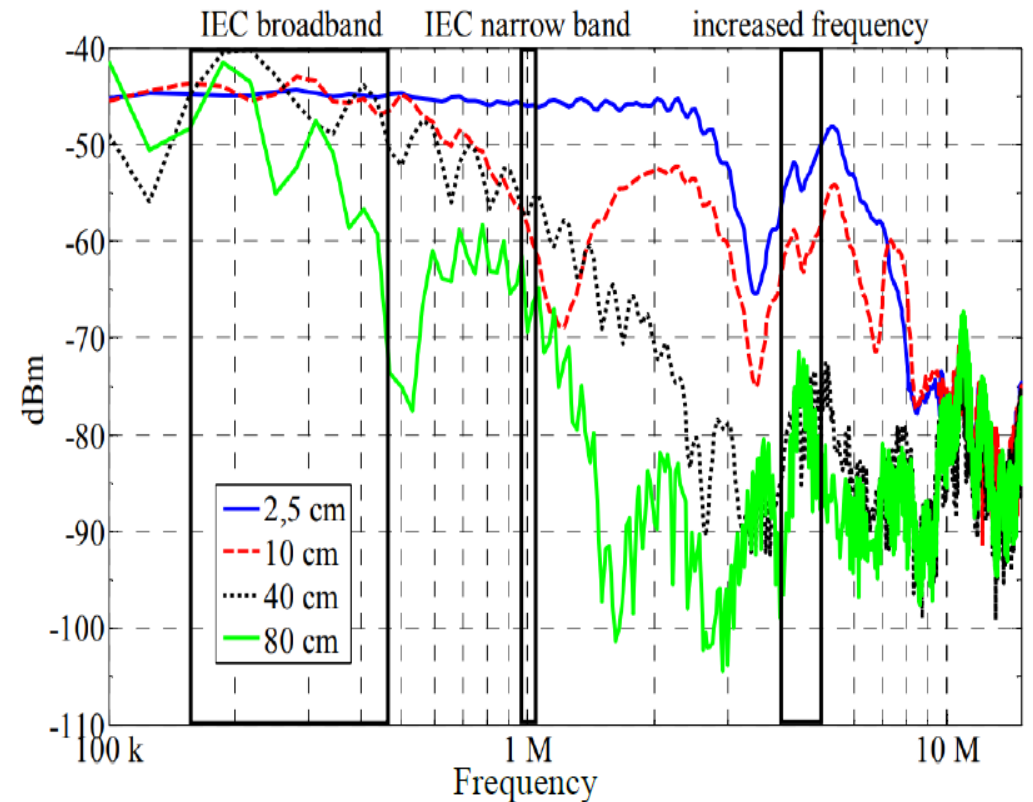
Figure 5-11 Narrow band disturbances during online measurements using amplification [5]

貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ FAT與SAT PD 量測改進/建議

➤ 傳感器和系統及可測量信號設計改善

- 模擬了變壓器繞組不同位置的 PD 源，並測量了真實 PD 脈衝的脈衝頻譜，如右圖。從該圖中可以注意到頻譜在低於 300 kHz 的頻率下具有更好的穩定性；這將確保穩定性測量 PD 值並保持準積分過程的有效性。
- 顯示的 PD 脈衝頻譜顯示，在正確且符合 IEC 60270 的設置的情況下，電荷讀數將在整個繞組中保持一致。這證實了 IEC 60270 的建議，該建議指出，對於帶有繞組的測試對象，上限截止頻率 f_2 應降低到幾個 100 kHz 甚至更低。
- 此外，IEC 窄帶測量會導致重大錯誤。例如 PD 在繞組內部『深處，距離校準點 80 cm』，則 500 kHz 中心頻率進行窄帶測量會導致 30 dB（因在數 32）的測量誤差（右圖綠色光譜）。



3-2 The pulse spectrum of a PD source stimulated at different winding positions

貳、Cigre 量測方法改進研究

◆FAT與SAT PD 量測之改進/建議

➤藉由優化的量測設置達到優化信噪比的量測

- 測試源的配置：
 - ✓ 無 PD 高壓源電路
 - ✓ 無 PD 高壓連接
 - ✓ 合適的傳感器和放大器（頻率300 - 750 MHz間）**接地**）。
- 測量電路的配置：
 - ✓ 窗口傳感器代替閘門 UHF傳感器
 - ✓ 優化閘門 UHF 傳感器的插入深度
 - ✓ 選擇性濾波器抑制無線電應用（300 MHz 高通 + 750 MHz 低通）
 - ✓ 具有低阻尼和良好屏蔽的電纜（例如 RG 214）
 - ✓ 通過性能檢查展示功能
 - ✓ 在連續工作無線電信道和隨機噪聲源之間選擇一個低噪聲區域（低環境干擾信號，例如，用於無源射電天文保留頻率範圍 608 - 614 MHz）
 - ✓ 在測量電路中使用諧振頻率（性能檢查）
- 正確的接地和屏蔽對於靈敏的 UHF 測量至關重要。電力變壓器的油箱起到屏蔽作用，但需要接地（通過低高頻阻抗）。**建議將測量電路單獨接地以避免UHF 寄生電流的影響**（傳感器上的低電感）。

貳、Cigre 量測方法改進研究

◆FAT與SAT PD 量測之改進/建議

➤ 藉由優化電壓源達到優化信噪比的量測

- 對於 SAT 條件，除了測量系統之外，最具挑戰性的部分是電壓源。不同的電壓源用於高壓測試設施和現場供電。
- 為了驗證 UHF 行為，使用了帶有變壓器測試場組件的測試電路，用於 FAT 條件(如上圖)。以 FAT 的電壓源 UHF-PD 行為驗證的測試佈置如右圖，帶有內置濾波器 (1) 為升壓變壓器 (2) 供電的 EPS 型高壓電源 UHF 傳感器 (3) 安裝在升壓變壓器的排油閥上。
- 下圖 (左) 顯示了背景噪音和工作電壓源的測量光譜。在 100 MHz - 2 GHz 的 UHF 範圍內記錄的頻譜在電源的兩種工作狀態下非常相似，看不到電源的影響。
- 下圖 (右) 的測量頻譜表明，變頻器不會影響在 100 MHz - 2 GHz 範圍內的變壓器上進行的 UHF 測量的基本噪音。

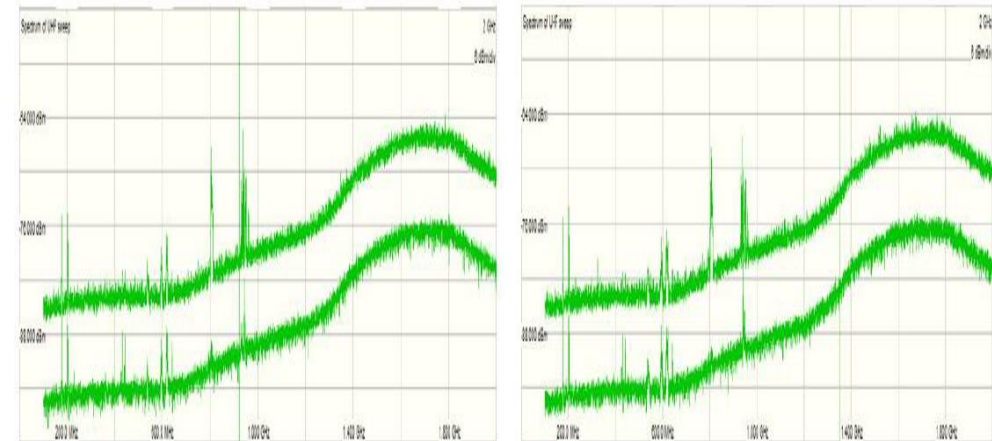
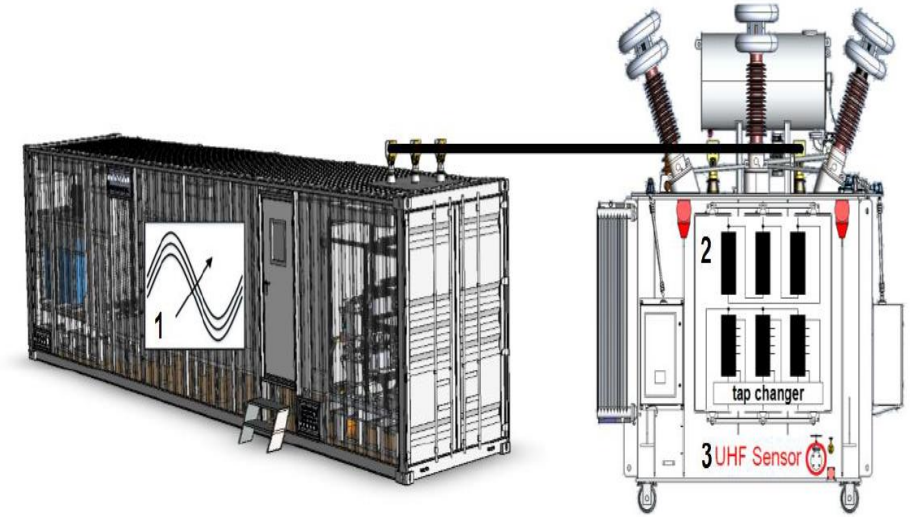


Figure 5-20 UHF spectra: left) noise level

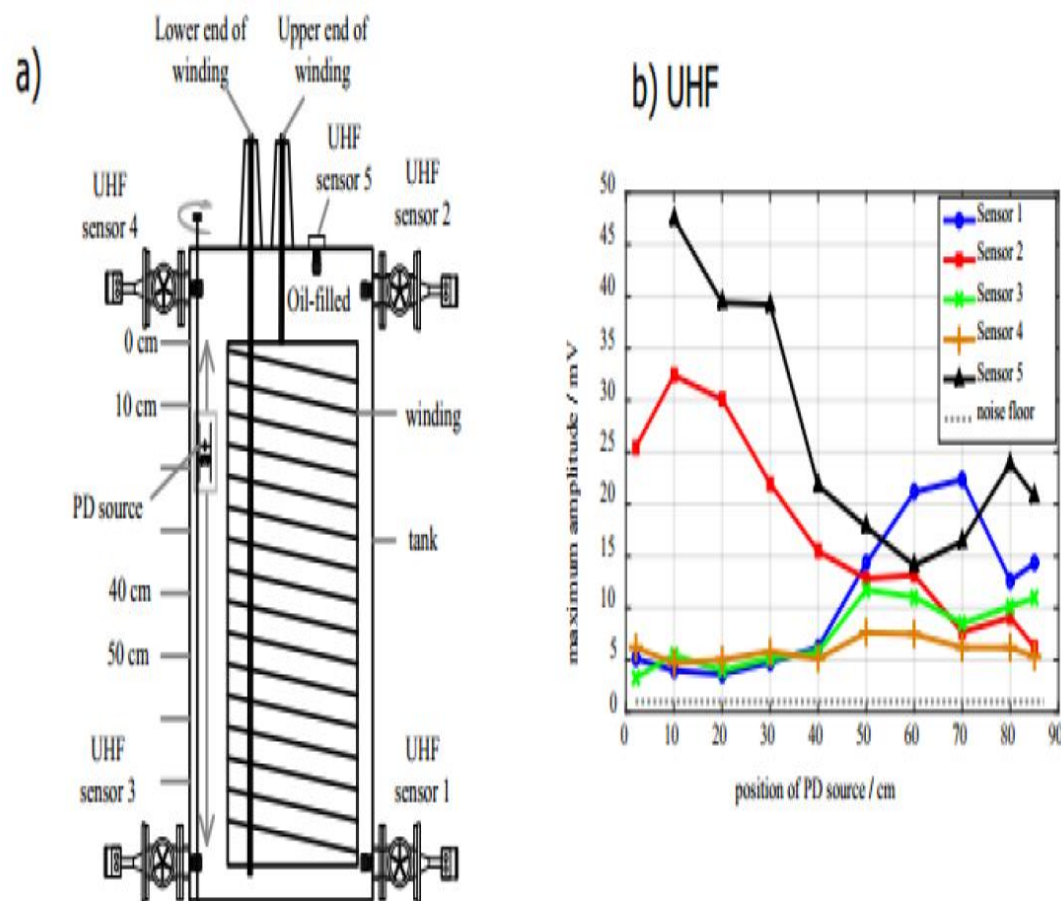
right) Converter [in operation] [64]

貳、Cigre 量測方法改進研究

◆FAT與SAT PD 量測之改進/建議

►傳輸路徑的影響/改善

- 右圖a為實驗裝置，合成 PD 源由通過電容器和充氣放電管連接的兩塊銅板組成(GDT)。一塊銅板與地電連接，另一塊通過其雜散電容耦合到高壓繞組。它提供了可重複的、相位穩定的、恆定的電荷轉換。恆定的原始 PD 電荷為 1000 pC，它會發出恆定的電磁輻射，因此可用作 UHF PD 源。
- 實驗過程中，改變PD源的位置，逐步增加灌頂與PD源的距離。電氣測量針對使用的每個頻率範圍進行校準。寬帶 UHF 測量不需要重新校準，但需要了解不同傳感器的天線係數。右圖 b 顯示了在變化PD源位置時每個傳感器的測量傳感器電壓。如果與PD源的距離增加（請注意傳感器 1 位於水箱底部），則傳感器 1 和 2 的信號會減小，因為在均勻傳播路徑中阻尼約為 2 dB/m。

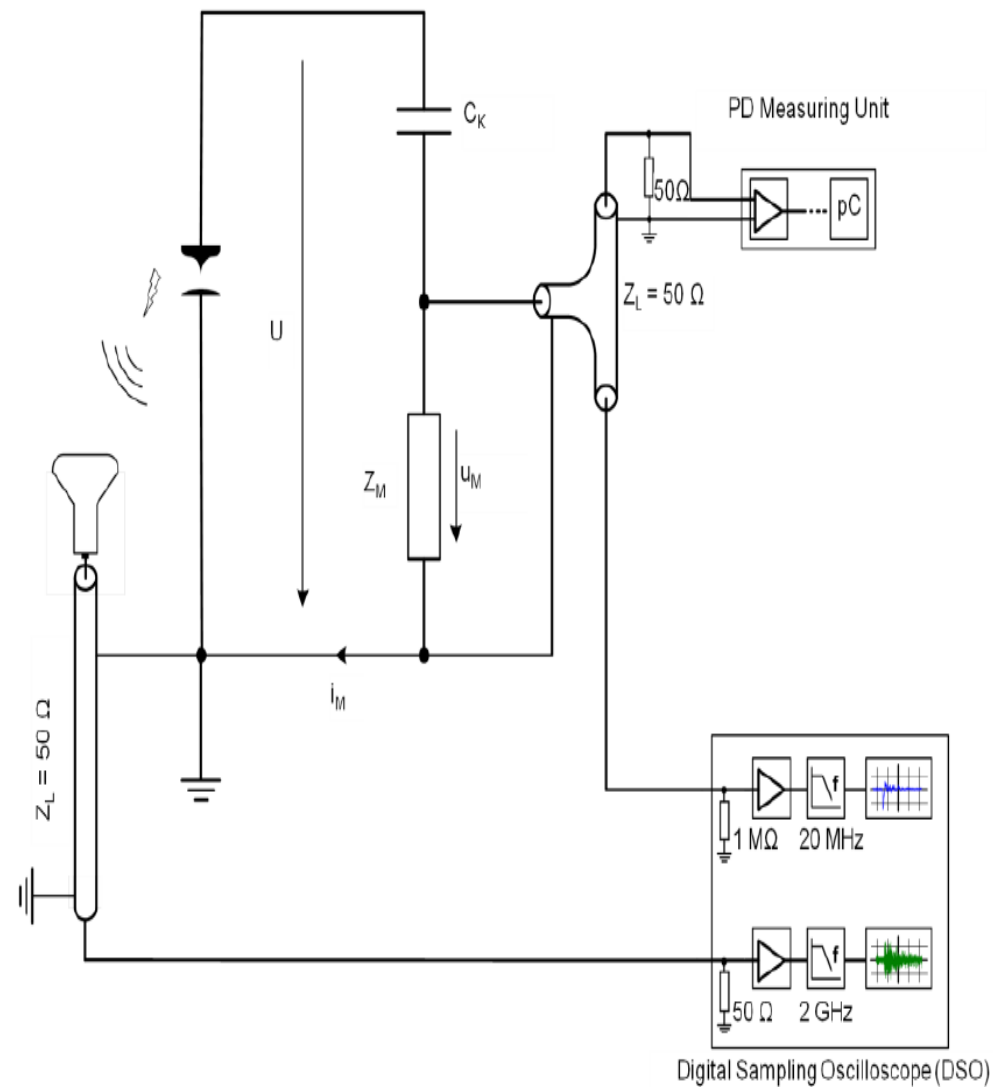


貳、Cigre 量測方法改進研究

◆ FAT與SAT PD 量測之改進/建議

➤ UHF信號與 IEC 60270 的相關性探討

- 為了比較 UHF 信號幅度以及視在電荷量，IEC 測量方法與 UHF 測量方法同時運用，如右圖的設置。
- 數字採樣示波器 (DSO) 的一個通道是用來量測阻抗 Z_M 的電壓信號，代表符合 IEC 60270 的四極桿。第二個通道同時測量來自 UHF 探頭的相關 UHF 脈衝。
- 經由該設置，UHF 信號和電氣的PD 信號可以連續測量，符合依據 IEC 60270 相關性和分析的量測要求。



貳、Cigre 量測方法改進研究

◆FAT與SAT PD 量測之改進/建議

➤經由提高 UHF 測量的重現性和可比性，對改進 PD 驗收測試提供下列建議：

- 為實現 UHF PD 測量的 FAT 或 SAT 測試的可比性，必須滿足一些要求。所使用的測量系統必須經過校準，因此所有來自系統的影響以及在某種程度上來自設置的影響都必須消除。
- 建議使用窗式 UHF 傳感器代替閥門式 UHF 傳感器，因為它們更易於使用（無需正確設置插入深度）並且具有更高的靈敏度。

參、未來展望

- ◆ 工廠驗收測試 (FAT) 和現場驗收測試 (SAT) 的主要改進是可能實現 UHF 範圍內局部放電 (PD) 測量的一般可比性。
- ◆ FAT 和 SAT 的 PD 測量應根據 IEC 和 UHF 傳感器。因此，檢測 PD 的整體靈敏度最高，並且使用不同的物理傳播機制提供了驗證和確認單個測量值的選項。
- ◆ 與 IEC 相比，在大多數情況下，在 SAT 上進行 UHF PD 測量更容易測量。因此，在 FAT 使用這兩種方法驗證的 PD 測量可以在 SAT 使用至少一種方法來確認。

參、未來展望

- ◆ CIGRÉ 在未來 FAT 和 SAT 期間收集校準 UHF 測量的經驗，並決定可以推導出哪些驗收標準。
- ◆ 使用經過校準的 UHF 測量系統進行的量測，將可能會被引導成為未來的驗收標準。

謝謝聆聽

交流時間



貳、Cigre 量測方法改進研究

□ IEC 60076-3:2013+AMD1:2018 CSV

- ◆ Induced voltage withstand test (IVW)
- ◆ An induced voltage withstand test shall be performed according to the method given in 11.2 with a (phase to earth) test voltage of $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$. If agreed by the purchaser this test may be substituted by an IVPD test with an enhancement voltage of $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$ see 7.3.1.3.
- ◆ **7.3.1.3 Special tests**
 - Induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)
 - If specified by the purchaser, a test shall be carried out according to the method given in 11.3, with an enhancement (phase to earth) voltage level of $(1,8 \times U_r) / \sqrt{3}$ and a PD measurement voltage of $(1,58 \times U_r) / \sqrt{3}$. Alternative higher voltage levels may be used if specified by the purchaser. In particular an enhancement voltage of $(3 \times U_m) / \sqrt{3}$ and a PD measurement voltage of $(1,5 \times U_m) / \sqrt{3}$ may be used if higher.
 - If an enhancement voltage level of $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$ is used this test can substitute for the routine induced voltage withstand test.
 - A shorter duration at the PD measurement voltage may be agreed between manufacturer and purchaser, a duration of 5 min is recommended.

貳、Cigre 量測方法改進研究

□ IEC 60076-3:2013+AMD1:2018 CSV

◆ 11.3 Induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)

11.3.3 Test sequence / The test sequence shall be as follows:

- a) The voltage shall be switched on at a voltage not higher than $(0,4 \times U_r) / \sqrt{3}$.
- b) The voltage shall be raised to $(0,4 \times U_r) / \sqrt{3}$ and a background PD measurement shall be made and recorded.
- c) The voltage shall be raised to $(1,2 \times U_r) / \sqrt{3}$ and held there for a minimum duration of 1 min and only long enough to make a stable PD measurement.
- d) The PD level shall be measured and recorded.
- e) The voltage shall be raised to the one hour PD measurement voltage and held there for a minimum duration of 5 min and only long enough to make a stable PD measurement.
- f) The PD level shall be measured and recorded.
- g) The voltage shall be raised to the enhancement voltage and held there for the test time in 11.3.2.
- h) Immediately after the test time, the voltage shall be reduced without interruption to the one hour PD measurement voltage.
- i) The PD level shall be measured and recorded.
- j) The voltage shall be held at the one hour PD measurement voltage for a duration of at least one hour following the PD measurement.
- l) After the last PD measurement in the one hour period the voltage shall be reduced to $(1,2 \times U_r) / \sqrt{3}$ and held there for a minimum duration of 1 min and only long enough to make a stable PD measurement.

壹、背景

◆ 局部放電與量測/不同的量測方法

➤ 電氣檢測(Electrical Detection) → 電荷傳輸

(優:PD 信號在實驗室中令人信服的記錄、高靈敏度、信號衰減小)

(缺:用於在線不易、靈敏度高易導致假警報、長期狀態監測不可靠、受電磁干擾影響、易受噪音影響)。

➤ 化學檢測(Chemical Detection) → 氣體分析

(優:PD 信號在實驗室令人信服的記錄，高靈敏度。)

(缺:溶解氣體的程度與故障類型區分無相對關係。葡萄糖的量與介電擊穿強度無相對關係)

➤ 聲學檢測(Acoustic Detection) → 聲音的釋放

(優:令人信服的即時結果、用於在線 PD 檢測的設備具有抗噪性、現場在地量測可行。)

(缺:易受環境噪音影響。靈敏度低)

➤ 光學檢測(Optical Detection) → 光發射

(優:可以使用多種化學和物理參數、高靈敏度、抗電磁干擾、體積小重量輕)

(缺:對固體和液體絕緣沒有可行的檢測、無法校準。)

➤ 電磁超高頻檢測(UHF Detection) → 電磁 (EM) 波輻射

(優:適合在線 PD 檢測提高抗擾度、可防止外部噪音干擾、高靈敏度和抗干擾、可靠安全、可抵抗任何感應電流)

(缺:需校準、費用貴、無法提供PD的電荷量)