

高壓配電盤的局部放電分析與實測探討 Analysis and Measurement of Partial Discharge of High Voltage Switchger Panel

陳建勳

Chien-Hsun Chen

國立台北科技大學 電機工系
台灣 台北市

Department of Electrical Engineering
National Taipei University of Technology
Taipei, Taiwan
yoshine76@gmail.com

周至如

Chih-Ju Chou

國立台北科技大學 電機工系
台灣 台北市

Department of Electrical Engineering
National Taipei University of Technology
Taipei, Taiwan
cjchou@ntut.edu.tw

摘要

3-35KV 等級之高壓配電盤的供電可靠度，直接關係到用戶端的供電品質，而配電盤的供電可靠度與有否發生局部放電息息相關，故是值得研究的課題。本文利用高頻電流(HFCT)感測器對高壓配電盤進行局部放電檢測，並針對配電盤中之內部放電、沿面放電、尖端放電進行模型建立與加壓實驗，觀察放電波形特徵與相位分佈之特性，藉此辨識局部放電的種類。同時比較用戶端現場檢測與實驗室資料的放電圖譜，發現相同之放電於兩者之相位分佈有其相似性，此可提供後續局部放電資料庫建立的基礎，做為局部放電自動辨識系統開發的重要依據。

關鍵詞：高壓配電盤，局部放電，相位圖譜

Abstract

3-35KV level of high-voltage switchgear panel power supply reliability, directly related to the customer's power supply quality, and power distribution reliability of the switchgear panel and whether the occurrence of partial discharge is closely related, it is worthy of study. In this paper, the high-voltage current distribution (HFCT) sensor is used to detect the discharge of the high-voltage switchboard. The characteristics of the characteristics and phase distribution of the discharge waveform are observed based on the internal discharge, the along-surface discharge and the tip discharge. To identify the type of partial discharge. At the same time, it compares the discharge pattern of the on-site detection and the laboratory data of the client, and finds that the same discharge has similarity to the phase distribution of the two. This can provide the basis for the establishment of the subsequent partial discharge database, which is developed as the partial discharge automatic identification system Important reference.

Key words: high voltage switchgear panel, partial discharge, phase map

I、前言

局部放電(Partial Discharge, PD)檢測技術是評估高壓電力設備是否存在絕緣缺陷的方法之一[1,2]。由於局部放電對高壓電力設備之絕緣材料造成無法修復的損壞，故近年來，局部放電檢測技術已被應用在高壓設備的出廠試驗以及現場的帶電測試，以評估該設備的絕緣狀態，提高設備運行的可靠度，以期降低設備故障所造成的生命以及財產的損失[3,4]。

在高壓電力設備中，與高壓用戶之供電系統密切相關的設備是高壓配電盤，高壓配電盤中可能存在的設備包括：開關(Switch)、熔絲(Fuse)、斷路器(Circuit Breaker, CB)、比流器(Current Transformer, CT)、比壓器(Potential Transformer, PT)、電力電纜(Power Cable)...等。在長期運行中的高壓配電盤內，上述設備之絕緣材料會因老化而導致絕緣強度降低，亦有可能因為接地距離不足、製造品質不佳、絕緣空間不夠、接觸不良、環境條件的影響...等導致絕緣劣化，這些因素造成的絕緣缺陷在最終擊穿前，往往會先經過局部放電階段，因此高壓配電盤的局部放電偵測與辨識，已是一項刻不容緩的研究課題。

高壓配電盤內的設備發生局部放電時，主要的檢測方法分為兩種：傳統的離線(Off-Line)停電檢測法以及在線(On-Line)帶電檢測法[5]；離線檢測法由於必須停電作業，故通常應用在設備的出廠試驗以及停電保養；在線檢測法由於無須停電，且可利用多種感測器量測局部放電現象，故近年來許多研究以局部放電的在線檢測為主要方向[5-7]。

本文針對高壓(35kV 以下)配電盤以 IEC 62478 標準 [8] 所建議之高頻(High Frequency)與甚高頻(Very High Frequency)頻段，使用高頻電流(High Frequency Current Transformer, HFCT)感測器進行局部放電檢測。針對配電盤中三種常見的局部放電：內部放電 (Internal Discharge)，沿面放電(Surface Discharge)，以及尖端放電(Corona) 進行模型建立與加壓實驗，觀察 HFCT 量測到的放電波形特徵與相位分佈之特性，藉此辨識局部放電的種類。同時在用戶端現場使用相同儀器進行檢測，將檢測到的放電訊號與實驗室資料進行放電圖譜比對，找出相同的量測特徵值，提供後續局部放電資料庫的建立，以做為局部放電自動辨識系統開發的重要依據，提供用戶長期監測高壓配電盤局部放電的解決方案。

II、高壓配電盤及其局部放電檢測設備

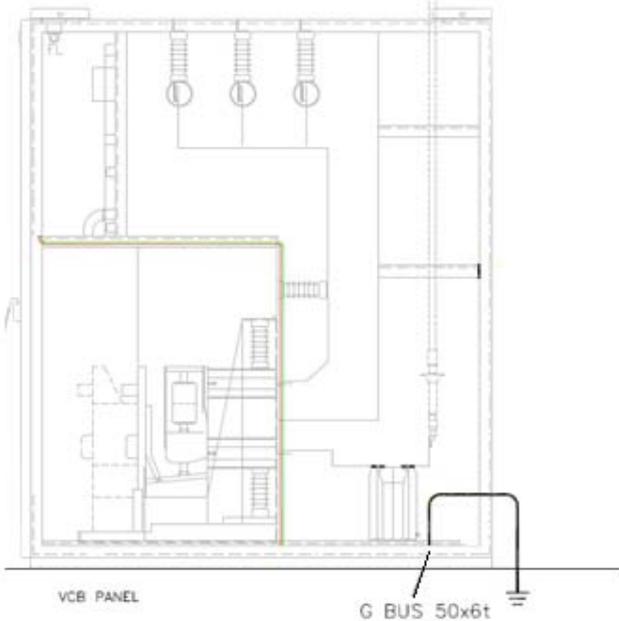


圖 1、高壓配電盤內部結構範例：VCB 配電盤

高壓配電盤主要功能是控制與保護電力系統運轉安全，不同型式的配電盤內部的設備不盡相同，圖 1 為一座 VCB 配電盤的內部結構，其中包括 CB、PT、電力電纜、匯流排(Busway)、支撐礙子等設備。這些設備皆存在絕緣材料以及連接各設備的金屬接點，在製造過程中的人為因素或時間導致的材料老化皆可能使上述設備出現局部放電現象。

局部放電是指發生在電極之間且未貫穿電極的放電現象，主要是由於設備之絕緣材料內部或表面存在瑕疵或污穢，或者是在製造過程中所造成的絕緣缺陷(如圖 2 所示)，當外加高壓時所產生重複擊穿的放電現象。初期的局部放電能量很低，故短時間內並不會影響電力設備的絕緣強度，但是，當長期運轉下重複出現局部放電

時，這些微弱的放電將造成累積效應，使絕緣材料的介電能力逐漸下降進而使局部缺陷擴大，最後導致高壓設備的絕緣擊穿。當高壓配電盤內之設備發生絕緣擊穿時，將因設備斷電而影響用戶端的供電狀況，進而造成用戶的財產損失以及生命的安全。

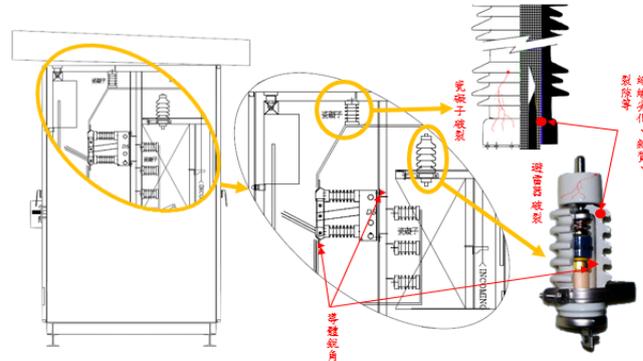


圖 2、高壓配電盤的缺陷示意圖

當高壓配電盤內的設備發生局部放電時，放電的能量將轉換成電磁訊號、聲音訊號、光訊號、化學反應...等釋放於空間中，其中，檢測放電產生的電磁訊號因為可用來評估局部放電的強度、來源、類型，且適用於長期在線監測，故近年來已被廣泛用於局部放電狀態監測和資產管理。常用的電磁訊號檢測法包含：脈衝電流檢測法、暫態對地電壓檢測法、微波檢測法...等[9]。



圖 3、局部放電感測器

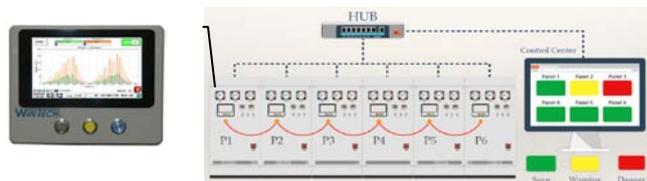


圖 4、局部放電在現監測系統

上述各種電磁訊號檢測法主要是使用不同的感測器(sensor)量測放電的電磁訊號，例如：HFCT 感測器是用來量測脈衝電流(如圖 3-a 所示)，TEV 感測器用來量測暫態對地電壓(如圖 3-b 所示)，而 UHF 感測器用來量測微波訊號(如圖 3-c 所示)；感測器將量測到的訊號轉換成局放檢測儀可處理的電壓訊號，以供後續判斷訊號來

源。圖 4 是利用電磁訊號檢測法配合局放監測儀對配電盤進行長期在線監測的範例，圖中之每座配電盤皆安裝局放監測儀，監測儀將判斷結果透過網際網路傳送到用戶的中央處理電腦，回報與顯示每座配電盤的監控資訊，提供使用者即時了解各座高壓配電盤的絕緣狀況。

為提升在線監測系統對局部放電判斷的準確度，避免設備現場的雜訊干擾造成誤判，建立局部放電系統的資料庫是非常重要的課題。以下章節將透過製作局放模型來分析不同類型放電的特徵，做為局部放電自動辨識系統開發的重要依據。

III、局部放電的訊號分析

1、局部放電實驗之儀器

當高壓配電盤內部的設備發生局部放電時，放電的脈衝電流將會流經設備的接地線，透過 HFCT 感測器可將局部放電的脈衝電流轉換成電壓訊號，以提供後端局放檢測儀分析，HFCT 感測器是一種安裝便利且用途廣的感測器。圖 5 為 HFCT 感測器現場實際安裝範例。本文將以 HFCT 感測器量測局部放電訊號，感測器的規格詳見[10]。感測器的量測訊號透過同軸電纜與一般示波器[11]連接，以進行放電訊號擷取與資料紀錄，提供給後端軟體分析以及資料庫建立。

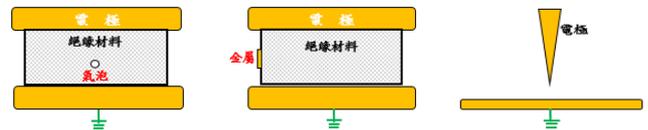


圖5、現場量測之HFCT安裝範例

2、局部放電實驗模型

高壓配電盤內設備的典型局部放電模型如圖 6 所示，包括：內部放電，沿面放電，以及尖端放電。尖端放電通常發生在設備與設備連接的金屬接點處，由於金屬之表面不平整所產生的放電現象；沿面放電通常由於設備表面存在粉塵，加上周遭環境水氣影響所產生的放電現象；此兩種放電現象可透過例行性的停電保養消除。內部放電通常是在製造過程中存在絕緣缺陷，或是

設備運行時間與震動因素所導致的絕緣劣化，因而產生的放電現象；此類放電必須透過更換設備來解決，故需制定停電策略以降低工廠產能損失，是局部放電偵測的重點。由於不同的放電種類，所呈現出的放電圖譜的特徵亦有所差異，故以下將針對局部放電的圖譜特徵模擬與介紹，作為日後辨識局部放電的依據。



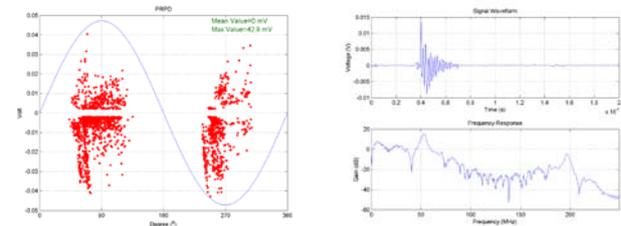
(a)內部放電模型 (b)沿面放電模型 (c)尖端放電模型

圖 6、典型的局部放電模型

3、實驗分析及結果

(1) 內部放電實驗

內部放電模型由兩塊邊長 45mm、厚度 7mm 的正方形環氧樹脂塊組成，其中靠近正極的環氧樹脂塊中間有一直徑 1mm，深度 0.5mm 的鑽孔，兩樹脂塊用一層非常薄的矽膠黏合形成。內部放電的放電相位圖與波形特性，如圖 7 所示。從圖 7(a)可見正負半週的放電強度大致相同，而正半週的放電次數較負半週多。這是因為內部放電模型以及兩個電極之物理結構是對稱，使得兩個電極邊緣電場強度相同，故放電的脈衝強度在相位分佈也是對稱，表現在正負兩半週期的放電波形基本相同；但由於缺陷較靠近正極，所以正半週產生放電的機率較大。放電相位與外加電壓峰值相位存在少量偏移。內部放電模型放電脈衝分散性強，相位分佈具有扇形特徵。放電強度之變化範圍大，但集中在一定相位之內。圖 7(b)是波形圖與頻率響應圖，由圖形可看出，HFCT 感測器檢測的內部放電訊號主要頻率範圍分佈在 1MHz 與 60MHz 之間，訊號的長度小於 400ns。



(a) 相位圖譜

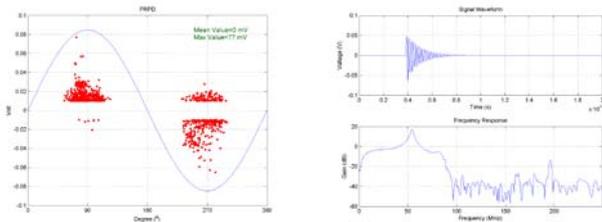
(b) 波形與頻率響應

圖7、內部放電特徵

(2) 沿面放電實驗

沿面放電模型由一塊邊長 45mm、厚度 12mm 的正方形環氧樹脂塊做成，樹脂塊的一側邊黏貼一片 7mm x 2mm 的銅箔，銅箔與兩電極的距離各為 5mm。沿面放

電的放電相位圖與波形特性，如圖 8 所示。從圖 8(a) 可見，正負半週的放電強度與放電次數非常相似，但放電相位分部不對稱，正半週的放電強度集中在放電大小較弱的地方，負半週放電強度分佈則較均勻分散在各放電大小處。這是因為沿面放電模型與電極在物理結構上對稱，但是電極與銅箔間形成多個放電通道，導致放電相位分佈不對稱，由圖形顯示放電相位分佈具有土堆狀特徵。從圖 8(b) 可看出，HFCT 感測器檢測的沿面放電訊號頻率範圍主要分佈在 50MHz 與 60MHz 之間，訊號的長度小於 400ns。

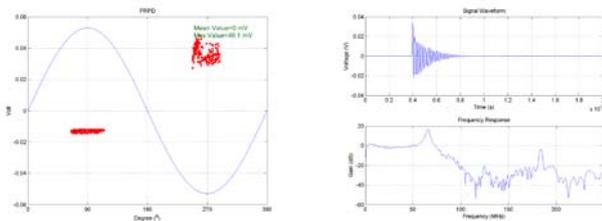


(a) 相位圖譜 (b) 波形與頻率響應

圖 8、沿面放電特徵

(3) 尖端放電實驗

尖端放電由一直徑 1mm 的針以及半徑 35mm 的接地電極所組成，針與地電極的間距為 20mm。尖端放電的放電相位圖與波形特性，如圖 9 所示。從圖 9(a) 可知，正半週放電較密集且相位分佈近似一條橫線，但放電強度較小；負半週放電強度分佈較廣且放電量較大。這是因為尖端放電模型的物理結構不對稱所致。從圖 9(b) 可看出，HFCT 感測器檢測的尖放電訊號頻率範圍主要分佈在 60MHz 與 70MHz 之間，在小於 10MHz 亦有頻率成份存在，訊號的長度約 400ns。



(a) 相位圖譜 (b) 波形與頻率響應

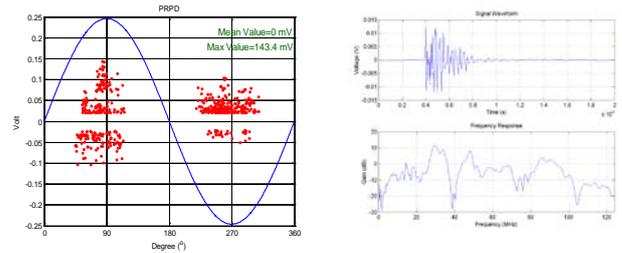
圖 9、尖端放電特徵

IV、現場局部放電檢測案例探討

1、案例一：大眾運輸單位 11.4kV FCB 盤

某大眾運輸單位在年度檢測服務中，於檢測的 600 座配電盤中之一座 FCB 盤接地線處利用 HFCT 檢測到局部放電信號，經雜訊濾除後的局部放電訊號相位分佈及波形特徵如圖 10 所示，由圖 10(a) 觀察可知，相位圖譜的

正負半週放電強度與放電次數非常相似，但放電相位分部不對稱，與實驗室沿面放電相位圖譜特徵相似；放電的波形圖則顯示訊號主要頻率範圍從 30MHz 到 90MHz，訊號的長度約 400ns，如圖 10(b) 所示。經相位比對後判定為配電盤內 R 相設備之放電現象。經確定排查 R 相線路的所有設備，最終確認局部放電信號來自匯流排之表面裂痕，如圖 11 所示。經現場安排停電檢修後複測，該放電現象即消失。



(a) 相位圖譜 (b) 波形與頻率響應

圖 10、案例一檢測結果

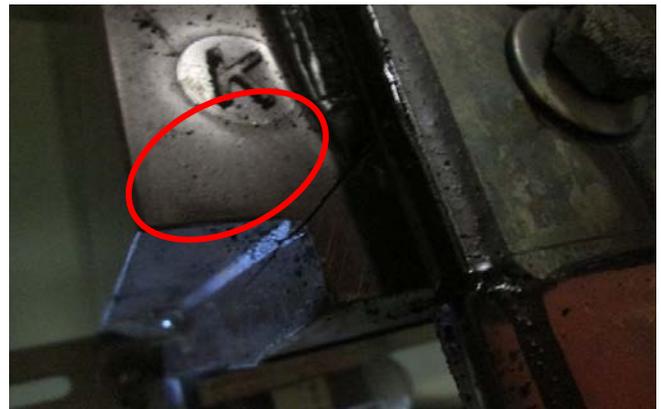


圖 11、停電檢察結果

2、案例二：桃園科技廠 22.8 kV GCB 盤

某知名大型電子廠之 22.8kV 配電盤在 2016 年 7 月 14 日之例行性檢測中，於 8 座配電盤中之一座 GCB 盤接地線處利用 HFCT 檢測到局部放電信號，經雜訊濾除後的局部放電訊號相位分佈及波形特徵如圖 12 所示，由圖 12(a) 觀察可知，正負半週的放電強度大致相同，而正半週的放電次數較負半週多，與實驗室內部放電相位圖譜特徵相似；放電的波形圖則顯示訊號主要頻率範圍從 30MHz 到 60MHz，訊號的長度約 800ns，如圖 10(b) 所示。經相位比對後判定為配電盤內 S 相設備之放電現象。經局部放電定位儀器訂位後確認為 CT 之內部放電，建議汰換 S 相之 CT 後，複測結果顯示此放電現象消失。

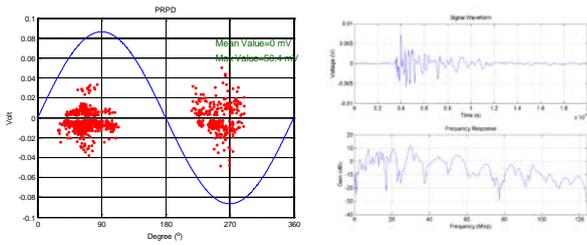


圖 12、案例二檢測結果

通過上述兩個案例介紹可見，局部放電檢測可以及早發現高壓配電盤內潛在的故障，為高壓配電盤預防性維護提供技術上的支持，可有效防止高壓配電盤的突發性絕緣事故的發生。

V、結論

本文利用高頻電流(HFCT)感測器對 35kV 以下的高壓配電盤進行局部放電檢測。在建立三種配電盤中常見的局部放電模型後，於實驗室加壓以觀察放電波形特徵與相位分佈之特性，並與現場檢測結果比較，得到以下結論：

- (1) 不同典型缺陷的放電脈衝相位分佈有其個別特徵。
- (2) 實驗結果與現場檢測結果在波形雖無觀察到明顯的一致性，但相位分佈有相同的特徵。

故藉由局部放電的相位分佈，可作為辨識局部放電的種類的基礎。藉此建立後續的局部放電資料庫立後，可做為局部放電自動辨識系統開發的重要依據。

參考文獻

- [1] G. J. Paoletti and A. Golubev, "Partial Discharge Theory and Technologies Related to Medium-Voltage Electrical Equipment," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, No. 1, pp. 90-103, Jan-Feb 2001.
- [2] J. E. Smith, G. Paoletti, and I. Blokhintsev, "Hot-spot hunting: Experience with on-line partial discharge analysis as a tool for predictive maintenance for medium-voltage switchgear systems," *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 10, No 5, pp. 41-47, Sep-Oct 2004.
- [3] IEEE 400.3 "Guide for PD Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment."
- [4] E. Gulski, P. Cichecki, F. Wester, J. Smit, R. Bodega, T. Hermans, P. P. Seitz, B. Quak, and F. deVries, "On-site testing and PD diagnosis of high voltage power cables," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 15, No 6, pp. 1691-1700, Dec 2008.
- [5] G. C. Stone, M. K. W. Stranges, and D. G. Dunn, "Common Questions on Partial Discharge Testing: A Review of Recent Developments in

IEEE and IEC Standards for Offline and Online Testing of Motor and Generator Stator Windings" *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 22, No 1, pp. 14-19, Jan.-Feb. 2016.

- [6] S. M. Gargari, P. A. A. F. Wouters, P. C. J. M. van der Wielen, and E. F. Steennis, "Partial discharge parameters to evaluate the insulation condition of on-line located defects in medium voltage cable networks" *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 18, No 3, pp. 868-877, June 2011.
- [7] I. Blokhintsev, C. L. Patterson, B. J. Cassidy, and A. H. Loesch "Advantage of on-line partial discharge continuous monitoring of medium voltage substation," 2009 IEEE Electrical Insulation Conference, Canada, June 2009.
- [8] *High-Voltage Test Techniques—Measurements of Partial Discharge by Electromagnetic and Acoustic Methods*, IEC Standard 62478, 2016
- [9] N. Uzelac, A. Milosevic, and S. Milosavljevic, "New method for in-service partial discharge measurement on solid dielectric switch," CIRE2015 - 23rd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, France, June 2015.
- [10] Retrieved May 1, 2017, from <http://www.wintech-pd.com.tw/uhfct--hfct-sensor.html>.
- [11] Retrieved April 28, 2017, from http://www.lecoln.com.tw/goods_detail/116