

## GIS 電纜終端之現場局部放電量測 On-site Partial Discharge Measurement on GIS Cable Terminations

李長興 邱敏彥 黃智賢  
Chang-Hsing Lee Min-Yen Chiu Chin-Hsien Huang  
震江機電技術顧問股份有限公司

顏世雄  
Shih-Shong Yen  
工業技術研究院 材料與化工研究所

### 摘要

研究顯示局部放電是有效的絕緣診斷手法，特別是針對絕緣材料內的瑕疵偵測。電纜終端因為是現場安裝，故常因人為疏失而造成損害。基此，局部放電特別適合於電纜終端之竣工測試，及日常測試。然而，現場局部放電的最大困難在於雜訊干擾，特別是長電纜更容易檢拾許多訊號。因此，非傳統局部放電檢測的方法遂被提出。該方法主要利用頻帶選用提高訊號雜訊比，藉以增加檢測之靈敏度。本文提出兩個 GIS 電纜終端之現場局部放電量測的案例，分別是竣工測試以及日常測試。測試結果顯示，傳統測試法在現場應用時，易因雜訊干擾而降低靈敏度，而非傳統測試法則因為頻帶選擇而有較好之靈敏度。同時，非傳統測試法在搭配不同的檢測手法下，可以進行局部放電源的定位。

關鍵詞：局部放電、現場量測、電纜終端。

### Abstract

Researches show that partial discharge measurement (PDM) is an effective diagnosis assessing the insulation condition, especially for defect detecting. Cable termination is on-site installation, and is easily damaged by improper workmanship. Hence, PDM is suitable for cable termination acceptance test and routine test. However, the difficulty in on-site PDM is noise interference, especially for long cable picking up various signals. Therefore, non-conventional PDMs are proposed. These methods mainly utilize frequency selection to raise signal-to-noise ratio (SNR), and the sensitivity becomes better. This paper takes two examples of on-site PDMs on GIS cable termination for acceptance test and routine test. Test results show that conventional PDM has poor sensitivity due to the noise interference, and non-conventional PDM has good sensitivity resulting from frequency selection. At the same time, combining different non-conventional PDMs, the location of PD source is possible.

**Keywords:** partial discharge, on-site measurement, cable termination.

### I. 前言

局部放電係指發生在絕緣材料內部，但未及橋絡兩端電極的放電現象。發生原因多是局部電場強度高於崩潰之電場強度，導致放電現象發生。常見之原因為瑕疵造成內部電場分佈不均勻，如空洞、裂縫、雜質等。

每次發生局部放電時，通常伴隨著數種現象，如光、聲音、電場暫態。局部放電量測即是量測這些現象來偵測是否有局部放電現象的存在[1-6]，如圖 1 所示。

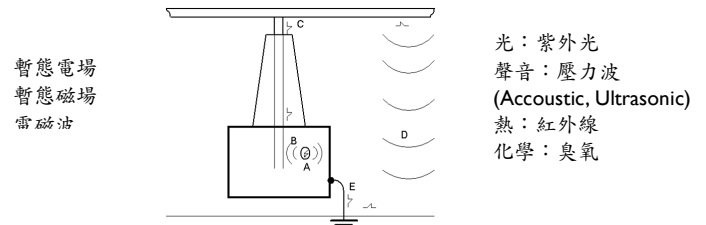


圖 1：局部放電現象與量測手法

這些量測手法又可略分為兩大類：電氣訊號和非電氣訊號。其中，非電氣訊號的量測手法因有較多使用上之限制，故通常以電氣訊號量測為主流[1,2]。由於局部放電量測的目的主要在於偵測絕緣材料內之瑕疵，故適於用在診斷絕緣材料之狀態。

電纜終端通常都是在現場組裝，故很容易因為現場安裝人員之疏失而受損。筆者經驗顯示，大部份的電纜系統事故皆是導因於電纜終端處理不良。因此，局部放電量測很適合用於電纜終端之竣工試驗及日常測試，用以診斷電纜終端是否有瑕疵，藉以提升系統可靠度。

然而，現場局部放電量的最大挑戰在於背景雜訊的處理。特別是電纜系統，由於長電纜就像天線一樣，會檢拾各式各樣的雜訊，故在量測上更是顯得困難。因此，各式的非傳統測試法的局部放電量測方法陸續被提出。這些量測方法，主要利用量測頻帶的選擇來避免背景雜訊的干擾，以提升信號雜訊比。

局部放電量測之傳統測試法主要規範於 IEC60270，屬於離線測試的方法，優點是靈敏度高，缺點是雜訊抑制能力差，故不適用於現場環境。為因應越來越多之非傳統測試法的局部放電量測，IEC 目前正在起草 IEC62478，主要用來規範非傳統測試法的相關細節，如感測器型式、量測頻寬、及靈敏度等。

本文提出兩個現場 GIS 電纜局部放電量測的典型經驗，用以比較局部放電量測之傳統測試法與非傳統測試法的差異。一組 161 kV 之 GIS 的電纜竣工測試中，加入局部放電量測。分別使用傳統測試法與非傳統測試法，比較兩者之優缺點。另一個亦為 161 kV 之 GIS 電纜，但係為日常測試。在該案例中，僅使用非傳統測試法即檢測出局部放電現象。因此，搭配不同檢測方法，如頻譜及時域分析，成功定位出電纜之局部放電位置。

量測結果顯示，局部放電之傳統測試法，在雜訊干擾嚴重之環境中，其檢測靈敏度受雜訊影響，將大幅下降，故不適用於現場環境。反之，局部放電之非傳統測試法，則因為頻帶選擇避開雜訊干擾，故可以得到良好之檢測靈敏度，故適用於現場環境。此外，在搭配不同檢測手法時，局部放電之非傳統測試法亦可以定位出局部放電訊號位置。

## II. 測試方法

### (1) 局部放電量測

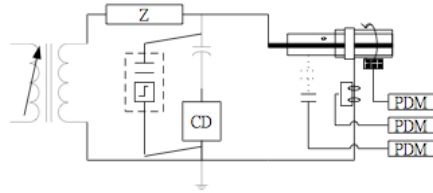


圖 2 局部放電量測接線示意圖

圖 2 所示為常見局部放電量測之接線。圖左所示為電壓源，在標準測試法中，為自耦變壓器或發電機，電壓大小可調整，在線測試法中則為系統電源，電壓為系統電壓。圖右則為量測線路，圖右中間為耦合電容及匹配阻抗的組合，需要停電才能安裝，屬於標準測試法。圖右則為非接觸式的感測線路，因為不需要直接接觸高壓，故在活電中即可量測。

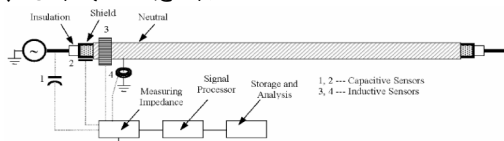
電纜之局部放電量測的傳統測試法，主要規範為 IEC60885-3 中。接線圖如圖 2 左半所示，背景雜訊須在 10 pC 以下。測試時，電壓先緩慢增加至 2 倍  $U_0$ ，維持 10 秒後，再緩慢降壓至 1.73 倍  $U_0$ ，持續 10 分鐘，記錄此時之局部放電量。允收標準為放電量需在 10 pC 以下。

相對於傳統測試法於局部放電量測時，需要先停電安裝耦合電容，非傳統測試法則不需要停電以安裝量測設備，屬於在線量測方法。為因應現行之狀態檢測維修策略，目前有許多非傳統量測方法被開發出來。然而，因為缺乏一致性之規範，故不同量測手法之檢測結果往往無法互通。基此，IEC TC42 已著手制定 IEC 62478 之草稿，用以規範非傳統測試法所需滿足之基本條件，如感測器、量測頻帶、分析方法、以及量測讀值等。

### (2) 現場之電纜局部放電量測

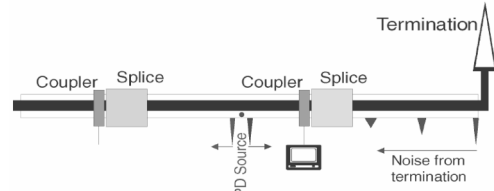
大部份經驗顯示，電纜系統之事故多肇因於電纜終端處理不良，而有瑕疵存在於絕緣材料中。這些瑕疵雖不會直接造成絕緣材料崩潰，但長久下來，瑕疵將會大幅縮短絕緣材料壽命。局部放電量測是一個能有效檢測絕緣材料狀態的診斷方法[4,6]。基此，局部放電量測加入電纜竣工測試遂有其必要性。此外，為避免部份瑕疵需要時間劣化以產生放電現象，故亦建議將局部放電量測加入日常檢測項目中。

目前 IEEE Std. 400.3 即描述電纜系統之現場局部放電量測方法，包含離線測試法和在線測試法，如圖 3 所示。圖 3(a)所示為離線測試法，傳統測試法之耦合電容及非傳統測試法之感測器（圖中之感測器 2、感測器 3 和感測器 4）皆可使用。圖 3(b)為在線測試法，僅可使用非傳統測試法之感測器。



(a) 離線 PDM[4]

圖 3 典型現場 PDM 之測試架構



(b) 在線 PDM[4]

圖 3 典型現場 PDM 之測試架構

### (3) 傳統測試法與非傳統測試法之比較

局部放電量測之傳統測試法屬於離線測試，主要應用於實驗室或工廠內，其背景雜訊之抑制主要依靠外加之遮蔽室。由於傳統測試法使用較低之量測頻帶，其檢測之靈敏度相對較高，可以檢測出小瑕疵。然而，若應用傳統測試法在雜訊干擾大之現場時，則容易因為背景雜訊干擾而大幅降低檢測靈敏度。此外，在現筆者經驗顯示，部份瑕疵需要累積時間以產生局部放電現象，故有可能無法在離線測試法中被檢測出來[4,5]。

局部放電量測之非傳統測試法屬於在線測試，主要應用於現場量測。因為測試時之環境即為平時運轉狀態，故其檢測結果最為貼近實際運轉狀態下之絕緣狀態。此外，非傳統測試法之量測頻帶為寬頻帶，故可以使用頻率選擇方法來濾除雜訊，以大幅增加訊號雜訊比，提升檢測靈敏度。

圖 4 所示為筆者經驗中，於現場環境常見之雜訊頻帶，其頻率可高達 30~40 MHz[6]。圖 5 所示即為非傳統測試法對於雜訊抑制能力之展示。圖 5(a)為現場量測時，未使用雜訊抑制功能所測得之放電圖譜，圖中顯示大量之雜訊存在其中，無法辨識是否有放電訊號存在。圖 5(b)則是利用頻帶選擇功能，將量測頻帶與背景雜訊頻帶錯開，所量測之放電圖譜，顯示有明顯放電現象存在其中。

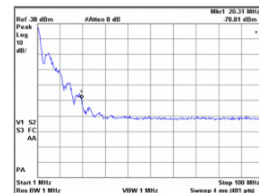
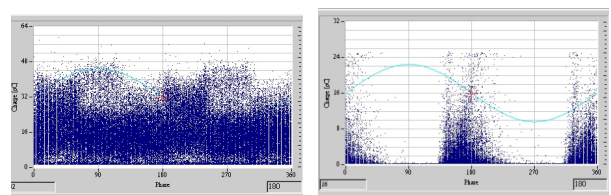


圖 4 典型現場背景雜訊之頻率分佈



(a) 未使用濾波器

(b) 使用 150 MHz 之高通濾波器

圖 5 在線 PDM 測得之圖譜

## III. 電纜竣工測試之現場局部放電量測

2007 年 6 月，一回新設之特高壓電纜線要加入系統，故進行竣工測試之耐壓試驗。在施行耐壓試驗同時，加入現場局部放電量測。

該電纜之額定電壓為 161 kV，且長度為 3 公里。電纜線兩端皆與氣封絕緣開關相連接，相關之斷路器皆為啟斷狀態。該電纜透過一個測試套管與測試回路連結，如圖 6 所示。因為耐壓測試與現場局部放電量測同時執

行，故圖 6 中可觀察到額外之濾波器以及耦合電容器組，用以執行現場局部放電量測。

現場局部放電量測可依耦合方法不同，分成兩大類。一類為傳統測試法，如圖 7(a)所示，需要停電加入量測電路，其頻寬約為 100 kHz 至 500 kHz。另一類為非傳統測試法，如圖 7(b)所示，活線中即可安裝感測器，此例之感測器頻寬可高達 1.3 GHz。此兩類之接線示意圖示於圖 8，與圖 3 之架構相似。



圖 6 現場電源接線圖



(a) 耦合電容 (b) UHF 感測器

圖 7 PDM 感測器

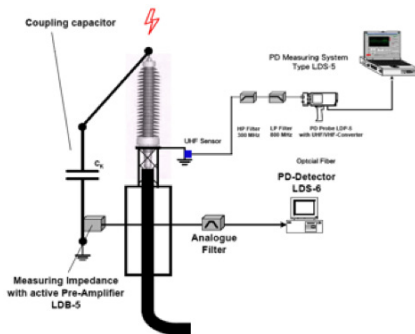
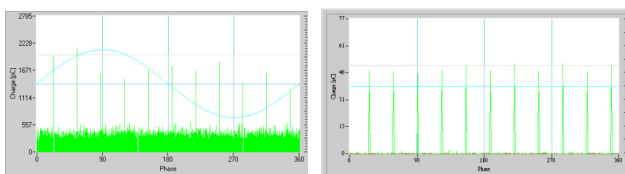


圖 8 現場 PDM 量測系統

在正式進行局部放電量測前，需先進行量測系統的校正。圖 9(a)所示為傳統測試法之校正畫面，畫面中之綠色脈衝訊號即為校正訊號，藍色之弦波訊號為參考訊號，畫面底部之綠色訊號即為雜訊。因為待測電纜之長度長，可等效為一長天線，故會檢拾許多訊號進入量測回路。因此，傳統測試法之校正訊號需使用 2000 pC 檔位，方可有效辨識背景雜訊與校正訊號的差別。圖 9(a)可知，背景雜訊高達 500 pC，即在 500 pC 以下之放電訊號將無法被偵測到。



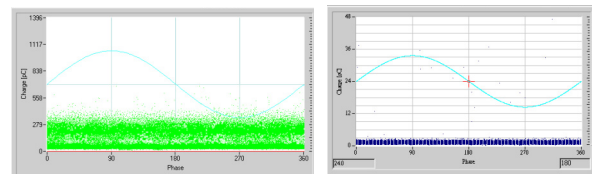
(a) 傳統 PDM (b) 非傳統 PDM

圖 9 校正畫面

非傳統測試法之校正，在未使用濾波器前，該校正畫面亦如同圖 9(a)。在施加濾波器後，則可大幅制抑雜訊，則可得到圖 9(b)之畫面。圖 9(b)顯示校正訊號只有 50 pC，且背景雜訊小於 2 pC。

正式試驗時，施加電壓由 0 V 緩慢增加至 2 倍對地額定電壓，並持續 10 秒鐘。然後，緩慢降壓至 1.73 倍對地額定電壓，持續 10 分鐘，量測此時之局部放電量。最後，緩慢將電壓降至 0 V。

圖 10(a)(b)分別是傳統量測方法和非傳統量測方法的局部放電相位圖譜，兩圖皆顯示沒有局部放電現象產生。然而，圖 10(a)(b)的背景雜訊等級差異很大。傳統測試法因為無法濾除背景雜訊，故在高雜訊環境時，並無法有效辨識局部放電訊號與雜訊。在此狀況下，若有小於 500 pC 之局部放電訊號，則無法被檢測出來，即使用傳統測試法進行現場局部放電量測將有潛藏風險。反之，非傳統測試法則因為其寬頻帶量測特性，可使用適切之濾波器濾除不必要之雜訊，故在高雜訊環境下，仍然有良好的訊號雜訊比。在此狀況下，非傳統測試法在現場局部放電量測中，擁有良好的表現。



(a) 傳統 PDM (b) 非傳統 PDM

圖 10 現場 PDM 測得圖譜

#### IV. 電纜日常測試之現場局部放電量測

過往經驗顯示，許多設備在出廠測試時，皆沒有局部放電現象，但在運轉一段時間後，卻陸續出現局部放電現象。其主要原因為，部份瑕疵點需要時間劣化，方能被檢測出來。在此條件下，竣工測試並無法有效檢測出此類瑕疵。基此，現場線上局部放電檢測遂成為能有效檢測出此類瑕疵的診斷方法。現場線上局部放電量測的最大優點在於，量測組態為真實系統運轉狀態，可測得真實的局部放電情形。本文以一組 161 kV 氣封絕緣開關之電纜終端為例，說明現場線上局部放電量測如何執行。

該氣封絕緣開關為兩回線輸入，即每相皆有兩個電纜終端，共有六個電纜終端。該電纜線一端為氣封絕緣開關，另一端為油浸式變壓器。本例之現場線上局部放電量測係利用 UHF 感測器安裝於電纜終端之接地線上，如圖 11 所示。因為現場背景雜訊很大，故同時使用多組濾波器進行濾波動作。除了相位圖譜外，頻譜及波形亦同步被記錄下來，如圖 12 所示。



圖 11 感測器置放位置



圖 12 量測儀器置放

量測結果顯示，六個電纜終端皆有相似之局部放電圖譜，以及頻譜分佈，如圖 13 所示。圖 13 顯示該訊號為內部放電訊號，而非外部雜訊。為確認訊號來源，筆者亦量測油浸式變壓器側之電纜終端，該側之局部放電量明顯低於氣封絕緣開關側之訊號強度。基此，測得之局部放電訊號係來自於氣封絕緣開關側之電纜終端。

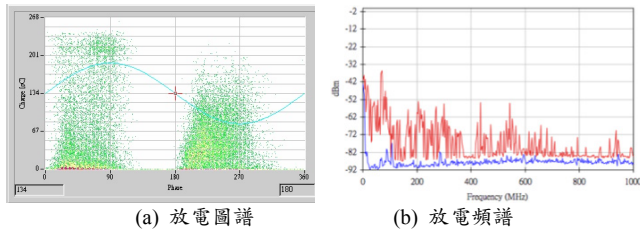


圖 13 #1 S 相電纜終端之量測結果

因為氣封絕緣開關側之六個電纜終端的局部放電大小差距沒有太大，故另利用示波器進行時序分析 (Arriving Time Analysis)，如圖 14 所示。量測結果顯示局部放電訊號來自於#1 S 相電纜終端。

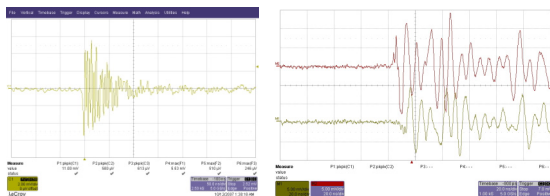


圖 14 用於 ATA 分析之波形  
(50.0 ns/div, 2.0 mV/div, Input resistance: 50 Ω)

因為電纜終端係與氣封絕緣開關直接連接，故局部放電訊號亦有可能來自於氣封絕緣開關內部。基此，氣封絕緣開關亦需執行現場線上局部放電量測，以區別局部放電訊號之來源。本例使用音源法進行氣封絕緣開關之線上局部放電量測。圖 15 為量測結果，顯示無局部放電聲響。如圖 15 所示，若局部放電訊號來自於電纜終端，則音源感測器將偵測不到任何聲響；反之，若訊號源來自於氣封絕緣開關，則音源感測器將偵測到局部放電現象。基此，可以確認局部放電源存在於#1 S 相電纜頭內部。

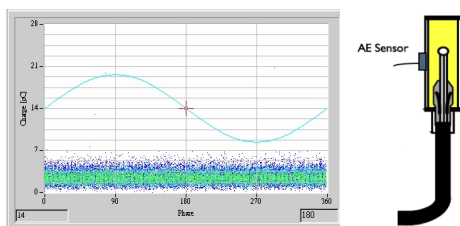


圖 15 使用 AE 感測器量測 GIS 之 PDM

#1 S 相電纜終端解剖時，觀察到電纜絕緣材料與連接端子間存有一個瑕疵，如圖 16(a)所示。圖 16(b)為正常電纜終端之狀態。比較圖 16(a)(b)，可明顯觀察到異常電纜終端在組裝時，少了必需之密封膠帶及半導電膠帶。在長時運轉下，最後導致該瑕疵的長成。



(a) 錯誤安裝 (b) 正確安裝

圖 16 異常電纜終端解剖

#### IV. 結論

如前所述，在現場局部放電量測時，傳統測試法易受高背景雜訊影響，而降低其靈敏度，無法檢測出小量的局部放電訊號。反之，非傳統測試法則不易受背景雜訊影響，仍舊維持良好的靈敏度，可有效檢測出局部放電現象的存在。此外，非傳統測試法因不需要停電安裝感測器，故可活線施作，可被用來作例行性試驗。

非傳統測試法之局部放電量測雖有良好的抗雜訊能力，但其為線上量測，故不容易進行局部放電源之定位。本文利用不同檢測手法進行一組氣封絕緣開關之電纜終端的局部放電源定位。在搭配不同檢測手法，如相位圖譜、時序分析、頻譜分析、以及音源法等，成功地將異常電纜終端定位出來。

非傳統方法的局部放電量測，對於長距離電纜的絕緣狀態診斷有良好表現。此外，在搭配適切地檢測手法時，尚可以有效地將瑕疵點定位出來。

#### 參考文獻

- [1] IEC 60270, High-voltage test techniques-Partial discharge measurements.
- [2] “IEC 62478 – present status of the new IEC Standard on Partial Discharge Testing”, High Voltage Testing, Monitoring and Diagnostics Seminar, Alexandria VA, Sept. 9-10, 2007.
- [3] IEC 60885-3 Test methods for partial discharge measurements on lengths of extruded power cable.
- [4] IEEE Std. 400.3-2006, IEEE Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment.
- [5] Ahmed, N. H. and Srinivas, N. N., “On-line versus off-line partial discharge testing in power cables”, 2001 IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, Vol. 2, pp. 865-870, Nov. 2001.
- [6] Min-Yen Chiu, Chang-Hsing Lee, Chih-Hsien Huang, and Shih-Shong Yen, “The Application of On-line PDM on in-service MV Cable Terminations”, 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-24, 2008.
- [7] Chang-Hsing Lee, Min-Yen Chiu, Chih-Hsien Huang, and Shih-Shong Yen, “Characteristics analysis of sensors for on-line partial discharge measurement”, 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-24, 2008.