

中壓電纜終端處理頭活線局部放電檢測案例探討 The Case Study of On-Line PD Measurement on MV Cable Terminations

邱敏彥 李長興 黃智賢
Min-Yen Chiu Chang-Hsing Lee Chih-Hsien Huang
震江機電技術顧問股份有限公司
Chan-Ching Electric Technique Consulting CO.,LTD
Hsinchu, Taiwan, R. O. C.
Chan.ching@msa.hinet.net

顏世雄
Shih-Shong Yen
工業研究院 材料所
Industrial Technology Research Institute
Hsinchu, Taiwan, R.O.C.

摘要

依據 IEC60270 局部放電測試法不能應用在活線局部放電的診斷測試，因為無法在待測物有電的情況下連接耦合電容到高壓端，如此才發展出非傳統式電磁場耦合測試技術，此耦合技術可以應用在活線中進行局部放電檢測。

本文介紹如何利用 UHF 活線局部放電檢測技術應用在電纜終端處理頭上，並依所檢測出有異常放電的電纜頭案例來探討一些常見的電纜頭施工上的瑕疵，以及其局部放電圖譜的辨識。

關鍵詞：局部放電、電纜頭、耦合電容

Abstract

IEC60270 is an off-line partial discharge measurement, which uses a coupling capacitor connecting with test object to measure partial discharge signal. So IEC-60270 can't be fully applied to on-line partial discharge measurement. Complying with the progressive ability of measuring equipments, the technology of partial discharge measurement utilizing electromagnetic coupling method is achieved. This paper deals how to apply UHF on-line PDM technology for diagnosing cable terminations. The real cases of abnormal cable terminations are used to discuss the defects resulting from installation. And the PD patterns of these cases are also used to identify the mentioned defects.

Keywords: Partial Discharge, Cable Termination, coupling capacitor,

I. 前言

目前電力電纜製造技術的提升，且在品質的控管下，所以一般電力電纜都不會有什麼問題出現，但是因電纜故障造成中壓電力系統的短路停電事故卻時有所聞，因此根據統計[1]電纜事故發生在電纜本體的只佔了11%(圖1)而已，其餘大部分的電纜事故都發生在電纜接續匣(Cable Joint)及電纜終端處理頭(Cable Termination)上，而造成電纜接續匣或電纜頭事故的原因，不是電纜頭本身材質上的不良，反而是大多為安裝過程中施工上的瑕疵所致，若施工上因切痕過深或殘留空氣及導電雜質在電纜頭裡等瑕疵，或是外半導與應力錐處理不良，這些瑕疵都會造成電纜頭內部電力梯度的分佈不均，並產生局部的過壓放電，在不正常的電應力破壞下會導致絕緣劣化，最後崩潰並造成短路事故。

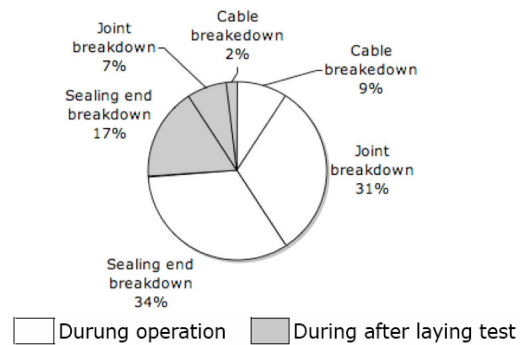


圖 1：電纜事故原因統計圖

因電纜的電容值相當大，若用商用頻率在中壓電力電纜的測試上，則必須用相當大容量的加壓設備才行，雖然國外已經開始應用極低頻(VLF)來測試電力電纜，但目前國內仍仰賴直流耐壓測試為主，不過介質電容在直流電路上視為開路，所以直流耐壓測試無法測試出絕緣介質內的瑕疵，就算較大的瑕疵缺陷也無法檢出[2]，此外，直流耐壓測試在亦可能會因空間充電效應而危害電纜絕緣[3]。基此，直流耐壓測試多在用來作電纜送電前的確認。

所以傳統之絕緣電阻、介質功率因數等測試法主要是檢測整體絕緣能力之良窳，對於缺陷之檢出則較為困難[4]。而局部放電測試則可以檢測出絕緣材料內的瑕疵缺陷，且近年來因測試儀器之進步，可利用缺陷電場不均勻較易產生局部放電訊號的特徵，進行局部放電檢測，以提早發現安裝或運轉中所出現之瑕疵，避免事故之發生[5]。

依據 IEC60270 標準法測試局部放電時，待測試電纜必須連接耦合電容，而且在有電的情況下要如何連接耦合電容卻成了最大的問題，在經濟效益上也無法隨時停電來安裝耦合電容，如此標準測試法才無法應用於活線(on-line)中測試診斷部放電，另外大容量的加壓設備也是個問題，基於這幾點因素下，所以才發展出非傳統式電磁場耦合測試技術，此耦合技術可以應用在活線中進行局部放電檢測，當然電磁場耦合技術可應用在各種高壓設備上，但本文只針對電纜頭的應用來進行探討。

本文首先會探討活線局部放電測試原理及方法，然後應用在實際現場測量，再以檢測到有異常放電的電纜頭，來探討一些常見因施工上所造成電纜頭的瑕疵缺陷，藉此來降低電纜頭事故的比例。

II. 本研究的活線局部放電測試原理

當電纜頭內部絕緣材料因瑕疵發生局部放電時，其產生的暫態電流時間約在奈秒(nanosecond)的範圍以

內，所產生的頻率從幾 MHz 到數百 MHz 以上不等，此暫態電流 $IE(t)$ 會以行進波的方式沿著接地線及遮蔽層前進，並在接地線及遮蔽層產生一個磁力線 $B(t)$ (圖 2)，因此可利用電感式感測器來感應此磁力線，這就是磁場耦合局部放電訊號的模式，通常使用電感式感測器如高頻比流器(HFCT)或羅式線圈(Rogowski Coil)等由接地線來測量局部放電的訊號。

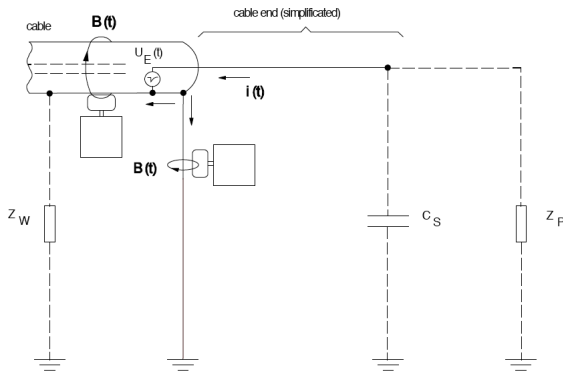


圖 2：電纜頭放電的等效電路

一般高頻比流器或羅式線圈的頻率響應大都在 20MHz 以下，但是電力系統所產生的雜訊也都在這個頻率範圍以下，圖 3 是由接地線利用電感式感測器測量的背景雜訊頻譜，大部分的雜訊也都在 20MHz 以下，因此在活電測試下若使用此頻帶所取得的訊號與雜訊比會非常的低，於某些範圍的部份放電訊號會因雜訊過大而無法偵測到，所以使用超高頻電感式感測器(UHF Sensor)來提高測量的頻率，進而改善訊號與雜訊比[6]，UHF 感測器的工作原理跟磁場耦合相同(圖 4)，都是測量脈衝電流的磁場變化。

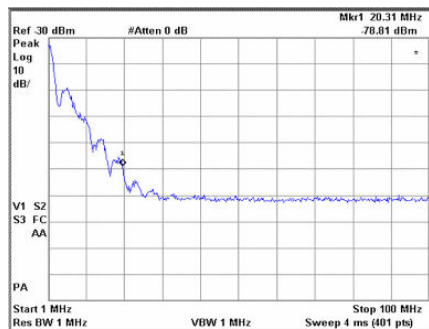


圖 3：由接地線利用電感式感測器測量的背景雜訊

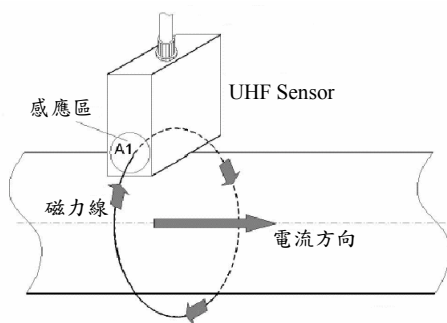


圖 4：UHF 感測器的工作原理

本文電纜頭局部放電測試用的 UHF 感測器的頻率

響應在 70MHz~1.3GHz 之間，但本文所使用的局部放電測試儀器的頻寬只有 50MHz，所以感測器進來的訊號需經過降頻並轉換成 VHF 頻帶，然後再給測試儀器使用，圖 5 是現場用 UHF 感測器在電纜頭末端的接地線或遮蔽層來測量局部放電的訊號，以下的案例全是應用此方法所測量到的電纜頭異常放電。



圖 5：電纜頭局部放電現場實測

III. 案例探討

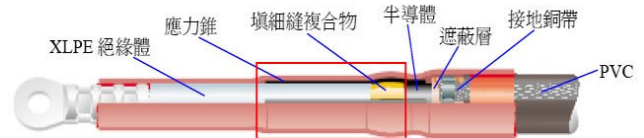


圖 6：電纜頭內部構造

圖 6 是電纜頭的內部構造，其中框線處是常見電纜頭因施工不良造成局部放電的位置，而最多施工不良的情況是殘留空氣於電纜頭裡，不然就是施工人員清潔不當讓雜質留於電纜頭內，另外最常見的瑕疵是應力錐並未套至外半導體處，造成應力錐失效的狀態，不然就是外半導體切割不完整等等，不管是任何一種瑕疵都會造成電纜頭內部的介電常數分佈不均，並形成內部電位分佈不均勻而造成內部的異常放電，以下的案例將分類探討不同瑕疵所造成的局部放電，並經由解剖電纜頭來驗證活線局部放電測試的實用性，以及電纜頭內部的瑕疵與放電圖譜間的關係。

1. 殘留空氣

電纜頭在施工時常因為在剝除外半導體層時，易割傷絕緣層造成表面不平整，或殘留半導體於絕緣體的表面上，然後又未以砂紙磨平或加矽脂膏填補細縫等處理，若以熱縮式電纜頭而言，殘留空氣大多是熱縮不完整所致，這些因施工不良殘留的氣泡(Void)，會因空氣的介電常數小，而絕緣體的介電常數高，所以空氣所分佈的電場強度就大，當此電場強度大於空氣的崩潰電壓時，就會造成間隙處的空氣開始放電，並加速電纜頭的絕緣劣化。

圖 7 是幾個於現場活線局部放電測量到的放電圖譜，其放電特徵類似外部放電，放電角度主要分佈在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 及 $180^\circ\sim 270^\circ$ 之間，而且負半週放電比正半週放電還明顯，放電量都在數百 pC 之間，當時只知道電纜頭有明顯的放電訊號，但實際上不清楚電纜頭內部的放電位置及放電形態。

因為經由局部放電檢測得知電纜頭有異常放電的訊號，所以決定更換有異常放電訊號的電纜頭，後來經解剖電纜頭後就發現因空氣殘留於電纜頭內的放電現象，而且已經明顯的碳化(圖 8)，此外也包括絕緣體因施工移除外半導體時的切痕過深的放電現象。

當電纜頭內部殘留空氣放電造成如圖 8 的碳化現象時，除了一開始的電場分佈不均勻外，也會影響整個電力線的分佈，電力線會集中在碳化的位置，最後會發生如圖 9 的短路事故，這種短路事故屬於高阻抗故障，故障電流較小，而且 XLPE 絕緣層完整如初，從中心導體到絕緣層找不到任何放電痕跡，但從事故點到接地端會有明顯的閃絡痕跡，這是電纜頭內部空氣放電造成事故的特性，有時此類型的事故因故障電流較小，所以保護電驛可能不會動作，但電場仍會集中在此事故點，最後仍會發生從中心導體到外半導或接地遮蔽層的短路事故，事後可以檢視出中心導體的閃絡痕跡。



b. 切痕過深的放電

圖 8：解剖電纜頭後發現的放電位置

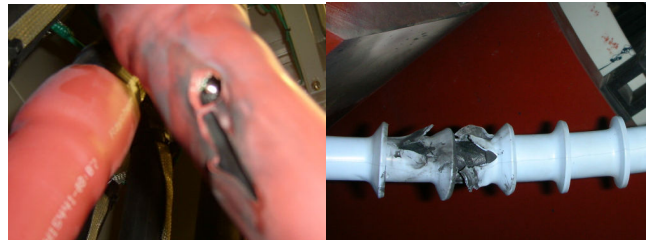


圖 9：因電纜頭內部殘留空氣造成的事故

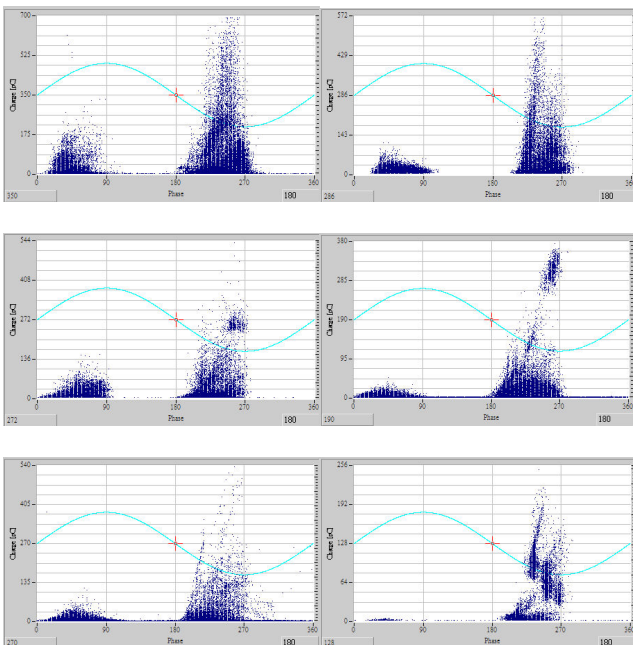
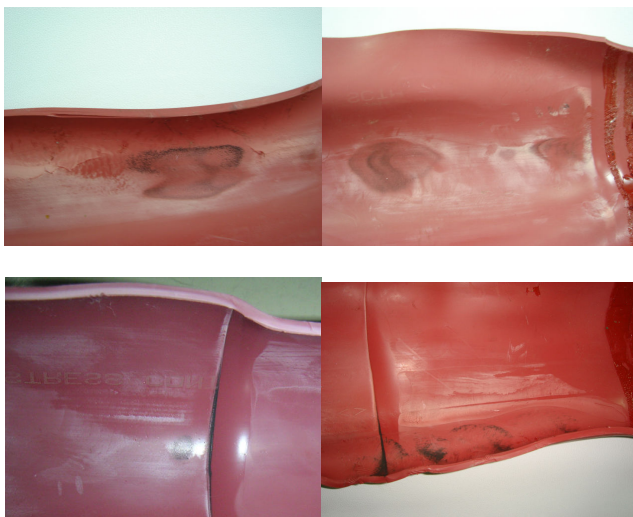


圖 7：電纜頭內因殘留空氣的放電圖譜



a. 殘留電纜頭內部的空氣放電

2. 應力錐未套入外半導

電纜終端處裡頭最重要的主要作用就是在電纜末端的電應力控制，其次就是防水，若沒有電纜頭時，在電纜末端的遮蔽層跟中心導體間會有很大的電場存在，然後會破壞電纜本身的絕緣(圖 10)，而電纜頭內高介電常數的應力錐就可以控制電應力不要集中在遮蔽層上(圖 11)，讓電力線平均分佈在電纜末端，因此如果電纜頭在施工時未將應力錐套在外半導時，那就代表此電纜頭完全失去作用，電應力仍會集中在外半導周邊，並對外半導放電。通常會發生這種錯誤都是施工人員未按照說明書的尺寸施工所造成，這種施工上的瑕疵大部分只發生在冷縮式(預撐式)的電纜頭，因為熱縮式的應力錐與外層護套是分開熱縮，所以不容易有應力錐未套入外半導體的情況發生。

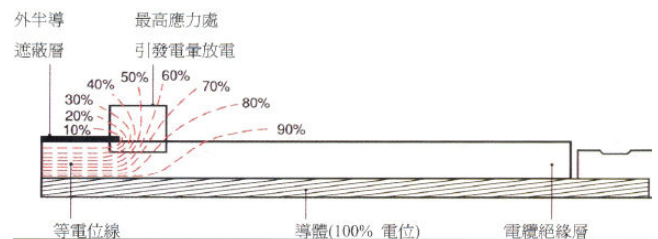


圖 10：沒有電應力控制的電纜頭的電應力分佈

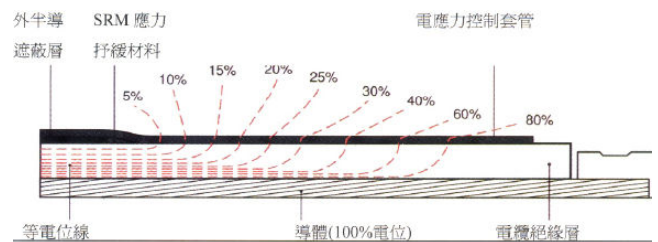


圖 11：有電應力控制的電纜頭的電應力分佈

圖 12 是於現場活線局部放電測量到的放電圖譜，放電角度主要分佈在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 及 $180^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 之間，而且正負半週放電量大小幾乎相等，放電量也都在數

百 pC 之間，同樣在測量之時也無法判斷放電的形態，等更換電纜頭才發現是應力錐未套入外半導體的放電訊號。

圖 13 都是應力錐未套入外半導體的案例，但圖 13.a 除了應力錐未套入外半導體外，其半導體膠帶也因纏繞不良而造成放電，這個放電位置將是以後此電纜頭崩潰事故的位置。

圖 13.b 也是應力錐未套入外半導體，但是其外半導體切割平整，此時電場強度雖大但電應力仍平均分佈在外半導體周遭，此時電應力破壞會集中在最脆弱的點上，如果外半導體切割不完整時，會於切割不完整的區域開始放電破壞。

應力錐未套入外半導體的事故就如圖 14 所示，此種事故是直接的對地故障，故障電流較大，而且會有明顯的從中心導體到接地層的閃絡痕跡出現，

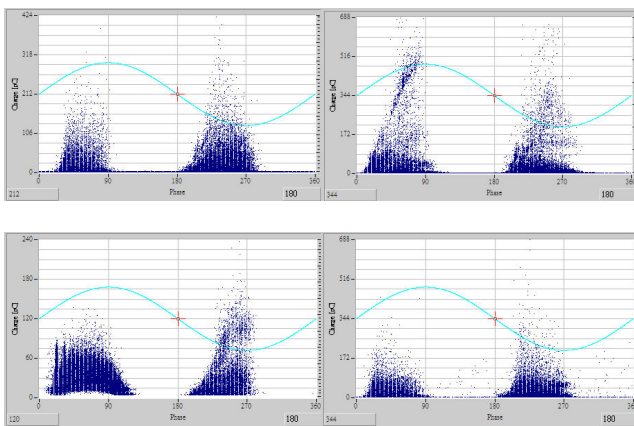


圖 12：應力錐未套入外半導體的放電圖譜



a. 半導體膠帶纏繞不良造成的放電



b. 應力錐未套入外半導體

圖 13：移除電纜頭外層發現的施工錯誤及放電位置



圖 14：應力錐未套入外半導體造成的事故

3. 外部放電：環境因素影響

除了施工上的瑕疵會造成電纜頭放電外，另外還會受到環境因素影響而造成外部放電，通常這些外部放電不須任何儀器檢測，只要靠目視檢查即可，從圖 15 可以清楚的看出電纜頭的外部放電，這些放電都是因環境的溼度讓電纜頭表面的電力梯度分佈不平均，當某些區域的分壓大於其崩潰電壓時，就會開始產生局部放電，但外部放電通常危險性不高，但是如果沿著導體到接地間的外部放電時，那就有可能出現如圖 16 般的沿面閃絡放電。

電纜頭的外部放電量會隨著環境的改變而改變，當溼氣相當大時可能放電量也大，同時有可能聽到放電的聲音及所表面產生閃絡的紫外光，但如果外在環境改變時，其放電現象有可能也會隨著消失。

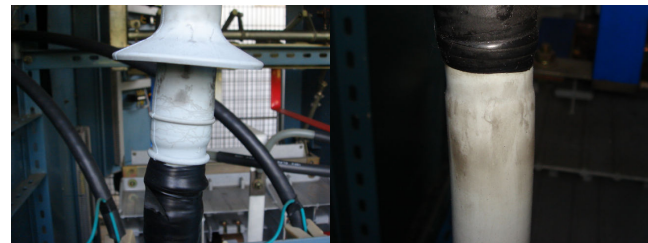


圖 15：因環境因素造成電纜頭的外部放電



圖 16：電纜頭的沿面閃絡痕跡

4. 外部放電：安全間距不足

電纜頭在安裝定位時，常常有安全間距的問題出現，電纜頭施工說明書上通常會說明電纜頭的相間及對地的最小安全間距，但在施工上常常因安全間距不足而發生短路事故。通常同相間的電纜頭更容易被忽略，在普遍的認知下，同相位的電位應該相等，不可能會有電位差，但是因電纜頭一端是高壓導體，另一端是接地端，所以因外部阻抗分佈不均勻，電纜跟電纜之間就會有電位差出現，當此電位差大於空氣的崩潰電壓時，空氣會被解離而開始放電，如圖 17 就是很明顯的同相間的電纜頭放電，更嚴重的就會造成如圖 18 所示的事故。

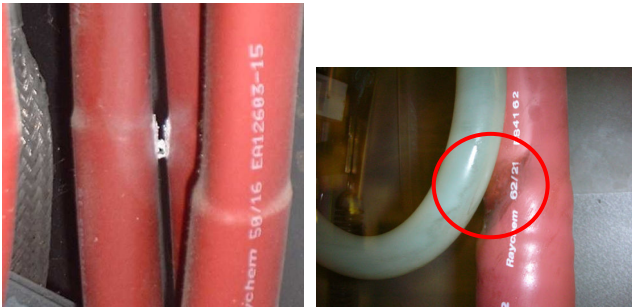


圖 17：同相間的電纜頭放電



圖 18：因安全間距不足造成的事故

IV. 結論

從以上的案例看來，電纜的事故以人為的因素佔最大的比例，因此若要降低電纜的事故率的話，則必須先從施工人員的教育訓練做起，並提升施工人員的技術層面。

應用電磁場耦合局部放電檢測技術可以在不停電的情況下，快速的檢查電纜頭是否隱藏有危險的放電訊號，更可以在事故發生前找出有問題的電纜頭並提高供電可靠度，但是目前線上局部放電檢測還沒有標準訂出，而且最大的問題不是在於如何測量局部放電，而是要如何有效準確的分析放電訊號，以及診斷電纜頭的放電形態及危險性才是最重要的。

參考文獻

- [1] Katsumi Uchida, Hideo Tanaka, and Ken'ichi Hirotsu, "Study on detection for the defects of XLPE cable lines", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 1, No. 2, April 1996, pp. 663-669
- [2] IEEE 400-2001 Guide for field testing and evaluation of the

insulation of shielded power cable systems.

- [3] IEC 60502-2 Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV up to 30 kV.
- [4] 李長興、邱敏彥、黃智賢、吳明學、顏世雄，"比壓器絕緣診斷手法之差異研究"，第 26 屆電力工程研討會。
- [5] Bolarin Oyegoke, Petri Hyvonen, and Martti Aro, "Partial Discharge Measurement as Diagnostic Tool for Power Cable Systems"
- [6] E. Lemke, H. Elze, W. Weissenberg, "Experience in PD diagnosis tests of HV cable terminations in service using the ultra-wide band PD probing", ISH-2003.