

現場中壓電纜之絕緣檢測技術應用

The Study on the Field Testing for Medium Voltage Power Cable

李長興*
Chang-Hsing, Lee

邱敏彥
Min-Yen, Chiu

黃智賢
Chih-Hsien, Huang

台灣震江電力科技股份有限公司
Power Diagnostic Service Co., Ltd
*standby@pdservice.com

摘要

電力電纜在電力系統中，肩付著輸送電能的工作，一旦發生事故，則會影響到眾多用戶。因此，如何適切地檢測電力電纜的絕緣狀態成為一個重要課題。近十年來，隨著檢測技術的進展，電力電纜的現場檢測技術也跟著提升能力。本文將簡潔介紹市頻電源的替代方法，以及更有效率的檢測方式。最後，並以實例介紹如何使用這些新技術。

關鍵詞：電力電纜、現場量測、中電壓系統。

Abstract

Power cable plays an important role in power system. Once, one cable breakdown occurs, lots of end-users will be affected. Therefore, the insulation condition assessment of cable system becomes an important issue. In the past decade, the insulation diagnostics of cable system progresses as the improvement of field-test techniques. This paper introduces the alternative voltage source of power frequency voltage source, and more effective diagnostics. Finally, some field cases are illustrated to demonstrate the new application of on-site insulation diagnostics.

Keywords: power cable, on-site test, medium voltage system.

1. 前言

電力電纜在電力系統中，扮演著電力傳輸的角色，將電能送至每個用戶。一旦電力電纜發生事故，則會電能將無法適切地傳送至需求者的手中，導致經濟上的損失。因此，如何適切地檢測電纜狀態，能有效地避免停電損失。因此，電力電纜在出廠時，其絕緣特性的試驗要求，亦皆其它設備來得嚴格。然而，電力電纜在現場組裝時，容易因為現場環境較為惡劣，故容易產生預期之外的瑕疵，導致電力電纜的運轉壽命大幅縮短。基此，電力電纜的於安裝現場的測試顯得相對重要。

早期受限於電源儀器的取得不易，現場測試多仰賴直流電源進行試驗。然而，相關研究及現場經驗顯示，對於固態絕緣的電力電纜而言，直流電源反而無法測得絕緣材料狀態的優劣。因此，除了使用笨重的市頻電源設備外，陸續有新型式的電力電纜測試用電源被開發出來[1]。

除了現場電源型式的開發外，電力電纜的檢測方式亦隨著檢測技術的進展而有進步。早期僅使用直流電源的絕緣阻值進行檢測。在有了極低頻電源後，介質損失因數的量測，成了檢測電力電纜絕緣系統狀態之另一良器，尤其是電力電纜最容易因數設不良所出現的水樹[2]。

接著，活電局部放電技術的成熟，亦被應用至電力電纜系統的檢測。因為頻率特性的關係，現場電力電纜局部放電量測，多侷限在電纜中間接續間及電纜終端，這兩者是電力電纜最容易因為現場組裝不良，而發生瑕疵的部份。隨著阻尼振盪波電源的開發，電力電纜系統的現場離線局部放電檢測變得可行[3]。除了電纜中間接續間及電纜終端外，電纜本體因瑕疵而產生的電樹，或是水樹演化而成的電樹都可以被檢測出來。

在各式檢測手法的搭配下，電力電纜的現場檢測使得電力電纜的可靠度增加。本文首先介紹目前國際上較常用於電力電纜現場量測之電源系統，接著介紹各式效果卓越的檢測手法，最後並引用筆者於現場的實測案例做為驗證。期能對國內電力電纜檢測服做一點貢獻。

2. 電源型式

電纜系統屬於電容性設備，其靜電容量如式(1)所示。在施加測試電壓時，電源系統的容量需大於電纜系統的靜電容量。以 25 kV 級電纜為例，每公里約有 0.12 uF 至 0.2 uF 的靜電容量，施加 60 Hz 電源至額定電壓為時，每公里長度約需要至少 28 kVA 的容量。對長電纜的而言，能滿足測試需求的市頻電壓源，其體積及重量皆十分可觀。基此，電纜系統的現場加電壓試驗時，電壓源的取得即是一個困擾。

$$Q=wCV^2 \quad (1)$$

式中，w 為測試電源頻率 (rad)，C 為受測設備之等效電容量，V 為測試電壓，Q 為滿足前述條件所需要的電源容量 (kVA)

目前，在中壓系統中，除了市頻交流電源外，尚有其他三種電源：直流電源、極低頻電源、以及阻尼振盪波電源。本節將介紹這種三種常用電源的原理及優缺點。

2.1 直流電源

如式(1)所示，對電纜系統加電壓時，靜電容量與電源頻率有關。基此，電纜系統施加直流電源時，僅需克服初始之充電電流，以及其後的洩漏電流，故其所需之容量小。因此，直流電源具有體積小、易攜帶、以及造價便宜的優點，故直流電源被大幅應用於現場測試中。

然而，自 1980 年代以來，陸續有研究觀察到直流電源對於固體絕緣電纜（如交連聚乙烯，XLPE）具有一定程度之破壞性[1]，如空間電荷問題、無法用於絕緣診斷、無法檢測出水樹且會加速水樹成長等缺點。基此，在新行的規範[2]中，多不建議在固體絕緣電纜施加直流電流，但對於油紙纏繞絕緣電纜（PILC）及充油式電纜則不在此限。

2.2 極低頻電源（Very Low Frequency, VLF）

極低頻電源為一交流電源，其頻率低於 0.1 Hz [2]。對電纜系統而言，電源容量大小與待試物之靜電容量、電源頻率、以及施加電壓有關。在待試物電容量以及施加電壓大小不變的條件下，電源頻率成了主要影響電源容量的關鍵。由式(1)可觀察到，當電源頻率由 60 Hz 降為 0.1 Hz 時，所需電源容量將可減少 600 倍。基此，極低頻電源具有直流電源之體積小的優點，同時又因其為交流電源，而不具有直流電源有空間電荷之缺點。

極低頻電源的實現有需多方式，如圖 1 所示，其波形亦決定其應用範圍。除了具正弦波之電源可應用在診斷及耐電壓試驗外，其餘波形皆僅能應用於耐電壓試驗[3]。

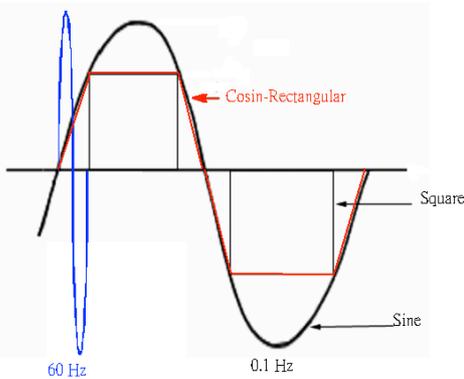


圖 1 極低頻電源波形

2.3 振盪波電源（Damping AC）

由於極低頻電源應用在電纜測試上，仍存在一些不方便，故振盪波電源成為另一種替代方案。振盪波電源係利用受測電纜之電容，與外加之電感，產生線路之自然共振[3]，如圖 2 所示。因為其充電過程中，並未在任一個電壓等級停留，且充電達到測試電壓時，旋即短路令系統自然共振，故其兼具直流充電的小體積，以及交流測試所而有的交流電壓變化。阻尼振盪波電源架構如圖 3 所示。

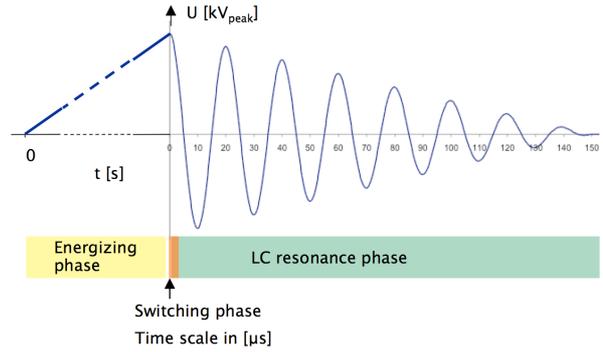


圖 2 阻尼振盪波電源波形[4]

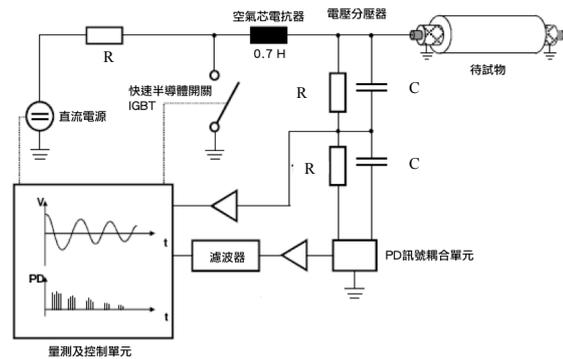


圖 3 阻尼振盪波電源架構[4]

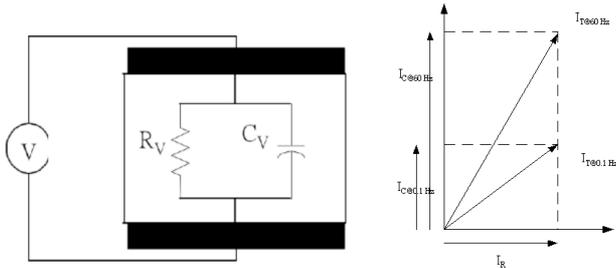
測試時，其自然共振頻的在 20 Hz 至 400 Hz 之間，如果超出此範圍，則測試結果並不一定會被認可。

3. 測試方法

過往常用於中壓電纜之現場檢測技術，主要為直流之絕緣電阻測試，以及直流的耐電壓試驗。如前所述，此兩種方法應用在 XLPE 電纜上，有一定的風險程度。基此，本節介紹應用前述之極低頻電源及阻尼振盪波電源，所進行之介質損失因數、局部放電量測、交流耐電壓試驗的方式。

3.1 介質損失因數

介質損失因數即洩漏電流中，電容性電流與電阻性電流之比值，如圖 4 所示。檢測標的主要為電纜絕緣材料的劣化程度，早期最常見的原因為水樹。因為電纜之等效電阻常高達 GΩ 等級，而等效電容高達數 uF。當使用市頻電源時，電纜系統常因為電容性電流（容抗約為 kΩ 等級）遠大於電阻性洩漏電流，其介質損失因數多為 10^{-3} 等級以下，故不易在瑕疵劣化初期即診斷出來。當使用極低頻電源時，電容性電流會大幅減少（容抗約為 MΩ 等級），而電阻性洩漏電流不變，故可以大幅增加瑕疵之辨識能力。



(a) 絕緣材料等效模型 (b) 洩漏電流相量示意
圖 4 介質損失因數示意

表 1 為一般典型之介質損失因數建議值， U_0 為受測設備之對地額定電壓， $\tan\delta$ 為此時之介質損失因數。惟表 1 亦為一經驗值，對於較短之電纜，或是電纜系統涵蓋斷路器（無法解連）之情形時，往往會受到電纜終端以及附屬附件的影響，導致介質損失因數有較大的讀值[5]。此時，建議比較相同形式電纜的測試結果，與歷史值做比較，或是 Tip-Up 方式，以得到較為準確的結果判讀。

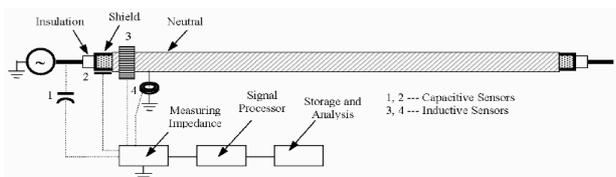
表 1 極低頻電源之介質損失因數建議值[2]

$\tan\delta @ 2U_0$	$\tan\delta @ 2U_0 - \tan\delta @ U_0$	判斷
小於 1.2×10^{-3}	小於 0.6×10^{-3}	良好
大於等於 1.2×10^{-3}	大於等於 0.6×10^{-3}	劣化
大於 2.2×10^{-3}	大於 1.0×10^{-3}	嚴重

3.2 局部放電

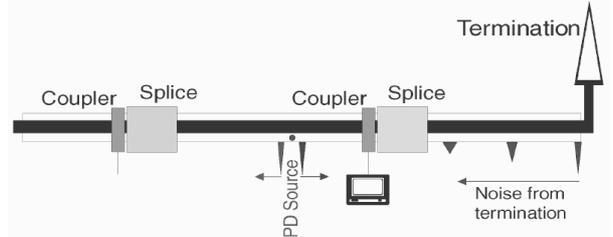
大部份經驗顯示，電纜系統除了早期常見的水樹導致絕緣崩潰外，事故多肇因於電纜終端或是中間接續處理不良，而有瑕疵存在於絕緣材料中。這些絕緣瑕疵將會加速絕緣材料的劣化，大幅縮短絕緣材料壽命。傳統量測絕緣阻抗變化方式的診斷方法，因為對於此類瑕疵的敏感程度低，故不易診斷出絕緣材料中的瑕疵。局部放電量測是一個能有效檢測絕緣材料狀態的診斷方法，故亦已被應用在電纜系統之現場檢測方法中[6]。

圖 5 所示為電纜系統之現場局部放電量測方法[6]，包含離線測試法和在線測試法。圖 5(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 5(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[6]

圖 5 典型現場 PDM 之測試架構（待續）



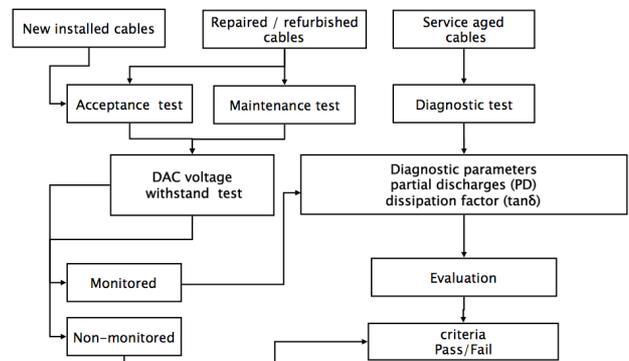
(b) 在線 PDM[6]

圖 5 典型現場 PDM 之測試架構（續）

3.3 耐壓試驗

電纜系統於竣工或是修復完成時，常會施加耐壓試驗。耐壓試驗即對電纜系統施加一超過額定電壓的測試電壓，經過一定時間，若電纜系統無閃絡或崩潰發生，即稱該電纜系統通過耐壓試驗。換言之，耐壓試驗的結果只有通過與不通過試驗，對於重大的瑕疵可在試驗過程中將之擊穿，但對於小瑕疵則不一定。而且，亦有可能將小瑕疵的劣化時間提早，縮短電纜的運轉壽命。

因此，對於耐壓試驗的方法，近年來亦開始加入“監控的耐壓試驗（monitored voltage withstand test）”。亦即在耐壓試驗過程中，結合電驗檢測方法，同時監看的不同的測試標的，如局部放電訊號，及介質損失因數。由於耐壓試驗之測試電壓高於額定電壓，故能使小瑕疵提早崩潰劣化，則此時會產生局部放電訊號，或是介質損失因數改變。在此狀態下，則測試結果將不僅是通過與不通過，而會連帶產生絕緣材料狀況的評估結果。此法將有助於電纜系統之絕緣狀況的判別。



Ref: IEEE P400.4/D3, October 2011

圖 6 電纜系統測試流程概略[3]

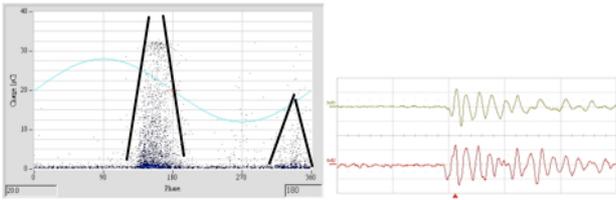
4. 現場案例

電纜的現場測試，會因應現場環境而採用不同的測試手法。本節將介紹不同檢測手法的實際案例。

4.1 電纜中間接續檢測案例

對於無法停電測試的長電纜而言，無法進行停電檢測，故會針對最容易出問題之電纜終端及電纜中間接續開進行活電局部放電量測。

圖 7 及圖 8 即為應用活電局部放電量測於電纜中間接續開的檢測結果，及解剖相片。



(a)局部放電圖譜 (b)局部放電定位波形
圖 7 現場活電局局部放電量測



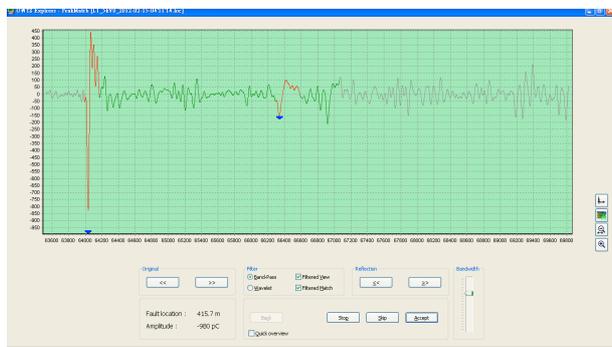
圖 8 電纜中間接續開解剖結果

4.2 阻尼振盪波檢測案例

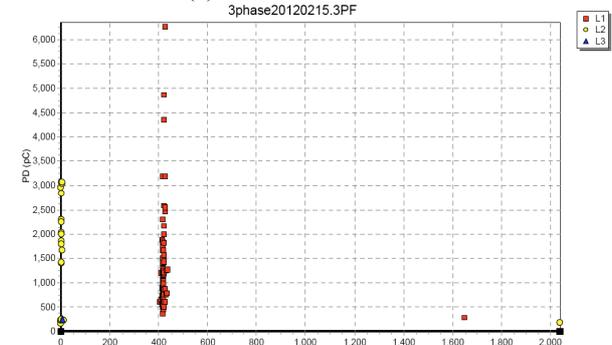
由於活電局局部放電檢測方法，若使用超高頻(UHF)感測器，則會因為高頻訊號的衰減大，導致檢測範圍短，約在數十公尺左右；反之，若使用高頻(HF)感測器，則易因為現場雜訊干擾，而無法進行量測。

因此，對於長電纜的檢測需使用離線檢測，以避免雜訊干擾。筆者係使用阻尼振盪波電源，做為現場的測試電源。

測試時，根據局部放電訊號的波形，利用行進波折反射的時間差，進行局部放電源的定位，如圖 9 所示。將定位出來之電纜解剖之相片，示於圖 10。



(a) 局部放電折反射波形



(b) 局部放電訊號定位結果
圖 9 局部放電源定位



圖 10 局部放電源定位之電纜中間接續的解剖圖

4.3 極低頻介質因數與阻尼振盪波檢測案例

在某些狀況下，若是電纜本身因為特別原因，導致水侵入絕緣系統，產生水樹，則在水樹轉變為電樹之前，局部放電量測並不一定會測到局部放電訊號。

圖 11 顯示為某相電纜之離線局部放電測試，測試結果顯示並無局部放電訊號。圖 12 顯示為該相電纜所屬之電纜系統的極低頻介質損失因數量測結果，量測結果顯示，該電纜系統已經嚴重劣化，可能有大範圍之水樹存在。且其中一相電纜在過電壓試驗(1.5 倍對地額定電壓)時，已發生絕緣崩潰。

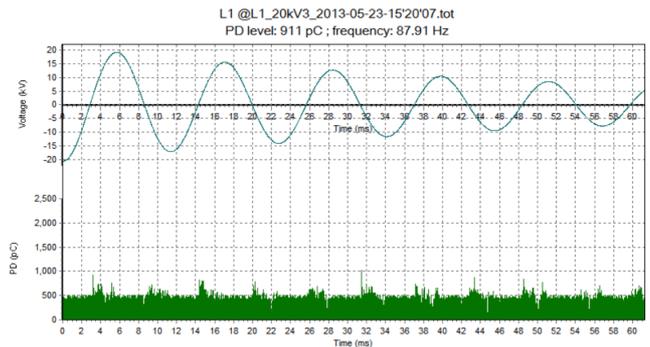


圖 11 阻尼振盪波之局部放電量測結果(額定對地電壓)

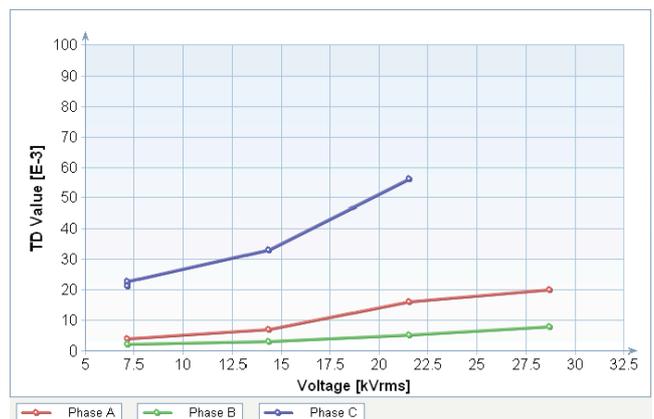


圖 12 極低頻電源之介質損失因數

5. 結論

對現場測試人員而言，長距離電力電纜的檢測一直是個難題，無論在測試電源的選用，以及採取的測試方法皆然。

極低頻電源搭配介質損失因數量測，可以有效地評

估電力電纜絕緣系統的劣化狀態，以及有無水樹等問題，可供維護人員及早安排策略。活電局部放電量測，可以有效檢出電纜終端及電纜中間接續是否有瑕疵存在，以避免事故發生。阻尼振盪波搭配局部放電量測，可以有效找出電纜本體的弱點，維護人員可評估電纜系統的風險，做出有效的策略安排。

參考文獻

- [1] IEEE Std. 400, “Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable System”, 2001.
- [2] IEEE Std. 400.2, “Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)”, 2004.
- [3] IEEE P400.4, “Draft Guide for Field-Testing of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with Damped Alternating Current Voltage (DAC)”
- [4] OWTS 操作手冊
- [5] 蘇聰漢，許俊明，黃智賢，邱敏彥，李長興，“應用極低頻介質電力因數檢測於電纜系統劣化趨勢分析”，第 30 屆電力工程研討會，台灣桃園，2009。
- [6] IEEE Std. 400.3, “IEEE Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment”, 2006