



現場電纜測試方法一

Field Testing of Cable System –

阻尼振盪波電源測試系統

Damped Alternating Current Voltage system

■ 李長興 Lee, Chang-Hsing / 台灣震江電力科技股份有限公司 Power Diagnostic Service Co., Ltd.

壹、前言

電纜系統肩負著傳輸電能的重要責任，任何一條電纜發生故障，多會造成重大的損失。基此，如何檢測電纜狀態的好壞一直都是重要的課題。因為電纜可視為一個大電容，若使用商頻電源進行測試，則需要相當大容量之電源。基此，在高壓系統常見的替代手法為使用直流電源，現行的檢測手法如表1所示。然而，在許多實例中觀察到，即使電纜系統通過此類測試，其仍有異常故障的情形發生。

在1990年代，針對此現象，國內外的研究文獻觀察到，使用直流電源測試交流電纜時，會產生許多不利的因素，如空間電荷，交直流電場分佈不均等，皆會導致無法正確獲取電纜狀態，甚或加速電纜的劣化。因此，國外先後發展出極低頻電源及阻尼振盪波電源的測試系統，藉以降低直流測試電源帶來的困擾，以及減少商頻測試電源攜帶不便的麻煩。

根據電路設計不同，極低頻電源的波

形也有所不同，各自有不同的適用範圍，如圖1及表2所示。在極低頻電源的適用項目中，最常使用的是耐壓試驗及絕緣介質損失因數的量測，其對於水樹之偵測效果優異。然而，對於電氣特性劣化導致的電樹之局部放電檢測，極低頻電源則因為先天上的特性，測試電壓的選擇及量測結果的結讀與市頻狀態下多有不同，故在實務上使用時需多加注意。

阻尼振盪波電源測試系統，其測試電源頻率在20~500 Hz內，且其測試電壓與量測結果判讀與市頻較為相似，故可被廣泛應用在現場離線之局部放電量測。與極低頻測試電源相似，阻尼振盪波電源係以直流電源對受測物進行充電，架構如圖2(a)所示。一旦試驗電壓達到設定值時，阻尼振盪波電源系統內之電抗器快速接地，使線路電容與電源電抗產生自然共振，讓試驗電壓成為頻率在20~500 Hz之交流電壓，如圖2(b)所示。圖3所示之電壓波形稱為一個衝擊(shot)。

因為在充電過程中，並未在任何一個電壓等級停電，且充電達到測試電壓時，系統旋即短路產生自然共振，故其兼具直流充電的小容量，以及交流試驗所需的交流電壓變化。由前述可知，阻尼振盪波電

源在測試過程中的能量低，即具有更低的破壞性，好處是對設備可能造成的危害更少，壞處是需要更用能量來誘使局部放電現象產生，如增加衝擊次數，或是提高測試電壓。

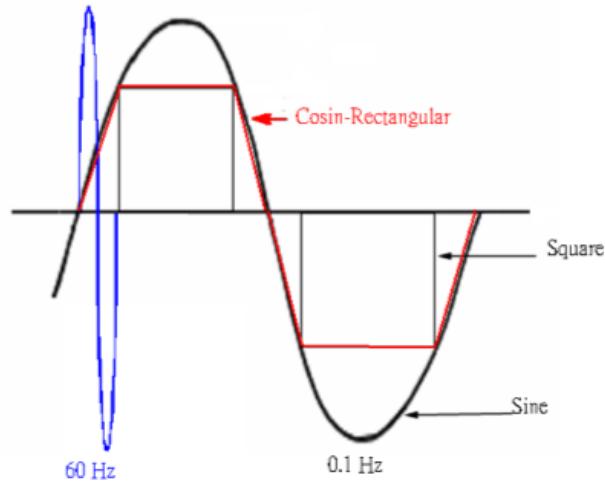
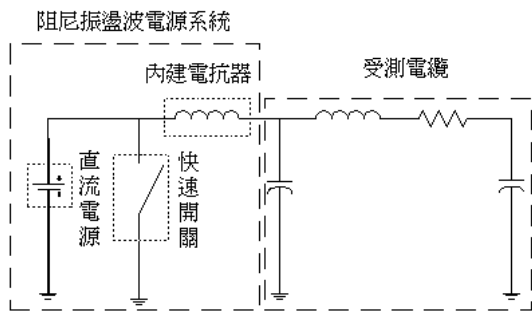


圖1 極低頻電源波形

(a) 充電階段



(b) 阻尼振盪階段

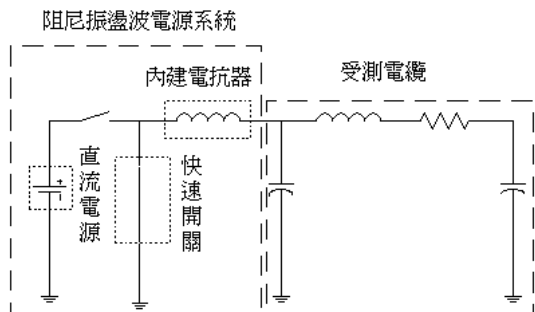


圖2 阻尼振盪電壓系統架構示意

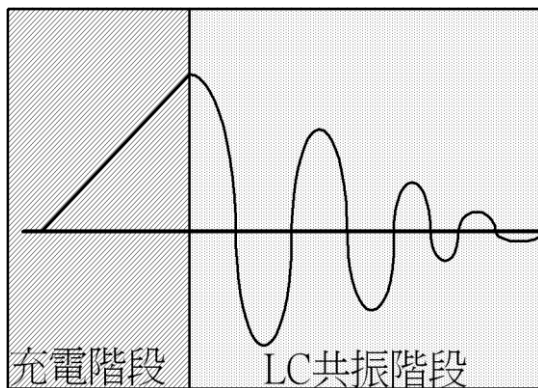


圖3 阻尼振盪波電源波形

表1 例行性電纜檢測手法 [1]

竣工試驗	定期試驗
DC-12-24-36 kV 1200 MΩ, 1000 MΩ, 500 MΩ, 250 MΩ, 250 MΩ 以下	DC-10 kV-1 分鐘絕緣值

表2 極低頻電源適用範圍 [2]

電纜狀態	診斷測試手法				
	耐壓試驗 (通過/不過通)	耐壓試驗 (受監控的)	VLF-TD VLF-DTD VLF-TDTS VLD-DS	VLF-PD	VLF-LC VLF-LCH
金屬遮蔽被侵蝕的電纜	可接受	可接受	可接受	差	差
廣域的水樹	可接受	好	好	差	好
少量的大型瑕疵/少量之電樹	好	可接受/好	可接受/好	可接受/好	可接受/好
電纜接續閘/終端有瑕疵	可接受/好	可接受/好	可接受	可接受	可接受
多種絕緣物	好	好	差/好	好	差/好

貳、量測內容

一、耐電壓試驗

如前所述，阻尼振盪波電源的每一次衝擊能量都小，其破壞性也小，故測試時需要連續多個衝擊(如圖4所示)，或是增加試驗電壓(如表3所示)，以達成與連續商頻電源相同的效果。然而，需要多少個連續衝擊次數才能達成與連續商頻電源一致的效果，因受到許多因素的影響，相前尚無定論。目前的耐電壓試驗可分為未受監控的試驗及受監控的試驗。前者的測試結果係以受測電纜是否發生絕緣崩潰作為評判依劇，僅有通過或失敗兩種結論。在此情形下，連續衝擊次數變得十分重要，選用錯誤將導致試驗結果錯誤。後者的測試結果包含耐電壓試驗過程中的局部放電量測及介質損失因數量測，這些指標透露出受測電纜的絕緣組態有無異常。即使電纜系統沒有在試驗過程中崩潰，但將局部放電訊號及介質損失因數的變化反應出電纜有無瑕疵存在，藉此得以避免將有瑕疵的電纜繼續

送電運轉，產生更大的損失。

圖5所示為常見的測試結果。圖5(a)所示為正常電纜，受測期間沒有電壓崩潰，且沒有局部放電現象發生。圖5(b)所示為有瑕疵電纜，受測期間沒有電壓崩潰，但隨著測試電壓增加，局部放電量亦逐漸增加至穩定狀態。圖5(c)所示為絕緣不良電纜，測試電壓沒有到最高試驗電壓，受測電纜旋即崩潰。此現象，可在觀察到局部放電量劇烈時，即應停止測試並找出異常瑕疵位置。圖5(d)所示為絕緣不良電纜，測試電壓可增君至最高試驗電壓，測試過程亦有放電現象出現。但在最後的耐電壓階段時，發生絕緣崩潰。透過監控耐電壓試驗過程中的局部放電現象，可以獲取更多關於電纜絕緣狀態的資訊。

在圖5之案例中，僅有(c)(d)兩例可以在未受監控之耐電壓試驗中被發現電纜絕緣不良，(b)例之絕緣瑕疵則僅能透過受監控之耐電壓試驗被發現。

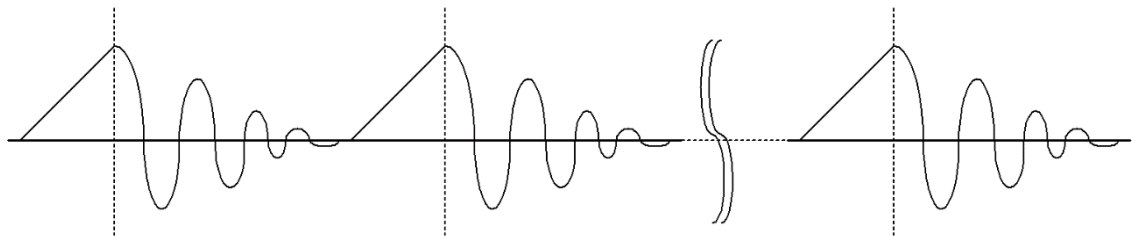


圖4 阻尼振盪波電源之耐電壓試驗波形示意

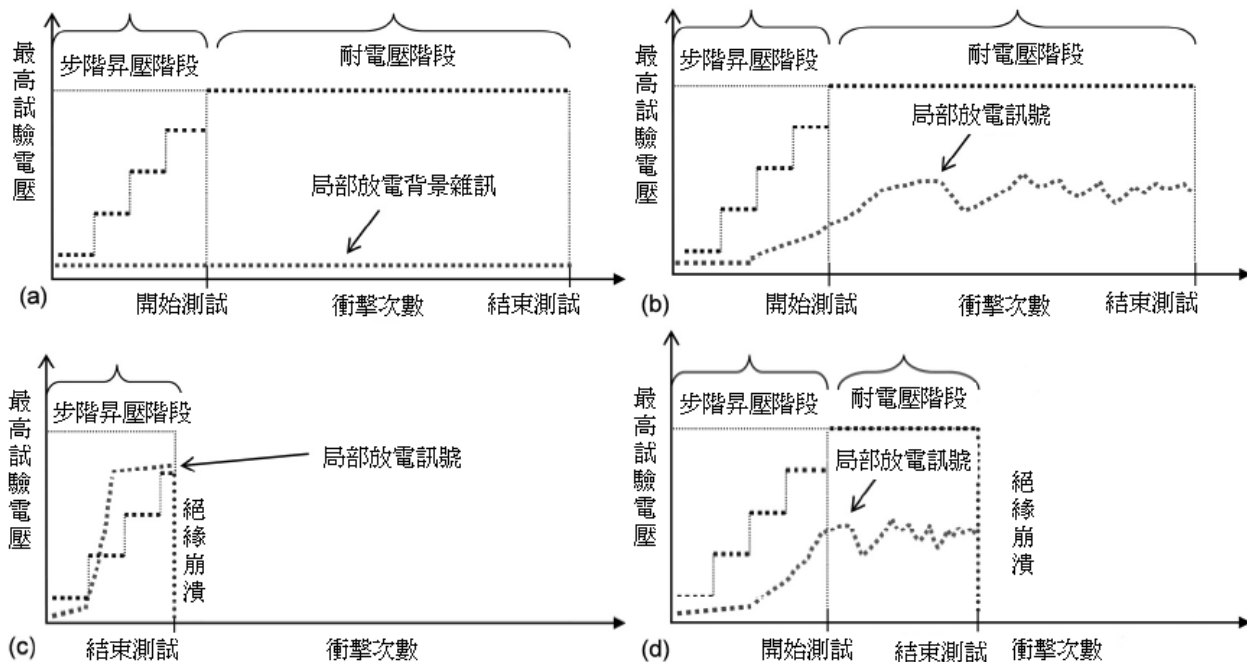


圖5 受監控的耐電壓試驗案例 [3]

表3 阻尼振盪電源試驗電壓 [3]

(a) 竣工試驗(部份)

額定相間電壓 (kV)	額定相對地電壓 (kV)	阻尼振盪波電源測試電壓 (相對地電壓)(kV)
3	2	6
5	3	8
6	4	12
8	5	14
10	6	17
15	9	26
20	12	34
25	15	43
30	18	51
35	21	60
45-47	26	74
60-69	35	99

(b) 維護試驗(部份)

額定相間電壓 (kV)	額定相對地電壓 (kV)	阻尼振盪波電源測試電壓 (相對地電壓)(kV)
3	2	5
5	3	6
6	4	10
8	5	11
10	6	14
15	9	21
20	12	28
25	15	35
30	18	41
35	21	48
45-47	26	60
60-69	35	80

二、局部放電量測

阻尼振盪波電源測試系統的局部放電量測，係依據IEC 60270的標準測試法進行測試。由於標準測試法的頻寬約為500 kHz，容易受到雜訊干擾，故在局部放電源定位時，會使用較高頻寬之電路進行訊號分析。然而，高頻訊號的衰減快，如圖6所示，故局部放電源之定位亦不能使用太高頻寬，以避免看不到訊號。

圖7所示為一阻尼振盪電源測試系統的示意圖，測試系統內建一組耦合電容，根據要進行的量測項目，執行不同的濾波程序：一為500 kHz內的標準測試法，用做評判的依據；一為150 kHz至45 MHz的局部放電源定位程序，用來濾除雜訊，提升定位的精確度。

進行局部放電量測時，係使用標準測試法(500 kHz低通濾波)。測試系統會記錄

試驗電壓波形與局部放電訊號波形，用以辨識受測電纜有無局部放電現象存在。一旦有可能有局部放電現象存在時，需再進行脈衝訊號波形分析定位，以釐清脈衝訊號來源。

脈衝訊號之定位分析主要係根據脈衝訊號的反射時間差，進行計算，如圖8所示。根據分析結果，判讀訊號源的位置，藉此瞭解是雜訊或是危險的放電訊號。

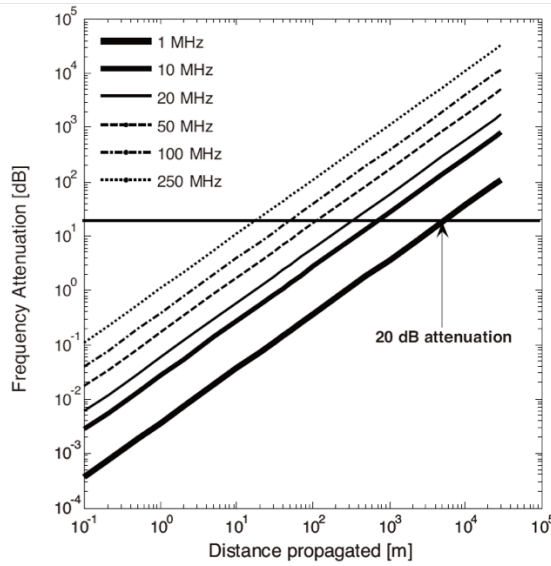


圖6 局部放電訊號於電纜內之衰減示意 [4]

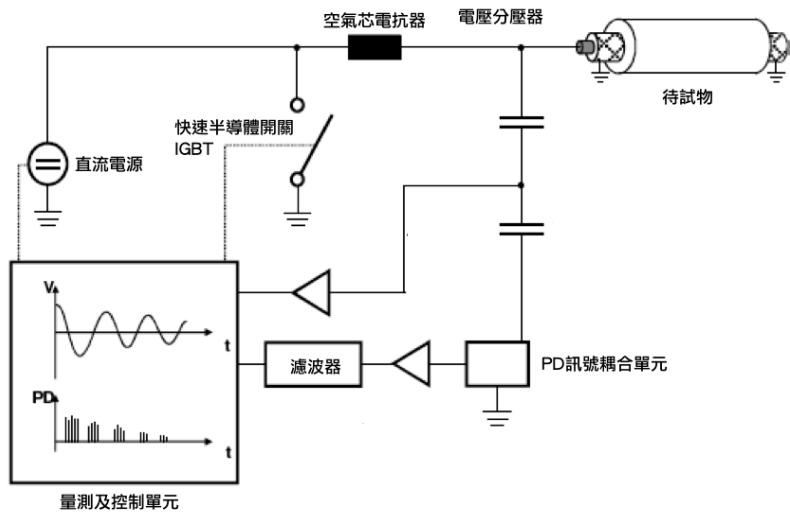


圖7 阻尼振盪波電源測試系統架構 [5]

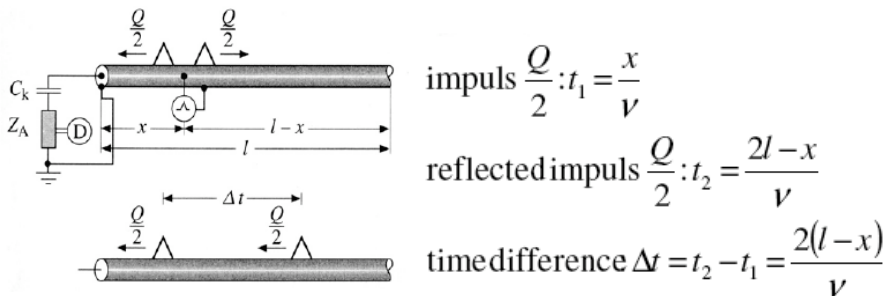


圖8 脈衝訊號定位示意 [5]

三、介質損失因數量測

除了局部放電量測外，阻尼振盪波電源亦可以估算受測電纜系統的介質損失因數。當阻尼振盪波電源內的電抗接地時，系統中的阻尼僅剩下電源系統的阻抗及電纜系統的絕緣阻值，如圖9所示。基此，量測共振電源的衰減程度，便可以估算出受測電纜系統的絕緣阻值，如圖10，式(1)，式(2)，以及式(3)所示。

介質損失因數的評判依據主要是比較三相電纜，或是週遭同型式電纜，或是不同時期不同測試狀態之測試數據，或是歷史經驗值。圖11所示例子中，圖11(a)之三相在不同測試電壓下，其介質損失因數值皆低，故評判為正常電纜。圖11(b)中，C相的介質損失因數值較另兩相高的多，故評判C相電纜有異常。圖11(c)中，三相之介質損失因數值相近，且皆隨測試電壓增加而增加，顯示電纜在劣化中。

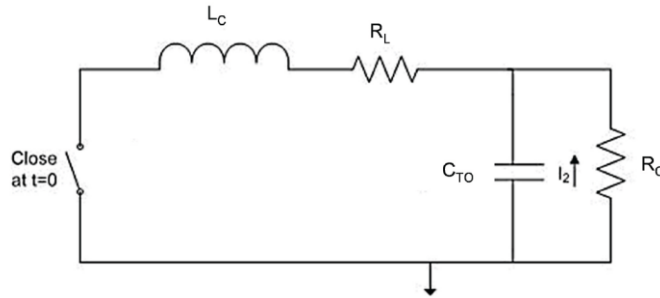


圖9 阻尼振盪電源系統量測介質損失因數示意圖 [3]

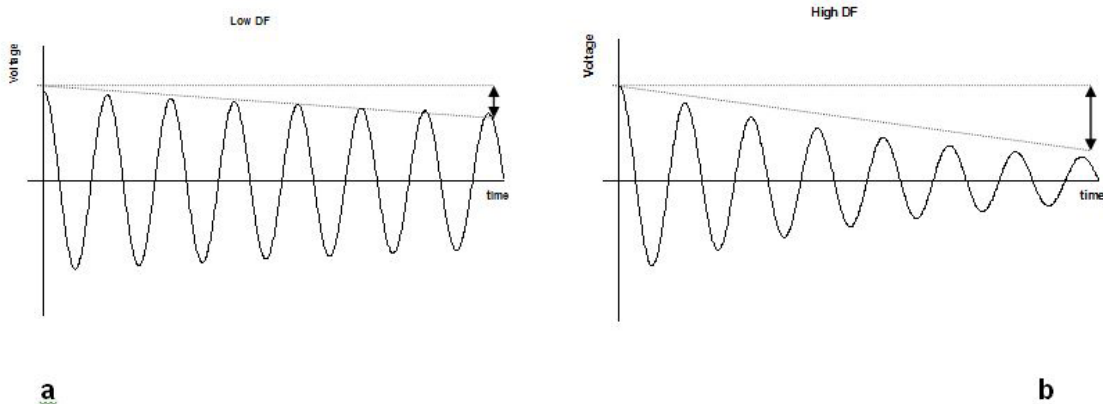
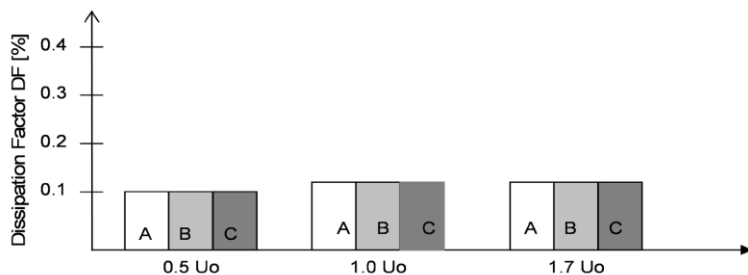


圖10 介質損失因數與共振電源衰減速度的關連性 [3]

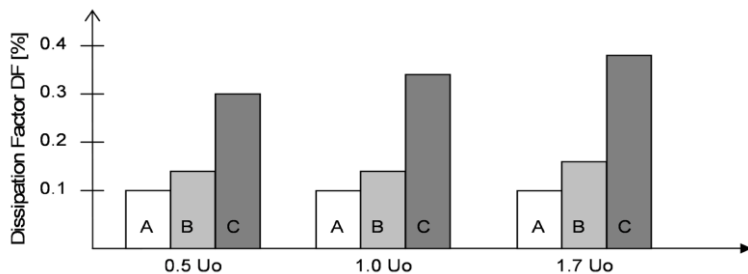
$$U(t) = U_0 \square e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi) \quad \text{式 (1)}$$

$$R_C = \frac{L_C}{2\beta_{DAC} L_C C_{TO} - R_L C_{TO}} \quad \text{式 (2)}$$

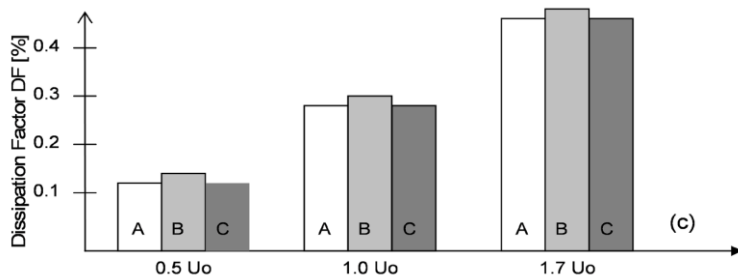
$$DL = \frac{1}{\omega R_C C_{TO}} \quad \text{式 (3)}$$



(a)



(b)



(c)

圖11 介質損失因數案例 [3]

參、測試程序

一、試驗接線

測試時，避抑止其它干擾源的影響，非測試相之電纜需要接地，且測試系統與受測電纜的接地最好採單點接地，如圖12所示。

此外，如圖5所示，局部放電訊號在電纜中衰減很快，為提昇量測靈敏度及定位的精確度時，建議於電纜終端處理頭及中間接續開位置皆安裝局部放電訊號偵測器，如圖13所示。

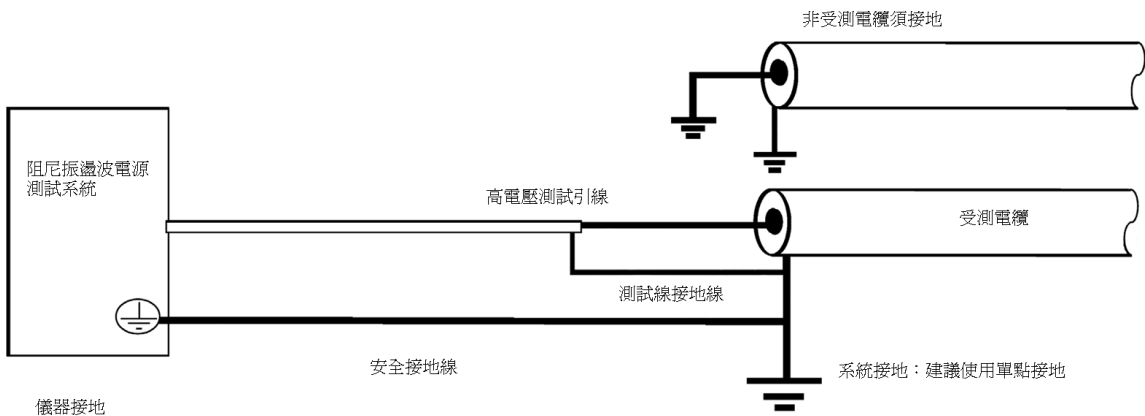


圖12 測試系統接線圖 [3]

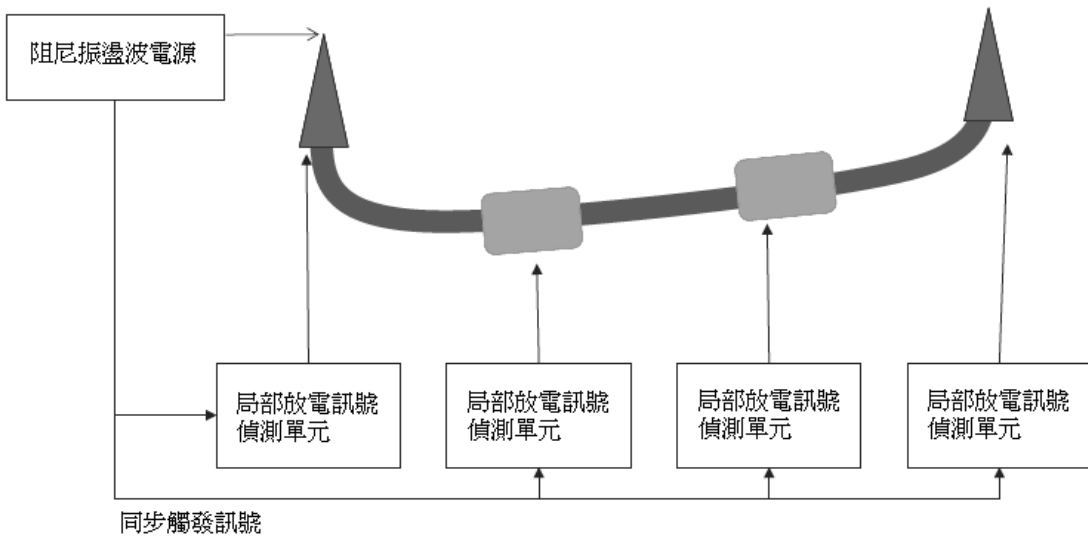


圖13 測試系統訊號檢出單元配置 [3]

二、試驗程序

圖14為阻尼振盪電源的測試流程，受測設備可略分為新設電纜或是即設電纜。對於新設電纜所施作之測試屬於竣工試驗，主要是使用較高之測試電壓進行測試，並全程監控局部放電狀態。一旦有異常之局部放電訊號出現，即需要進行定位分析，以釐清受測設備是否健全；反之，若沒有異常局部放電訊號出現，則代表受測設備通過試驗。對於即設電纜所施作之測試屬於維護試驗，主要是量測局部放電訊號及介質損失因數。藉由訊號定位分析及比對歷史值變化，受測電纜的絕緣狀態可以被適切的評讀出來。

試驗步驟如下列所示：

1. 根據試驗項目及電纜規格，選擇最高

試驗電壓(表3)；

2. 選定步階電壓的大小(如0.2 U₀)；
3. 決定每一步階電壓所要施加的衝擊次數(如5次)；
4. 決定最高測試電壓時，所需要施加的衝擊次數(如50次)；
5. 開始測試；
6. 升電壓過程中若出現局部放電訊號，則需要定位出其位置，並作出適切的作為；
7. 到達最高試驗電壓時，開始耐電壓試驗；
8. 耐電壓試驗過程中，若出現局部放電訊號，則需要定位出其位置，並作出適切的作為；
9. 試驗結束後，評估結果。

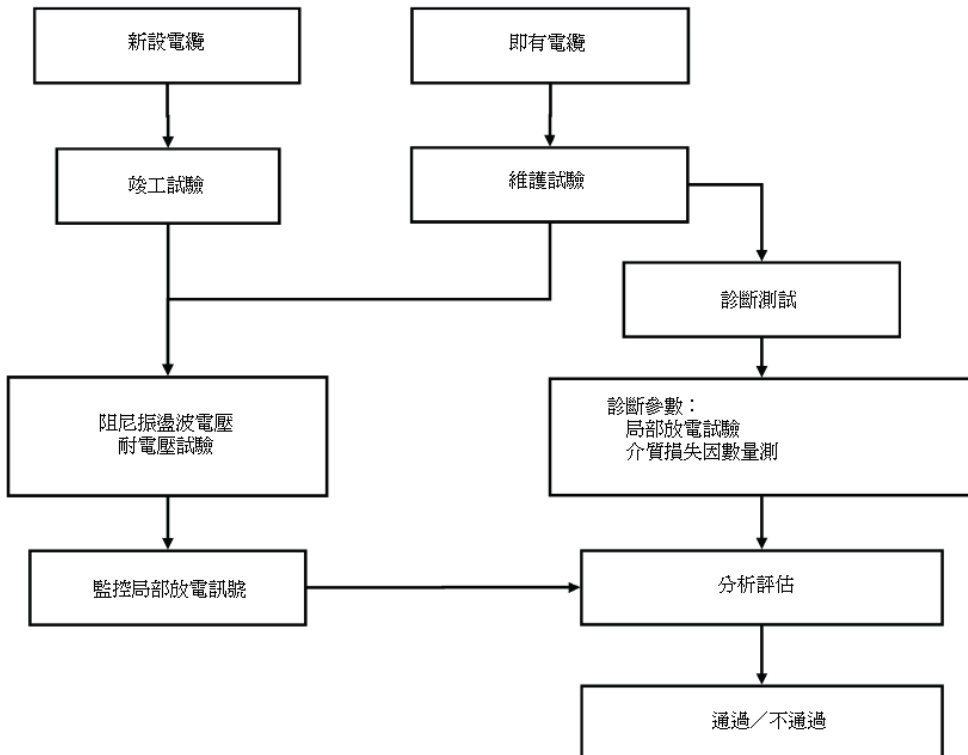
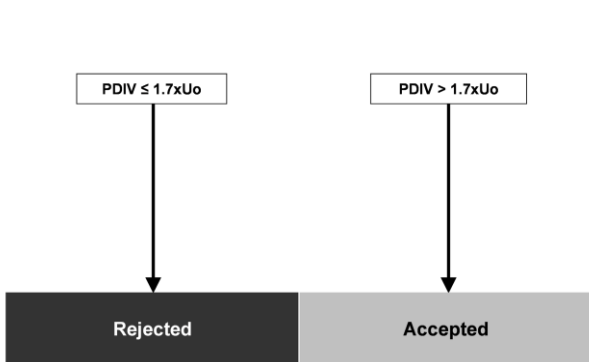
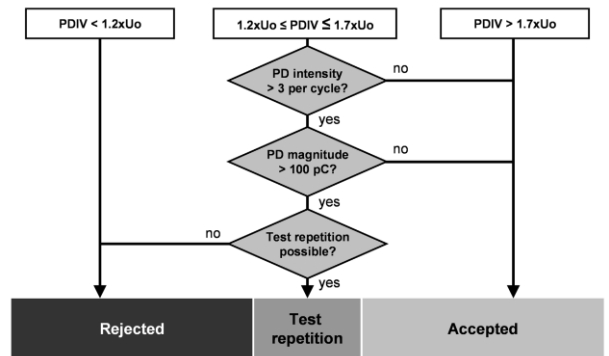


圖 14 阻尼振盪波電源測試系統之試驗流程 [3]

(a) 電纜本體內之局部放電現象



(b) 中間接頭有局部放電現象



(c) 電纜終端處理頭有局部放電現象

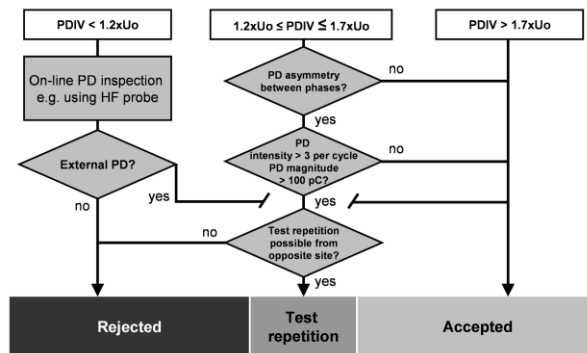


圖15 局部放電量測結果判讀之流程示意圖 [3]

肆、現場實例

一、案例1

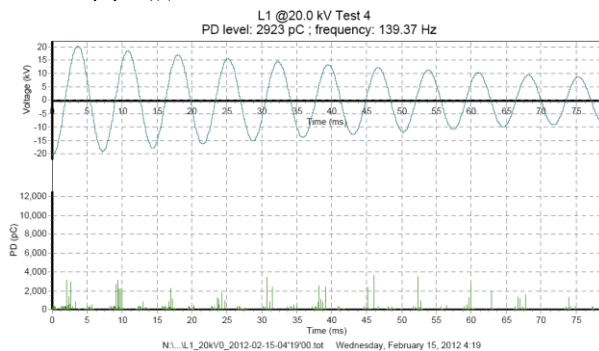
圖16及圖17所示為一3相電纜應用阻尼振盪波電源測試系統測得的結果，圖16所示為測試電壓波形與局部放電訊號之關連性，圖17為局部放電定位結果。圖16(a)顯示，L1相電纜在此試驗電壓下，已有明顯的局部放電現象。圖16(b)顯示，L2相電纜在此試驗電壓下，有疑似的局部放電現象，當試驗電壓再增加時，並沒有再次出現局部放電現象，顯示有可能僅是外部放電訊號或是雜訊干擾

而已。圖16(c)顯示，L3相電纜在此試驗電壓下，並沒有局部放電現象產生。

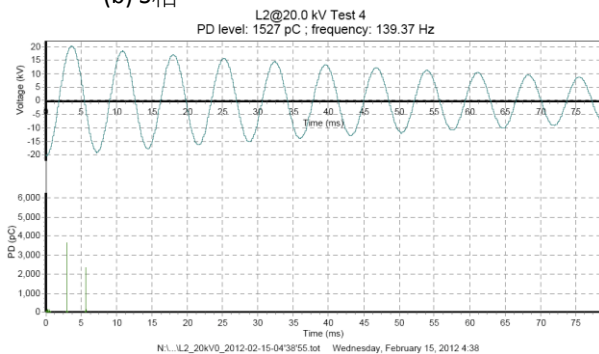
如圖17所示，當試驗過程中有觀察到局部放電現象時，即需要進行局部放電源的定位分析。圖17即是圖16之局部放電訊號的定位結果。藉由局部放電波形之折反射時間差計算，可以推估出局部放電源的位置，計算結果示於圖17(d)。由圖17(d)可觀察到，三相系統中有兩個局部放電源，一個為L1相距測試點430公尺處，該處有一個中間接續閘，

解剖後之瑕疵如圖18所示。另一個為L2相的測試點位置，加強電纜終端之表面清潔，以及增加防電暈環於連接點後，該訊號消失。

(a) R相



(b) S相



(c) T相

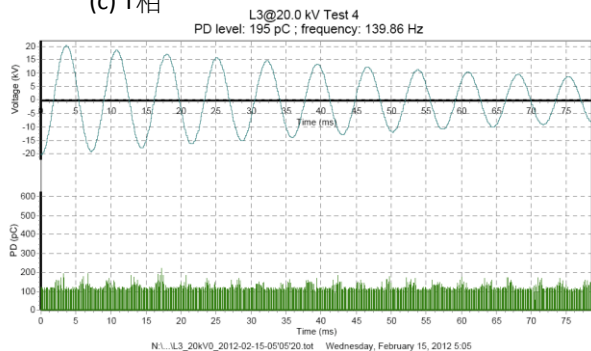
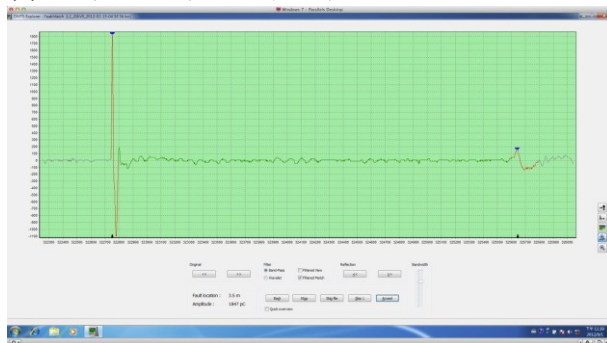
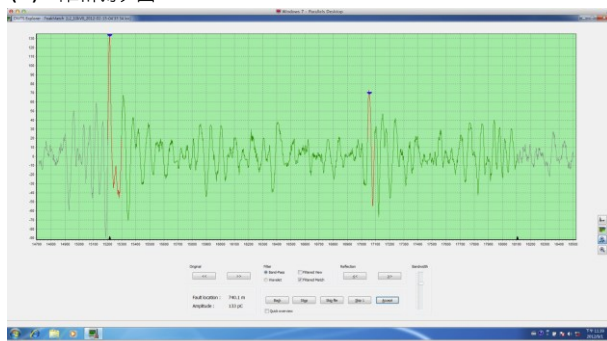


圖16 三相電纜測試結果

(a) 局部放電源位於電纜終端



(b) 雜訊影響



(c) 局部放電源位於430公尺處之中間接續閘



(d) 定位結果

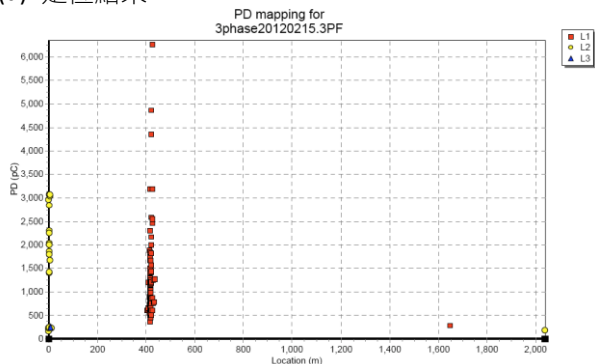


圖17 局部放電訊號定位

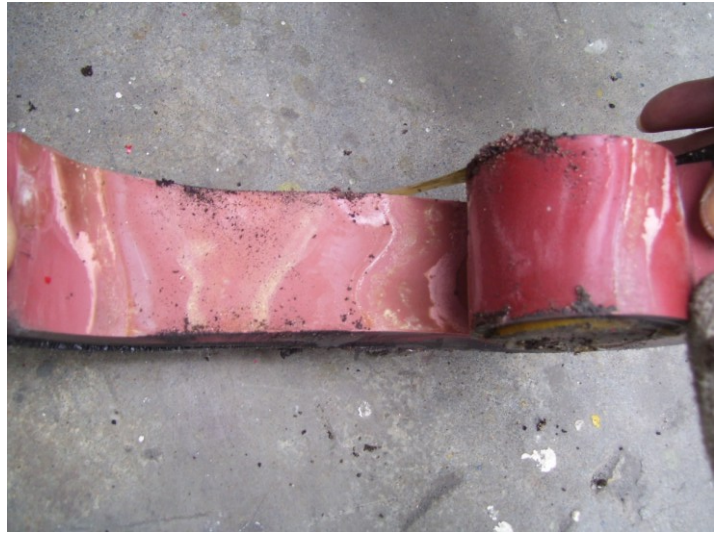


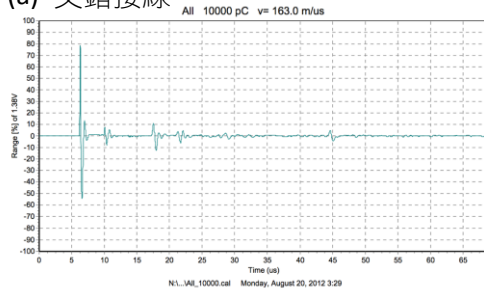
圖18 異常中間接續閘解剖圖面

二、案例2

典型阻尼振盪電源測試系統測試電纜時，電纜的中間接續閘需為直通，不建議交錯接線。因為交錯接線時，線路阻抗會有所變化，導致波形的折反射變多。圖19所示即為中間接續閘交錯連接與直通連接的差異性。圖19(a)所示為中間接續閘為交錯連接時，校正訊號的折反射現象。圖中可觀察到校正訊號在經過每個中間接續閘時，皆會產生反射現象，進而衰減訊號強度，導致最後無法觀察到線路末端的反射訊號。圖19(b)為將前述交錯連接之中間接續閘改為直通連接後，校正訊號於電纜系統中的折反射現象。圖中可觀察到，雖然在中間接續閘位置仍會產生反射現象，但線路末端的反射訊號已明顯大於中間接續閘的反射訊號。

在此情形下，進行局部放電訊號定位分析時，則有一定的難度需要克服。因為局部放電訊號會在每個中間接續閘的位置出現折反射現象，導致分析人員無法直接由時間差進行計算，如圖20所示。分析人員需要從一連串的訊號中，分離出正確的折反射訊號。在此例中，此局部放電訊號為外部放電訊號，故其訊號的折反射特性與校正訊號相同。

(a) 交錯接線



(b) 直通接線

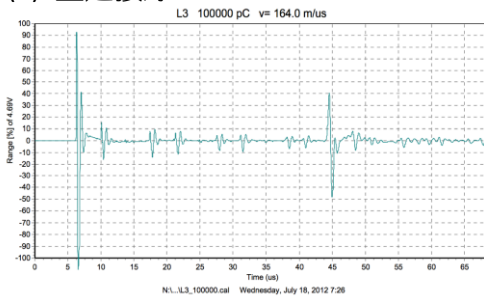


圖19 校正訊號於中間接續閘之折反射現象



圖20 測試系統外部放電訊號

伍、結 論

現場電纜測試往往受限於電纜之大靜電容量，多數測試採用直流電源進行試驗。然而，直流電源之試驗法亦存在盲點及風險，故國內外研究文獻採用極低頻電源測試系統及阻尼振盪電源測試系統，做為替代手法。本文針對國內較少見之阻尼振盪電源測試系統進行介紹，並提出現場案例供作參考。由測試系統架構可知，阻尼振盪電源測試系統以直流電源做為測試電源，故有直流電源體積小之優勢；而其振盪電源則具有交流電源之特性，可用做絕緣診斷。

因為阻尼振盪電源之每一次衝擊的能量低，故最高試驗電壓需要較一般測試稍高，或是需要較多次數之衝擊數量，以誘發瑕疵點開始局部放電或是崩潰。因此，在測試前需先根據電纜規格及試驗類型，以決定最高試驗電壓及每一步階電壓的衝擊次數。

在進行試驗過程中，同時監控局部放電訊號。一但有局部放電現象發生時，便需要進行局部放電訊號定位，以確認該訊號是否會危及電纜絕緣狀態之健全。同時，試驗過程亦監控介質損失因數的變化，並藉由與歷史經驗值的比較，可以評估電纜系統的劣化狀況。

本文舉的兩個例子中，一個案例成功的找出電纜系統中的瑕疵點，一個案例則是說明中間接續閘的连接狀態會影響到數據的判讀。因此，阻尼振盪電源測試系統在正常的操作下，可以替代商

頻電源的現場測試手法，並準確地定位出瑕疵點的位置，有效地避免運轉後的故事。

陸、參考文獻

- [1] 「自設變電站設備檢驗標準參考規範」，台灣區用電設備檢驗維護工程工業同業公會。
- [2] IEEE Std. 400.2 2012: IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above.
- [3] IEEE Std 400.4 2015: IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with Damped Alternating Current (DAC) Voltage.
- [4] A. Cavallini, G. C. Montanari, and M. Tozzi, “Partial discharge measurement and calibration: limits and perspectives for power cables”, Proc. in CMD2010.