

高電壓直流耐壓試驗對電纜壽命的影響

陳建勳 勇帥電氣技術顧問(股)公司

一、前言

油紙絕緣用於中壓、高壓電纜已有 50 多年，由於這些電纜有很大的電容量，以往現場測試時考慮測試設備容量及搬運，往往不做商頻交流耐壓試驗，而採用直流耐壓試驗。目前直流耐壓試驗用來判斷油紙絕緣電纜的好壞已有幾十年的經驗，實踐證明效果不錯，可獲得其缺陷危害性的可靠信息。因此，直流耐壓試驗作為油紙絕緣電纜的現場竣工驗收試驗和定期的預防性試驗項目，對檢出絕緣缺陷和保證電力系統的安全運轉發揮了很好的作用。

現場試驗的目的不是為了檢驗電纜的製造品質或電纜附件的製造品質的好壞，其製造質量已在型式試驗和出廠試驗中證實。電纜在運輸、搬運、存放、敷設和回填的過程中，有可能受到意外損害，所以現場竣工驗收試驗的目的是檢查電纜的敷設及電纜頭的安裝是否正確。隨著電力技術的發展，交聯聚乙烯(XLPE)電力電纜的使用越來越廣泛，對油紙絕緣電纜和交聯聚乙烯絕緣電纜都採用直流耐壓試驗是否合適，如何正確判斷電纜的試驗結果，能否投入運行，這些都是我們在工作中遇到的實質性問題，需要我們正確地判斷並得出正確的結論，為電纜的安全運行提供可靠的依據。

二、直流耐壓試驗對發現油紙絕緣電纜缺陷的有效性

直流耐壓試驗用來判斷油紙絕緣電纜的好壞已有幾十年的經驗，實踐證明效果良好，可獲取其內部缺陷的可靠數據。首先要從電纜直流耐壓與洩漏電流測量意義上來說明，電纜在直流電壓的作用下，電纜絕緣中的電壓按絕緣電阻分佈，當電纜絕緣存在著有發展性局部缺陷時，直流電壓將大部分加在與缺陷串聯的未損壞的部分上，所以直流耐壓試驗比交流耐壓試驗更容易發現電纜的局部缺陷。電纜的直流耐壓試驗和直流洩漏電流測量在其意義上是不同的，直流耐壓試驗和直流洩漏電流測量同時進行，是因為在實際工作中，兩者在接線和使用設備測試等方法與標準是完全相同的。在一般情況下直流耐壓試驗是用來檢查絕緣不良、氣泡、紙絕緣中的機械損傷和施工

不良等的有效方法；而洩漏電流的測試是檢查絕緣老化，受潮的有效方法。

直流耐壓試驗的目的在於檢驗電纜的耐壓強度，它對發現油紙絕緣介質中的受潮，機械損傷等局部缺陷比較有效，因為在直流電壓下絕緣介質中的電壓按電阻係數分佈，當介質有缺陷時，電壓主要被與缺陷部分串聯的未損介質的電阻承受，使缺陷更容易暴露。較有利於發現介質缺陷。油紙絕緣電纜在直流電壓下的擊穿強度約為交流電壓下的二倍以上，所以可施加更高的直流電壓對絕緣介質進行耐壓強度的考驗。在許多情況下，用高阻計測量電纜的絕緣結果良好，但在直流耐壓試驗中發生絕緣被擊穿，因此直流耐壓是檢測油紙絕緣中、高壓電纜缺陷的有效手段。

三、直流耐壓試驗對交聯聚乙烯絕緣電纜的問題性

交聯聚乙烯絕緣電纜，由於它的電氣性能優良，製造工藝簡單，安裝方便，得到了廣泛的採用。已成為油紙絕緣電纜的替代品。一般高壓試驗的通用原則，被試品上所施加的試驗電壓電場強度應模擬高壓電器的運行狀況。而直流耐壓試驗對發現紙絕緣電纜缺陷十分有效，但對交聯聚乙烯絕緣電纜則未必有效，而且還可能產生負作用，主要問題在以下幾個方面：

- 1、交聯聚乙烯絕緣電纜在交、直流電壓下的電場分佈不同，交聯聚乙烯絕緣層是採用聚乙烯經化學交聯而成，屬整體型絕緣結構，其介電常數為 2.1—2.3 受溫度變化的影響較小，在交流電壓下，交聯聚乙烯電纜絕緣層內的電場分佈是由介電常數決定的，即電場強度是按介電常數反比例分配的，這種分佈比較穩定。在直流電壓作用下其絕緣層中的電場強度按絕緣電阻係數正比例分配的。而絕緣電阻係數分佈是不均勻的，這是因為在交聯聚乙烯絕緣電纜處於交聯過程中不可避免地溶入一定量的副產品，它們具有相對小的絕緣電阻係數但在絕緣層徑向分佈是不均勻的，所以在直流電壓下交聯聚乙烯絕緣電纜絕緣層中的電場分佈不同於理想的圓柱體絕緣結構，與材料的不均勻性有關。
- 2、交聯聚乙烯絕緣電纜在直流電壓下會累積單極性電荷，一旦有了由於直流耐壓試驗引起的單極性空間電荷需要很長時間才能將這種電荷釋放，電纜如果在直流殘餘電荷未完全釋放之前投入運行，直流電壓便會疊加在商頻電壓峰值上，使得電纜上的電壓值遠遠超過其額定電壓，它將加速絕緣老化縮短使用壽命，嚴重的會

發生絕緣擊穿。

- 3、交聯聚乙烯絕緣電纜半導體凸出處和污穢點等處容易產生空間電荷，但如果在試驗時電纜端頭發生表面閃絡或電纜附件擊穿，會造成電纜芯線中產生振盪波，在已積聚空間電荷的地點，由於振盪電壓極性迅速改變為異極性，使該處電場強度顯著增大，可能損壞絕緣，造成多點擊穿，也會對其他正常的電纜和接頭的絕緣造成危害。而交聯聚乙烯絕緣電纜一個致命弱點是絕緣內容易產生水樹枝，一旦產生水樹枝在直流電壓下，會迅速轉變為電樹枝，並形成放電，加速了絕緣劣化，以至於在運轉商頻電壓作用下形成擊穿。
- 4、直流耐壓試驗不能有效發現交流電壓作用下的某些缺陷，如在電纜附件內，絕緣若有機械損傷等缺陷在交流電壓下絕緣最易發生擊穿的部位，在直流電壓下往往不能發生擊穿。直流電壓下絕緣擊穿處往往發生在交流工作條件下絕緣平常時不發生擊穿的部位。因此直流耐壓試驗不能模擬高壓交聯聚乙烯絕緣電纜的運行情況，試驗效果差，並且有一定的危害性，所以直流耐壓試驗對檢測交聯聚乙烯絕緣電纜缺陷有明顯的不足。

四、交流耐壓試驗方法選擇

既然直流耐壓試驗不能模擬交聯聚乙烯絕緣電纜運行電場強度狀態，不能達到我們所期望的試驗效果，因此可以考慮用交流耐壓試驗來檢測電纜敷設和附件的安裝品質，目前有以下幾種交流試驗方法介紹：

1、 0.1Hz 極低頻電壓

因被試 XLPE 電纜的電容量很大，商頻試驗時所需試驗變壓器的容量也要很大，導致試驗設備笨重而不適用於現場使用。採用 0.1Hz 作為試驗電源，理論上可以將試驗變壓器的容量降低到 1/600，試驗變壓器的重量可大大降低，可以較容易地移動到現場進行試驗。目前，此種方法主要應用於中低壓電纜的試驗，由於電壓等級偏低，還不能用於 69kV 及以上的特高壓電纜試驗。由於這種原因原來為對大型旋轉式電機進行試驗而開發的超低頻電壓是一種可能替代交聯聚乙烯絕緣電纜直流耐壓試驗的選擇方案。

2、振盪電壓脈衝

振盪電壓脈衝源出於 CIGRE 21-09/2 工作組的推薦標準，該組在 80 年代進行可替代塑料絕緣高壓電纜設施直流電壓試驗的選擇方案的調查研究。按照有或無極性變換的電路變形，這種電壓波形因其隨時間的變化避免了空間電荷效應。此外，這種電壓波形具有在現場使用相對比較簡單的方法可以產生很高試驗電壓的優勢。與其低頻方法不同，它適用於高壓電纜設施。

這些試驗方法在台灣目前還沒有普及，無論從硬體還是軟體上尚處於研究階段。

3、調諧共振電壓

共振耐壓試驗方法是通過改變試驗系統的電感量和試驗頻率，使回路處於共振狀況；對於改變系統的電感量的試驗系統一般稱之為商頻共振系統；對於改變系統的頻率的試驗系統一般稱之為變頻共振系統。可調電感型共振系統可以滿足耐壓要求，但由於重量大，可移動性差，主要用於實驗室。而變頻共振交流耐壓試驗系統，符合體積小、重量輕、容量大且安裝測試方便，很適合於現場測試。依據 IEC 規定主絕緣交流耐壓試驗的電壓波形應為實際正弦波形，頻率應為 20Hz 到 300Hz 之間。

五、試驗結果的分析與判斷

電纜通過直流耐壓試驗而未擊穿者，一般可認為該電纜的絕緣是合格的，可以投入系統運行，但並不是說，通過直流耐壓試驗的電纜品質就是好的。具有優良質量的電纜線路應在合理運用及無外力損傷的情況下安全運行數十年無事故，以下將一般對電力電纜線路絕緣優劣的判斷標準簡介如下：

- (1) 電纜經直流耐壓試驗後絕緣擊穿者，不能投入系統運行，應立即測尋故障點並進行搶修。
- (2) 洩漏電流隨試驗電壓的增高而急劇上升者，不能投入系統運行，應人為提高試驗電壓將電纜擊穿，然後測尋故障點並進行搶修。
- (3) 洩漏電流值很不穩定(排除電源電壓波動等外界因素)，這可能是電纜絕緣內部微小氣隙的局部放電引起。這時可延長耐壓持續時間或提高試驗電壓，觀察洩漏電流

的變化情況，如果在延時或提高電壓的情況下，洩漏電流惡化趨勢不大，可以投入系統運行，6個月後再行複試。

- (4)洩漏電流不平衡系數超過規定的標準時，應首先排除外界因素造成的影響，當確認是由電纜絕緣內部缺陷而引起的洩漏電流不平衡時，應採取上述(3)條中的延時或提高試驗電壓的方法進行判斷與處理。
- (5)洩漏電流隨時間延長有上升趨勢，且洩漏電流值比上次顯著增大時，可採取上述第3條中的延時或提高試驗電壓的方法進行判斷與處理。
- (6)短電纜或其他有微弱缺陷的電纜，洩漏電流偏大而洩漏電流值穩定、平衡時，可投入系統運行。但應在6個月後再行複試。
- (7)直流耐壓試驗中有少數閃絡現象，但在延時或提高試驗電壓情況下，閃絡現象不再出現者，允許投入系統運行，但需6個月後複試；如果仍有閃絡現象出現，一般應找出故障點並予以排除。

以上各條中，需做複試的電纜，凡複試結果無明顯惡化趨勢的電纜，均可投入系統運行，並不再列入複試範圍；如果複試結果具有明顯惡化趨勢，則應找出原因並予以修復。

六、結論

直流耐壓試驗不能有效的發現高壓交聯聚乙烯絕緣電纜的缺陷，在 IEC 60502 中有關 1kV-30kV 電纜現場竣工試驗，雖然並未禁止使用直流耐壓試驗，但是也強烈建議直流耐壓可能會損傷電纜所以並不建議使用直流耐壓試驗。交流耐壓試驗是檢驗交聯聚乙烯電纜絕緣好壞的有效方法，可準確有效的掌握電纜各部位的絕緣狀況，有利於提高電纜的安全運行，減少電纜在運行中的故障。

七、參考文獻

[1] “IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable System Using Very Low Frequency (VLF)”, IEEE Std 400.2-2004.

[2] IEC 60502 “Power Cables With Extruded Insulation And Their Accessories For Rated Voltage From 1kV Up To 30 kV”, 2005.

[3] IEC 60-3 “HIGH-VOLTAGE TEST TECHNIQUES Part3: Definitions and requirements for on-site testing”, 2006

[4] 黃調正 “電力電纜交流耐壓試驗”，台電工程月刊，第 695 期，95 年 7 月，頁 54-65