

電力電纜耐壓試驗

Power Cable Dielectric Test

李永勳
輔仁大學電子工程學系

242 台北縣新莊市中正路 510 號
Tel: (02) 29031111ext.3791
Fax: (02) 29042638
E-mail: lee@ee.fju.edu.tw

黃調正
輔仁大學電子工程學系

242 台北縣新莊市中正路 510 號
Tel: (02) 29031111 ext. 3791
Fax: (02) 29042638
E-mail: titiantw@yahoo.com.tw

摘要

地下電力電纜線路竣工後須進行竣工試驗，近來發生部分電纜線路通過直流耐壓試驗，送電幾小時後卻發生電纜故障的事件，一條 161KV XLPE 電力電纜絕緣層厚度 23mm，僅僅刀傷約 1mm 深度，在送電短短以幾小時內電力電纜被系統電壓擊穿。

研究顯示，電力電纜線路竣工試驗以交流耐壓試驗做為施工不良偵測是非常有效的。由於這種試驗研究很有參考價值，希望本文發表能對從事電力電纜同仁或同業有所防範。

Abstract

Underground power cables have to do the final test when the installation of the cable system has been completed. Recently, some cables have passed direct voltage dielectric test, but they were faulted in several hours after served in system. One 161KV XLPE power cable with 23mm insulation thickness was cut by knife by 1mm depth, and it was broken through by system voltage in just few hours.

Evidently in research, it is very efficient to test installation fault by using alternating voltage dielectric test. Because the research is a very valuable reference, the author wishes it would be useful to his colleagues who are charged in the power cable work or the same business.

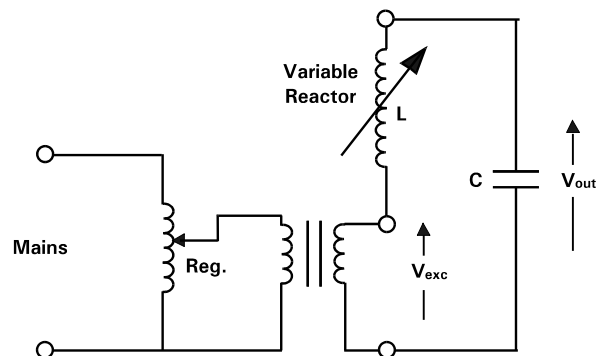
1. 前言

台電公司的第六輸電計畫工程在最近兩年內

已大力的展開，如此可減少輸電及配電的階層以減少損失，69KV 及 11.4KV 電力系統將會慢慢的隨第六輸電計畫工程的完成而漸漸消失，電力的一致化及損失的減少將是一大貢獻，但本次計畫除了變電等相關設備外，地下電力電纜線路佔有一相當大的份量，因架空線路在市區架設較不易被接受，地下電力電纜(Power Cable)線路主要的優點為較不易為外力破壞及影響市容，地下電力電纜線路加入系統前會進行竣工試驗(Final test)，主要有耐壓試驗(Dielectric test)及線路常數試驗(Electrical tests)，但隨着地下電力電纜的施工及加入系統線路的增加，對於台電向來採用的耐壓試驗以直流耐壓方式也須有變革，台電採購國內器材是經過評鑑定型試驗合格的廠商才能參加台電的招標作業，加入系統線路是從定型試驗至竣工試驗為一系列的品質管制，但隨着加入 WTO 允許外國廠商及國內同業參與投標的大量增加，以完善的竣工試驗來做為品質的最後防線相形重要，如有一些例行抽樣試驗成效將更顯著，以下就一些耐壓試驗為本文發表的重點，期能對在電力電纜施工和維護的電力品質管制有所貢獻。

2. 交流耐壓諧振原理及 Q 值技術

串聯諧振等效電路：



圖一

一些典型負載電容量如下：

被試物	電容量
開關	1-5 nF
六氟化硫匯流排	10-50 nF
高壓絕緣體	up to 2 mF

固態介電質電纜的電容公式如下：

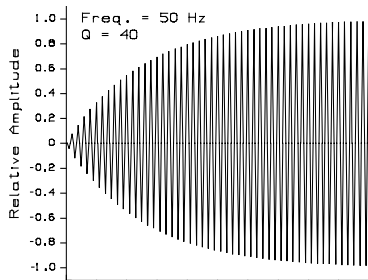
$$C = \frac{7.36 \epsilon_r}{\log_{10}(b/a)} \text{ pF/ft} = \frac{24.16 \epsilon_r}{\log_{10}(b/a)} \text{ pF/meter}$$

b = 絕緣體的外半徑

a = 絕緣體的內半徑

r = 相對的介電常數(2 - 6).

當被測物閃絡發生時，能量在諧振電路內遊散，電壓傾向緩慢的再建立，閃絡後系統輸出電壓顯示如下：



圖二

$$V(t) = V_{peak} [1 - e^{(-\frac{\omega t}{2Q_{system}})}] \cos(\omega t)$$

在諧振系統的設計值 Q 是一重要參數

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{exc}} \right| = \frac{1}{\sqrt{(\omega RC)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2}}$$

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{exc}} \right| = \frac{1}{\omega RC} = \frac{\omega L}{R} = Q$$

在串聯諧振情況： $\omega L = 1/\omega C$ or $\omega^2 LC = 1$
輸出 KVAR 與輸入 KW 的關係如下：

$$kVAR_{out} = IxV_{out} = QxIxV_{exc} = QxkW_{input}$$

由上述顯示品質因素 Q 參數在串聯諧振電路是很重要的，當被試物為低 Q 值(損失因素大)要諧振時系統必須供應大量的有效功率，

被試物	損失因素	被試物"Q"值
開關	< .0001	>
10,000 XLPE 電纜	< .001	>
1,000 EPR 電纜	~ 0.005	~ 200
PVC 電纜	~ 0.05	~ 2
電容器	< .01	> 100
水端末	0.1	10
發電機	0.1	10

3. 電力電纜的試驗規範及歐日規範探討

台電電力電纜的材規就 11.4KV、22.8KV、69KV、161KV(XLPE)及 161KV(OF)皆有竣工試驗的耐壓規定，如表一，制定時考量當時的現場環境及設備的可行性，依國外較有公信力的試驗規範，並配合台電實際須要而定出當電力電纜兩端皆為 GIS 且無法用套管引出試驗時改用系統加壓 24 小時，使用系統加壓 24 小時的這種方法有些缺點，因其所用的電壓與將來運轉電壓一樣，較不具有耐壓試驗的精神，電纜(Cable)如有品質不良而產生擊穿，遭擊穿的不良地方將因嚴重的破壞燒損而無法查明，且故障產生的強大故障電流對供電系統及開關設備是一極大威脅。

(表一)

電壓等級	竣工試驗	使用一年內	使用超過一年
11.4KV	直流 55KV, 15 分鐘	依使用狀況	依使用狀況
22.8KV	直流 80KV, 15 分鐘	依使用狀況	依使用狀況
69KV	直流 200KV, 15 分鐘	直流 156KV, 5 分鐘	直流 96KV, 5 分鐘
161KV(XLPE)	直流 320KV, 15 分鐘	直流 228KV, 15 分鐘	依使用狀況
161KV(OF)	直流 325KV, 15 分鐘	直流 228KV, 15 分鐘	依使用狀況
345KV	250KV 耐壓 及部份放電 試驗	250KV 耐壓 及部份放電 試驗	依使用狀況

多年來歐洲與日本在電纜竣工試驗使用的電壓是以直流或交流有相當的差異，日本在 161KV 以下普遍使用直流耐壓，161KV 以上以則以交流耐壓為主，另外有些尚配合部份放電的現場測量，但歐洲系統普遍以交流耐壓為試驗電源，另外有些進行部份放電的現場測量，以部份放電試驗所強調的是部份放電的檢出而非耐壓，其使用交流頻率為 30-300HZ，而且現場部份放電的測量通常研究成份居多且為經驗判斷，是否會造成誤判有待研究，而且沒有很明確的數量化，很難被施工單位信服，不管直流耐壓或交流耐壓，許多規範皆認定兩者皆為可用的一種試驗電源，以 IEC 的規範而言，161KV 以下交流耐壓與直流耐壓皆有規範，取捨的不同試驗結果品質亦會不同，由耐壓施行發展情況看來，直流耐壓由於設備簡便，在現場組裝試驗較方便，電纜安裝中有嚴重的品質缺失很容易被檢出，對於品質缺失屬於中長期才會顯現者，交流耐壓試驗效果就非常顯著。

就 IEC 規範等，在此有關 11.4KV 及 22.8KV XLPE 電力電纜竣工試驗方面做一說明，該電壓等級適用 IEC60502-2，耐壓可分為直流試驗及交流試驗如下：

1. 在直流試驗方面採用 $4U_0$ 加壓 15 分，無異狀為接受。

註:U: 相對相電壓， U_0 : 相對地電壓

2. 在交流試驗方面從下面兩項選擇一項試驗，如無異狀則接受該電纜。
 - A. 在導體與 Sheath 間以 $U_0 \times \sqrt{3}$ 耐壓試驗 5 分鐘。
 - B. 在導體與 Sheath 間以 U_0 耐壓試驗 24 小時。

在 69KV 及 161KV XLPE 電力電纜竣工試驗方面，這兩電壓等級適用 IEC 規範為 IEC60840，該規範適用額定電壓由 36KV 至 170KV 的 XLPE 電力電纜，耐壓可分為直流試驗及交流試驗如下：

1. 在直流試驗方面採用 $3U_0$ 加壓，試驗 15 分，如無異狀為通過試驗。
2. 在交流試驗方面從下面兩項選擇一項試驗，如無異狀則接受該電纜。

A. 在導體與 Sheath 間以 $U_0 \times \sqrt{3}$ 耐壓試驗 5 分鐘

B. 在導體與 Sheath 間以 U_0 耐壓試驗 24 小時

在 345KV XLPE 電力電纜竣工試驗方面，此一電壓等級適用 IEC 規範為 IEC62067，該規範適用額定電壓由 170KV 至 550KV 的 XLPE 電力電纜，竣工試驗只有交流耐壓試驗規範，並建議不要對主絕緣部份進行直流耐壓試驗，但對於被覆的絕緣試驗，則建議用 DC20KV 耐壓，試驗一分鐘，如無異狀則接受該電纜的被覆絕緣，表二為該標準所訂定的試

驗電壓，且為買賣雙方同意，使用正弦波，頻率為 20-300HZ，利用表二試驗電壓(相對地)耐壓一小時或 $U_0 \times \sqrt{3}$ 耐壓一小時，另外也可用 U_0 耐壓 24 小時。

表二

額定		試驗電壓(相對地)
U KV	U_0 KV	KV r. m. s.
220-230	127	180
275-287	160	210
330-345	190	250
380-500	220	260
500up	290	320

其他在 IEEE STD 400-1991 規範裏電纜 5KV-500KV 的竣工試驗規定如表三，竣工試驗為 15 分鐘，維護試驗為 5-15 分鐘，對於超過 115KV 的電纜進行試驗前，須要與製造商討論有關加壓的情況，是否會對其配件有任何影響，通常故障型態為(1)電流急遽上升，(2)試驗設備或終端匣閃絡。

表三

系統電壓 (KV)	系統 BIL (KV)	竣工試驗 (DCKV)	維護試驗 (DCKV)
15	110	56	46
25	150	75	61
69	350	175	130
161	550	275	205
	650	325	245
345	750	375	280
	950	475	355
	1050	525	395
	1175	585	440

4. 構造及電性試驗

由於近來發生部分直流耐壓通過試驗，但送電後卻發生電纜故障的事件，以下的試驗為取樣自羅東-利澤二路 M30 人孔故障電纜附近沒有受損的部分電纜，電纜規格為 161KV2000mm² 進行部分重要的構造及電性試驗。

一、電纜構造的實測平均值如下：

絕緣體外徑:104.495mm

絕緣遮蔽層(外導)厚度:1.533mm

絕緣體厚度:22.95mm

內導厚度:2.09mm

導體外徑:53.71mm

本項所有構造測出的數據皆合乎規格標準要求。

二、絕緣體試驗平均值:

老化前:

取試片厚度:1.77mm

寬度:6.4mm

橫斷面積:11.33mm²

拉斷力:24.58kg

抗張強度:2.17kg/mm²

試片標記:50.8mm

拉斷強度:325.1mm

伸長率:528 mm

在交連度方面:

伸長率 55%

變形率-2.2%

本項絕緣體試驗合乎規格標準要求。

三、外導體積電阻測試如圖一: $\rho = 2R(D^2 - d^2)/L$

絕緣體外徑(d):4.114 吋

兩電壓極間距(L):2.004 吋

外導之外徑(D):4.235 吋

在 90°C 下由量測的電壓 2.92V, 電流

14.71mA, 電阻 198.5Ω 得出的體電阻為 200.1 Ω-cm。

在 110°C 由量測的電壓 3.9V, 電流 11.21mA, 電阻 348.2Ω 得出的體電阻為 351.1 Ω-cm。

本項外導體積電阻測試合乎規格標準要求。



圖三

四、內導體積電阻測試如圖三: $\rho = 2R(D^2 - d^2)/L$

絕緣體外徑(d):2.115 吋

兩電壓極間距(L):2.004 吋

外導之外徑(D):2.299 吋

在 90°C 下由量測的電壓 51.3V, 電流 0.72mA, 電阻 71250Ω 得出的體電阻為 28876 Ω-cm。

130°C 由量測的電壓 44.6V, 電流 0.83mA, 電阻 53734.9Ω 得出的體電阻為 21777.5 Ω-cm。

本項內導體積電阻測試合乎規格標準要求。

5. 破壞模擬試驗

試驗一:取一故障電纜附近未受損 30 公尺的電纜,在兩端做必要的端末處理,在端末處理與未去除電纜被覆交接近,於一處已去除電纜被覆的地方,將外導刮除約直徑 10mm 的不規則形狀如圖四,再以錫箔包紮以模擬 Sheath 效果,以 AC60HZ 分別以 93KV、161KV 及 240KV 各實施耐壓 5 分鐘,結果並無擊穿破壞,說明外導的輕微受傷尚不至使送電中之電力電纜造成故障。



圖四

試驗二:將試驗一的電纜,在兩端做必要的端末處理,在端末處理與未去除電纜被覆交接近,於一處已去除電纜被覆的地方,利用刀片插入深約 5.7mm(含外半導)與電纜平行的刀傷如圖五,也就是深入電力電纜 XLPE 絕緣層約 3.73mm 的刀傷,再以錫箔包紮以模擬 Sheath 效果,預備以 AC 60HZ 93KV 實施耐壓試驗 5 分鐘,結果在 183 秒時該刀傷處擊穿破壞如圖六。



圖五



圖六

試驗三：取一如試驗一的另一節 30 公尺電纜，在兩端做必要的末端處理，在末端處理與未去除電纜被覆交接近，於一處已去除電纜被覆的地方，利用刀片插入深約 3mm(含外半導)與電纜平行的刀傷如圖七，也就是深入電力電纜 XLPE 絕緣層約 1mm 的刀傷，再以錫箔包紮以模擬 Sheath 效果，以 AC 60HZ 93KV 實施耐壓試驗 5 分鐘，結果無異狀，再以 AC 60HZ 161KV 耐壓試驗 5 分鐘，結果在 84 秒時該刀傷處擊穿破壞如圖八。



圖七



圖八

表四

試驗別	93KV5 分鐘	161KV 5 分鐘	240KV 5 分鐘	說明
試驗一	無異狀	無異狀	無異狀	不小心傷及外半導時，短時間電纜尚可承受耐壓。
試驗二	183 秒 刀傷處擊穿破壞			送電後，極短時間即會造成該電力電纜擊穿破壞。
試驗三	無異狀	84 秒 刀傷處擊穿破壞		送電後，約幾十小時內即會造成該電力電纜擊穿破壞。

本項試驗主要是以模擬方式做為事故的判斷，當施工過程中，從電纜的延放到接續匣或終端匣的組裝，若無視於小小的不清潔或刮傷，往往會造成電力電纜擊穿破壞，電力電纜主要的要求是能承受系統電壓並忠實的傳送電力，由本項三個不同方式試驗的結果，表四列出三種可能判斷依據。

6. 結論

前面的各項實驗證明，電力電纜的從材料、製造及施工，每一步驟皆非常重要，材料及製造變異性較少，但施工由於搬運過程、現場環境、人員素質及管理，皆不能有閃失，只要有一個部分不週延，

將容易使整個工程失敗，接續匣按裝時因不注意環境溼度、溫度及整潔，也會一樣被系統電壓擊穿，它們所引起的故障並不亞於電力電纜的絕緣故，因量化試驗不易本文並未提及。

為使系統送電後長久運轉順利，本人建議日後 69/161KV 電力電纜的耐壓試驗儘量要克服困難，以 60HZ、 U_0 耐壓試驗 5 分鐘，如無異狀再將電壓升至 $U_0 \times \sqrt{3}$ 耐壓試驗 5 分鐘，無異狀則接受該電力電纜。

對於很特殊的變電所交流耐壓車無法到達試驗時，先以 $3U_0$ 直流耐壓 10 分鐘，如無異狀再以系統電壓加壓 24 小時，如不先直流耐壓就使用系統加壓，比較容易造成系統或開關的危害。

至於 345KV 電力電纜竣工耐壓試驗，本人建議採用 250KV，60HZ 耐壓試驗 1 小時為主，部分放電試驗可做為研究，但因現場環境的干擾太大，誤判的機率也很高。

7. 參考文獻

- [1] Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1KV ($U_m=1,2KV$) up to 30KV($U_m=36KV$) IEC 60502-2 First edition 1997-04
- [2] Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30KV ($U_m=36KV$) up to 150KV($U_m=170KV$) IEC 60840 Second edition 1999-02
- [3] Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150KV($U_m=170KV$) up to 500KV($U_m=550KV$) IEC 60502-2 First edition 2001-10
- [4] IEEE Guide for Making High-Direct-Voltage Tests on Power Cable Systems in the Field IEEE Std. 400-1991 (Revision of Std 400-1980)
- [5] 高壓地下電纜 VLF 測試評估研究完成報告 廖財昌 89,12
- [6] High voltage AC Dielectric Series Resonant test systems Hipotronic ,Inc 1996-02

8. 感謝

本研究非常感謝台電廖俊峰股長、李春通股長、余維文分隊長、戴文正領班、莊裕豐股長及太平洋電線電纜公司李六槐副理等人，由於他們不吝的提出個人的寶貴意見，使得本文能順利的完成。