



# 中壓電纜之 電氣崩潰 電蝕崩潰 識別

廠區發生中高壓電纜線路電蝕崩潰時，可能引起線路跳脫或停電，嚴重時可能引起爆炸、氣爆或火災，對多數火災調查人員而言，處理這類火災之起火原因調查工作，確實存在一定的難度。

黃明進 /  
國立中正大學電機工程學系博士



## 廠區中壓電纜需求增多

**隨**著企業規模或工程日益加大，基於監控、管理及自動化需求，於是有中壓變電中心的設置，利用提高電壓降低電流的傳輸方式，來減少變電中心與負載之間的線路傳輸損失，及解決遠距離大負載電能傳輸之電壓降問題，於是中高壓電纜線路猶如人體的血管般分佈廠區各處，當事故發生時，除了影響生產造成極大損失外，更可能引起電氣火災及公共安全問題。

中高壓電纜線路發生電氣崩潰（電路短路行為）時有所聞，事故發生時災害較輕者僅發生線路跳脫及停電損失，災害較重者則會引起爆炸、氣爆或火災，當事故原因複雜且涉及公安問題及災害調查時，若調查人員僅用線路事故或電線走火作為調查結論，於糾紛調解及法律訴訟上必會出現極大爭議，因為災害產生有其因果關係、先後演進過程、涉及多種電氣理論基礎及其他科學學術領域，非一般電氣工程人員所能深入分析與鑑別引起事故之原因<sup>[1]</sup>。

### 中高壓電纜結構

中高壓電纜為了提高電纜使用壽命，確保電應力均勻分佈及平滑之等電位面，除了提高絕緣體的純淨度外，製造時須採內導電層、絕緣體、外導電層三層同時押出，來減少氣隙、水氣及雜質，利用半導體性材料取代電纜高、低壓電極，使電力線均勻分佈進而達到絕緣體內部電位梯度呈同心圓分佈，且使電力線集中現象降低、等電位線不受周圍環境變化而影響電纜電場（電位梯度）的分佈，中高壓電纜利用金屬遮蔽層接地使將電纜之電（場）位限制於絕緣體內部，將金屬遮蔽層直接接地以提供電纜參考接地電位<sup>[2]</sup>，使人員可以免於感電之風險，且可將電纜安裝於金屬托架上。中高壓電纜之被覆層，其功能包括，避免水氣徑向進入絕緣體、安裝運轉時保護電纜絕緣體、降低火焰延燃能力、承受金屬遮蔽層感應電壓、承受雷擊電壓或開關突波或故障電流於金屬遮蔽層產生之感應電壓，因為被覆層必須有足夠阻抗及耐壓能力要求，以承受金屬遮蔽層感應電壓、雷擊電壓、開關突波或故障電流感應電壓，所以又稱之為防蝕層，中壓電纜之結構如圖 1 所示。

圖 1. 中壓電纜之結構





## 電蝕災害可能擴大為電蝕崩潰或引起電氣災害

金屬遮蔽層結構為銅帶重疊纏繞，用來提供電纜參考電位，當金屬遮蔽層浮接、金屬遮蔽層不連續時，金屬遮蔽層會產生異常接地電位及發生電蝕，當金屬遮蔽層接地電位有洩漏路徑時，防蝕層也會發生電蝕行為，因為電蝕係先對有接地參考電位之防蝕層進行侵蝕，試圖提供金屬遮蔽層及絕緣體參考接地電位，當防蝕層電蝕侵蝕路徑形成後，因無法滿足絕緣體參考接地電位要求，且金屬遮蔽層之電位經由電蝕路徑之阻抗接地會產生局部高溫，進而導致絕緣體受到逐步侵蝕，稱之為電蝕行為。因為電蝕僅發生於某些有接地參考電位之防蝕層位置，所以不易察覺，此外一般電氣維護人員通常無法了解，已接地之金屬遮蔽層會產生異常接地電位且會帶來電蝕崩潰風險，因而使得電蝕災害擴大或再次發生電蝕崩潰。

## 電場引起之破壞行為

任何絕緣系統於加壓後，高壓電極與參考電極間便存在極微小之電流流動，此電流包括介質吸收電流與表面洩漏電流（或稱之為暗流），介質吸收電流用以呈現絕緣體之絕緣本質特性，表面洩漏電流（或暗流）用以說明絕緣體之表面與環境相互影響之特性，介質吸收電流與表面洩漏電流皆為連續性電流，當絕緣體內部或絕緣體表面之電場強度超過臨界放電電壓時，則會產生放電電流脈波，連續性介質吸收電流、洩漏電流、間歇性放電脈波電流皆會引起溫升與電位梯度變化，當介質內部或絕緣體之表面存在瑕疵時，更容易引起局部溫升、電應力集中與間歇性脈波放電電流，瑕疵點引起之放電行為，促使絕緣體產生劣化崩潰之原因包括：放電行為會引起溫升、瑕疵點尖端或碳化路徑尖端使得電應力更集中、電子撞擊絕緣材料使得分子鏈結斷裂或成為帶電離子、放電產生之機械應力超過材料之機械強度造成絕緣材料局部裂痕，因此瑕疵點鄰近之絕緣材料，更容易產生電樹 (electric treeing)、電痕 (electric tracking)、及防蝕層之電蝕 (electric erosion)。

## 絕緣體發生部份放電之影響

所謂放電乃是一種瞬間電壓崩潰或電場急遽變動之現象，放電可區分為絕緣體內部放電，稱之為部份放電或局部放電，高壓導體之放電稱之為電暈 (Corona) 放電，絕緣體表面之放電稱之為表面放電，加壓時絕緣體及瑕疵點隨著電源電壓變動率 ( $\Delta v / \Delta t$ ) 進行充電，當瑕疵介質達到放電起始電壓時，累積之電荷會以極快之速度向周圍介質進行放電，此放電是一種電壓崩潰或電荷釋放行為，放電過程會導致局部介質電場劇烈變化，進而加速絕緣介質劣化，放電能量以電流脈波或電弧形式將能量散逸，任何形式的放電行為都是以周圍其他絕緣材料作為放電路徑及能量散逸路徑，所以隨著電壓增減、極性交變、時間延續，都會快速加熱絕緣材料進而引起絕緣材料老化及崩潰。放電介質之殘餘電荷多寡，會影響部份放電消失電壓準位及是否發生加速老化崩潰速率及連續放電之關鍵。

- (一) 部份放電：部份放電又稱局部放電或（絕緣體）內部放電，用以描繪絕緣材料或絕緣系統中的瑕疵、電應力集中、電應力局部崩潰所造成的放電行為，絕緣系統中之瑕疵包括雜質（有機物、無機物）、金屬、氣隙、液體，絕緣系統之瑕疵點其介質常數與絕緣材料不同，就交流電場而言，此瑕疵點之介質常數差異，會改變絕緣體之電力線之路徑及各區域之電通密度，進而改變絕緣體內部之電位梯度分佈，而導致瑕疵點與絕緣體產生不同的分壓比率、局部電場強度差異與電場過度集中，所以高純度絕緣材料內部，其電場強度及電通路徑會均勻分佈，當絕緣材料有瑕疵時會造成電場不均勻、電通（力線）路徑繞曲及電應力集中，隨著電壓的升高，瑕疵點的電場強度超過臨界應力時，則會發生局部崩潰放電現象，隨著交流電壓正負週期的交變，瑕疵點會經由絕緣體進行充電，瑕疵點累積之電荷以極短時間快速對絕緣體再進行放電，此種以其他絕緣厚度為橋樑的高頻放電行為或絕緣厚度未完全崩潰之放電行為稱之部份放電或局部放電，放電產生時放電能量會導致絕緣體快速產生進展式侵蝕而引起崩潰<sup>[2-3]</sup>。連續部份放電會引起絕緣材料劣化引發電氣崩潰。





圖 2. 近內導電層引起之崩潰與電樹路徑

固態聚合物絕緣體內部之雜質或瑕疵點，通常會伴隨著氣隙存在，所以部份放電發生時，通常會造成雜質及氣隙產生離子現象，此帶離子會引起氣隙及瑕疵點電場劇烈變化及降低放電起始電壓，此外當固態絕緣材料發生內部放電，帶離子或電荷會對於包覆瑕疵點之絕緣體內壁 (Walls) 進行轟擊 (ionic bombardment)、能量散逸、引起電應力遽變、電磁力 (Electro mechanic force) 對絕緣體鏈結之侵襲 (impinging) 等，都會造成聚合 (polymeric) 絕緣材料斷鏈與破壞，使得絕緣體分子量降低，聚合絕緣材料局部斷鏈為單體 (monomer) 或數百單體組合體，放電過程產生之不穩定媒介物及帶離子，更易因側擊 (side attack) 聚合體的鏈結，使得聚合體的鏈結 (polymeric chain) 斷裂，而使絕緣體局部形成個別聚合物，進而變成脆化 (embrittled)、軟化 (softening)、劣化而崩潰。當電纜絕緣體發生崩潰時，可由絕緣體電樹成長方向來判斷電應力集中之源頭，進而分析引起崩潰之原因，圖 2 所示電樹自近內導電層開始成長，之後逐步成長終至絕緣崩潰，由電樹成長方向可判定電應力起源近內導電層，圖 3 所示電樹自近外導電層開始成長，之後逐步成長終至絕緣崩潰，由電樹成長方向可判定電應力起源近外導電層，對於引起電應力集中之原因則須進一步 (顯微鏡觀察或微量分析) 分析以判定引起崩潰之原因。

(二) 電痕：發生電痕之原因乃絕緣體表面存在電導電性瑕疵所致，如水氣、碳痕或積塵污穢等，當導體或電極加電壓 (energizing) 後，於高壓電極及參考電極間之絕緣體沿面 (creeping surface) 瑕疵點，會引發局部區域電場強度不均勻分佈，使得局部區域電應力集中或電位梯度提高，若由離子化角度來衡量，導電性瑕疵於絕緣體表面會產生電子遷移，且加劇導電性瑕疵點之電子與原子碰撞，使得電場變化加劇及電場分佈更不均勻、更顯著加劇離子化進展，若由電應力集中之角度來衡量，電應力集中會加劇周圍氣體離子化，進而產生表面放電或火花，使得絕緣體表面產生導電性電痕路徑。若由沿面洩漏電流角度來衡量，導電性瑕疵除了增大表面洩漏電流外，當局部電位梯度達到臨界條件時則會產生間歇性放電脈波，進而促進局部溫升與電應力不均勻分佈。

圖 4 所示為絕緣體表面放電引起之電痕路徑。電痕最常發生於鄰近高壓電極或參考電極附近之絕緣材料，其主要原因乃表面洩漏電流、間歇性放電脈波、電子與離子於接近高壓電極或參考電極附近時，會急遽引起電場變化及加速電子與離子碰撞或二次碰撞離子化現象，其次乃高壓電極或參考電極附近之絕緣體表面易吸附或存在導電性瑕疵，容易引起表面放電及解離氣體分子，加速絕緣體劣化。絕緣體表面電場強度不均勻分佈的原因有 (1) 電極或絕緣體表面之幾何形狀不規則或尖突，(2) 絕緣材



圖 3. 近外導電層引起之崩潰與電樹路徑



圖 4. 絕緣體表面放電引起之崩潰與電痕路徑



料吸溼或表面殘留溼氣且分佈不均勻，(3) 絕緣體加電壓後，表面洩漏電流對材料本身或其表面所吸收之水分進行煮散 / 再分配 (boil away-redistribution) 的作用，此重覆性的加熱現象促使材料表面產生局部溫升之乾帶及絕緣材料表面阻抗不均勻，因而導致電場分佈不均勻，而產生放電及電痕，(4) 水氣與灰塵凝結於絕緣材料表面形成污垢，降低絕緣表面電阻或增加導電性，因而產生放電或電痕。<sup>[2-3]</sup>

(三) 電蝕：所謂電蝕乃接地電位對防蝕層的嚼食 (chewing) 侵蝕現象，本文用電蝕來描述中高壓電纜金屬遮蔽層接地電位對防蝕層的嚼食 (chewing) 侵蝕或放電現象，用來區別絕緣體內部之放電之電樹崩潰行為、絕緣體表面放電之洩漏電痕行為與 Galvanic 電化蝕 (異種金屬 (dissimilar metal) 電化蝕) 行為。當中高壓電纜線路或電力絕緣線路之防蝕層發生破損或形成電導路徑、金屬遮蔽層浮接、金屬遮蔽層不連續、金屬遮蔽層接地電位異常、或金屬遮蔽層接地電位出現洩漏路徑時，穿越防蝕層之電流或放電脈波電流將逐步侵蝕防蝕層，對於有參考電位之防蝕層，常導因於防蝕層之破損而發生單純電蝕行為，此時防蝕層須位於參考電位上且有潮濕或電導媒介存在。若金屬遮蔽層浮接或金屬遮蔽層不連續時，於有參考接地點處會發生防蝕層電蝕行為，不需要經由潮濕或電導媒介。圖 5 所示為防蝕層電蝕引起之崩潰與環狀電蝕路徑，當防蝕層因無法承受上述因素所產生異常地位升時，會經由防蝕層或電蝕路徑以放電形式將電位降低或接地排放於參考電位點。電蝕通常以較慢的成長速率對防蝕層產生進展性的侵蝕，

進而發展出電蝕路徑或電位接地路徑，再逐漸剝蝕絕緣材料而產生漸蝕現象。此種剝蝕或漸蝕現象，有異於電痕總是生成於絕緣表面，且朝向高低壓電極間縱向方向成長。電蝕首先對有參考電位之防蝕層發生電蝕及成長，之後以較長的時間來造成電纜防蝕層圓周環向劣化或漸蝕。此種局部電蝕會促使絕緣體與防蝕層逐步建立電導性接地路徑，使得絕緣厚度降低，當剩餘的絕緣材料無法承受系統電壓時，兩電極瞬間會產生跨橋 (bridges) 崩潰，即形成一條完整的破壞通道。如前所述，因漸蝕終致崩潰的電蝕現象，需要很長時間，才會引發第二階段絕緣崩潰，所以電蝕成長過程與路徑並非僅單一徑向進展。此非單一徑向電蝕崩潰路徑提供研究者一個判斷依據，包括電蝕所生成之電樹成長方向為電蝕方向及起源，緩慢電蝕行為引起之崩潰，會留下環狀電蝕路徑為其主要特徵，電蝕崩潰隱藏之風險可區分為自燃自蝕之電蝕風險及短路崩潰電弧風險。<sup>[3-5]</sup>

#### 金屬遮蔽層異常電位原因分析

金屬遮蔽層出現高電位之原因，可區分電力系統暫態感應電壓及商頻感應電壓，暫態感應電壓、局部電場集中超過防蝕層設計要求、防蝕層之阻抗或絕緣能力降低等，都會促使防蝕層出現針孔破壞，商頻感應電壓則是持續產生電蝕之動力來源，防蝕層設計時已考慮商頻感應電壓承受能力，當有參考電位之防蝕層存在針狀蝕孔



圖 5. 防蝕層電蝕引起之崩潰  
與  
環狀電蝕路徑





時，或存在異常商頻感應電壓時，則會發生電蝕行為，提供電蝕行為源源不斷之主要能量來源，包括電流（磁場）感應電壓（Current induced voltage）及電容（電場）感應電壓（Capacitance induced voltage）。

（一）電流感應電壓：當線路上有負載電流流動或臨近電磁場時，金屬遮蔽層會因電磁感應而產生感應電壓，為保護人員安全和確保設備壽命並避免產生電腐蝕現象，通常會採取各種措施以降低感應電壓及防止電蝕現象產生，就防蝕材料而言，必須視環境需求提高防蝕材料等級，使突波或感應電壓無法破壞防蝕層而產生電蝕電流，或增加防蝕層阻抗降低電蝕電流。就中高壓電纜金屬遮蔽層感應電壓的處理方式而言，三心絞合電纜之金屬遮蔽層可採兩端接地方式處理，短距離線路可採單端接地方式，長線路通常將金屬遮蔽層進行换位（transposition）即交錯接地（cross Bonding），將金屬遮蔽層之電位限制於 30V - 65V 之間，在特殊情形，如發變電所內因大電流傳輸之需求，可經防蝕處理後容許感應電壓提高至 100V<sup>[6]</sup>，雖然電流感應電壓不易使被覆層或防蝕層破壞，但當防蝕層有破損瑕疵且周圍環境提供參考電位、或防蝕層長期處於潮溼環境中，防蝕層材料特性會大幅降低而產生電蝕。

電流感應電壓通常與導體配置方式有極大關係，三相電纜之金屬遮蔽層感應電壓之計算如以下公式所示。

$$E_a = 2\pi f \cdot I_A \left\{ 2 \ln \frac{\sqrt{D_{AB} D_{AC}}}{r} + j\sqrt{3} \ln \frac{D_{AC}}{D_{AB}} \right\} \times 10^{-4} \quad V/kM$$

$$E_b = 2\pi f \cdot I_B \left\{ 2 \ln \frac{\sqrt{D_{AB} D_{BC}}}{r} + j\sqrt{3} \ln \frac{D_{AB}}{D_{BC}} \right\} \times 10^{-4} \quad V/kM$$

$$E_c = 2\pi f \cdot I_C \left\{ 2 \ln \frac{\sqrt{D_{AC} D_{BC}}}{r} + j\sqrt{3} \ln \frac{D_{BC}}{D_{AC}} \right\} \times 10^{-4} \quad V/kM$$

其中

$E$ ：金屬遮蔽層感應電壓， $r$ ：金屬遮蔽層平均半徑， $D$ ：電纜中心間距， $I$ ：導體電流

（二）電容感應電壓：當傳輸線路之金屬遮蔽層發生不連續現象，在不連續的金屬遮蔽層區間會與周圍參考電位間，存在電容感應現象而產生感應電壓，此感應電壓與系統電壓及防蝕層介電常數及參考電位接地阻抗成比例，此感應電壓極易造成防蝕層絕緣破壞，而產生電蝕電流，此電蝕電流路徑提供浮接金屬遮蔽層或不連續之金屬遮蔽層接地放電路徑，此電容感應電壓會持續提供電蝕電流且逐步嚼食防蝕層，因為電蝕路徑屬於變動高阻抗接地，所以仍無法滿足金屬遮蔽層低阻抗穩態接地之要求，因此浮接之金屬遮蔽層，無法提供符合電纜等電位面分佈要求之參考電位遮蔽，亦即金屬遮蔽層無法將電纜電位局限於絕緣體內部，電蝕過程金屬遮蔽層無法提供良好接地，將導致絕緣遮蔽層經由電蝕路徑之接觸電阻接地或鄰近金屬遮蔽層接地，因無法提供連續且長時間的接地電位及不連續金屬遮蔽段經由絕緣遮蔽層向鄰近金屬遮蔽層接地排放電位，所以將導致絕緣遮蔽層的阻抗及溫度提高，因而更加劇電蝕區嚼食或漸蝕的情形，若電蝕區域長期曝露於大氣中則更容易因為潮溼而加速電蝕。

#### 中高壓電纜之故障原因判斷依據

最常應用於中高壓電纜之故障原因判斷方法，係利用電樹成長方向來判斷故障位置之誘發點或電應力集中之源頭，對於電應力引起之崩潰或災害之專業判斷，須結合電場分佈理論、微量成份分析及相關佐證特徵，來判斷電應力集中位置及方向，以判斷事故發生原因或應力來源，進而推論電樹成長與事故肇因之關係<sup>[1]</sup>。

若故障原因屬於製造上或外來機械力所造成之品質瑕疵，其破壞現象必為單點崩潰現象，電樹之成長如大自然中之樹木成長可發現樹之根源，此樹根即為故障發生之起源，此等單純故障類型，除了判斷故障發生之起源外，為確定引起崩潰故障原因，通常必須對破壞點前後段之電纜樣品進行微量物質檢測，以確認真正事故原因。若崩潰點周圍佈滿電樹時，可判定在崩潰點附近（環境）存在極強大的應力或變動應力，亦或此



區域失去原來電應力控制條件、設計或環境，此應力將造成整個電纜由外向內逐步破壞或無方向性電樹破壞現象。此等故障類型通常發生於電纜末端或接續部位，電纜接續匣及電纜終端匣因為結合其他器材進行電應力控制，所以除了判斷故障發生之起源外，必須對電纜系統之電應力設計及組立器材進行相容性分析，才能正確判斷引起崩潰之原因 [2]。

電纜瑕疵點引起之絕緣崩潰現象，可概分為由內導電層瑕疵所引起之由內向外之崩潰行為、由絕緣體內部引起之由中間向內及向外之崩潰行為、及由外導電層瑕疵所引起之由外向內之崩潰行為。此種導因於內導電層 / 絕緣 / 外導電層瑕疵所造成的崩潰，其崩潰路徑通常會存在電樹狀之碳化路徑（有別於水樹的形式），電樹隨著電場之作用及絕緣之劣化而呈樹狀般之成長，而其瑕疵點即為樹根部位，可藉此用以判斷瑕疵的起緣及引起事故之原因。防蝕層崩潰屬於非直接性的絕緣崩潰行為，且崩潰點之絕緣體屬於另類的由外向內蝕破壞情形，主要起因於金屬遮蔽層經由防蝕層，由內向外尋求參考接地電位之擴展性的破壞行為，進而引起絕緣崩潰，其崩潰或電蝕形態屬於逐步擴展破壞，擴展步驟如下所述：

- 步驟 1：放電脈波或洩漏電流逃逸路徑建立，造成防蝕層局部溫昇。
- 步驟 2：防蝕層或導體絕緣支撐物 (supporter) 或襯墊 (gasket) 出現針孔狀電蝕。
- 步驟 3：防蝕層或襯墊呈區域性由內向外的電蝕現象或悶燒。
- 步驟 4：防蝕層出現局部由外向內電蝕悶燒現象。
- 步驟 5：出現非連續接地或非穩態接觸阻抗放電路徑，而加速外被覆呈環狀電蝕及絕緣電蝕劣化現象。
- 步驟 6：防蝕層電蝕劣化導致絕緣體耐壓降低最後導致絕緣體完成崩潰破壞 (Breakdown)。

防蝕層發生電蝕之主要特徵及識別方法：

1. 於金屬遮蔽層未連續點或介面發生電蝕行為或電蝕崩潰。
2. 電蝕崩潰點必發生於相對參考接地點或金屬支撐物處。
3. 電蝕崩潰區域出現電蝕嚼蝕痕跡而非爆裂裂痕。
4. 一般電纜崩潰則爆裂面有尖銳裂痕（面），電蝕崩潰則多呈侵蝕狀或悶燒痕跡。
5. 一般電纜爆裂面通常可見初始爆裂點，電蝕點則由參考接地點或與金屬支撐物接觸處開始進行環狀電蝕。
6. 金屬遮蔽層有不連續點。
7. 金屬遮蔽層有斷裂或不穩定斷裂接觸阻抗。
8. 金屬遮蔽層發生浮接 (Floating) 現象，導致相對參考電位點出現火花。
9. 金屬遮蔽層發生浮接現象，導致相對接地電位變化顯著，浮動電位隨電蝕行為、電蝕接地阻抗、接地阻抗而變化。
10. 金屬遮蔽層發生浮接現象，導致周圍環境電場干擾嚴重。
11. 由防蝕層向外導電層 / 絕緣層逐步電蝕劣化現象（由外向內）。
12. 防蝕層功能喪失，且相對參考電位存在水氣或電導路徑。
13. 防蝕層容易吸濕且阻抗偏低，於潮濕環境下出現火花。

14. 地面水泥出現高溫或高溫熔化現象。
15. 防蝕層出現電蝕燃燒現象。
16. 保護元件出現高溫現象。

## 結論

低壓電纜發生短路時，常引起短路線路著火，俗稱電線走火，中高電纜發生短路行為稱之為崩潰，通常為僅於崩潰點產生巨大電弧，可由電樹與電痕成長機制進行判別，而電蝕崩潰初期屬於非外力因素引起之緩慢燃燒之電蝕劣化，一般電力系監測控設備無法檢測此燃燒及電蝕劣化過程，以致無法提出預警或使系統提早跳脫，金屬遮蔽層異常為線路發生電蝕之主要原因，引起電蝕之其他原因，包括防蝕層吸



溼或水解因而對地阻抗大幅降低而產生電蝕、防蝕層無法承受突波電壓而產生破壞或針狀蝕孔、針狀蝕孔使形成假接地路徑或阻抗接地路徑，結合水氣或環境因素而產生電蝕破壞等，所以對於絕緣系統的崩潰或電蝕探討，必須謹慎小心求證，才能獲得真正引起電氣災害原因。 FACT

## 參考文獻

- [1] 張文恭、黃明進等作者，“控制電纜燒損事故分析、改善與預防對策” 台電研究計劃編號：2101-19，2002。
- [2] 黃明進，“地下電纜電應力分佈與控制之研究” 碩士論文，中正大學，2002。
- [3] 張文恭、黃明進等作者，“南科 345kV 交連 PE 電纜終端匣異狀調查及影響” 台電研究計劃編號：嘉南契約 96-16，2007。
- [4] 張文恭、黃明進等作者，“民雄～頭橋 69kV 地下電纜輸電線路及相關 11.4/22.8kV 配電饋線與嘉惠電廠天然氣管線之防蝕影響評估技術服務工作”，台電研究計劃編號：R6569510030-95102，2006。
- [5] 張文恭、黃明進等作者，“南科 345kV 交連 PE 電纜 GIS 事故成因分析與調查” 台電研究計劃編號：嘉南契約 95-57，w2006。
- [6] “Calculation of Induced voltages and Currents in Cable Sheaths” ANSI/IEEE Std. 575-1988。

## Keywords:

電蝕 (electric erosion)，漸蝕 (electric degradation)，電樹 (Electric treeing)，電痕 (Electric tracking)，電蝕崩潰 (electric erosion breakdown)，電氣火災 (electric fire)，部份放電 (Partial Discharge)，絕緣介質 (Dielectric)