

## 電氣工安

# 電弧閃絡危害的防範

電弧閃絡危害 (arc flash hazard) 一直是現場電氣工作人員除感電外的最大隱藏風險，其嚴重性和感電一樣可能會致命，但過去卻未被重視予以研究與積極防範。美、加等國經過近20年的電弧相關研究結果，已有具體辦法可以有效防範工作現場的電弧閃絡危害，並且在近年相繼更新相關電氣法規以全面提升電氣從業人員的工作安全，反觀國內似仍無動靜。個人在此不揣淺陋，彙整相關資料將電弧閃絡危害的防範做一個概略說明，俾供有關單位參考，並建請儘速推動以提升本公司現場同仁的電氣工作安全。

## 電弧閃絡的危害

電弧灼傷是電氣工作者除感電以外最可能傷害的原因，因為嚴重電弧發生點的溫度是太陽表面溫度的4倍（約35,000°F），週遭的材料物質係被氯化或燒熔高溫後噴出，也有電弧強光、氣浪（blast）推力與爆炸聲響等傷害，其中如果工作者衣服被點燃則會造成身體更大面積的燒燙傷，而更易致命。

美國燒傷協會（American Burn Association）在1991-1993年燒傷存活數據方面的研究結果指出：治療的存活率與受害者的燒傷面積比率以及年齡大小兩者有密切的關係，例如20-29歲年齡層的人被燒傷時約有60%的存活機會，但如果是50-59歲年齡層則降至20%。因此如何避免在萬一電弧事故發生時被灼傷，特別是衣服不能被點燃或熔化成為防範電弧傷害的重點之一（註：熔化的衣服質料會增加傷口清理費時）。除直接燒傷致命以外，電弧氣浪壓力（或推力）是其次可能致命的傷害原因（或造成墜落），嚴重電弧事故受害者也可能遭受視力損害、聽力損失以及呼吸的、肌肉的、骨骼的或神經的系統損傷，所以對電弧傷害的完整防護應是從頭到腳的全身保護配備系統。

據美國芝加哥的一家研究顧問公司（CapShell）統計：全美國在工作場所內每天發生約5到10件的電弧閃絡爆炸事件。而美國政府勞工部（Department of Labor）統計：每年約有2,000人受到嚴重的電氣灼傷送進醫院燒傷中心治療。因此美、加等國自1980年代即開始投入大量資金研究電弧事故與防範措施，電力業界也早在2000年以前就已有實施防範電弧的相關措施。這些措施在NFPA-70E文件、IEEE 1584文件、NEC法規以及最近的NESC法規等相繼納入如何防範電弧閃絡

事故之有關條文，因此可說，到2000年時，已經全面確立了成熟的防範模式。

## 法規標準的變革

這些法規或文件的來龍去脈以及其防範電弧措施的內容簡述如下：

- 一、NESC（National Electrical Safety Code）是美國相當於政府規定各電力公司必須遵守的技術法規，並在最新的2007版新增自2009年起生效的410A3與420I2條文。這些條文大意即要求雇主必須確定員工有依本條款內規定程序，執行防範電弧危害的評估分析，以及在必要時，要求員工穿戴能耐額定之電弧能量的保護衣著配備。
- 二、NEC（National Electrical Code，亦即NFPA-70文件）是美國的國家電氣法規，最新的是2008年版。自2005年版起的第110.16節即有規定必須在會發生電弧閃絡的設備上標示警告「電弧閃絡危險」的標記。
- 三、NFPA-70E文件（名稱：Standard for Electrical Safety in the Workplace）是美國編訂NEC法規的NFPA（National Fire Protection Association）組織，為補足NEC法規在電氣工作安全規定的不足，而另編訂的電氣安全標準文件，在2000年版內容就已有對活電工作防範電弧灼傷等相關措施有一系列標準作法和建議，包括電弧危害評估、電弧計算與分類、防護配備標準以及保護衣著如何搭配應用等等許多細節的實務建議。2004年版更修訂許多的新標準規定使得內容更充實。個人認為此文件是目前美國在電氣工作安全上（不止是防範電弧灼傷）結合理論

與實務的最佳標準版本。（個人估計年底前應有2009版出現）

四、IEEE 1584文件（名稱：IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations）是美國編訂NESC法規的IEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineers）組織專為計算電弧閃絡的危害距離與事件能量而編製的指導應用文件。初版是2002年版，後來在2004年做了些微修正。這個文件特別的地方是因為使用的計算公式較複雜，所以依使用者需要也可搭配設計妥的電腦Excel軟體程式出售。

由上述這些法規文件內容的出現可見防範電弧灼傷的危害，現在已有完整成熟的措施可以執行。去年IEEE更以此為標題發出電子郵件給全世界會員，鼓勵購買NESC新法規，以了解防範電弧危害的基本規定

## 電弧安全界限的計算

理論上工作者距離發生電弧閃絡點愈近其灼傷愈嚴重，因此某個電氣設備假定發生電弧事故時，防範的重點是要計算出在灼傷可治癒情況下至少應保持的距離，此距離即為安全界限，又稱閃絡保護界限（Flash Protection Boundary）。若要進入此界限內活電工作，則需再計算距離電弧發生點的工作者身上所承受的電弧能量，並且要穿用能耐受所計算電弧能量的保護衣著系統。由於有關電弧能量的計算式都是以實驗數據反向推導歸納成數學公式，因此不同的研究機構或專家學者，所推導出的算式就不同，故市面上有多種計算公式，目前最為美國業界所普遍採用的是IEEE 1584與NFPA 70E的計算式。個人分析認為：IEEE 1584文件的公式複雜，可能其計算結果較為準確，而NFPA 70E的公式

則較為簡單易用，但不管如何，這些都是數學推估值僅能作參考依據。

個人曾依照較簡便的NFPA 70E文件第130.3節的計算公式，推算二次變電所開關電弧事故的安全界限距離；以11.4kV系統，假設有效短路事故電流25kA，4週期（約0.067秒）後即能正常保護跳脫，計算結果為2.85公尺。至於配電線路開關方面以11.4kV的配電系統，假設有效短路電流10kA，事故8週期（0.133秒）後即能正常保護跳脫，計算結果為2.54公尺。個人要強調這兩個計算結果值並不是標準值，但此假設值有某個程度的實務代表性，惟不管結果數值如何變化（甚至使用不同學者公式），這些計算數值都會呈現了一個重要事實；就是防範電弧危害的最小安全工作距離（如2.85或2.54公尺）都遠大於防範感電的活電工作最小安全距離（11kV為0.6公尺）。而且現場操作人員一般是很不容易做到在此防範電弧的最小安全界限範圍外來操作開關（遠方遙控除外），顯現防範電弧傷害的適當防護配備對現場操作人員就應像一般安全護具一樣是必要的。這些觀念重大的改變了電氣工作安全的許多行為準則，可以說是電氣工作安全近20年來的大變革。

## 防範電弧的正確觀念

除上述最小安全距離之計算外，目前美國尚有許多研究成果可以糾正過去許多錯誤的觀念，為節省篇幅個人將重點摘要以供參考：

- 一、電弧的熱效應比一般火燄還要嚴重，可以耐燃（或防感電）的質料未必可以抵抗電弧閃絡事件能量（incident energy）。（註：事件能量係以卡路里/平方公分（cal/cm<sup>2</sup>）為單位）
1. 依據實驗特性分析：雖然電弧事故的發生期

甚短（通常1秒以內），但電弧事件能量可達100 cal/cm<sup>2</sup>以上且尚有熔化的金屬噴出物，而火燄事件能量僅到30 cal/cm<sup>2</sup>間，也不會有濺出物。所以電弧的危害特性是遠大於火燄，因此對保護衣著系統的耐電弧額定能力判定應依電弧測試專用的ASTM 1506與ASTM 1959規範為依據標準，目前國內採購規範一般比照CNS的垂直火燄測試—以織品最長的燒焦物長度（char length）判定，其防範功能是不足的。

2. 防感電用的絕緣手套或護具並不等於可承受電弧閃絡能量的手套或護具。因此操作開關在必要時，2種（耐電壓與耐電弧）的手套都要使用，而且耐電弧的手套（通常為皮製）必須戴在外層。
3. 電氣工作人員嚴禁穿用的工作服質料（不管單獨或混紡）：美國聯辦法規OSHA（Occupational Safety and Health Administration Standards）規定有四種；醋酸纖維（acetate）、尼龍（nylon）、聚酯纖維（polyester）或嫫縈（rayon）。NESC規定一樣也是4種，但將嫫縈改為聚丙烯（polypropylene）。NFPA 70E文件則除與NESC規定一樣外，再另加彈性人造纖維（spandex）質料，而且規定貼身內衣亦不可有這5種質料。

二、在封閉空間發生的電弧閃絡事故威力比在開放空間發生大3倍以上。亦即發生在封閉開關箱中的電弧閃絡事故遠較裸露的開放開關設備危險，因為一般開關箱結構設計是無法耐受電弧事故

的發生，箱體將會破壞變形可能傷及附近人、物，是以美、加等國早已開始設計產製與應用各種類型的耐電弧故障的開關設備（相關抗電弧（Arc-Resistant）開關設備規範請參考IEEE C37.20.7、IEC 62271等文件）。此觀念影響所及在電氣工作安全上，形成供電中的開關箱門、背板等不得隨意打開的工安新意識以及不打開箱門就可內視內部的新產品應運而生。

- 三、電弧閃絡事故的威力能量是可以透過工程設計規劃予以適度控制縮小。關鍵技術在設法降低故障電流的專業措施以及縮短事故發生時間（如縮短斷路器或電力熔絲的斷路隔離時間等）的保護協調重新研討調整措施。
- 四、電氣工作人員只要依照標準程序以及穿用適當的防護衣著設備即可將電弧閃絡的傷害減至最小。
  1. 一般定義的電弧閃絡保護界限的灼傷，其可治癒事件的能量值為1.2 cal/cm<sup>2</sup>。
  2. NFPA-70E文件130.7(c)(II)表格將電弧的危害風險種類（Hazard Risk Category）分為4、8、25、40 cal/cm<sup>2</sup>等四個電弧能量等級以搭配建議保護衣著至少穿上的層數（1-3層以上），至於在大於40 cal/cm<sup>2</sup>能量的可能風險場所工作，則建議應採取停電作業。
  3. 對於嚴重電弧閃絡風險的完整防護應是使用從頭到腳的全部配備（如NFPA 70E的表格130.7(C)(8)中列有11種從頭到腳部的保護設備，且必需依據美國訂的標準）。
- 五、NFPA 70E文件界定50V以上活電電壓即有產生感電或電弧閃絡的危險。

## 美國的防範措施

美國電力業界對於現場工作人員的電弧閃絡危害的防範措施，普遍採行下列2個的要求：

- 一、依NEC規定在有可能發生電弧閃絡事故場所（如開關設備處），貼告警示標記並標示電弧閃絡風險等級、安全界線尺寸以及可能的最大電弧能量與建議應穿用個人保護設備（Personal Protective Equipment，簡稱PPE）的種類。這些在現場的標示通常也順便包含標示防範感電的最小活電工作安全距離等資料。
- 二、依NFPA-70E或NESC規定做法，進入工地工作前要先進行風險評估，嚴守在電弧安全界限範圍外工作的規定，如要進入安全界限範圍內工作則需穿用有效電弧額定（arc rating）的保護衣著系統。

至於美國業界如何採行符合法規要求又能考量工作效率與成本的保護衣著系統呢？個人從有關資料判斷美國的電力公司大概都採用兩類簡化式的抗燃（Flame-Resistant，簡稱FR）衣著系統；一是每日工作衣著，另一是電氣操作衣著或稱抗電弧套服（Arc Flash Suit），IEEE Industry Applications 期刊2002年5/6月的文章曾報導：美國最大的100家電力公司大部分都使用稱為不會熔化的抗電弧雨衣(nonmelting electric-arc-resistant rainwear)，應屬於類似後者的保護衣著。對於開關設備部分；專家的建議是「伺機」（例如屆齡或故障等時機）汰換為抗電弧開關裝置，並非全面汰換為抗電弧能力的開關，對於一般無抗電弧能力的開關設備則採較嚴謹的工作規定替代。當然，全面檢討電氣設備，在可能的工程技術範圍內降低萬一電弧閃絡產生的危害能量是必要的一個手段。

然而除上述主要規定外，實際上防範電弧的措施還有許多背景工作不可忽視，例如在此方面人員知識與技術的再教育、作業規定（包含日常工作衣著要求）的修訂、保護衣著系統設備的正確穿用（穿著搭配等）與維護訓練等等。個人認為這就是為什麼2007版NESC法規（約2006年第4季發行）卻要將防範電弧有關條文訂到2009年起才生效的理由，因為電力公司實在有太多的準備工作要做。

## 本公司的電弧事故與規定

本公司的電弧閃絡意外事故在工安意外事件中並不常見，只是常常被忽略掉而已，過去大家都只注意在是否有發生感電事情上，其實現場發生的爆炸聲兼有強光或工作服著火等就是發生電弧閃絡的典型徵狀。例如今年初發生本公司人孔蓋爆開灼傷過路人事件，個人就認為是個典型的電弧事故，根本不是沼氣點燃事故（因為雨天低溫且鏤空的孔蓋根本不適於沼氣積存，而且據報載是先停電再爆炸）。又如過去電視曾實況報導電氣工人登桿的工安意外事故，有登桿者發生工安意外燒掉上衣被抬上救護車的電視畫面，也應是受電弧灼傷的典型例子。

其實本公司對於防範電弧閃絡意外事故，個人經驗認為過去即有一個良好的習慣，就是現場停電工作要復電操作時，領班一般都會要求除操作復電開關人員外，其他人員必須「閃避」到遠處去的不成文規定，可見現場人員大概都有操作開關時必須防範可能電弧閃絡意外事故的工安意識經驗，只是在公司的「工作守則」內卻無此項規定。

下列照片是本公司二次變電所某一電弧事故發生的



實況，被變電所影像監控系統的遠方同一攝影機自動記錄發生全部歷程的5個畫面。發生位置是在裝甲開關箱（MCSG）內的11kV匯流排比壓器，產生的電弧氣浪將原先上鎖的箱門爆開，且噴出比壓器等器材殘屑在地上，被爆開的箱門已有變形，可見電弧事故的威力，也顯現沒有抗電弧結構設計的開關箱即使是有「裝甲」密封的，也是存在著風險。所以這個案例直接證實了美國的一些作法是正確的且是必要的。

目前本公司「從事電氣作業應穿著棉質長袖工作服或防焰性工作服」的規定，個人根據公司工作服採購規範以及NFPA-70E文件等資料，保守估計可能僅能承受第一級以下的輕度電弧事故能量。有興趣的同仁可自行上美國網站（[www.whsalisbury.com/videos/images/28 to 100k arc flash portion.wmv](http://www.whsalisbury.com/videos/images/28%20to%20100k%20arc%20flash%20portion.wmv)）下載棉質長袖工作服以及防焰性工作服在不同電弧閃絡能量測試下全部燒光的影片（本影片有版權）。不過保護衣著僅是其中一項防範電弧閃絡傷害的配備，完整的配備尚需有例如耳塞、護目鏡、頭罩...等等，建議本公司應對已提供部分再做檢討—是否有能耐受額定電弧能量的能力，至於未提供部分如訓練與配套措施規定等應儘速考慮提供。

## 相關措施的推動與建議

個人建議本公司如要推動本文所談電弧危害防範相關措施，應先購置相關文件，因為這些文件都是禁止複製的有版權文件，必須合法購置供有關部門人員使用確實了解評估，才能制定或修改相關規定或採購適當保護配備等。雖然在現場實務上正常發生電弧閃絡危害事件的機率很低，但不表示絕不會發生，基於工作安全應該如同平日戴安全帽一樣有備無患，尤其當現場人員從事高度電弧風險的作業時，例如某些類型的開關操作或供電中設備開箱巡檢工作等等，更需依規定穿用額定保護配備，以保障第一線工作人員的電氣工作安全。

由於國外相當重視人命、人權，發生工安意外事故的業主（僱主），法院的處罰或判定賠償金額對於業主（僱主）都是相當嚴重的損失，因此為防患未然，國外業界常走在政府法令之前儘量避免發生意外工安事故。本文所述都是美國已經履行的措施，本公司工安不應落後國外太多，個人建議應由有關主管單位儘速研討推動防範電弧危害措施，以增進現場員工的電氣工作安全，並應橫向推廣也要求本公司承攬商比照辦理，以全面提升國內的電氣工作安全水準。