

# 電弧風險就在你身邊 - 從美國 NFPA-70E 看電弧安全評估

席寶祥，李長興

## 1. 最新案例 - 南科電盤檢修發生爆炸 3 人燒燙傷送醫，1 人須緊急手術治療

報載 2018 年初南科某高科技廠在進行 22.8kV 配電盤檢修時突然爆出火花，造成三人燒燙傷，其中一名工人上半身衣服全被燒毀[1-2]。由於「電擊」本身不會燃燒衣物或造成非接觸的三人同時燒傷，這個不幸事故的提醒電氣從業人員，電氣風險除了大家所熟知的電擊之外，還有同樣重要的「電弧」(Arc Flash)風險。

美國工業安全與衛生新聞 ISHN 統計，電弧事故每年在美國造成 7000 位電氣工作人員燒燙傷，其中大約 1/3 須住院治療，並造成每年 400 位電氣工作人員死亡[3]。和電擊不同，電弧造成的傷害主要是燒燙傷，且電弧事故容易造成導電銅排高溫融化噴濺甚至壓力波，其造成的傷害範圍常常大於電擊[4-6]

全球大部分電氣行業及從業人員對於電弧風險危害的警覺性甚低，直到 2002 年美國 NEC 首次確認電弧風險的危害，並經過 IEEE 與 NFPA 花了將近 10 年的時間進行超過 1,500 次實驗後，2014 年美國職業安全衛生管理局(OHSA)正式確認電弧安全規定，NFPA 並在 2015 年修訂 NFPA-70E 電弧安全評估建議[7]。為避免發生事故後承擔員工長期且高昂的燒燙傷治療費用，現今美國企業主均極重視電弧安全評估。

## 2. 什麼是電弧 (Arc Flash)?

大家平常應該有這樣的經驗，直接拔掉正在使用中的電器插頭時，很容易看到插座裡會產生火花。那就是電弧。電弧是一種電流經由空氣導通的現象，正常情況下空氣本身是絕緣體，但當電場強度足以破壞空氣的絕緣強度時，電弧便會形成。

直接拔掉正在使用中的電器插頭是一種很危險的行為，如果使用中的電器用電量很大，拔掉插頭的瞬間造成的感應電壓極大，電弧可能無法在很短的時間內消除，此時電弧能量可能足以燒毀插座，引燃周邊物質，插座中的導體亦可能融化爆出傷人。

廠務人員在工廠進行電盤活線檢修或維護時，面臨比拔除插頭數倍的風險。首先，若某電盤需要檢修時，代表可能已存在不正常狀態(或是久未開啟內部狀況不明)，其內部風險本來就高。另外，在打開電盤或進行活線維護時常存在下節中各種電弧發生原因。

### 3. 工廠電盤常見電弧原因?

工廠電盤常因下列原因而在活線檢修時發生電弧事故:

- 開關操作、活線安裝儀表、鑽孔
- 作業中工具掉落造成間歇性短路後發弧
- 前次作業工具或雜物遺留在電盤內而在電盤開門時掉落造成發弧
- 作業工具或與導體距離過近造成發弧
- 異物(包含小動物侵入)造成短路後發弧
- 螺絲或匯流排鬆落(未鎖緊、長期電磁應力、或開關操作震動鬆落)造成發弧
- 開門時導電性粉塵或空氣進入電盤造成發弧
- 設備絕緣劣化發弧
- 下游負載電流急遽變動或開關突波

圖一為操作電盤發生電弧之模擬狀況圖。在 IEEE/NFPA 及很多類似實驗中都發現，即使是一個極小型電弧事故(斷路器在 1 個 cycle 內完成啟斷，50 公分處電弧能量密度僅 0.6 Cal/cm<sup>2</sup>，約 NFPA 安全標準 1.2. Cal/cm<sup>2</sup>的一半)，電弧本身影響範圍也超過 1 公尺，同時融化的銅排噴射距離超過 2 公尺並足以引燃任何非耐燃性之衣料。



圖 1. 操作電盤發生電弧之模擬狀況 (圖片來源: openelectrical.org) [8]

#### 4. NEC 及 NFPA-70E 電弧風險標示要求

有鑑於電弧風險的危害，NEC 及 NFPA-70E 要求「所有可能需要活線進行保養、維護、調整的電氣設備(如分電盤、開關盤、馬達控制中心等)，除標示其電擊風險外，另須同時標示其電弧風險，以便工作人員毋須自行計算便可知須穿何種等級之個人保護設備」。電弧風險標示內之重要名稱說明如下：

- **電弧風險邊界 (Arc Flash Boundary)** - 電弧事故時電弧能量密度降至 1.2. Cal/cm<sup>2</sup> 所需的安全距離。(註: 根據研究 1.2. Cal/cm<sup>2</sup> 以上的能量便可能造成二級以上之燒傷，因此以這個能量值訂定安全距離邊界)
- **工作距離 (Working Distance)** - 同樣的電弧事故，若距離愈遠其單位面積電弧能量便愈低，因此計算電弧能量前須先給定正常工作距離。須注意的是，**若工作人員實際工作距離更近，則會承受超過電弧風險標示上的電弧能量，不可不慎!**
- **工作距離下之電弧能量 (Incident Energy)** - 電弧事故時在所給定之工作距離下須承受之電弧能量。
- **個人防護設備等級 (PPE Requirement)** - 為避免工作人員承受電弧能量，須依電弧能量決定個人防護設備等級，受過訓練之工作人員須穿著該等級以上之防護設備方可在指定工作距離或以外進行活線作業。

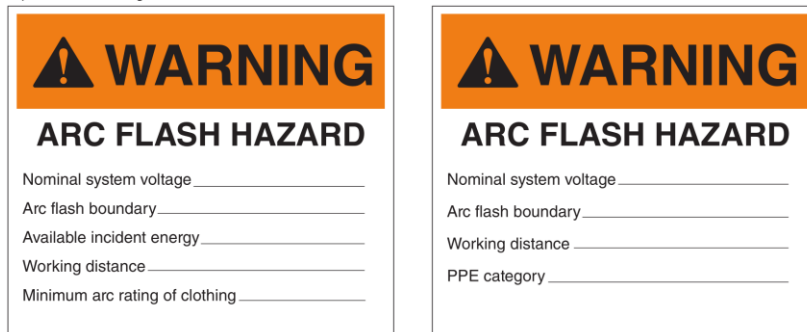


圖 2. 電氣設備電弧風險標示，NFPA-70E-2018 建議兩種擇一 (圖片來源: NFPA-70E-2018 Handbook)

#### 5. NFPA-70E 電弧能量計算流程

發生電弧事故時，電弧能量大小會受到溫濕度及電弧阻抗(時變且非線性)等不確定因素影響，因此 NFPA-70E 特別提醒: 電弧能量計算僅是一種估計，無法達到 100%準確。NFPA-70E 中提供幾種不同計算電弧能量的參考方法，但其原理均為

$$E = C_0 * I^2 * R * t$$

其中

E = 電弧能量

C<sub>0</sub> = 轉換常數

R = 電弧電阻

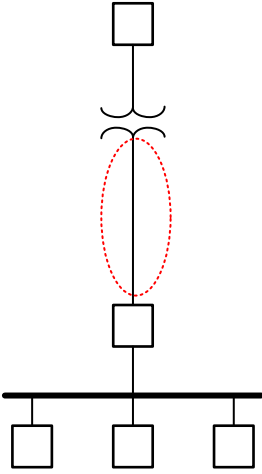
t = 電弧持續時間 (亦即故障清除時間或斷路器完成啟斷時間)

由上述模型可知，電弧能量主要取決於電流大小及電弧持續時間。低壓系統若跳脫時間較長，其電弧能量可能高過高壓系統。大家常見的電焊機雖然額定電壓僅 220V 但卻可在數秒間產生 1000 度以上高溫融化金屬其原理便是如此。

NFPA-70E 中提供幾種不同計算電弧能量的參考方法，本文介紹其中 IEEE-1584 計算方法如下。由於每次發生事故的電弧電阻都未必相同，因此 IEEE 透過實驗建立「電弧電流」與「三相短路電流」、「電壓等級」、「導體距離」等不同參數之間的迴歸模型，間接透過這些可計算之參數估計電弧電流。整個計算流程為:

	工作	說明
1	計算短路電流 $I_{bf}$	三相短路電流( $I_{bf}$ ) 可利用故障分析軟體計算得之
2	估計電弧電流	<p>(A) 若系統電壓&lt;1kV 依照下列公式估計電弧電流 <math>I_{arc}</math></p> $\log I_{arc} = K + 0.662 \log I_{bf} + 0.0966V + 0.000526G + 0.5588V * \log I_{bf} - 0.00304G * \log I_{bf}$ <p>其中</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● <math>I_{arc}</math> 為電弧電流之估計(kA)</li> <li>● <math>K = -0.153</math> (開放空間電弧) 或 <math>-0.097</math> (密閉空間電弧)</li> <li>● <math>I_{bf}</math> 為三相短路電流(Symmetrical, rms, kA)</li> <li>● <math>V</math> 為事故點匯流排系統電壓 (kV)</li> <li>● <math>G</math> 為導體間距 (mm)</li> </ul> <p>(B) 若系統電壓<math>\geq 1</math>kV 則改用下列公式估計電弧電流 <math>I_{ar}</math></p> $\log I_{arc} = 0.00402 + 0.983 \log I_{bf}$
3	估計電弧能量密度	<p>有了電弧電流估計值後便可依照跳脫時間及工作距離估計電弧能量密度。IEEE-1584 的實驗是在 2 英尺距離、0.2 秒電流啟斷的假設下完成，因此須先求得此距離與時間條件下之電弧能量密度然後再進行調整。</p> <p><b>步驟一: 依照下列公式估計 IEEE-1584 實驗條件下電弧能量</b></p> $\log E_{in} = K_1 + K_2 + 1.081 \log I_{arc} + 0.0011G$ <p>其中</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● <math>E_{in}</math> 為 IEEE-1584 實驗條件下電弧能量之估計(<math>J/cm^2</math>)</li> <li>● <math>K_1 = -0.792</math> (開放空間電弧) 或 <math>-0.555</math> (密閉空間電弧)</li> <li>● <math>K_2 = 0</math> (非接地或高阻抗接地系統) 或 <math>-0.113</math> (接地系統)</li> <li>● <math>I_{arc}</math> 為電弧電流之估計 (kA)</li> <li>● <math>G</math> 為導體間距 (mm)</li> </ul> <p><b>步驟二: 依照下列公式調整電弧能量估計</b></p> $E = 4.184C_f * E_{in} \left(\frac{t}{0.2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$ <p>其中</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● <math>E</math> 為在工作條件下之電弧能量估計(<math>J/cm^2</math>)</li> <li>● <math>C_f = 1.5</math> (若系統電壓小於等於 1kV) 或 <math>1.0</math> (若系統電壓<math>&gt; 1</math>kV)</li> <li>● <math>E_{in}</math> 為 IEEE-1584 實驗條件下之電弧能量估計(<math>J/cm^2</math>)</li> <li>● <math>t =</math> 電弧清除時間 (秒，須進行保護協調分析計算在所估計之電弧電流下現場電驛及斷路器動作完成啟斷所需之總時間)</li> <li>● <math>D</math> 為實際工作距離 (mm)</li> <li>● <math>x</math> 為從 IEEE-1584 查表之距離指數</li> </ul>

## 6. 計算上須特別注意的地方

	計算上特別注意地方	說明
1	比較 100%與 85%電弧電流和者能量較大並以較高者為準[4-6]	<p>由電弧能量公式</p> $E = C_0 * I^2 * R * t。$ <p>可知，電弧能量與電弧電流之平方及電弧清除時間均為正比。</p> <p>發生電弧事故時，電弧電流大小本身具有不確定性(會因當天事故狀況及溫溼度而變化)。考慮到電驛本身反時性特性，為避免忽略掉電流較小但電弧能量更高的可能性，IEEE-1584 建議在分析時應同時考慮 100%電弧電流及 85%電弧電流時之電弧能量並以較高者為準。</p>
2	變壓器二次側高危險區[6]	<p>變壓器二次側接頭到下游第一層過電流保護設備之間可能出現極高之電弧能量。</p> <p>當這個區間發生電弧事故，須由變壓器一次側過電流保護進行隔離，但變壓器一次側過電流保護為了允許變壓器激磁電流通過，跳脫時間會延長，但這也使事故時電弧能量變得很高。</p> 
3	資料正確性[6]	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 系統阻抗對三相短路電流估計有很大影響</li> <li>● 單線圖是否為最新?</li> <li>● 現場電驛設定是否有變動?</li> </ul>

## 7. 低壓比較安全?

根據美國的統計，美國每年 7000 件電弧事故(造成 2000 人以上住院，400 人死亡)中有大約 8 成發生在低壓設備。分析其原因有:

- 低壓設備數量較多且活線維護的機率較高 (高壓設備較少活線維護)
- 低壓設備維護人員素質較參差不齊，可能有未受完整訓練下包商施工
- 電弧清除時間可能較長
- 電氣從業人員對低壓設備警覺性相對比對高壓設備警覺性低

從電弧能量公式可知，電弧能量主要取決於電流大小及電弧持續時間。低壓系統若跳脫時間較長，其電弧能量可能高過高壓系統。大家常見的電焊機雖然額定電壓僅 220V 但卻可在數秒間產生 1000 度以上高溫融化金屬其原理便是如此。

## 8. 降低電弧風險的方法

從電弧能量公式可知，降低電弧風險須靠下列多管齊下的方式[4-6, 9-11]:

降低電弧發生機率 (Reduce Probability)	降低電弧能量 (Reduce Energy)	剩餘風險處理 (Residual Risk Handling)
<ul style="list-style-type: none"><li>● 避免活線作業</li><li>● 到位的預防保養機制</li><li>● 採用絕緣匯流排</li><li>● 使用具有絕緣處理的工具</li><li>● 透過 IR 視窗(不須打開箱體)進行熱影像檢查</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 減少電弧清除時間<ul style="list-style-type: none"><li>- 加裝電弧電驛</li><li>- 增加「維護模式」跳脫設定，進行維護時可調整至減少跳脫時間，維護後復歸</li></ul></li><li>● 減少電弧電流(限流能力)</li><li>● 增加工作距離或使用自動機械設備進行維護工作</li><li>● 使用電弧安全開關設備導引電弧能量噴出方向</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 電弧風險標示</li><li>● 電弧安全訓練</li><li>● 活線作業許可及稽查制度</li><li>● 穿著具有足夠防護之個人防護設備(PPE)</li><li>● 確保足夠工作距離</li></ul>

## 9. 電弧安全評估資源

電弧能量分析若採用 IEEE-1584 方法須要做短路電流分析、保護協調分析、並考慮 85%, 100%電弧電流不同情境，一般建議採用專業套裝軟體如 Easypower, ETAP, SKM, CYME 等進行分析。

個人保護設備廠牌眾多，須特別注意的是 PPE 須能保護全身(包含頭部、臉部、手部、及全身其他地方)，而非只是一件衣服。NFPA-70E Handbook 第一章中有一個活生生的例子便在介紹美國一位 29 歲的電氣工程師即使在未開啟開關盤下，活線鑽孔裝儀表時遭受全身灼傷的事故。除了提醒大家重視電弧風險也特別強調個人安全設備完整性的概念。

詳細的電弧分析規定、案例及方法請參閱本文之參考文獻。



## 參考文獻

1. 南科事故 <https://www.ettoday.net/news/20180109/1089320.htm>,
2. 南科事故 <http://www.chinatimes.com/realtimenews/20180109003734-260402>
3. 美國工業安全與衛生新聞針對美國電弧事故統計資料 <https://www.ishn.com/articles/96001-arc-flash-statistics>
4. Christopher D. Coache, Gil Moniz, “*Handbook for Electrical Safety in the Workplace (NFPA-70E-2018 Handbook)*”, NFPA, 2017
5. M.D. Fontaine, et al., “*Handbook for Electrical Safety in the Workplace*”, NFPA, 2015
6. Jim Philips, “*Complete Guide to Arc Flash Hazard Calculation Studies*”, Brainfiller Inc, 2011.
7. Callie Lorentson, “A Brief History of Arc Flash”, <https://www.powerstudies.com/blog/brief-history-arc-flash-part-one>
8. Openelectrical, “Arc Fault”, [https://wiki.openelectrical.org/index.php?title=Arc\\_Fault](https://wiki.openelectrical.org/index.php?title=Arc_Fault)
9. J.C. Das, “*Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation*”, IEEE, 2012.
10. Antony Parsons, “*Arc Flash Mitigation*”, Schneider Electric White Paper, 2013.
11. David Loucks, John Collins, “What You Need to Know about Arc Flashes – Understanding and Mitigating the Danger of Data Center Electrical Explosions”, EATON, 2013.