

# 電弧能量計算方法介紹

■ 李長興 / 台灣震江電力科技股份有限公司

## 壹、前言

一般而言，電氣事故可略分為兩大類：感電(electric shock)事故與電弧閃絡(arc flash)事故。由於感電意外發生時，對於人體的風險多是電流流經體內造成的傷害，較易於辨識分類，故相關研究分析較為常見。而電弧閃絡意外發生時，對人體的風險，主要是電弧能量的熱傷害，故常會誤認為是燒燙傷類的事故，而非電氣事故。因此，電弧事故較少見於電氣事故。

感電造成的危害主要是流經人體內電流的強度，導致人體肌肉器官受損，甚至死亡。影響此致命電流的因素包含了帶電導體電壓等級及頻率、導電路徑上的阻抗、人體的阻抗等。基此，其相對應的安全防護主要還是在於保持距離避免誤觸，增加阻抗抑低電流大小，以及快速隔離電流。因為感電風險的分析研討較多，故不在本文中贅述。

電弧閃絡時會產生高熱氣體、熔化金屬微粒、爆炸壓力波，以及強光等，

其會對人員造成燒傷及視力受損等傷害。影響電弧能量的因素主要是故障電流幅值、閃絡的間距、人員與電弧源的距離，以及電弧發生處的佈置等。然而，電弧閃絡的發生，多是設備處於異常狀態(如不正常維護或不正常安裝等)，或是異常的操作(如設備帶電中進行維修)。因此，典型的防護手法是先從降低或避免風險的發生(如停電操作，操作程序之評估等)，最後一道防線才是穿著防護器具進行活電操作<sup>[1]</sup>。

根據電弧能量等級，相對應的防護器具亦有所不同。越高等級的防護器具，雖可以提供較周全的防護，但相對來說亦會造成人員活動較不方便與悶熱感。因此，若一味要求人員穿著較高等級之防護具進行低風險之工作，常會導致現場人員不願意穿戴防護具。反之，若認為穿戴最高等級防護器具，即不會有風險，則可能會對部份電弧能量(大於40 cal/cm<sup>2</sup>)過強之場所，過於輕忽大意反而容易發生危險。

電弧防護器具的穿戴主要是保護人員在意外發生時，不會留下永久性的傷害，故以二級燒傷做為可以接受的範圍，其換算之能量約為 $1.2 \text{ cal/cm}^2$ <sup>[1]</sup>。此外，工廠多少會有增減設備，故每隔一段時間就需要檢討各電盤的電弧能量，以確保操作人員安全。基此，本文將介紹電弧能量的計算方法，並藉由簡單案例說明計算結果，供現場人員可以評估各電盤的風險等級，並穿著適切的個人防護器具。

## 貳、計算方法說明

電弧閃絡(arc flash)的產生主要是空氣解離導電，接著產生高溫，使熱能向外飛散對接觸人員造成傷害。因為解離空氣之阻抗並不容易估算，故電弧電流大小的估算並沒有理論公式可供計算。基此，實際多以理論分析搭配試驗結論進行整理歸納。同理，電弧閃絡產生的能量亦受到多重因素影響，如人員與電弧源的距離、電弧發生位置的空間佈置等，亦沒有理論公式可以估算，而需使用試驗結論進行評估分析。

現行電弧能量(incident energy)的評估方法有兩種：一為根據現場經驗進行分類的NFPA 70E之個人防護具分類表法；另一為根據實驗室大量實驗數據，結合理論分析歸納的計算公式，IEEE 1584。本節即介紹這兩種評估方式。

電弧能量的評估中，須知兩個重要的名詞，分別是工作距離與電弧邊界(Arc-Flash Boundary)。工作距離的定義為

可能發生電弧位置與臉、胸的距離，典型值示於表1，電弧能量即是以此距離為基礎，計算電弧閃絡發生時傳遞至工作人員的能量。電弧邊界的定義為以發生電弧之位置至此距離外的電弧能量小於 $1.2 \text{ cal/cm}^2$ 。換言之，在此距離外的工作人員，即使不穿著個人防護具，受到電弧閃絡傷害的嚴重程度或可低於二級燒傷。

表1 典型工作距離

設備類別	典型工作距離 (mm)
15 kV 開關設備	910
5 kV開關設備	910
低壓開關設備	610
低壓馬達控制盤及配電盤	455
電纜	455
其它	視現場需求

### 一、NFPA 70E 個人防護具分類表法 (Personal Protective Equipment Category Method)<sup>[1]</sup>

為簡化現場人員的評估，NFPA 70E 中列舉現場可能發生的工作項目內容，評估是否需要穿戴個人防護器具。對於需要穿戴個人防護器具的情形，並根據可能的現場配置規劃，建議所需的電弧防護衣類等級，以及電弧邊界，如表2所示。NFPA 70E中另有直流電系的電弧閃絡個人防護具類別說明。

表2 交流電系統的電弧閃絡個人防護具類別<sup>[1]</sup>

設備	個人防護衣類別	電弧邊界
額定電壓小於240 V的配電盤 ( panelboard ) 或其它設備。 參數：最大故障電流不超過25 kA；故障清除時間不大於0.03秒；最小工作距離不少於455公釐。	1	485公釐
額定電壓介於240 V至600 V間的配電盤或其它設備。 參數：最大故障電流不超過25 kA；故障清除時間不大於0.03秒；最小工作距離不少於455公釐。	2	900公釐
600 V等級馬達控制盤 ( Motor Control Centers, MCCs )。 參數：最大故障電流不超過65 kA；故障清除時間不大於0.03秒；最小工作距離不少於455公釐。	2	1.5公尺
600 V等級馬達控制盤 ( Motor Control Centers, MCCs )。 參數：最大故障電流不超過42 kA；故障清除時間不大於0.33秒；最小工作距離不少於455公釐。	4	4.3公尺
600 V等級開關設備 ( Switchgear ) ( 配有電力斷路器或熔絲開關 ) 和600 VAC開關盤 ( Switchboard )。 參數：最大故障電流不超過35 kA；故障清除時間不大於0.5秒；最小工作距離不少於455公釐。	4	6公尺
其它600 V等級設備 ( 標稱電壓277 VAC至600 VAC )。 參數：最大故障電流不超過65 kA；故障清除時間不大於0.03秒；最小工作距離不少於455公釐。	2	1.5公尺
NEMA E2 ( 配有熔絲 ) 馬達起動器，2.3 kV至7.2 kV。 參數：最大故障電流不超過35 kA；故障清除時間不大於0.24秒；最小工作距離不少於910公釐。	4	12公尺
金屬外殼 ( Melta-clad ) 的開關設備，1 kV至15 kV。 參數：最大故障電流不超過35 kA；故障清除時間不大於0.24秒；最小工作距離不少於910公釐。	4	12公尺
耐電弧 ( Arc-resistant ) 開關設備(故障電流不大於設備耐電弧額定，且故障清除時間少於0.5秒，和金屬包覆的斷路開關 ( metal-enclosed interrupter switchgear )，具熔絲或不具熔絲的耐電弧設備，1 kV至15 kV。 參數：最大故障電流不超過35 kA；故障清除時間不超過0.24秒；最小工作距離不少於910公釐。	N/A (不開盤門) 4 (盤門開啟)	N/A (不開盤門) 12公尺 (盤門開啟)
其它設備，1 kV至15 kV。 參數：最大故障電流不超過35 kA；故障清除時間不超過0.24秒；最小工作距離不少於910公釐。	4	12公尺
備註1：對於額定電壓不超過600 V，且由上游限流熔絲或是額定200A以下之限流斷路器所保護的設備而言，上表中之防護衣類別可以降1級，但不能少於1。 備註2：個人防護衣類別1的最小耐電弧能量為4 cal/cm <sup>2</sup> ；個人防護衣類別2的最小耐電弧能量為8cal/cm <sup>2</sup> ；個人防護衣類別3的最小耐電弧能量為25 cal/cm <sup>2</sup> ；個人防護衣類別4的最小耐電弧能量為40 cal/cm <sup>2</sup> 。		

表2中可以觀察到，低壓系統若非使用快速熔絲作為保護，則只要工作項目有可能產生電弧閃絡，即需要穿戴類別4的個人防護衣。而高壓系統則是皆需要穿戴類別4的個人防護衣，無論其保護元件為何。因此，使用NFPA 70E的個人防護衣類別法，是較為保守的做法。

## 二、電弧能量分析法<sup>[2]</sup>

不同NFPA 70E之個人防護衣類別法，IEEE 1584經由實驗室的一系列測試，歸納出一套公式，用以計算電弧能量。其適用範圍3相交流電系統，但不適用於直流電系統或是單相交流電系統。電弧能量分析法的流程如圖1所示。

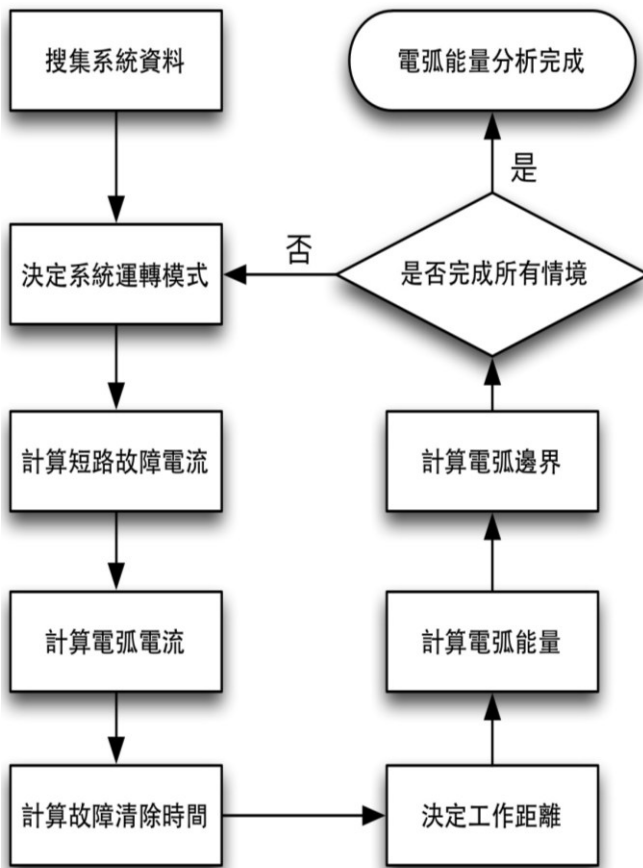


圖1 電弧能量計算流程

### (一) 決定系統運轉模式

進行電弧能量分析時，故障電流為影響電弧電流大小的重要因素，而電力系統運轉在不同模式時，如弧島運轉，各匯流排的故障電流亦會有較大變化。因此，分析人員需根據所屬電力系統的運轉規則，規劃出可能的運轉模式，供作故障電流計算使用。

### (二) 計算電弧電流

如前所述，電弧電流受到解離空氣之阻抗無法推估的影響，其評估公式係以大量的試驗數據，結合理論分析所歸納擬合而得。因此，應用公式時，需注意其應用範圍：208 V至15 kV之三相系統，故障電流介於700 A至106 kA，導體間隙介於13 mm至152 mm間。

對於額定電壓低於1000 V之情形，電弧電流的計算公式如式(1)所示。對於額定電壓介於1000 V至15 kV間之情形，電弧電流的計算公式如式(2)所示。對於額定電壓大於15 kV之情形，係假定電弧電流與故障電流為相同時 (Lee Method)

$$\log I_a = K + 0.662 \log I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V (\log I_{bf}) - 0.00304 G (\log I_{bf}) \text{ — 式 (1)}$$

$\log I_a = 0.00402 + 0.983 \log I_{bf}$  — 式 (2) 85 %電弧電流值，供做後續分析用。

$I_a$ : 電弧電流 (kA)

K: 常數, 0.153 (開放空間);  
0.097 (盤內空間)

$I_{bf}$ : 三相對稱故障電流(kA)

V: 系統電壓 (kV)

G: 導體間隙 (mm), 詳見表3。

表3 設備與電壓等級之因數

系統電壓 (kV)	設備類別	典型導體 間距 (mm)	距離 因數 x
0.208 - 1	Open air	10-40	2.000
	Switchgear	32	1.473
	MCCs and Panels	25	1.641
	Cable	13	2.000
> 1 - 5	Open air	102	2.000
	Switchgear	13-102	0.973
	Cable	13	2.000
> 5 - 15	Open air	13-153	2.000
	Switchgear	153	0.973
	Cable	13	2.000

電弧能量除了與電弧電流有關外，亦於電弧電流持續時間(故障清除時間)有關。一般而言，較大的電弧電流會有較快的故障清除時間，反之，較小的電弧電流，其故障清除時間則較慢。因此，考量電弧電流的估算值與實際值間的差異，可能推估得到相反的電弧能量，故另外計算85%之電弧電流為第二個電弧電流值，比較100%與85%電弧電流所造成的電弧能量差異，取其較大者做為代表。基此，在此階段會得到100%與

(三) 計算故障清除時間(電弧持續時間)

根據不同的保護設備，其故障清除時間的估算略有不同，如下：

1. 保護設備為熔絲

若動作曲線包含熔化及清除時間，則可以直接使用其數據；若動作曲線為平均熔化時間的話，則需要增加15% (熔化時間在0.03秒以內) 或10% (熔化時間超過0.03秒) 的數值作為完全清除時間。

2. 保護設備為具過流保護功能之斷路器時，其動作曲線已包含偵測及動作時間，可以直接使用該數值。

3. 保護設備為外接電驛之斷路器時，其動作曲線僅為電驛動作時間，需要再加上斷路器的動作時間，方為最終的故障清除時間。此外，考慮到保護設備可能有異常未能正常工作，故會以後衛保護之動作時間做為故障清除時間。

(四) 標註系統電壓及設備類別

不同的電壓等級的設備，其導體間距亦有所不同。表3所列為典型值。

## (五) 計算電弧能量

電弧能量的計算分成兩個階段：第一階段先以故障清除時間為0.2秒，工作距離為610公釐為條件，計算出常規化的電弧能量(Normalized incident energy)，如式(3)所示。第二階段再根據實際故障清除時間及工作距離，計算出實際的電弧能量，如式(4)所示。

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1.081 \log I_a + 0.0011 G \quad \text{— 式 (3)}$$

$E_n$ ：故障清除時間為0.2秒，工作距離為610 mm時之電弧能量 (J/cm<sup>2</sup>)

$K_1$ ：常數，0.792 (開放空間)；0.555 (盤內空間)

$K_2$ ：常數，0 (非接地系統或高阻抗接地系統)；0.113 (接地系統)

$G$ ：導體間距(mm)，詳見表2

$$E = 4.184 C_f E_n \left( \frac{\tau}{0.2} \right) \left( \frac{610^x}{D^x} \right) \quad \text{— 式 (4)}$$

$E$ ：電弧能量 (J/cm<sup>2</sup>)

$C_f$ ：常數，1.0 (系統電壓大於1 kV)，1.5 (系統電壓不超過1 kV)

$E_n$ ：常規化的電弧能量 (Normalized incident energy, J/cm<sup>2</sup>)

$\tau$ ：電弧持續時間(秒)

$D$ ：工作距離(mm)

$x$ ：表2中的距離因數

若系統電壓大於15 kV時，電弧電流假設為與故障電流一樣，電弧能量的計算式如式(5)所示。

$$E = 2.142 \times 10^6 V I_{bf} \left( \frac{\tau}{D^2} \right) \quad \text{— 式 (5)}$$

$E$ ：電弧能量 (J/cm<sup>2</sup>)

$V$ ：系統電壓 (kV)

$\tau$ ：電弧持續時間 (秒)

$D$ ：工作距離 (mm)

$I_{bf}$ ：故障電流

## (六) 計算電弧邊界

電弧邊界之電弧能量典型值為1.2 cal/cm<sup>2</sup> (5 J/cm<sup>2</sup>)，15 kV以下系統可以由公式(4)反推得到電弧邊界，如式(6)所示。同理，15 kV以上系統可以由公式(5)反推，得到電弧邊界，如式(7)所示。

$$D_B = \left[ 4.184 C_f E_n \left( \frac{\tau}{0.2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right)^x \right]^{\frac{1}{x}} \quad \text{— 式 (6)}$$

$$D_B = \sqrt{2.142 \times 10^6 V I_{bf} \left( \frac{\tau}{E_n} \right)} \quad \text{— 式 (7)}$$

$D_B$ ：由電弧發生位至至電弧邊界的距離 (mm)

$C_f$ ：常數，1.0 (系統電壓大於1 kV)，1.5 (系統電壓不超過1 kV)

$E_n$ ：常規化下的電弧能量

$E_B$ ：在電弧邊界上的電弧能量 (J/cm<sup>2</sup>)，典型值為5 J/cm<sup>2</sup>

$\tau$ ：電弧持續時間 (秒)

$x$  : 表3中的距離因數

$I_{bf}$  : 故障電流 (kA)

因為電弧能量的影響因素甚多，且經驗公式係透過測試所歸納得，故計算所得的電弧能量與實際發生情形可能略有差異。因此，故障電流的估算不宜使用過於保守的預測值，以避免過大的預期故障電流加速保護設備的故障清除時間，間接抑低電弧能量。

由電弧能量計算公式可以觀察到，對於不同故障電流及不同故障清除時間，其造成之電弧能量有較大變化。顯示，依電弧能量計算公式所得結果有利於工作人員選用合適的個人防護器具，避免過度的保護，失去人員的靈活性，反而增加風險。

## 參、實際案例

本節以一實際22.8 kV之工廠為例，進行電弧能量之計算比較。為簡化計算，在不更改原工廠電力系統架構下，移除部份負載回路，如圖2所示。

### 一、搜集系統資料

搜集圖中各元件資料:變壓器、馬達、發電機、電容器具、線路阻抗、保護設備參數。

### 二、決定系統運轉模式

- (一) 正常運轉模式 ( TPC#1 及 TPC#2 供電, HV-T12、LV-T12、LV11A、LV21A啟斷 )
- (二) 高壓側轉供模式 ( TPC#1供電, HV-T12投入, 4-Way Switch-2、HV20、LV-T12、LV11A、LV21A啟斷 )

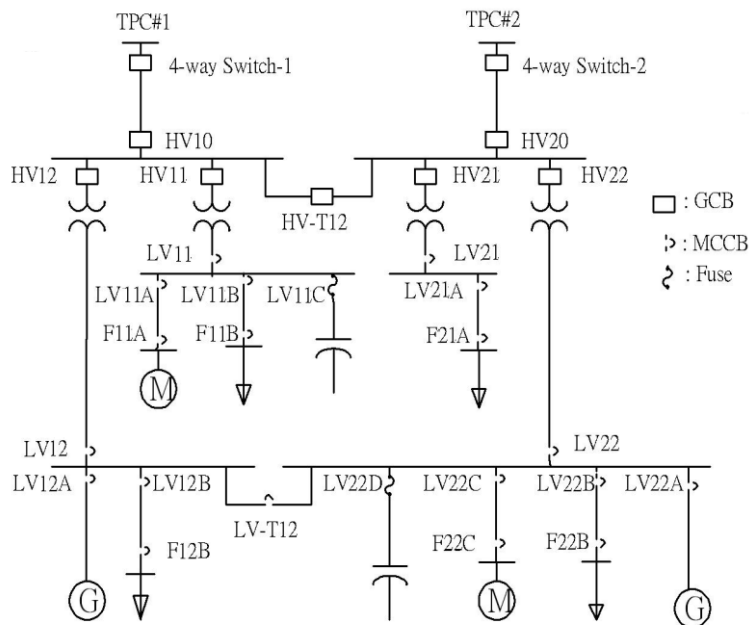


圖2 簡化後之系統單線圖

(三)低壓側轉供模式( TPC#1及TPC#2 供電，LV-T12投入，HV21、HV-T12、LV21、LV11A、LV21A 啟斷)。

(四)發電機供電(LV11A及LV21A及LV-T12投入，4-Way Switch-1、4-Way Switch-2、HV10、H-20、HV-T12啟斷)

### 三、計算短路故障電流

計算各匯流排短路故障電流，如表4所示。

### 四、計算電弧電流

根據設備類別及電壓等級，換算電弧電流，如表4所示；需考量85%電弧電流的狀況，表4所示為電弧能量較大之結果。

### 五、計算故障清除時間

根據電弧電流，計算後衛保護設備的動作時間，如表4所示；考量上下游保護設備實際佈置情況或有間距太近之情形(如主盤與分路盤分佈在左右或上下)，下游設備發生電弧意外時，亦會波及上游盤，故亦需考量下游盤的電弧能量。

### 六、決定工作距離

根據電壓等級，決定工作距離，典型值如表1所示。

### 七、計算電弧能量

依據電弧電流、故障清除時間、及工作距離，計算電弧能量，如表4所示；表4已考量85%電弧電流，以及鄰近盤之

電弧能量大小之情形，僅列出最終結果。

### 八、計算電弧邊界

以  $1.2 \text{ cal/cm}^2$  為界線，計算電弧邊界，如表4所示。

### 九、分析其它情境

依預期的運轉模式，計算其它電弧能量及電弧邊界，如表5所示。

由表4可以觀察到，在現場開關盤部份，因為電弧電流大多已達到瞬跳設定，且上游保護設備為模殼式斷路器(MCCB)，故障清除時間短，故其電弧能量不大。對開關站的分路盤而言，則因為其上游保護設備(或後衛保護設備)多為電驛驅動斷路器，且電弧電流相對較小，故電驛多動作在延時區間，導致電弧時間增加，電弧能量亦相對增加。對22.8 kV系統而言，可以觀察到，因為假設故障電流與電弧電流相同，故即令保護電驛為瞬跳元件作動，其電弧能量仍大。

表5所示為不同運轉條件下的電弧分析摘要。由表中可以觀察到，在本節設定條件下的高壓轉供及低壓轉供運轉模式下，因為系統阻抗的變化不大，對故障電流造成的影響亦不大，故電弧分析的結果相似。但在發電機運轉的模式下，因為故障電流變小，保護設備的動作時間增加，故電弧能量亦會增加，如LV-11/12，LV-21/22；同時，高壓部份，亦可能因為故障電流變小，但保護電驛的動作時間沒有劇烈增加，所以反而得到較大的電弧能量，如HV-11，HV-21。



當電弧能量大於40 cal/cm<sup>2</sup>時，雖然亦有相對應的個人防護具可以使用，但仍不建議開盤作業。因為發生電弧事故時，除了電弧的熱能外，亦同時存在爆炸震盪波。電弧防護衣雖可以對熱能的

危害加以防護，但無法應付爆炸震盪波所造成的傷害。故當電弧能量過大時，其爆炸盪波亦有足夠能量對人體造成傷害。因此，當電弧能量大於40 cal/cm<sup>2</sup>時，不建議開盤作業。

表4 電弧能量分析結果－正常運轉模式

盤名	系統電壓 (kV)	上游保護設備	設備類別	導體間隙 (mm)	故障電流 (kA)	電弧電流 (kA)	電弧時間 (sec)	工作距離 (inches)	電弧邊界 (inches)	電弧能量 (cal/cm <sup>2</sup> )	個人防護具等級
F-11A	0.5	LV-11A	Other	32	28.38	15.01	0.04	18	25.4	2	# 1
F-11B	0.5	LV-11B	Other	32	32.6	16.85	0.04	18	27.7	2.3	# 1
F-12B	0.5	LV-12B	Other	32	32.58	16.84	0.04	18	27.7	2.3	# 1
F-21A	0.5	LV-21A	Other	32	25.18	13.59	0.08	18	37.9	3.6	# 1
F-22B	0.5	LV-22B	Other	32	21.82	12.06	0.01	18	8.5	0.4	# 1
F-22C	0.5	LV-22C	Other	32	30.74	16.05	0.08	18	42.8	4.3	# 2
HV-10	23	4WSW-1	SG	254	7.501	7.501	0.13	31	122.8	18.8	# 3
HV-20	23	4WSW-2	SG	254	7.478	7.478	0.13	31	122.6	18.8	# 3
LV-11	0.5	HV-11	SG	32	39.85	16.93	0.39	18	131.3	22.4	# 3
LV-12	0.5	HV-12	SG	32	43.94	18.37	0.49	18	162.3	30.6	# 4
LV-21	0.5	HV-21	SG	32	36.02	15.56	0.39	18	123.3	20.4	# 3
LV-22	0.5	HV-22	SG	32	46.68	19.32	0.49	18	168.6	32.4	# 4
HV-11	23	HV-10	SG	254	7.501	7.501	0.1	31	106.4	14.1	# 3
HV-12	23	HV-10	SG	254	7.501	7.501	0.1	31	106.4	14.1	# 3
HV-21	23	HV-20	SG	254	7.478	7.478	0.1	31	106.2	14.1	# 3
HV-22	23	HV-20	SG	254	7.478	7.478	0.1	31	106.2	14.1	# 3
MOF-10	23	4WSW-1	Other	254	7.503	7.503	0.13	31	122.8	18.8	# 3
MOF-20	23	4WSW-2	Other	254	7.485	7.485	0.13	31	122.7	18.8	# 3
MTR-11	23	HV-11	TR	254	7.489	7.489	0.1	31	106.3	14.1	# 3
MTR-12	23	HV-12	TR	254	7.497	7.497	0.1	31	106.3	14.1	# 3
MTR-21	23	HV-21	TR	254	7.453	7.453	0.1	31	106	14	# 3
MTR-22	23	HV-22	TR	254	7.473	7.473	0.1	31	106.2	14.1	# 3

表5 不同運轉條件下的電弧分析摘要

盤名	正常運轉				高壓轉供			
	電弧邊界 (inches)	工作距離 (inches)	電弧能量 (cal/cm <sup>2</sup> )	個人防護 具等級	電弧邊界 (inches)	工作距離 (inches)	電弧能量 (cal/cm <sup>2</sup> )	個人防護 具等級
F-11A	25.4	18	2	#1	25.4	18	2	#1
F-11B	27.7	18	2.3	#1	27.7	18	2.3	#1
F-12B	27.7	18	2.3	#1	27.7	18	2.3	#1
F-21A	37.9	18	3.6	#1	37.9	18	3.6	#1
F-22B	8.5	18	0.4	#1	8.5	18	0.4	#1
F-22C	42.8	18	4.3	#2	42.8	18	4.3	#2
HV-10	122.8	31	18.8	#3	123.3	31	19	#3
HV-20	122.6	31	18.8	#3	106.7	31	14.2	#3
LV-11	131.3	18	22.4	#3	131.2	18	22.4	#3
LV-12	162.3	18	30.6	#4	162.2	18	30.6	#4
LV-21	123.3	18	20.4	#3	123.3	18	20.4	#3
LV-22	168.6	18	32.4	#4	168.5	18	32.4	#4
HV-11	106.4	31	14.1	#3	106.7	31	14.2	#3
HV-12	106.4	31	14.1	#3	106.7	31	14.2	#3
HV-21	106.2	31	14.1	#3	106.7	31	14.2	#3
HV-22	106.2	31	14.1	#3	106.7	31	14.2	#3
MOF-10	122.8	31	18.8	#3	123.3	31	19	#3
MOF-20	122.7	31	18.8	#3	-	-	-	-
MTR-11	106.3	31	14.1	#3	106.7	31	14.2	#3
MTR-12	106.3	31	14.1	#3	106.7	31	14.2	#3
MTR-21	106	31	14	#3	106.6	31	14.2	#3
MTR-22	106.2	31	14.1	#3	106.7	31	14.2	#3

盤名	低壓轉供				發電機運轉			
	電弧邊界 (inches)	工作距離 (inches)	電弧能量 (cal/cm <sup>2</sup> )	個人防護 具等級	電弧邊界 (inches)	工作距離 (inches)	電弧能量 (cal/cm <sup>2</sup> )	個人防護具等級
F-11A	25.4	18	2	#1	27.3	18	2.2	#1
F-11B	27.7	18	2.3	#1	18	18	1.2	#1
F-12B	28.5	18	2.4	#1	25.5	18	2	#1
F-21A	37.8	18	3.6	#1	232.6	18	52	Ext Danger
F-22B	8.5	18	0.4	#1	7.9	18	0.4	#1
F-22C	42.8	18	4.3	#2	39.1	18	3.8	#1
HV-10	123.3	31	19	#3	-	-	-	-
HV-20	122.2	31	18.6	#3	-	-	-	-
LV-11	131.2	18	22.4	#3	249.5*	18	57.7*	Ext Danger**
LV-12	168.5	18	32.4	#4	4605.7*	18	4228.6*	Ext Danger**
LV-21	123.4	18	20.4	#3	208*	18	44.1*	Ext Danger**
LV-22	168.5	18	32.4	#4	4605.7*	18	4228.6*	Ext Danger**
HV-11	106.7	31	14.2	#3	56.2*	31	3.9*	#1
HV-12	106.7	31	14.2	#3	293.9*	31	107.8*	Ext Danger**
HV-21	105.8	31	14	#3	50.6*	31	3.2*	#1
HV-22	105.8	31	14	#3	263.4*	31	86.6*	Ext Danger**
MOF-10	123.3	31	19	#3	-	-	-	-
MOF-20	122.2	31	18.7	#3	-	-	-	-
MTR-11	106.7	31	14.2	#3	43.7	31	2.4	#1
MTR-12	106.7	31	14.2	#3	293.9*	31*	107.8*	Ext Danger**
MTR-21	105.6	31	13.9	#3	39.6	31	2	#1
MTR-22	-	-	-	-	263.4*	31*	86.6*	Ext Danger**

\*：因為發電機運轉模式下，潮流方向不同，故上游保護設備與正常模式不同。

\*\*：電弧能量大於40 cal/cm<sup>2</sup>。

## 肆、對策結論

由於電弧能量受到很多因素影響，故尚無理論公式可以涵蓋所有情形。因此，現階段僅能以大量試驗數據搭配理論分析，擬合出適合的理論公式，用以進行數值分析。目前對於電弧防護的分析方法可分為兩大類：一為根據NFPA 70E的快速查表法，其優勢為可以快速選擇需要的個人防護具，但缺點為估算較為保守，容易造成現場人員穿著太厚重的防護衣，反而造成風險；另一為根據IEEE 1584之公式進行試算，其優勢為可以選用較合適的個人防護具，確保個人工作的靈活性，但缺點是計算較為繁瑣。對本文案例而言，若依表2(NFPA 70E查表法)進行分析，則在低壓系統中，需選用等級2(瞬時元件作動之設備)及等級4(延時元件作動之設備)的防護衣；而在高壓系統中，則皆需穿戴等級4的防護衣。若依電弧能量公式進行分析(如表4所示)，則在低壓系統中，需選用等級1(瞬時元件作動之設備)及等級3/4(延時元件作動之設備)的防護衣；而在高壓系統中，則皆需穿戴等級3的防護衣。除了單純選用防護衣等級外，亦可以根據電弧能量公式分析結果之電弧能量，直接選擇相對應規格之防護衣。

換句話說，若使用完整的電弧能量分析，防護衣等級的選用有機會可以減少一級，這對現場人員於工作時的靈活性將有所助益。但若無法取得系統資訊以進行電弧能量分析的話，亦可以使用

NFPA 70E之查表法，進行選用，其結果為較保守但仍可行。

## 伍、參考文獻

- [1] Christopher D. Coache and Gil Moniz, "Handbook for Electrical Safety in the Workplace", NFPA.
- [2] IEEE Std 1584: Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations.