

防止電弧閃光灼傷之研究

Prevention of Burn from Electric Arc Flash



防止電弧閃光灼傷之研究 ILOSH103-S302

勞動部勞動及職業安全衛生研究所

勞動部勞動及職業安全衛生研究所

INSTITUTE OF LABOR, OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH, MINISTRY OF LABOR



地址：新北市汐止區橫科路407巷99號
電話：(02) 26607600
傳真：(02) 26607732
網址：<http://www.ilosh.gov.tw>

ISBN 978-986-04-4665-4



9 789860 446654

GPN:1010400727

定價：新台幣250元

防止電弧閃光灼傷之研究

Prevention of Burn from Electric Arc Flash

防止電弧閃光灼傷之研究

Prevention of Burn from Electric Arc Flash

研究主持人：蘇文源、辜志承

計畫主辦單位：勞動部勞動及職業安全衛生研究所

研究期間：中華民國 103 年 3 月 1 日至 103 年 12 月 31 日

*** 本研究報告公開予各單位參考 *
惟不代表勞動部政策立場**

勞動部勞動及職業安全衛生研究所

中華民國 104 年 4 月

摘要

電弧閃光灼傷是電氣作業人員除電擊以外，最可能發生的傷害類型，而國內卻缺少相關電弧閃光灼傷危害之標準及技術文件，因此本計畫以常見之配電箱（盤）電氣作業為研究對象，訪視檢討國內事業單位防止配電箱（盤）電氣作業產生電弧閃光灼傷危害之現況，並建立配電箱（盤）電弧閃光灼傷危害計算之實際範例。

本計畫訪視國內 6 家事業單位，發現只有 2 家進行電弧閃光危害評估(1 家委託美國顧問公司，1 家採用原外商提供簡略方法)。另外，本計畫採用符合 IEEE 1584 標準之分析程式，完成包括 22.8kV、11.4kV、3.3kV、440V、380V、220V、110V 配電箱(盤)電壓等級之 3 個範例系統的電弧閃光灼傷危害分析計算，以決定電弧閃光保護邊界與個人防護裝備之選用。

最後，本計畫彙整美國電弧閃光灼傷危害之相關技術資料，並編製「防止配電箱(盤)電氣作業產生電弧閃光灼傷危害之技術指引」，以提供事業單位應用與勞動檢查單位檢查之參採。

關鍵詞：電弧閃光、灼傷、個人防護裝備

Abstract

Aside from electric shocks, burns from electric arc flash are the most common injury suffered by electricians. However, Taiwan is lacking in standards and technical documents on electric arc flash burns. In this project, we investigate companies that adopt actual countermeasures to prevent burn hazard caused by electric arc flash from panel boards, and to establish examples to perform arc flash analysis.

A total of six companies are investigated for this project. Of these, only two conduct hazardous assessment of electric arc flash. To perform panel board arc flash analysis, an IEEE 1584 base program is applied to three typical power supply systems of several voltage levels. The major purpose of this analysis is to determine both the arc flash protection boundary and personal protection equipment.

Lastly, we compile technical information on electric arc flash burn hazard from America to develop a technical guideline for the prevention of arc flash burn when handling electrical work in panel boards. The result of this project can be used as references and suggestions for the application of industries and inspection of labor inspectors.

Keywords : Electric Arc Flash, Burn, Personal Protective Equipment

目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
目錄.....	iii
圖目錄.....	v
表目錄.....	ix
第一章 計畫概述.....	1
第一節 前言.....	1
第二節 計畫目的.....	3
第三節 研究方法與步驟.....	3
第二章 電弧閃光之機制與危害.....	5
第一節 電弧閃光之機制.....	5
第二節 電弧閃光之危害.....	6
第三章 電弧閃光灼傷之案例與要因.....	8
第一節 電弧閃光之事故案例.....	8
第二節 電弧閃光之原因.....	11
第四章 國內外法規與標準規定.....	13
第一節 美國職業安全衛生署法規.....	13
第二節 美國國家電氣規範 NEC.....	14
第三節 美國電機與電子工程師協會指引 IEEE 1584.....	14
第四節 美國防火協會標準 NFPA 70E.....	15
第五節 國內防止電弧閃光灼傷危害相關法規.....	16
第五章 配電箱（盤）電氣作業之電弧閃光灼傷危害分析.....	17
第一節 分析流程.....	17
第二節 能量模型.....	20
第三節 危險等級與個人防護具之選用.....	26
第四節 弧光危險距離之決定.....	30
第五節 電弧閃光危險警告標示.....	34

第六章 訪視事業單位防止電弧閃光危害現況	36
第一節 已完成電弧閃光評估	36
第二節 未完成電弧閃光評估	48
第七章 配電箱(盤)電弧閃光危害計算實際範例	63
第一節 範例系統 A 之分析	63
第二節 範例系統 B 之分析	74
第三節 範例系統 C 之分析	87
第八章 結論與建議	101
第一節 結論	101
第二節 建議	102
誌謝	103
參考文獻	104
附錄一 各範例系統保護電驛設定值	106
附錄二 防止配電箱(盤)電氣作業產生電弧閃光灼傷危害之技術指引	108

圖目錄

圖 1 匯流排電壓等級及電弧閃光能量分佈圖.....	7
圖 2 配電盤與電動機控制中心之電弧閃光能量分佈圖.....	7
圖 3 台電開關盤電弧閃光事故.....	8
圖 4 台電裝甲開關箱電弧閃光事故.....	9
圖 5 污水處理廠開關盤電弧閃光事故.....	9
圖 6 事故配電箱及使用之梅開板手.....	10
圖 7 控制面板電弧閃光事故.....	10
圖 8 電弧造成嚴重燒焦之眼鏡.....	11
圖 9 美國國家電氣規範要求之電弧閃光危害標記.....	14
圖 10 電弧閃絡分析流程圖.....	19
圖 11 低壓弧光電流誤差比較圖.....	23
圖 12 弧光能量等級決定與個人防護具選用流程圖.....	27
圖 13 電弧閃光接近邊界圖.....	31
圖 14 NFPA 70E 2015 弧光危險警告標示圖.....	34
圖 15 NFPA 70E 2012 弧光危險警告標示圖.....	35
圖 16 廠家 A 之配電盤全景.....	36
圖 17 廠家 A 弧光危險警告標示圖.....	37
圖 18 廠家 A 全套之防護具.....	37
圖 19 廠家 A 使用之全罩頭盔.....	38
圖 20 廠家 A 使用之弧光保護大衣.....	38
圖 21 廠家 A 使用之絕緣手套.....	39
圖 22 廠家 A 使用之雙層手套.....	39
圖 23 廠家 A 使用之足部保護.....	40
圖 24 廠家 A 使用之絕緣手套及絕緣工作靴檢查標籤.....	40
圖 25 廠家 A 使用之遠端操作開關.....	41
圖 26 廠家 A 使用之斷路器安全鎖.....	41

圖 27 廠家 B 之電氣室全景圖	42
圖 28 廠家 B 使用之弧光警示標籤	43
圖 29 廠家 B 使用之限制邊界距離	43
圖 30 廠家 B 使用之全罩頭盔	44
圖 31 廠家 B 使用之危險等級 2 之長袖上衣	44
圖 32 廠家 B 使用之防弧吊帶褲	44
圖 33 廠家 B 使用之橡膠絕緣手套及皮革手套	45
圖 34 廠家 B 使用之安全鞋	45
圖 35 廠家 B 使用之防觸電掛勾	46
圖 36 廠家 B 使用之鑰匙管理盒	47
圖 37 廠家 B 使用之配電箱內部不同保護方式	47
圖 38 廠家 C 之配電箱外觀圖	48
圖 39 廠家 C 使用之防電弧上衣	49
圖 40 廠家 C 使用之防電弧吊帶褲	49
圖 41 廠家 C 使用之安全頭罩	50
圖 42 硬殼安全帽	50
圖 43 廠家 C 使用之絕緣手套	51
圖 44 廠家 C 使用之絕緣橡膠工具	51
圖 45 廠家 C 配電盤上使用之各種警告標籤	52
圖 46 廠家 C 使用之分散式控制系統	53
圖 47 廠家 C 使用之停電作業卡	53
圖 48 廠家 D 之配電盤外觀圖	54
圖 49 廠家 D 配電盤上使用之危險警示圖	54
圖 50 廠家 D 使用之警告標示	54
圖 51 廠家 D 配電盤內使用之電弧閃光保護電驛	55
圖 52 廠家 D 配電盤內使用之弧光感測器	55
圖 53 廠家 E 之電氣室全景圖	56
圖 54 廠家 E 11.4kV 等級配電箱	56

圖 55 廠家 E 220V 等級配電箱.....	57
圖 56 廠家 E 配電盤使用之符合 NEC 規範之警告標籤.....	57
圖 57 廠家 E 使用之警告標籤.....	58
圖 58 廠家 E 配電盤使用之偵煙裝置.....	58
圖 59 廠家 F 變電室內規劃之步道.....	59
圖 60 廠家 F 之電容器配電箱.....	59
圖 61 廠家 F 使用之配電箱.....	60
圖 62 廠家 F 使用之 69kV 等級配電箱.....	60
圖 63 廠家 F 之 3.3kV 等級配電箱.....	61
圖 64 廠家 F 之 480V 等級配電箱.....	61
圖 65 廠家 F 使用之斷路器安全鎖.....	62
圖 66 廠家 F 曾經發生過意外事故之配電盤.....	62
圖 67 範例系統 A 之三相短路電流圖.....	66
圖 68 範例系統 A 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之一.....	67
圖 69 範例系統 A 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之二.....	68
圖 70 範例系統 A 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之三.....	69
圖 71 電壓等級 22.8kV 之弧光警告標籤.....	72
圖 72 電壓等級 380V 之弧光警告標籤.....	72
圖 73 電壓等級 220V 之弧光警告標籤.....	73
圖 74 電壓等級 110V 之弧光警告標籤.....	73
圖 75 範例系統 B 單線圖之一.....	74
圖 76 範例系統 B 單線圖之二.....	75
圖 77 範例系統 B 單線圖之三.....	75
圖 78 範例系統 B 之三相短路電流圖.....	79
圖 79 範例系統 B 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之一.....	81
圖 80 範例系統 B 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之二.....	82
圖 81 範例系統 B 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之三.....	83
圖 82 電壓等級 11kV 之弧光警告標籤.....	85

圖 83 電壓等級 3.46kV 之弧光警告標籤.....	86
圖 84 電壓等級 480V 之弧光警告標籤.....	86
圖 85 範例系統 C 單線圖之一	87
圖 86 範例系統 C 單線圖之二	88
圖 87 範例系統 C 之三相短路電流圖	93
圖 88 範例系統 C 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之一	94
圖 89 範例系統 C 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之二	95
圖 90 範例系統 C 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之三	96
圖 91 範例系統 C 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之四	97
圖 92 電壓等級 3.3kV 之弧光警告標籤.....	99
圖 93 電壓等級 480V 之弧光警告標籤.....	100

表目錄

表 1 導體絕緣劣化主要因素與現象.....	12
表 2 系統電壓與典型導體間距及距離係數對照表.....	21
表 3 設備種類與其典型工作距離對照表.....	21
表 4 設備種類與其典型母線間距對照表.....	22
表 5 弧光危險等級與個人防護具選用.....	28
表 6 個人防護具.....	29
表 7 個人防護具選用之簡化.....	30
表 8 接近邊界距離表.....	32
表 9 範例系統 A 電力系統參數表.....	63
表 10 範例系統 A 變壓器參數表.....	63
表 11 範例系統 A 電纜參數表.....	64
表 12 範例系統 A 馬達參數表.....	64
表 13 範例系統 A 之保護設備動作協調時間表.....	65
表 14 範例系統 A 之設備參數表.....	70
表 15 範例系統 A 之弧光能量分析.....	71
表 16 範例系統 A 之弧光危險距離表.....	71
表 17 範例系統 B 電力公司參數表.....	76
表 18 範例系統 B 發電機參數表.....	76
表 19 範例系統 B 變壓器參數表.....	76
表 20 範例系統 B 電纜參數表.....	77
表 21 範例系統 B 馬達參數表.....	78
表 22 範例系統 B 之保護設備動作協調時間表.....	80
表 23 範例系統 B 之設備參數表.....	84
表 24 範例系統 B 之弧光能量分析.....	84
表 25 範例系統 B 之弧光危險距離表.....	84
表 26 範例系統 C 電力公司參數表.....	88

表 27 範例系統 C 發電機參數表	88
表 28 範例系統 C 變壓器參數表	88
表 29 範例系統 C 電纜參數表	89
表 30 範例系統 C 馬達參數表	91
表 31 範例系統 C 之保護設備動作協調時間表	93
表 32 範例系統 C 之設備參數表	98
表 33 範例系統 C 之弧光能量分析	98
表 34 範例系統 C 之弧光危險距離表	99

第一章 計畫概述

第一節 前言

電力工程建設與電氣設備安裝或維修作業人員，可能因設備故障或個人行為疏忽而衍生之電弧閃光 (Electric arc flash) 危害，例如電氣開關停電送電之切換、電氣設備故障、相間短路故障、線路接地故障及未與高壓電路保持安全距離等。電弧閃光灼傷是電氣作業人員除感電以外，最可能發生的傷害類型，因為嚴重電弧發生點的溫度是太陽表面溫度的 4 倍 (約 20,000°C)，週遭的材料物質係被氣化或燒熔高溫後噴出，也有電弧強光、衝擊波 (blast) 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。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融化成為防範電弧傷害的重點之一 (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，電弧衝擊波也可能是致命的傷害原因 (例如造成墜落)，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防護系統。

然而一般防範電弧危害的最小安全工作距離可能遠大於防範感電的活電工作最小安全距離。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邊界範圍外來操作開關 (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。另外電弧閃光還有以下幾點特性：一、電弧閃光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光；二、防感電用的絕緣手套或護具並不等於可承受電弧閃光能量的手套或護具；三、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。

美國勞工部曾經統計每年約有 2 千人受到嚴重的電氣灼傷而送進醫院燒燙傷中心治療，而另一項資料顯示美國每年約有 3 萬件電弧災害並且造成約 7 千人灼傷。然而國內電弧閃光意外事故在工安意外事件中並非不常見，只是常常被忽略掉而已，過去大家都只注意感電事故，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光的典型徵狀。依本所針對國內 96 至 100 年之感電類型重大職災彙整分析，發現其中因電弧灼傷佔感電重大職災約 4% (計 7 件)，

但造成 4 死 13 傷事故，平均 1 件約造成 2.4 人死傷，係非電弧灼傷平均 1.1 人死傷之兩倍多。

電氣設備之安裝維修應以停電作業為優先考量，當無法停電作業時儘量由遙控方式操作自動化開關，讓作業人員在不與電弧接觸環境下作業，確保作業安全。然為確保供電穩定性，實務上在不停電之情況下操作電氣開關或維修電氣設備有其必要性，開關切換過程產生電氣火花或足以威脅作業人安全之高溫電弧，潛在危險源存在是不爭的事實。

電弧閃光危害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，電力業界也早在西元 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、IEEE 1584、NEC 及 OSHA 法規皆相繼納入如何防範電弧事故之有關條文。NEC 自 2002 年版起的第 110.16 節即有規定必須在會發生電弧的設備上標示警告「電弧閃光危險」的標記。OSHA 29 CFR 規定在電弧閃光危險工作區之工作人員，應配備有規範之個人防護裝備。NFPA 70E，是美國編訂 NEC 法規的 NFPA 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，最新為 2015 版，內容對電弧閃光事故防範有一系列標準作法與建議，包括電弧閃光危害評估、電弧閃光能量計算與分類、個人防護裝備標準等實務建議，是電弧閃光事故防範實務的標準範本。IEEE 1584，是美國編訂 NESC 法規的 IEEE 組織專為計算電弧閃光的危害距離與能量而編製的指導應用文件。2002 年提出電弧閃光能量數學計算模型，這些計算式根據 1990 年起執行的實驗資料，經過分析研究後而發展出之電弧閃光能量分析公式，主要功能為分析開關箱之電弧閃光能量與電弧閃光危險距離，與 NFPA 的電弧閃光能量計算式比較，參數相對於複雜與繁多，但是計算結果較為準確，應用範圍也更加廣泛，是電弧閃光能量計算上重要的里程碑。

電弧閃光事故的危害是可以減低的，其關鍵在於減少故障電流大小與電弧閃光持續時間。在系統方面，可透過系統設計規劃來降低故障電流的大小。在保護設備方面，縮短斷路器與電力熔絲的跳脫時間、保護協調重新規劃調整或使用電弧閃光保護系統等，都可以減少電弧閃光的持續時間，以降低電弧閃光事故發生時的電弧閃光能量。此外，在可能發生電弧閃光事件的工作區域，也必須張貼警

告標示，在此區域從事活電作業的工作人員，須穿著適合的個人防護裝備，以免電弧閃光事故發生時，人員遭受到電弧閃光事故的危害。

第二節 計畫目的

本計畫主要目的為分析配電盤的電弧閃光能量與電弧閃光保護邊界，產生電弧閃光警告標示，編訂電弧閃光防護之技術指引，作為電弧閃光防護的參考依據，減低因電氣作業電弧閃光灼傷事故，因此主要分為以下六個部分。

- 一、探討分析產生電弧閃光之機制與危害問題。
- 二、蒐集分析電弧閃光造成人員灼傷案例與要因。
- 三、彙整分析國內外防止電弧閃光危害相關法規或標準規定。
- 四、進行配電箱（盤）電氣作業之電弧閃光灼傷危害分析。
- 五、訪視檢討國內事業單位防止配電箱（盤）電氣作業產生電弧閃光灼傷危害之現況。
- 六、建立配電箱（盤）電弧閃光灼傷危害計算之實際範例（包括 22.8kV、11.4kV、3.3kV 等級及 440V、380V、220V、110V 等級）。
- 七、編製「防止配電箱（盤）電氣作業產生電弧閃光灼傷危害之技術指引」。

第三節 研究方法與步驟

本計畫之研究方法如下：

- 一、標準規範比較法：蒐集相關文獻、標準、法規與技術資料進行比較分析與彙整。
- 二、現場訪視法：進行現場訪視，瞭解目前國內實際現況與所遭遇之問題及採行對策。
- 三、專家諮詢法：向國內相關專家學者、製造商、代理商、施工單位及現場使用者請益。

本計畫為編製「防止配電箱(盤)電氣作業產生電弧閃光灼傷危害之技術指引」，需先了解電弧閃光事故可能發生原因，並彙整分析國內外針對電弧閃光灼傷危害之技術規定與相關做法，進而研究電弧閃光意外事故能量，選用適當之個

人保護設備及電弧閃光邊界之選定，最後編製技術指引，其研究步驟如下：

- 一、蒐集相關文獻、標準、法規與技術資料，包括美國 OSHA、NEC、NFPA 70E 及 IEEE 1584 等相關技術指引與標準規範及相關技術資料等。
- 二、進行相關文獻、標準、法規與技術資料之彙整分析，包括美國 OSHA、NEC、NFPA 70E 及 IEEE 1584 等相關技術指引與標準規範及相關技術資料等。
- 三、探討分析產生電弧閃光之機制與危害問題。
- 四、蒐集分析電弧閃光造成人員灼傷案例與要因。
- 五、配電箱（盤）電氣作業之電弧閃光灼傷危害分析。
- 六、現場訪視相關事業單位或場所。
- 七、視需要，向相關專家學者、製造商、代理商、施工單位及現場使用者詢。
- 八、檢討事業單位防止配電箱（盤）電氣作業產生電弧閃光灼傷危害之況。
- 九、建立配電箱（盤）電弧閃光灼傷危害計算之實際範例。
- 十、編製「防止配電箱（盤）電氣作業產生電弧閃光灼傷危害之技術指引」。

第二章 電弧閃光之機制與危害

第一節 電弧閃光之機制

在兩根電極之間加電壓，彼此慢慢的靠近，當兩根電極靠近到一定距離時，電極間會產生火花，此時導體電流由一電極，經過以游離化氣體路徑，流到另一根電極，所產生的高溫氣體導電現象，就像是電焊機正常操作時出現電弧閃光，這就是所謂的電弧閃光短路。

當空氣溫度升高時，空氣將具有導電性，電弧閃光電阻的大小不一定，電弧閃光短路電流的大小也不一定，電弧閃光是一種隨時間變化的非線性電阻元件，而電弧閃光故障也是一種可以用數學統計方法描述的隨機物理現象[1]。

當電弧閃光發生時，將發生下列現象[2]：

- 一、當電弧閃光短路現象發生時，發生點將產生極高的溫度，大約為太陽表面溫度的 4 倍高(20,000°C)，周圍物品會被這高溫所加熱熔化。
- 二、銅金屬被電弧閃光短路產生的巨大高溫所氧化，體積膨脹約 76,000 倍。
- 三、周圍的金屬設備因為電弧閃光短路產生的巨大高溫，也開始融化。
- 四、電弧閃光短路會導致可見光與不可見光的放射，距離發生點約 6 到 7 公尺處，所產生的照度可達 9,000 勒克斯。
- 五、燃燒中的電弧閃光會使周圍空氣升溫，造成空氣膨脹擴散，於配電盤內部產生巨大的壓力。
- 六、電弧閃光產生的壓力達臨界，爆炸的壓力波開始向外擴散。
- 七、在電弧閃光短路所產生的爆炸同時，巨大的聲響產生。
- 八、被電弧閃光短路高溫所熔化的碎片隨著爆炸的產生，一同迸射出來。

此外，電弧閃光故障的電弧閃光以 100m/s 的速度快速移動，是非常危險且具破壞性的，電弧閃光源快速移動，沒有一定的路徑，特別是引發燃燒效應時，設備與導線被高溫熔斷，接地故障可在 0.1ms 內快速的擴大變成三相接地故障。

電弧閃光的燃燒常常發生在盤門、盤壁及匯流排等地方，燃燒效應會熔斷設備與導線，因而釀成火災。在配電盤附近的工作人員，身體會因高溫而灼傷，衣服也因為著火熔化，使傷勢加重。爆出的氣體可能含有一氧化碳、銅或鋁氣等有毒氣體，造成身體的傷害[1]。

第二節 電弧閃光之危害

電弧閃光造成的傷害很多，就人員的傷害來說，包括視力或聽力的損害、燒傷、灼傷，嚴重的話甚至需要進行皮膚移植與復健，再更嚴重的話，可能會導致死亡。電弧閃光也會造成儀器與設備的損毀，包括配電盤體、斷路器、比流器、比壓器等設備。電弧閃光會造成光害，使人目眩、與暫時失明，也會產生高溫與高壓，釀成爆炸與火災[3]。根據美國燒傷協會(American Burn Association, ABA)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，除了感電防護外，如何避免電弧閃光發生時被灼傷，尤其是衣服的點燃與熔化，熔化的衣服質料會增加傷口清理費時，這是防範電弧閃光傷害的重點之一。嚴重電弧閃光事故，也可能使受害者遭受視力損害、聽力損失以及呼吸、肌肉、骨骼或神經系統的損傷[4]。

電弧閃光能量單位一般以 cal/cm^2 或 J/cm^2 表示，IEEE 1584 與 NFPA 70E 有詳細的計算方程式，利用這些方程式可以求得電弧閃光保護邊界，也就是皮膚受到可治癒的 2 級灼傷，電弧閃光能量為 $1.2\text{cal}/\text{cm}^2$ (或 $5\text{J}/\text{cm}^2$)能量時電弧閃光源與工作者的距離[1]。若要進入此邊界內進行活電作業，則需再計算距離電弧閃光發生點的工作者身上所承受的電弧閃光能量，並且要穿著能耐受所計算電弧能量的個人防護裝備。NFPA 70E 2015 年表格 130.7(c)(16)將電弧閃光個人防護具(Arc Flash PPE)分為 4、8、25、40 cal/cm^2 等四個電弧閃光能量等級並且搭配建議保護衣著裝備。如果在電弧閃光能量可能大於 $40\text{cal}/\text{cm}^2$ 的風險場所工作，則建議應採取停電作業[5]。

Daniel R. Doan 等人在小型工廠、商辦以及大型化工廠等共 91 個地點進行電弧閃光分析，地區包含美國、墨西哥、南非及台灣等地，並以資料分析之結果提出安全改善方案[6]。此研究一共彙整 19,268 個匯流排之資料，電壓等級及其電弧閃光能量分佈如圖 1 所示，其研究成果顯示，55%的匯流排產生之電弧閃光能量在 $1.2\text{cal}/\text{cm}^2$ 內，72%的匯流排產生之電弧閃光能量在 $4\text{cal}/\text{cm}^2$ 內。即此研究中，45%電弧閃光事件屬於危險等級 1 以上，必須穿戴適當的保護配備(Personal Protective Equipment, PPE)以避免產生危害。

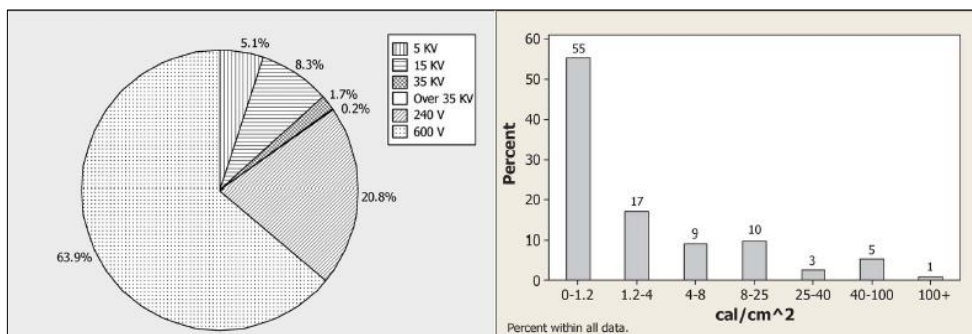
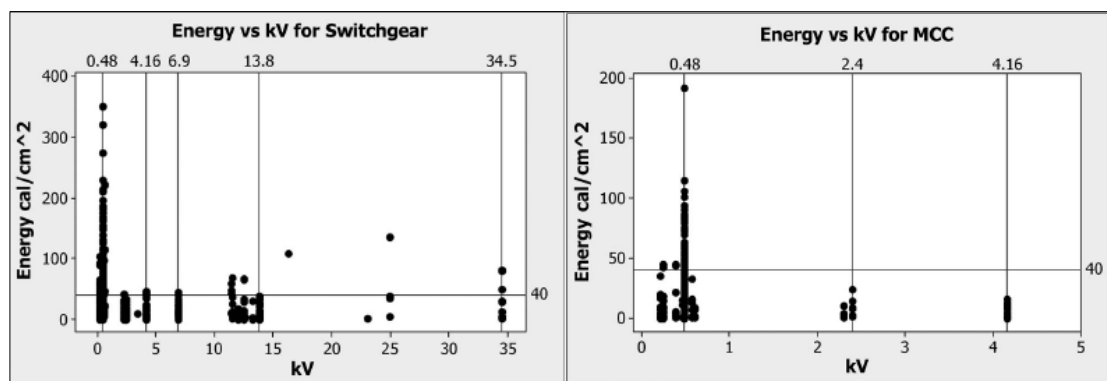


圖 1 匯流排電壓等級及電弧閃光能量分佈圖

如圖 2 所示，為針對配電盤(Switchgear)及電動機控制中心(Motor Control Center, MCC)所作之電弧閃光能量分佈圖，電弧閃光能量超過 40cal/cm²以上，將極度危險，從圖 2 中可發現，電弧閃光能量幾乎在各電壓等級的匯流排都超過 40cal/cm²，此外，電弧閃光能量不只跟電壓等級有關，跟保護設備的設計也有很大的關連，而大部分超過 40cal/cm²以上的匯流都集中 480V 這個等級，此研究發現原因大致上有兩點，第一，低壓配電盤卻配上較大型的變壓器；第二，只有在變壓器一次側裝設保險絲，導致二次側故障時需更多時間切離，另外有些保險絲電流值設為滿載之 2~3 倍，也會加長電弧閃光電流流過的時間。



(a)配電盤

(b)電動機控制中心

圖 2 配電盤與電動機控制中心之電弧閃光能量分佈圖

其它可能使電弧閃光能量增加的原因如下，(1)保護協調時間太長。(2)電纜太長使電弧閃光電流下降，保護設備不易偵測延長故障時間，累積出高電弧閃光能量。(3)系統上有併接(Tie)之情形，並聯型式之變壓器或電纜造成電流上升，另外因電流分流，一樣可能使保護設備偵測不易，造成啟斷時間變長。

第三章 電弧閃光灼傷之案例與要因

第一節 電弧閃光之事故案例

電弧閃光意外常常發生原因是人為的操作失誤，近年來國內外亦有多起電弧閃光事故發生。

台電公司於 2009 年，大豐變電所的一個機房，工作人員在測試斷路器過程中，高壓氣體六氟化硫絕緣開關設備故障，造成氣體外洩，並發生電弧閃光現象，電弧閃光產生的強光和熱造成六名台電包商員工灼傷送醫，這起事件造成新店地區兩萬六千戶一度跳電，台北縣消防隊員也身穿防護衣搶救，噴灑大量清水降低空氣中的六氟化硫含量[7]。

台電 2009 年某事業單位勞工，從事地下配電線路故障搶修作業，操作亭置式四路氣封開關，試送小環路開關時，B 相肘型端頭因故障電流產生電弧，造成彈出電弧灼傷作業人員腰部[8]。

2009 年，台電發生另一起電弧閃光事故，某事業單位勞工，從事地下配電線路故障搶修作業時，C 相套管插頭突然故障產生電弧，作業人員閃避不及被灼傷頸部，如圖 3 所示[8]。



(a)開關盤體 (b)使用之絕緣手套

圖 3 台電開關盤電弧閃光事故

2009 年 9 月 24 日，台電核三廠也發生電器意外，一名包商李姓工人在維修電器設備時，不慎被電弧閃光灼傷頸部及手臂，緊急送恆春旅遊醫院急救，所幸

沒有發生性命危險，經包紮後回家休養[9]。

2012 年 4 月台電嘉義營業處，6 名台電員工於裝甲開關箱進行 11.4KV 電源對相測試工作時，疑因控制電纜掉落，致測試人員驚慌之下抽出測試棒時，因電源相間距離不足，產生大量高溫火花電弧，導致人員 1 死 5 傷灼傷，如圖 4 所示。



圖 4 台電裝甲開關箱電弧閃光事故

2011 年 6 月某事業單位勞工 4 人，於污水處理廠回收水單元電氣機房內，從事沉水泵之線路查修工作，疑似因板手之延長桿不慎同時觸碰到帶電（電壓 460 V）之電源一次側及電氣箱外殼而發生短路產生電弧造成 3 人灼傷，如圖 5 所示。



圖 5 污水處理廠開關盤電弧閃光事故

2010 年 11 月某事業單位勞工，3 人，於頂樓電氣室配電箱從事無熔絲開關 (220V、300A)電力電線聯結作業時，其手持之梅開板手就誤觸左側無熔絲開關

(220V、1600A)帶電之電源端引發短路電弧造成 3 人灼傷，如圖 6 所示。



圖 6 事故配電箱及使用之梅開板手

美國佛羅里達州傑克遜維爾，亦發生電弧爆炸，作業員嚴重灼傷並送往醫院；2009 年 8 月 1 日，一個 45 歲的維修員工，大約有 15 年的電機經驗，在作業中使用絕緣螺絲起子進行 480VAC 控制面板的例行調整，但施工時的螺絲不慎掉落，造成配電箱發生相對地短路，故障所產生的電弧閃光點燃員工的襯衫和褲子的上部，員工的臉受到三度灼傷，以及身體多處二度灼傷，此外，員工身穿棉質衣物熔化後緊黏在員工的軀幹部分，同時員工並沒有戴絕緣手套，因此燒傷診所表示僱員將需要在未來 12 週進行換皮手術，其次是廣泛的物理治療和整容手術 [10]；2010 年 1 月 1 日，一間美國的大型百貨公司，在 480V 配電等級下發生故障，當維修工人在做檢查時，突然發生電弧閃光，這起意外使的維修工人及消防員送命，如圖 7 所示[11]。



(a)毀損嚴重的斷路器

(b)銅片因電弧產生的高溫而融化

圖 7 控制面板電弧閃光事故

2011 年 9 月 1 日，英國利物浦一間公司，其工人嘗試在交換機中插入保險絲，但公司未依規定進行斷電，因此活電作業的情況下，電弧閃光意外發生，工

人被近距離灼傷眼睛以及燒傷臉部[12]，如圖 8 所示。



圖 8 電弧造成嚴重燒焦之眼鏡

2013 年 11 月 22 日，蘇格蘭位於泰德賽的某公司，進行活電作業，在施工完成後，將安全蓋歸位時，蓋子的一角不慎碰到周邊帶電物體，造成電弧閃光，電弧灼傷工人的臉、手及手臂，歷經兩個月後才回歸工作崗位[13]；2014 年 4 月 25 日，美國 CSX 運輸公司也發生電弧閃光意外，兩名工人嚴重燒傷，病情嚴重[14]。

第二節 電弧閃光之原因

電弧閃光短路的導因，主要可以分成兩個部分，第一個部分為外部的物體侵入，包括昆蟲或動物的入侵、雜質、灰塵污染或濕氣結露滲透等；或者人為疏失，如工具不小心觸碰到電源、工具遺落在盤內，導致與電源接觸和不恰當的工作程序等。第二部分為設備故障，例如缺乏定期維護保養，導致設備或導電體絕緣劣化破壞，此外，保護協調時間設定不當，過電壓、過電流與過載等因素也會造成設備故障。造成導電體絕緣劣化主要因素與其現象如表 1 導電體絕緣劣化主要因素與現象所示[2]。

表 1 導電體絕緣劣化主要因素與現象

主要因素	現象
電場劣化	部份放電、突波電壓
熱劣化	導電體溫升、熱分解、龜裂剝離
應力劣化	週溫、氧化、龜裂剝離
	溫度變化、熱應力、龜裂剝離
	短路事故、電磁機械力
環境劣化	溼氣、塵埃、吸溼、污染、絕緣電阻降低

當導電體絕緣劣化時，劣化的導電體會產生部分放電，並且產生熱、光、聲音與化學反應一起擴散出現，導致電弧閃光短路的發生[2]。

第四章 國內外法規與標準規定

1991 年，OSHA 將電弧閃光危害新增至電氣危害項目中，之後在 1995 年時，第五版的 NFPA 70E 出版，這也是第一個專門針對電弧閃光危害制定的標準，內容主要包含防護衣服的要求與定義弧光保護邊界，之後兩次修訂，重點在詳細解釋電弧閃光危害分析，例如提供更多有關弧光保護邊界、個人防護裝備規範與弧光能量計算式。2004 年，第六版的 NFPA 70E 出版，在附錄 D 裡新增弧光保護邊界的計算範例，並進一步更新危險等級的區分。2009 年又再更新，主要新增弧光能量計算方法與更新個人防護裝備要求，目前最新版為 2015 版本。

第一節 美國職業安全衛生署法規

美國職業安全衛生署(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)，係一執行法規之機構，其中 OSHA 29 CFR 1910.333 至 OSHA 29 CFR 1910.335，主要內容為員工暴露於電氣危險之區域時，員工與業主兩者間之法律責任等相關規定，如以下規定：

一、OSHA 1910.132(d)：

需於弧光保護邊界內執行工作時，應進行弧光閃烙故障分析，業主並應文件說明工作人員可能遭受之事故能量等級(cal/cm²)。

二、OSHA 1910.269(l)(6)：

員工依於執行特定任務所可能遭受到之事故能量，須穿抗燃性衣著及相應之個人防護具。OSHA 將會調查嚴重之工安事故，要求調閱員工電氣安全訓練紀錄及弧光閃烙危害等級之評估報告，若忽略以上任何一項，將可能遭受罰款及受傷員工所提起之法律訴訟。

三、OSHA 1910.333：

員工於工作時，若可能曝露於附近有帶電體之環境中，除非業主能證明若斷電將導致或增加不可預測的危險性，否則此帶電體應先斷電，基本要求是將任何對地電壓高於 50V 之帶電體予以斷電。

四、OSHA 1910.335(a)(1)(i)：

員工於具有潛在電氣危險之區域工作時，應裝配或具備於工作時足以適當保護身體特定部位之電氣保護設備。

第二節 美國國家電氣規範 NEC

美國國家電氣規範(NEC)由 19 個法律編定與相關技術委員會所制定，並被美國國家標準協會(ANSI)批准，正式名稱為 ANSI/NFPA 70，首次出版於 1897 年，並每三年發布一次，2014 年為最新版本。儘管 NEC 被稱為電氣最低標準，仍被美國許多管轄區視情況添加或刪減法條並使用[17]。

其中 NEC 110.16 規定：「所有於送電中須進行測試、調整及維護之電氣設備，諸如開關盤、配電盤、工業控制盤或電動機控制盤，必須在可能會發生電弧閃絡的設備上標示“電弧閃絡危險”之警告標記」，如圖 9 美國國家電氣規範要求之電弧閃光危害標記所示[18]。



圖 9 美國國家電氣規範要求之電弧閃光危害標記

第三節 美國電機與電子工程師協會指引 IEEE 1584

美國電機與電子工程師協會(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)[19]，IEEE 1584 係美國編訂 NESC 法規的 IEEE(編訂 NESC 之組織)，專為計算電弧閃絡的故障電流、危害邊界與事故能量而編的指導文件，此文件特別之處是因所使用之計算公式較複雜，所以使用者依需要可與設計妥之 Excel 軟體程式一起購買。2002 年提出弧光能量數學計算模型，這些計算式根據 1990 年起執行的實驗資料，經過分析研究後而發展出之弧光能量分析公式，主要功能為分析開關箱之弧光能量與弧光危險距離，與 NFPA 的弧光能量計算式比較，參數相對於複雜與繁多，但是計算結果較為準確，應用範圍也更加廣泛，是弧光能量計算上重要的里程碑，弧光能量計算模型及弧光危險距離之決定將於第五章作詳細介紹。

第四節 美國防火協會標準 NFPA 70E

NFPA 70E 是美國編訂 NEC 規範的美國防火協會(NFPA)組織，為補足 NEC 規範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，對活電工作防範電弧閃光危害等相關措施有一系列標準做法與建議，最新的 2015 年版，包括弧光危害評估、弧光計算與分類、防護配備標準以及防護具如何搭配選用等都詳細規範[5]。

一、電弧閃光發生之接近邊界

(一)觸電分析

觸電分析應包括電壓等級、保護邊界以及個人保護配備，以降低處電人員觸電的可能性。

(二)電弧閃光接近邊界

電弧閃光接近邊界包含管制接近邊界、限制接近邊界與弧光保護邊界，其中管制接近邊界與限制接近邊界的決定無須計算，根據電壓等級將有對應之邊界距離，將於第五章做詳細介紹。

二、個人保護配備

NFPA 70E 將弧光能量的危險等級(Hazard / Risk Category)共分成四類，危險等級代表危險的標準，不同的危險等級須配合不同的個人防護具(Personal Protective Equipment, PPE)，個人保護配備須具有可移動性及可視性，當進入弧光保護邊界時，須穿著個人保護配備才可入。

NFPA 70E 依據身體不同部位，分別規範適當的個人保護配備，如下所示：

(一)弧光保護套裝(Arc flash suits)

弧光保護套裝之設計應使人員在穿著後，能容易且快速地移動，且整體保護套裝(包含頭罩之面罩)之弧光等級須能承受弧光能量。

(二)頭部保護

在弧光保護邊界內應戴用弧光等級面罩(face shield)與弧光等級大絨帽(balaclava)，而允許弧光等級頭罩(hood)取代弧光等級面罩與弧光等級大絨帽。

當弧光能量超過 12 cal/ cm²時，應戴用弧光等級頭罩。

(三)臉部保護

面罩之弧光等級須能承受弧光能量，並且有綁緊之護罩完整的包覆臉部、

下巴、額頭、耳朵、脖子等區域。穿戴面罩或頭罩時，應戴用安全眼鏡或安全護目鏡等眼睛保護裝置。

(四)手部保護

當進入弧光保護邊界時，工作人員須穿戴防護手套，根據電弧閃光強度不同，而有不同的保護材質。

1. 觸電保護

在有可能觸電或接觸帶電導體的情況下，人員須穿著橡膠絕緣手套，NFPA 70E 內詳細規範橡膠絕緣手套的使用情況，將於第五章做細部說明。

2. 電弧閃光保護

當人員處於可能發生電弧閃光能量場合時，需穿著厚(heavy-duty)皮革手套或弧光等級手套。

當穿戴橡膠絕緣手套防止感電時，皮革保護套應穿於橡膠絕緣手套外部。

(五)足部保護

厚皮革工作鞋可提供足部某些弧光保護，當弧光能量大於 4 cal/cm^2 時，人員須穿著厚皮革工作鞋。

NFPA 70E 規定身體各部位所需之個人保護配備後，根據弧光能量的危險等級，要求各危險等級所需之保護衣物及保護設備，將於第五章做詳細介紹。

第五節 國內防止電弧閃光灼傷危害相關法規

儘管國外已有許多電弧相關文獻及研究，但國內尚未真正重視電弧閃光灼傷危害的嚴重性，多數國內企業單位也並未具備電弧相關知識，因此目前並無明確定義電弧灼傷危害的相關法規，但根據「職業安全衛生法第 6 條第 1 項第 3 點」，內容提及：雇主對下列事項應有符合規定之必要安全衛生設備及措施(三、防止電、熱或其它之能引起之危害)，因此法規雖無詳細規範電弧意外發生之責任，但雇主仍有義務防止電弧的發生，以及確保人員的安全。

第五章 配電箱（盤）電氣作業之電弧閃光灼傷 危害分析

電弧閃光事故造成人員與設備相當大的生命與財產上的威脅，為了減少電弧閃光事故的危害，首先就是要做現場與設備的弧光危險評估，根據 IEEE 1584 與 NFPA 70E 所提供的弧光分析模型，預測弧光危險區的弧光能量，並依照 NFPA 70E 建議的危險等級區分，做好相對應個人防護裝備的挑選，此外，在弧光危險區也需標示弧光警告標示，以期減少弧光事故所帶來的傷害與損失。

第一節 分析流程

為了減少弧光事故的傷害與損失，電弧閃光的分析是不可或缺的，本文之分析方式參考自 IEEE 1584 之指導文件[19]，其分析流程如下及圖 10 所示：

一、蒐集系統與現場安裝資料

收集系統單線圖，包括變壓器、傳輸線、迴路分佈、保護電驛、電容器、含保護設備之斷路器、無熔絲開關型號、電壓等級等等，各元件之參數。

二、決定系統操作方式

除了系統參數外，系統的操作方式也將影響短路電流的大小，例如系統含一個或多個饋線、備用匯流排斷路器開關狀態、MCC 由一個或多個饋線供應、發電機使用中或備用等等。

三、計算三相短路電流

根據系統單線圖，計算出短路電流，而弧光分析所需之短路電流為三相短路電流。

四、計算電弧閃光電流

利用三相短路電流依 IEEE 1584 建議之公式推算電弧閃光電流，由於電弧產生時將帶有電弧阻抗，因此一般而言弧光電流將會比三相短路電流小，在 1kV 以下之低壓系統尤其明顯。

五、依據保護方式預測故障清除時間

電弧閃光燃燒時間將影響電弧能量的大小，根據電流反時特性曲線及不同保護設備，須選用不同的時間，如保險絲由清除時間來決定持續時間，斷路器則由

跳脫時間來決定。

六、蒐集系統電壓及導線間距

蒐集每個匯流排之系統電壓及導線間距，IEEE 1584 與 NFPA 70E 皆有導線間距典型值之相關規範。

七、選擇工作距離

電弧閃光能量定義為電弧閃光發生地點與人員之臉與胸接觸面之距離，而非與手的距離，因此在電弧閃光分析上，將採用 IEEE 1584 規範之典型值。

八、計算弧光能量

透過 IEEE 1584 與 NFPA 70E 之經驗公式，帶入以上參數並計算弧光能量以決定適當之個人防護具。

九、計算弧光保護邊界

利用計算弧光能量之公式反推，並帶入人可承受之最低弧光能量 1.2 cal/cm^2 ，得到弧光保護邊界。

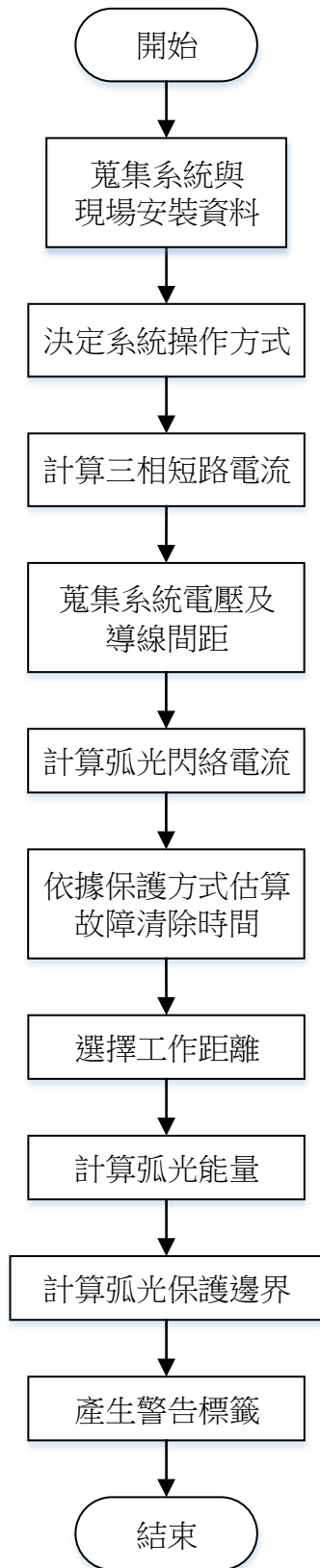


圖 10 電弧閃絡分析流程圖

第二節 能量模型

IEEE 1584 與 NFPA 70E 是國際間弧光分析重要的參考標準，IEEE 1584 所提供的弧光能量計算方程式，適用範圍電壓從 208V 到 15kV，短路電流從 0.7kA 到 106kA，而 NFPA 70E 附錄 D 中規範，電壓等級 600V 以上之開放式無箱體設備(open air)，其弧光能量與弧光危險距離之計算參考 Lee 所提出的計算公式，且其計算之能量隨電壓等級增加而越趨保守；電壓等級 600V 以下，則參考 Doughty, et al.提出之計算公式，適用範圍短路電流從 16kA 到 50kA。因此從適用的電壓與短路電流範圍作比較，IEEE 1584 適用範圍明顯比 NFPA 70E 寬廣許多，IEEE 1584 作弧光分析之前，必須收集系統參數，如系統電壓、短路電流、導體間距、接地類型與設備類型等，方程式的變數較 NFPA 70E 的變數為多，NFPA 70E 在弧光能量計算，相對保守許多，IEEE 1584 因為計算繁複，準確度也比較高。而且 NFPA 70E 的計算方程式適用於低壓的配電系統，於中高壓的輸電系統並不在其適用範圍。

電弧閃光產生的弧光能量單位一般以 cal/cm^2 或 J/cm^2 表示，電弧閃光的熱效應比一般火焰還嚴重，可以耐燃或防感電的質料未必可以抵抗。雖然弧光事故發生週期甚短(通常少於 1 秒)，但是弧光能量有可能超過 100 cal/cm^2 以上，而且有金屬溶化物噴出，而火焰事件能量僅達 30 cal/cm^2 間，也沒有濺出物，因此電弧閃光的危險特性是遠大於火焰。若在封閉空間發生電弧閃光事故，其威力比在開放空間發生時大 3 倍以上，亦即發生在封閉開關箱中的電弧閃光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，箱體受電弧閃光的破壞，將會熔化與變形，噴出物可能傷及附近的工作人員與設備，所以美、加等國早已開始設計產製與應用各種類型的耐弧光故障的開關設備，相關抗電弧 (Arc-Resistant) 開關設備規範如 IEEE C37.20.7 與 IEC 62271 等文件 [1]，惟其成本亦相對較高。

一、IEEE 1584

IEEE 1584 的弧光分析方程式，係透過三相短路電流計算，以討論弧光電流、弧光能量與弧光危險距離之關係。其中弧光分析輸入參數分別如表 2、表 3 及表 4 所示[19]。

表 2、表 3 及表 4 分別為系統電壓與典型導體間距及距離係數、設備電壓等級與典型的工作距離、及設備電壓等級與典型母線間距對照表，是參考 IEEE 1584 提供的弧光分析輸入參數參考對照表，使用者可依據計算的現場電壓等級與設備類型選擇適當的典型工作距離、典型導體間距與距離係數來計算弧光電流、弧光能量與弧光危險距離。

表 2 系統電壓與典型導體間距及距離係數對照表

系統電壓(kV)	設備種類	典型導體間距(mm)	距離係數(x)
0.208~1	開放式	10~40	2.000
	開關箱	32	1.473
	馬達控制中心與配電盤	25	1.641
	電纜	13	2.000
>1~5	開放式	102	2.000
	開關箱	13~102	0.973
	電纜	13	2.000
>5~15	開放式	13~153	2.000
	開關箱	153	0.973
	電纜	13	2.000

表 3 設備種類與其典型工作距離對照表

設備種類	典型工作距離(mm)
15kV 開關箱	910
5kV 開關箱	910
低壓開關箱	610
低壓馬達控制中心及配電盤	455
電纜	455
其他	依現場情況決定

表 4 設備種類與其典型母線間距對照表

設備種類	典型母線間距(mm)
15kV 開關箱	152
5kV 開關箱	104
低壓開關箱	32
低壓馬達控制中心及配電盤	25
電纜	13
其它	未要求

(一) 弧光電流

IEEE 1584 依短路電流用於推算弧光電流(I_a)之公式，係根據電壓範圍來區分，分別為 208V~1.0kV 與 1.0kV~15kV，而超過 15kV 以上，則使用 Lee Method 之公式來計算。不同電壓範圍的弧光電流公式分別如(1)、(2)及(3)所示[19]：

1. 系統電壓：0.208kV~1.0kV

$$\lg I_a = K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.0966V + 0.000526G + 0.5588V(\lg I_{bf}) - 0.00304G(\lg I_{bf}) \quad (1)$$

2. 系統電壓：1.0kV~15kV

$$\lg I_a = 0.00402 + 0.983 \lg I_{bf} \quad (2)$$

3. 系統電壓：15kV 以上

$$I_a = I_{bf} \quad (3)$$

其中

\lg ： \log_{10}

I_a ：弧光電流(kA)

K：箱體係數(開放式取-0.153，密閉式取-0.097)

I_{bf} ：短路電流(kA)

V：系統額定電壓(kV)

G：導體間距離(mm)

(4-1)與(4-2)式經整理後可得弧光電流 I_a 為：

$$I_a = 10^{\lg I_a} \quad (4)$$

由於弧光電流難以精準預測，因此透過大量實驗取得經驗公式以計算弧光電流，並利用弧光電流估測保護電驛動作時間，而弧光電流小幅的變動，可能對保護電驛動作時間造成很大的改變。如圖 11 低壓弧光電流誤差比較圖，IEEE 1584 比較實際量測之弧光電流與計算所得弧光電流，從菱形曲線中發現大約有 45% 至 50%的弧光計算電流比量測值高，最高誤差為 50%，而平均值為-4.2%，而保護電驛反時曲線中，電流越低跳脫時間越長，因此誤差為負值計算出的能量將會相對保守。

IEEE 1584 嘗試將計算之弧光電流降低 85%後重新比較，結果如三角形曲線所示，整體平均值左移為-18.4%，但弧光計算電流比實際量測值高的情況只剩 8.5%，而在有限的參數下欲計算弧光電流，此結果較為符合實際狀況。

因此 IEEE 1584 於 2011 年新增修訂版 IEEE 1584a，規定電壓等級 1kV 以下時，需再次計算 85%的弧光電流，並比較透過兩種弧光電流所求得的弧光能量，取較大的能量做為最後的計算結果。

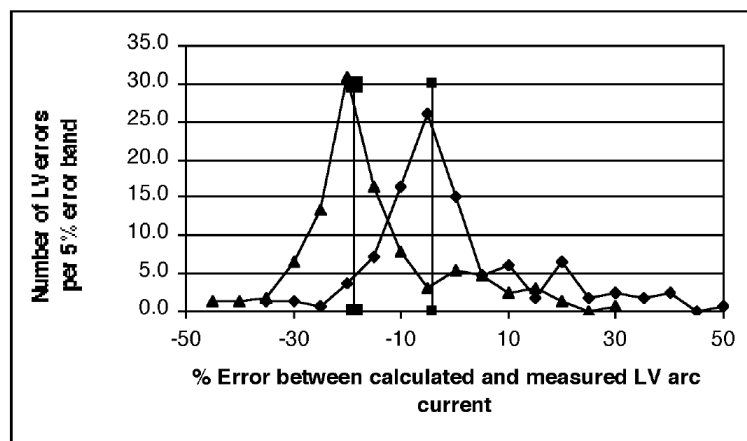


圖 11 低壓弧光電流誤差比較圖

(二) 弧光能量

IEEE 1584 依短路電流用於計算弧光能量(E_n)之公式，亦根據電壓範圍來區分，為 0.208kV~15kV 與 15kV 以上，而超過 15kV 以上，則使用 Lee Method 之公式來計算。不同電壓範圍的弧光能量公式分別如 (7)及(8)所示：

1.系統電壓：0.208kV~15kV

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1.081 \lg I_a + 0.0011G \quad (5)$$

(4-5)式整理改寫後，如(4-6)式所示：

$$E_n = 10^{\lg E_n} \quad (6)$$

弧光能量(E)如(4-7)式所示：

$$E = C_f E_n \left(\frac{t}{0.2}\right) \left(\frac{610^x}{D^2}\right) \quad (7)$$

2.系統電壓：15kV 以上

$$E = 5.12 \times 10^5 V I_{bf} \left(\frac{t}{D^2}\right) \quad (8)$$

其中

lg : log10

E_n : 在弧光持續 0.2 秒，工作距離 610mm 條件下之弧光能量(J/cm²)

E : 弧光能量(Incident Energy)(cal/cm²)

C_f : 電壓係數(電壓大於 1kV 取 1，電壓小於 1kV 取 1.5)

D : 弧光故障點到人接觸面的距離(mm)

x : 導體間距離係數

t : 弧光電流持續時間(sec)

K_1 : 箱型係數(開放式取-0.792，密閉式取-0.555)

K_2 : 接地系統係數(接地系統為-0.113，非接地及高阻抗接地系統為 0)

二、NFPA 70E

(一)系統電壓 600V 以下

NFPA 70E 在 600V 以下時，依短路電流用於計算弧光能量之公式，可分成兩類：在開放式無箱體設備的最大弧光能量(E_{MA})，及 20 in 箱體最大弧光能量(E_{MB})，如開關箱、馬達控制中心或其它的電氣設備。

1.開放式無箱體設備的最大弧光能量(E_{MA})

開放式無箱體設備的最大弧光能量(E_{MA})如(4-9)式所示，其中弧光故障點到人接觸面的距離 D_A 範圍在 18 in.或以上；短路電流(F)範圍從 16kA 到 50kA。

$$E_{MA} = 5271D_A^{-1.9593}t_A[0.0016F^2 - 0.0076F + 0.8938] \quad (9)$$

其中

E_{MA} ：最大開放式無箱體設備弧光能量(cal/cm²)

D_A ：弧光故障點到人接觸面的距離(in.)

t_A ：弧光電流持續時間(sec)

F ：短路電流(kA)

2. 20 in 箱體最大弧光能量(E_{MB})，單面開放式

$$E_{MB} = 1038.7D_A^{-1.4738}t_A[0.0093F^2 - 0.3453F + 5.9675] \quad (10)$$

(二)系統電壓 600V 以上，主要應用於開放式無箱體設備

$$E = \frac{793 \times F \times V \times t_A}{D^2} \quad (11)$$

其中

E ：弧光能量(cal/cm²)

D ：弧光故障點到人接觸面的距離(in.)

F ：短路電流(kA)

V ：相對相電壓(kV)

t_A ：弧光電流持續時間(sec.)

第三節 危險等級與個人防護具之選用

透過電弧閃光分析之公式計算，將可得到電弧閃光發生時之弧光能量，2012年版 NFPA 70E 將弧光能量分成四種危險等級，不同的危險等級須配合不同的個人防護具，危險等級 1 幾乎沒有危險，危險等級 4 是四個危險等級中最高者。隨著危險等級的增加，所需之個人防護具也越多，厚重的防護具將造成移動與操作上的不便，因此個人防護具並非等級越高越佳，選擇適當等級的防護才能最有效的保護工作人員的安全。

根據 IEEE 1584 與 NFPA 70E 不同之規範，有兩種方法能決定危險等級，IEEE 1584 為應用弧光分析之公式，對應不同的危險等級，NFPA 70E 則為查表的方法，並依據危險等級決定個人防護具，如圖 12 弧光能量等級決定與個人防護具選用流程圖，2010 年版 NFPA 70E 規定個人防護具之防護材質為防焰等級 (Flame-resistant, FR)，2012 年版則已修定為弧光等級 (Arc-rated, AR)。

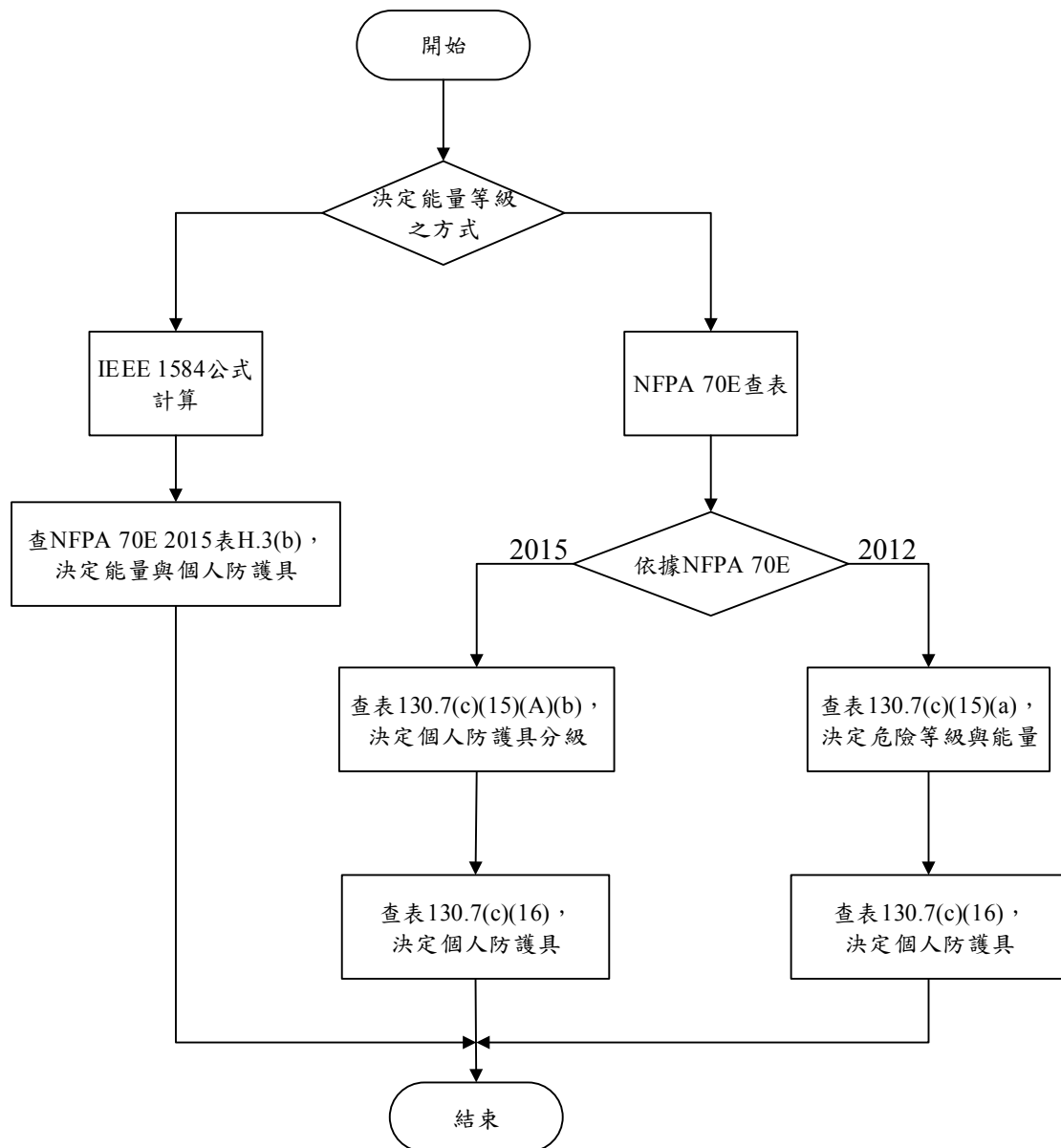


圖 12 弧光能量等級決定與個人防護具選用流程圖

一、 IEEE 1584

透過 IEEE 1584 公式計算可得弧光能量，IEEE 1584 將弧光能量以 $1.2\text{cal}/\text{cm}^2$ 及 $12\text{cal}/\text{cm}^2$ 為基準，簡單分為 3 個能量等級，在個人防護具的選擇上，只需依據計算所得之及弧光能量，選用足夠承受該能量之個人防護具即可，如表 5 弧光危險等級與個人防護具選用。

表 5 弧光危險等級與個人防護具選用

弧光能量	防護衣物	其他個人防護具
小於 1.2 cal/cm ²	不會融化(符合 ASTM F 1506)或未經處理之天然纖維的長袖上衣與長褲或衣褲相連工作服(coverall)	防護射出物之面罩(視情況穿戴) 安全眼鏡或安全護目鏡 聽力保護(耳塞) 厚(heavy-duty)皮革手套或橡膠絕緣手套與皮革保護套(視情況穿戴)
介於 1.2 到 12 cal/cm ²	AR 等級長袖上衣與長褲或 AR 等級衣褲相連工作服或電弧閃光套裝(arc flash suit) AR 等級套裝頭罩或 AR 等級面罩與 AR 等級大絨帽(balaclava) AR 等級夾克、風雪大衣(parka)、雨衣、硬殼帽內襯(視情況穿戴)	硬殼帽 安全眼鏡或安全護目鏡 聽力保護(耳塞) 厚(heavy-duty)皮革手套或橡膠絕緣手套與皮革保護套 皮革工作鞋
大於 12 cal/cm ²	AR 等級長袖上衣與長褲或 AR 等級衣褲相連工作服(coverall)及/或電弧閃光套裝(arc flash suit) AR 等級套裝頭罩 AR 等級夾克、風雪大衣、雨衣、硬殼帽內襯(視情況穿戴)	硬殼帽 安全眼鏡或安全護目鏡 聽力保護(耳塞) AR 等級手套或橡膠絕緣手套與皮革保護套 皮革工作靴

二、 NFPA 70E

NFPA 70E 2015 表 130.7(C)(15)(A)(b)根據不同電壓等級、短路電流及電弧燃燒時間等參數，訂定查詢表格，若所有參數都符合規定與條件，可直接選用該防護等級與弧光保護邊界，透過該表取得個人防護具等級後，參考 NAPA 70E 2015 表 130.7(C)(16)選用對應之個人防護具，如表 6 個人防護具。

然而台灣保護設備與系統條件與美國不盡相同，在查表的使用上較不適用，且查表所得之弧光等級過於保守，較不建議使用，常見方法仍為透過能量分析方式取得弧光能量及選用個人防護具。

表 6 個人防護具

個人防護具分級	AR 等級衣物	其他個人防護具
1 最小弧光額定能量 4 cal/cm ²	AR 等級長袖上衣與長褲或 AR 等級衣褲相連工作服 (coverall) AR 等級面罩或 AR 等級套 裝頭罩 AR 等級夾克、風雪大衣 (parka)、雨衣、硬殼帽內襯 (視情況穿戴)	硬殼帽 安全眼鏡或安全護目鏡 聽力保護(耳塞) 厚(heavy-duty)皮革手套 皮革工作鞋(視情況穿戴)
2 最小弧光額定能量 8 cal/cm ²	AR 等級長袖上衣與長褲或 AR 等級衣褲相連工作服 AR 等級套裝頭罩或 AR 等 級面罩與 AR 等級大絨帽 (balaclava) AR 等級夾克、風雪大衣、雨 衣、硬殼帽內襯(視情況穿戴)	硬殼帽 安全眼鏡或安全護目鏡 聽力保護(耳塞) 厚皮革手套 皮革工作鞋
3 最小弧光額定能量 25 cal/cm ²	AR 等級長袖上衣 AR 等級長褲 AR 等級衣褲相連工作服 AR 等級套裝夾克 AR 等級套裝長褲 AR 等級套裝頭罩 AR 等級手套 AR 等級夾克、風雪大衣、雨 衣、硬殼帽內襯(視情況穿戴)	硬殼帽 安全眼鏡或安全護目鏡 聽力保護(耳塞) 皮革工作鞋
4 最小弧光額定能量 40 cal/cm ²	AR 等級長袖上衣 AR 等級長褲 AR 等級衣褲相連工作服 AR 等級套裝夾克 AR 等級套裝長褲 AR 等級套裝頭罩 AR 等級手套 AR 等級夾克、風雪大衣、雨 衣、硬殼帽內襯(視情況穿戴)	硬殼帽 安全眼鏡或安全護目鏡 聽力保護(耳塞) 皮革工作鞋

三、個人防護具選用之簡化

當整個電力設備過於龐大、系統過於複雜的情況下，可能需要不同等級的個人防護具，在面對這種情形下，70E 附錄 H 將個人防護具的分級做適當的簡化成為兩個等級，如表 7 個人防護具選用之簡化。

表 7 個人防護具選用之簡化

適用之弧光危險等級	防護衣物 ¹
適用弧光危險等級 1 及等級 2	每日工作服 AR 等級長袖上衣與長褲(最低 8 cal/cm ²) 或 AR 等級衣褲相連工作服(最低 8 cal/cm ²)
適用弧光危險等級 3 及等級 4	電弧閃光套裝(arc flash suits) 整套衣物防護系統包括: AR 等級長袖上衣與長褲，及/或 AR 等級衣褲相連工作服，及/或 AR 等級外套(coat)與長褲 (衣服防護系統最低 40 cal/cm ²)

註 1：標示於表 6 之其他個人防護具，包含 AR 等級面罩、AR 等級套裝頭罩、AR 等級硬殼帽內襯、安全眼鏡或安全護目鏡、硬殼帽、聽力保護、厚皮革手套、橡膠絕緣手套與皮革保護套等可能被要求穿戴。

第四節 弧光危險距離之決定

為了保持用電安全，工作人員應盡量避免活電作業，但當活電作業不可避免時，於接近活電設備的邊界地區工作，需遵守弧光危險距離之規定。

一、弧光危險距離之介紹

NFPA 70E 規定的危險距離標示如圖 13 電弧閃光接近邊界圖所示，由中心點開始，分別為活電區、限制區(Restricted space)、限制接近邊界(Restricted approach boundary)、管制區(Limited space)、管制接近邊界(Limited approach boundary)與弧光保護邊界(Arc flash boundary)。

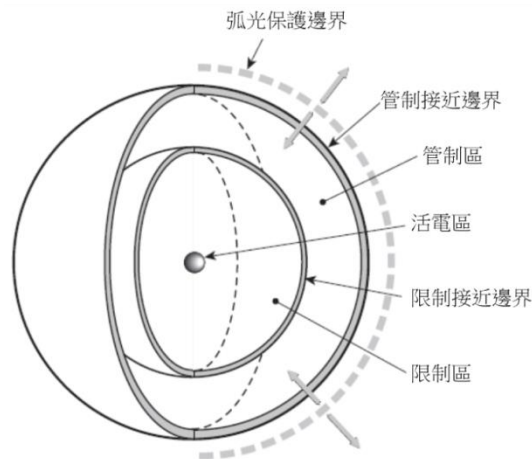


圖 13 電弧閃光接近邊界圖

(一) 弧光保護邊界

定義為弧光能量等於 1.2 cal/cm^2 (5J/cm^2)時，人員與弧光發生處的距離。

(二) 管制接近邊界

僅受訓合格人員，方可接近可能暴露活電設備部分的邊界地區，未具資格人員除非有合格人員陪同，否則不可進入。

(三) 限制接近邊界

唯有合格人員並需具有適當的電擊防護及個人防護設備，才可進入可能接觸到暴露活電部分的邊界地區。

表 8 接近邊界距離表

系統電壓	管制接近邊界		限制接近邊界
	外露的可移動導體	外露的固定線路部分	
0~50V	無明確規定	無明確規定	無明確規定
50~150V	3.0 m (10 ft 0 in.)	1.0 m (3 ft 6 in.)	避免接近
151~750	3.0 m (10 ft 0 in.)	1.00 m (3 ft 6 in.)	0.3 m (1 ft 0 in.)
751~15kV	3.0 m (10 ft 0 in.)	1.5 m (5 ft 0 in.)	0.7 m (2 ft 2 in.)
15.1~36kV	3.0 m (10 ft 0 in.)	1.8 m (6 ft 0 in.)	0.8 m (2 ft 7 in.)
36.1~46kV	3.0 m (10 ft 0 in.)	2.5 m (8 ft 0 in.)	0.8 m (2 ft 9 in.)
46.1~72.5kV	3.0 m (10 ft 0 in.)	2.5 m (8 ft 0 in.)	1.0 m (3 ft 3 in.)
72.6~121kV	3.3 m (10 ft 8 in.)	2.5 m (8 ft 0 in.)	1.0 m (3 ft 4 in.)
138~145kV	3.4 m (11 ft 0 in.)	3.0 m (10 ft 0 in.)	1.2 m (3 ft 10 in.)
161~169kV	3.6 m (10 ft 0 in.)	3.6 m (8 ft 0 in.)	1.3 m (3 ft 3 in.)
230~242kV	4.0 m (10 ft 8 in.)	4.0 m (8 ft 0 in.)	1.7 m (3 ft 4 in.)
345~362kV	4.7 m (11 ft 0 in.)	4.7 m (10 ft 0 in.)	2.8 m (3 ft 10 in.)
500~550kV	5.8 m (10 ft 8 in.)	5.8 m (8 ft 0 in.)	3.6 m (3 ft 4 in.)
765~800kV	7.2 m (11 ft 0 in.)	7.2 m (10 ft 0 in.)	4.9 m (3 ft 10 in.)

二、 弧光保護邊界之計算

利用弧光保護邊界之定義，弧光能量等於 1.2 cal/cm^2 (5J/cm^2)時，人員與弧光發生處的距離。因此不論是 IEEE 1584 或 NFPA 70E 皆可利用公式的反推，將 $E=1.2(\text{cal/cm}^2)$ 代入弧光能量分析的計算公式，此時得到的弧光危險距離即為弧光保護邊界。

(一)IEEE 1584

電壓範圍在 $0.208\text{kV}\sim 15\text{kV}$ 時，弧光危險距離可由(7)式反推，如(11)式所示：

$$D = 610[C_f(\frac{E_n}{1.2})(\frac{t}{0.2})]^{\frac{1}{x}} \quad (11)$$

電壓 15kV 以上時，弧光危險距離可由(8)式反推，如(12)式所示：

$$D = \sqrt{5.12 \times 10^5 V I_{bf}(\frac{t}{1.2})} \quad (12)$$

(二)NFPA 70E

系統電壓 600V 以下，開放式無箱體設備之弧光危險距離可由(9)式反推，如(13)式所示：

$$D_A = \left\{ \frac{1.2}{5271t_A[0.0016F^2 - 0.0076F + 0.8938]} \right\}^{-1.9593} \quad (13)$$

20 in. 箱體之弧光危險距離可由(10)式反推，如(14)式所示：

$$D_A = \left\{ \frac{1.2}{1038.7t_A[0.0093F^2 - 0.03453F + 5.9675]} \right\}^{-1.4738} \quad (14)$$

系統電壓 600V 以上，開放式無箱體設備之弧光危險距離可由(11)式反推，如(15)式所示：

$$D = \frac{793 \times F \times V \times t_A}{1.2^2} \quad (15)$$

第五節 電弧閃光危險警告標示

NFPA 70E 2012 內詳細規範弧光危險警告標示內應包含下列三點：

- 一、 該設備之電壓等級
- 二、 禁止接近邊界、限制接近邊界、管制接近邊界及弧光保護邊界
- 三、 至少應包含下列一項：
 - (一) 弧光能量
 - (二) 防護衣物最少應承受之能量
 - (三) 個人防護具等級(Hazard/Risk Category and PPE Level)

新版 NFPA 70E 2015 中，將禁止接近邊界移除，危險警告標籤不須註明此項，此外計算所得之弧光能量不得與查表所得之個人防護具等級同時存在，新舊版之弧光警告標籤分別如圖 14 及圖 15 所示。

在這些標示中，工作人員可以清楚的獲得工作現場設備的弧光危險資訊，NFPA 70E 規定的弧光保護邊界、管制接近邊界、限制接近邊界與危險等級等資訊，為了就是提醒工作人員在作業時能保持適當的安全距離並根據弧光警告標示穿著適當的個人防護具，如此一來便可降低電弧閃光事故造的危害，減少生命與財產損失。

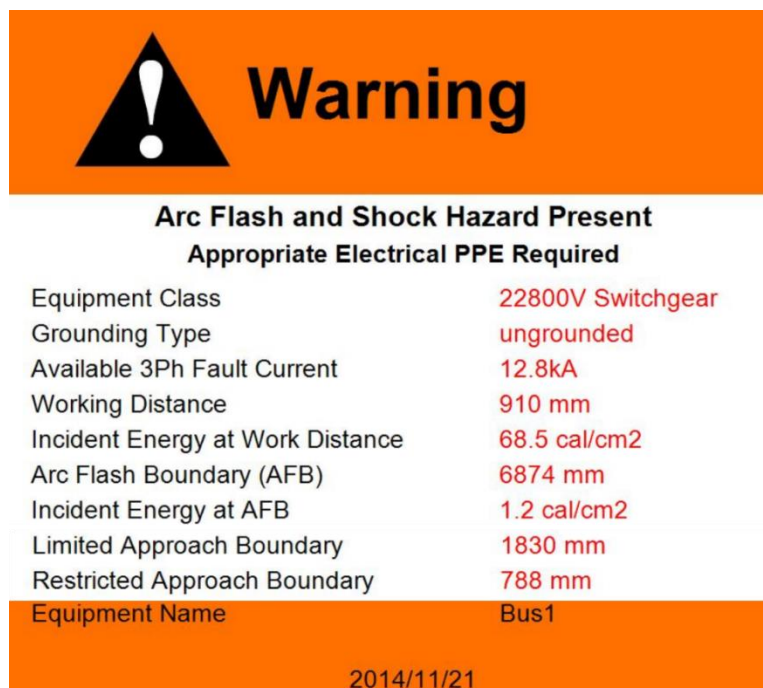


圖 14 NFPA 70E 2015 弧光危險警告標示圖


	
WARNING	
Arc Flash and Shock Hazard	
Appropriate PPE Required	
53 inch	Flash Hazard Boundary
7.1	cal/cm ² Flash Hazard at 18 inches
Category 2	Cotton Underwear + FR Shirt & Pants + Hood
480 VAC	Shock Hazard when cover is removed
00	Glove Class
42 inch	Limited Approach (Fixed Circuit)
12 inch	Restricted Approach
1 inch	Prohibited Approach
03/15/2007	Arc Flash Study Date *IEEE 1584-2004a
Bus: PANEL 4V26-2AR3	
Prot: 4-FDR 4V26-2AR3	
Study Performed By Power Studies .com (253) 639-8535	

圖 15 NFPA 70E 2012 弧光危險警告標示圖

第六章 訪視事業單位防止電弧閃光危害現況

本計畫實際訪視國內 6 家事業單位，了解其對於弧光危害之認知程度，並依據各廠家之配電盤是否完成電弧閃光評估，將其分成兩類，廠家 A 與廠家 B 已完成電弧閃光評估，而廠家 C、D、E、F 則未完成，本文將針對這六事業單位，根據訪視結果作比較。

第一節 已完成電弧閃光評估

此計畫訪視檢討之國內事業單位中，有 2 廠家已具有弧光分析，並備有個人防護具，然而根據不同的計算方式，其弧光邊界以及個人防護具嚴謹程度也不同。

一、廠家 A 之訪視檢討

廠家 A 早於民國 96 年即做過電弧閃光分析，在配電箱上貼有 NFPA 70E 規範之警告標籤，並依據不同電壓等級穿著對應之個人防護具，圖 16 為實際訪視之配電箱全景。



圖 16 廠家 A 之配電盤全景

(一) 弧光分析

該廠家之危險警告標籤雖具有禁止接近邊界、限制接近邊界、管制接近邊界與弧光保護邊界等標示，但其限制邊界並非如 NFPA 70E 所示，利用電壓等級進行查表，該廠家限制接近邊界一律為盤面內 10 公分、禁止接近邊界為盤面內 20 公分，而弧光保護邊界則為盤面外 6 公尺，如圖 17 所示。因此，該廠家之弧光分析非採用 NFPA 70E 之標準，可能為電機技師根據經驗設計而得，但其在配電箱上貼有該警告標籤，對於人員仍具有一定的警示效用，進而降低意外的發生。



圖 17 廠家 A 弧光危險警告標示圖

(二) 個人防護具

個人防護具上，廠家 A 嚴格規定，不論來賓或主管等所有人員在進入電氣室時，皆須配戴護目鏡、安全帽以及長袖衣物才可進入。在進行維修時，皆需要依公司規定穿著全套之防護具，如圖 18。



圖 18 廠家 A 全套之防護具

其個人防護具包含:

1. 全罩頭盔, 頭盔本身可防 50 cal 之能量, 且頭盔內需加裝硬殼安全帽, 如圖 19。



(a) 硬殼安全帽

(b) 可防 50 cal/cm² 之能量標示

圖 19 廠家 A 使用之全罩頭盔

2. 弧光保護大衣, 大衣可承受之弧光能量為 34.4 cal/cm², 如圖 20。



(a) 全圖

(b) 可防 34.4 cal/cm² 之能量標示

圖 20 廠家 A 使用之弧光保護大衣

3. 絕緣手套, 手套分成一般操作手套及正式絕緣手套兩種, 如圖 21, 一般操作手套無法取代正式絕緣手套, 因此在電弧能量較高之工作場合, 視情況同時使用兩種手套, 如圖 22。



(a) 一般操作皮手套



(b) 絕緣手套

圖 21 廠家 A 使用之絕緣手套



圖 22 廠家 A 使用之雙層手套

4. 足部保護，包含綁腿及絕緣工作靴，如圖 23，在穿上大衣及工作靴後，仍可能因為大衣長度不足，使得腿部裸露，則需將綁腿繫於裸露處確保全身皆被防護具覆蓋。



(a) 綁腿



(b) 絕緣工作靴

圖 23 廠家 A 使用之足部保護

除了具備個人防護具，廠家 A 也定期做防護具的檢查，以確保其保護品質不因時間及使用而降低，如圖 24。



(a) 絕緣手套



(b) 絕緣工作靴

圖 24 廠家 A 使用之絕緣手套及絕緣工作靴檢查標籤

(三)其他安全措施

廠家 A 對於電器人員的安全格外重視，除了進行電弧閃光分析及個人防護具等保護外，針對人員觸電以及因人員溝通不足而造成意外之情況，也特別訂定預防措施。

1. 遠端操作開關，電弧閃光之意外事故常常發生在維修之後，因在維

修過程中人員可能不小心造成短路、工具遺留配電盤內等情況發生卻不自知，待維修完成進行送電時，則發生弧光意外對人員造成傷害，但廠家 A 將送電開關遠離配電盤，因此不論是電弧閃光發生時的斷電處理，或是維修後的復送電，人員都能安全地進行遠端操作，如圖 25。



圖 25 廠家 A 使用之遠端操作開關

2.斷路器安全鎖，為了防止維修人員進行維修時，不知情的操作人員將開關投入，造成人員觸電的情況發生，廠家 A 在斷路器皆設有安全鎖及警告標示，維修人員進行維修時，需先將安全鎖鎖上，則斷路器將無法進行 ON，待維修完成再將安全鎖取下，如圖 26。



(a) 配電箱

(b) 遠端操作開關

圖 26 廠家 A 使用之斷路器安全鎖

二、 廠家 B 之訪視檢討

本次訪視之廠家 B 對於人員的安全十分重視，自 1995 年來多次獲得勞委會頒發自護制度優良單位，公司主管也曾多次應勞委會邀請，向其他事業單位講授人員安全及設備改善等相關議題，並在 2010 年聘請國外專業顧問，對廠區內所有配電箱進行電弧閃光分析，並購入個人防護具，廠內電氣室如圖 27 所示。



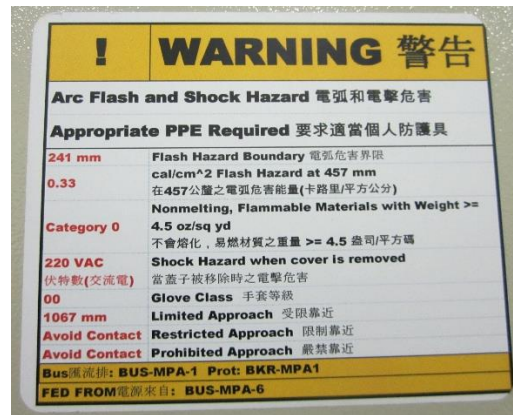
圖 27 廠家 B 之電氣室全景圖

(一) 弧光分析

該廠家針對廠內所有配電箱進行電弧閃絡分析，包含電壓等級 22.8kV、380V、220V、190V 以及 110V，而警告標籤內容依據 NFPA 70E 規定項目，具有能量危險等級、弧光危害邊界、接近邊界距離表等標示，如圖 28，其中接近邊界距離根據



(a) 110V



(b) 220V

圖 28 廠家 B 使用之弧光警示標籤



圖 29 廠家 B 使用之限制邊界距離

(二) 個人防護具

該廠家之弧光危害分析結果雖具有 0 到 4 各等級，但公司嚴禁活電時進行維修，大大降低人員遭受電弧閃光意外發生機率，因此該廠家只備有危險等級 2 之個人防護具。

1. 全罩頭盔，該頭盔本身可抵抗 8 cal/cm^2 ，此外，內部並裝有硬殼安全帽，如圖 30。



圖 30 廠家 B 使用之全罩頭盔

2. 防弧長袖上衣，依據 NFPA 70E 規定，危險等級 2 之衣著最低應能承受 8 cal/cm^2 ，如圖 31。



圖 31 廠家 B 使用之危險等級 2 之長袖上衣

3. 防弧吊帶褲，該廠家之腿部保護選用能承受 12 cal/cm^2 之吊帶褲，如圖 32。



(a) 全圖

(b) 可防 12 cal/cm^2 之能量標示

圖 32 廠家 B 使用之防弧吊帶褲

4. 絕緣手套，可分成橡膠絕緣手套及皮革手套兩種，如圖 33，穿戴時須將皮革手套置於橡膠絕緣手套外。



(a) 橡膠絕緣手套

(b) 皮革手套

圖 33 廠家 B 使用之橡膠絕緣手套及皮革手套

5. 安全鞋，該廠家選用之安全鞋可承受 20kV，由美國製造，Salisbury 公司代理，如圖 34。



圖 34 廠家 B 使用之安全鞋

6. 防觸電掛勾，為了避免人員觸電後無法自行脫離觸電物體，廠家 B 另備有防觸電掛勾，可藉由絕緣掛勾將人員拉離電源，如圖 35。



圖 35 廠家 B 使用之防觸電掛勾

(三) 其他安全措施

除了弧光警告標籤及個人防護具外，廠家 B 為了防止非電氣人員誤觸配電箱及防止人員發生其他意外，明訂許多相關規範。

- 1.安全訓練，廠家 B 定時的作業人員安全觀念的培訓，員工每年皆需要上指定的安全課程，才能避免考績不佳。此外，對於外賓的來訪第一件事為告知逃生路線，避免意外發生時驚慌不知所措，而廠區內也需配合配戴安全帽及穿著安全鞋。
- 2.不活電作業，當設備需要進行維修保養時，一定先將上游電源切離才進行維修動作，而當活電作業進行紅外線量測時，只有穿著個人保護設備人員才可進入限制保護邊界，進行配電箱的操作。
- 3.配電箱上鎖，為了避免人員在任何情況下自行接觸配電箱，造成意外事故，廠家 B 將所有配電箱上鎖，並將鑰匙統一管理，至於固定鑰匙盒，如圖 36。



圖 36 廠家 B 使用之鑰匙管理盒

4.配電箱多層保護，所有配電箱除了需上鎖管理外，將配電箱外蓋打開後，還要有第二層的隔離保護，避免帶電端子外露與人體接觸，如圖 37。



(a) 內層金屬蓋板



(b) 內層壓克力板

圖 37 廠家 B 使用之配電箱內部不同保護方式

第二節 未完成電弧閃光評估

此計畫訪視檢討之國內事業單位中，共四間廠家並未進行弧光分析，也並無弧光等級之個人防護具，然而這些廠家雖皆不具有弧光分析，但其對於弧光危害之認識程度卻不同。

一、廠家 C 之訪視檢討

此次訪視之廠家 C 雖未進行電弧閃光評估，但該廠家仍備有能量等級 2、3 之個人防護具，但因公司進行設備維修及維護時，皆須斷電方能進行操作，因此個人防護具較少使用，圖 38 為廠區配電箱整體圖。



圖 38 廠家 C 之配電箱外觀圖

(一)個人防護具

該廠家所具備之個人防護具，可承受弧光能量 31 cal/cm^2 ，相當於弧光能量等級 3 之保護，而廠家直接向代理商購買整套個人防護具。

- 1.防弧上衣，該廠家所購買之上衣可承受弧光能量 31 cal/cm^2 ，如圖 39。



圖 39 廠家 C 使用之防電弧上衣

2.防電弧吊帶褲，吊帶褲可承受弧光能量 31 cal/cm^2 ，但廠家購買之吊帶褲過長，如圖 40，在操作上可能造成移動的困難或不小勾到物品造成短路。



圖 40 廠家 C 使用之防電弧吊帶褲

3.安全頭罩，頭部保護為全罩式的安全頭罩，頭罩長度達到肩膀，可完全的將作業人員完全包覆，如圖 41。



(a) 正面照

(b) 可防止 31 cal/cm²之能量標示

圖 41 廠家 C 使用之安全頭罩

4.安全眼鏡及安全帽，安全眼鏡為一般市售之護目鏡，安全帽為 class E 之硬殼安全帽，如圖 42。



圖 42 硬殼安全帽

5.絕緣手套，手套分成耐 1kV 電壓之橡膠手套及羊皮手套兩種，使用時將羊皮手套置於外面，如圖 43。



圖 43 廠家 C 使用之絕緣手套

6.絕緣橡膠工具，用來控制配電盤之閘刀開關，並可承受 4.16kV 電壓，
如圖 44。



圖 44 廠家 C 使用之絕緣橡膠工具

(二)警告標籤

該廠區配電箱上貼有不同警告標示，通知人員配電箱為高壓電、醒目之紅色噴漆，如圖 45。



圖 45 廠家 C 配電盤上使用之各種警告標籤

(三)其他安全措施

- 1.分散式控制系統，該廠家採用分散式控制系統(Distributed Control System, DSC)，將所有配電箱之開關集中由中央控制，降低配電箱意外發生時人員接觸危險，如圖 46。
- 2.停電作業卡，維修中之配電箱皆須繫上停電作業卡，告知非維修人員勿進行開關操作，以免發生意外，如圖 47。



圖 46 廠家 C 使用之分散式控制系統



圖 47 廠家 C 使用之停電作業卡

二、 廠家 D 之訪視檢討

此計畫參訪之廠家 D 整個廠區以及設備十分乾淨新穎，應建廠時間不久，該廠家雖不具有弧光分析及個人防護具，但其額外裝設弧光偵測電驛，能有效預防弧光的發生，圖 48 為整體配電箱圖。



圖 48 廠家 D 之配電盤外觀圖

(一) 警告標籤

廠家 D 雖無符合 NFPA 70E 之弧光警告標籤，但仍有其他防止人員觸電及靠近之警告標籤，如圖 49 及圖 50。



圖 49 廠家 D 配電盤上使用之危險警示圖



圖 50 廠家 D 使用之警告標示

(二) 電弧閃光保護電驛

廠家 D 在配電箱上皆裝設電弧閃光保護電驛，該廠家裝設之電驛型號為 VMAP 120[20]，如圖 51，該電驛是一個「獨立」的系統，並可搭配光感測器，利用弧光發生時產生的光進行偵測，如圖 52，因此在弧光意外發生時，光感測器能夠快速地偵測並跳脫斷路器，有效的降低弧光燃燒時間並將傷害降到最低。

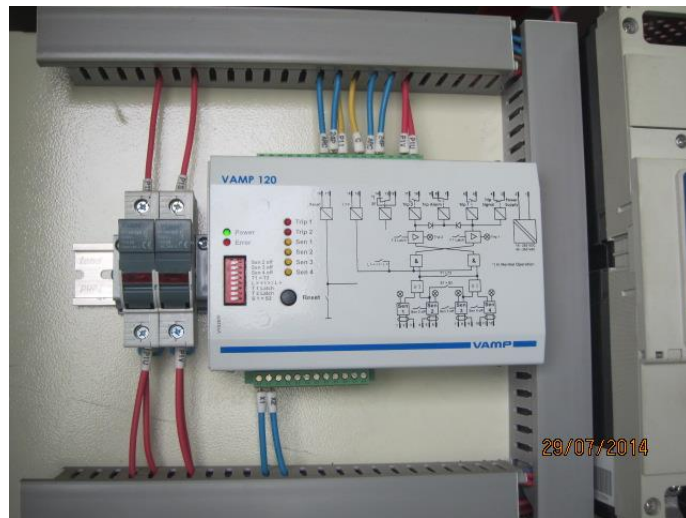


圖 51 廠家 D 配電盤內使用之電弧閃光保護電驛



圖 52 廠家 D 配電盤內使用之弧光感測器

三、 廠家 E 之訪視檢討

因廠家 E 之廠區常有起重機進行搬運操作，因此當外賓進入廠家 E 時，皆

須穿著具有亮麗顏色之警示衣，而進入廠家 E 之電氣室時，須配戴護目鏡及安全帽，防止上方物品掉落，保護人員安全，圖為電氣室全景圖 53。



圖 53 廠家 E 之電氣室全景圖

(一)配電箱

此次參訪該廠家主要觀察到 11.4kV 及 220V 兩種電壓等級之配電箱，如下所示：

1. 電壓等級 11.4kV 配電箱

配電箱整體乾淨，器具配置整齊，由於電壓等級較高之原因，配電盤至於箱體內部，維修時須先將其拖出方可進行操作，如圖 54 所示。



(a) 外觀

(b) 內視圖

圖 54 廠家 E 11.4kV 等級配電箱

2. 電壓等級 220V 配電箱

220V 配電箱與 11.4kV 配電箱最大相異點為器具裸露，打開配電箱門即可看見斷路器、電磁接觸器等器具，此次訪視之 220V 配電箱為自動功因調整器，如圖 55。



圖 55 廠家 E 220V 等級配電箱

(二) 警告標籤

該廠家具有符合 NEC 規範告知人員電弧閃光危險之警告標籤，如圖 56，並含有其他如禁止人員接觸以免感電等標籤，如圖 57。



圖 56 廠家 E 配電盤使用之符合 NEC 規範之警告標籤



(a) 禁止接觸警示圖



(b) 電擊危險警示圖

圖 57 廠家 E 使用之警告標籤

(三) 電弧閃光保護電驛

廠家 E 在配電箱上也裝有電弧閃光保護電驛，其型號與廠家 D 同為 VAMP 120，但廠家 E 之電弧偵測裝置除了光感測器外更增加了偵煙裝置，如圖 58，此保護電驛另可監測電流訊號，並判斷意外發生時是否過電流，保護電驛具有多種跳脫模式，條件嚴格者為偵測到過電流與光感測器皆須動作才跳脫，反之則任一動作及跳脫，廠家可依需求自行設定電驛之動作條件。



圖 58 廠家 E 配電盤使用之偵煙裝置

四、廠家 F 之訪視檢討

此次訪視之廠家 F 對於人員保護最為嚴謹，進入廠區前須先看過公安訓練影片，以確實了解意外發生時之處理方式，此外，進入廠區前後皆需簽名登記，

確定每位人員未因意外而尚未出來，在廠區內皆須配戴護目鏡、耳塞、長袖衣著以及安全鞋，並跟隨廠區主管腳步，走於規劃之黃線內，如圖 59。此外，該廠家對於弧光意外之嚴重性也十分了解，積極尋求專業人員進行弧光能量分析及個人防護具之選用。



圖 59 廠家 F 變電室內規劃之步道

(一) 配電箱

廠家 F 廠區面積廣大，具有多種電壓等級配電箱，此次訪視之配電箱，包含電容器、69kV、3.3kV、480V 等，如圖 60 及圖 61。



圖 60 廠家 F 之電容器配電箱



(a) 69kV (b) 3.3kV



(c) 480V

圖 61 廠家 F 使用之配電箱

1. 電壓等級 69kV 配電箱，配電箱體內、外如圖 62。



圖 62 廠家 F 使用之 69kV 等級配電箱

2. 電壓等級 3.3kV 配電箱，配電箱體內、外如圖 63。



圖 63 廠家 F 之 3.3kV 等級配電箱

3.電壓等級 480V 配電箱，配電箱電源輸入自箱體底部匯流銅排，如圖 64。



圖 64 廠家 F 之 480V 等級配電箱

(二)安全措施

- 1.斷路器安全鎖，此安全鎖功用與廠家 A 相同，在人員進行維修時皆須鎖上此安全鎖，安全鎖鎖上後將無法進行送電動作，待維修完成後方可取下，如圖 65。



圖 65 廠家 F 使用之斷路器安全鎖

2. 除去變壓器銘牌，廠家 E 曾發生變壓器銘牌掉落引起相間短路，造成弧光燃燒意外事故，如圖 66，意外發生後，便將所有變壓器銘牌移位，同時加裝保險絲加強保護。

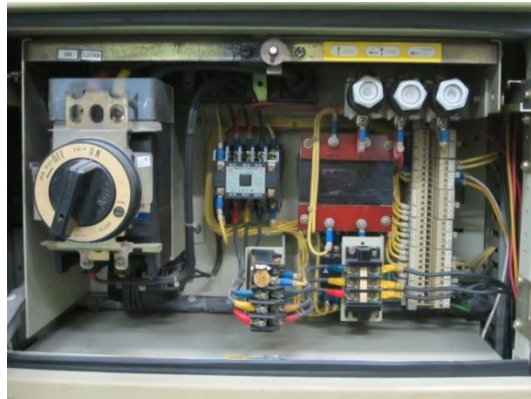


圖 66 廠家 F 曾經發生過意外事故之配電盤

第七章 配电箱(盤)电弧閃光危害計算實際範例

弧光事故對於人員與設備來說是不可忽視的威脅，在保護上，過電流保護是最傳統的使用方式，但是由於上、下游的保護設備間必須協調，而弧光事故可能延遲過電流保護設備之跳脫時間，導致弧光事故能量的增加。本章將建立 A、B、C 三個範例系統，探討在傳統保護模式下，依據其短路電流、斷路器動作時間等，計算各範例系統不同電壓等級之弧光能量，最後產生警告標籤，可貼於配電盤上以供警示用。

第一節 範例系統 A 之分析

一、系統參數

範例系統 A 係國內南部某半導體產業工廠，其供電系統包含 22.8kV、0.38kV、220V 及 110V 四個電壓等級，並針對 Bus1 至 Bus7 七個匯流排進行分析，其中包括變壓比分別為 380/110V 與 380/220V 之兩台變壓器，其二次側主要為燈力負載，其單線圖如圖 67 所示。系統元件參數如表 9 到表 12 所示，其中馬達為等效總動力負載量，考慮其參差因數不會同時滿載運轉，因此部分負載降載運轉。

表 9 範例系統 A 電力系統參數表

名稱	額定電壓(kV)	短路容量(MVA)	X/R
U1	22.8	500	25

表 10 範例系統 A 變壓器參數表

名稱	容量(kVA)	一次側(kV)	二次側(kV)	Z(%)
T1	1000	22.8	0.38	6
T2	1000	22.8	0.38	6
T3	10	0.38	0.11	2.3
T4	7.5	0.38	0.22	2.3

表 11 範例系統 A 電纜參數表

名稱	額定電壓(kV)	#/C	線徑(mm ²)	長度(m)
Cable1	30	3/C	70	3
Cable2	30	3/C	50	3
Cable3	0.6	2-3/C	240	5
Cable4	0.6	1/C	120	183
Cable5	0.6	1/C	25	18
Cable6	0.6	1/C	25	30
Cable7	0.6	1/C	95	54
Cable8	0.6	1/C	15	55
Cable9	0.6	1/C	6	54
Cable10	0.6	1/C	35	170
Cable11	0.6	2-3/C	150	21
Cable12	0.6	2-3/C	240	40
Cable13	0.6	1/C	25	26
Cable14	30	3/C	50	3

表 12 範例系統 A 馬達參數表

名稱	額定電壓(kV)	馬力(kW)	X _M %	X/R	負載量(%)
MPA-A	0.38	467	16.4	20	50
ILD	0.38	5	13.5	2	
ROPD	0.38	55	15.7	6.6	
PPD	0.38	33	15.4	5	
APD	0.38	100	16	9	80
EPPD	0.38	4	13.3	1.8	
ILE	0.38	6	13.8	2	
ACMPA-D	0.38	224	15.3	13.4	50
Mtr1	0.38	224	16.3	13.4	50
MCC-D	0.38	28	15.2	4.7	80

二、保護協調圖

本章節主要探討各電壓等級弧光能量分析與計算之範例，因此只選用單一饋線進行示範，本範例系統選用包含斷路器 GCB1、GCB2、ACB 與 NFB1 到 NFB3 之左側饋線。各匯流排發生三相短路故障時，故障電流分別為 12.8kA、12.8 kA、32.9 kA、32.3 kA、8.1 kA、2.2 kA 與 0.844kA，如圖 67 所示，然而保護電驛跳

脫時間由流經電驛之故障電流決定，其電流值將小於匯流排上之三相短路電流。當三相短路發生時，因考慮主保護設備與後衛保護設備動作協調時間相差至少 0.2 秒如表 13 所示。各保護電驛反時曲線之設定除上下協調外，同時考慮變壓器啟動時之湧入電流(inrush point)，反時特性曲線須置於湧入電流上方，以避免變壓器啟動時造成誤動作，保護電驛設定值皆直接標示於保護協調圖內，如圖 68、圖 69 與圖 70 所示。

表 13 範例系統 A 之保護設備動作協調時間表

故障點	主保護		後衛保護		協調時間(s)
	設備名稱	動作時間(s)	設備名稱	動作時間(s)	
Bus1	GCB1	0.378	無	無	
Bus2	GCB2	0.153	GCB1	0.378	0.225
Bus3	GCB2	0.375	GCB1	0.617	0.242
Bus4	ACB	0.06	GCB2	0.384	0.324
Bus5	NFB1	0.03	ACB	0.36	0.33
Bus6	NFB2	0.024	ACB	0.36	0.33
Bus7	NFB3	0.024	ACB	0.36	0.33

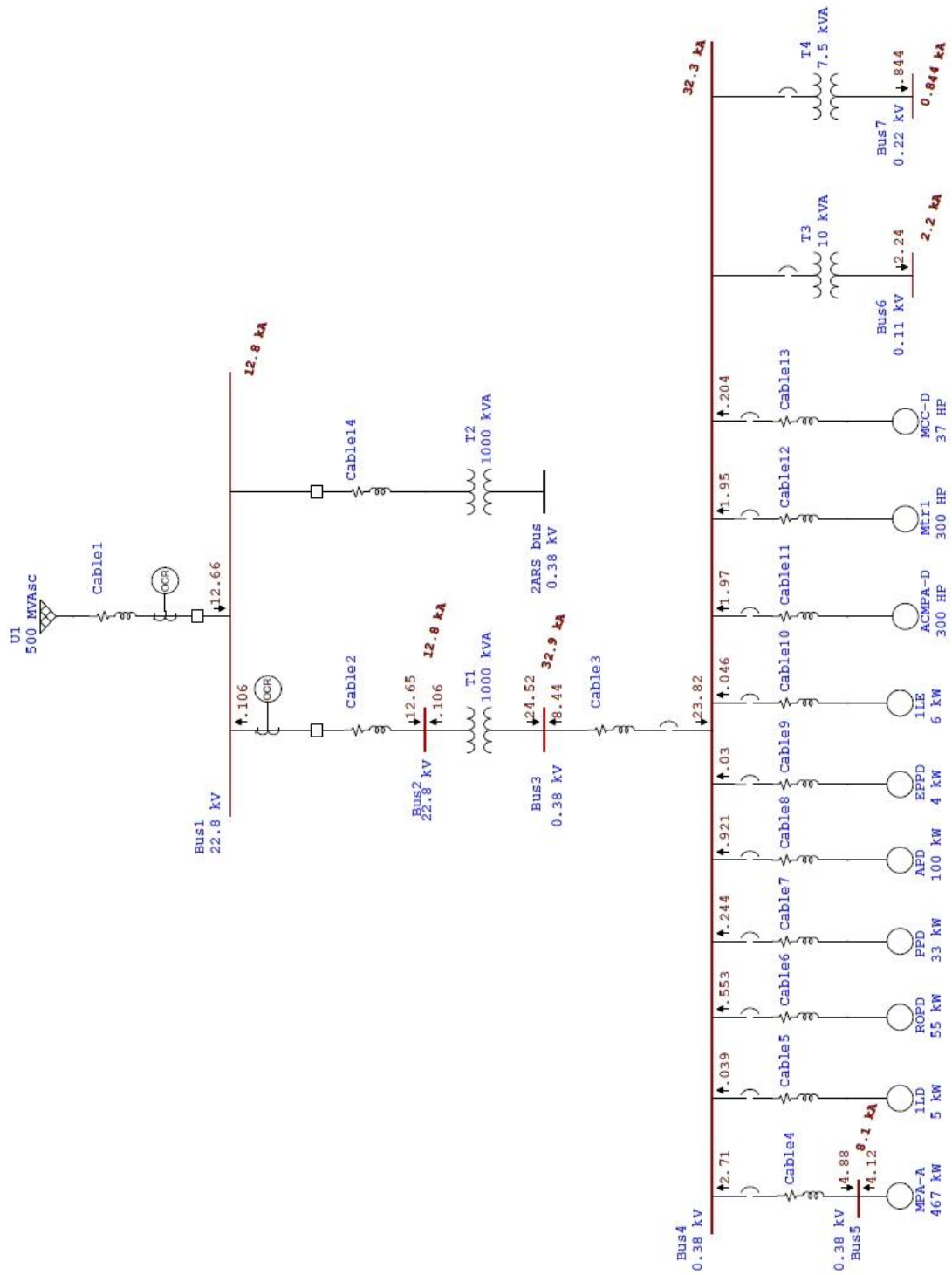


圖 67 範例系統 A 之三相短路電流圖

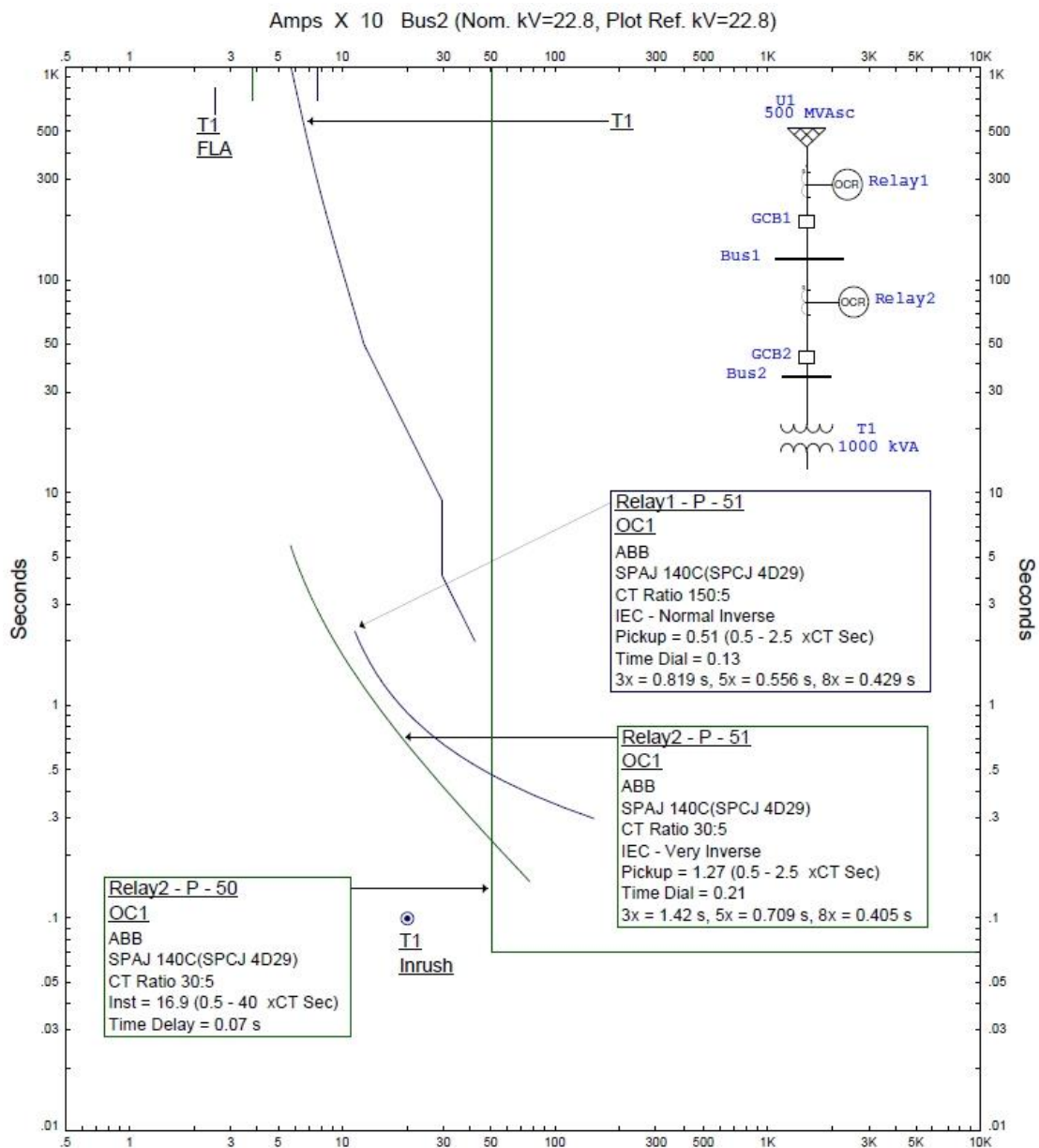


圖 68 範例系統 A 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之一

Bus1 發生故障時，流經 Relay1 之弧光電流為 12.66kA，Relay1 跳脫時間為 0.355 秒; Bus2 發生故障時，流經 Relay2 之弧光電流為 12.65kA，Relay2 為瞬時跳脫，跳脫時間為 0.13 秒。

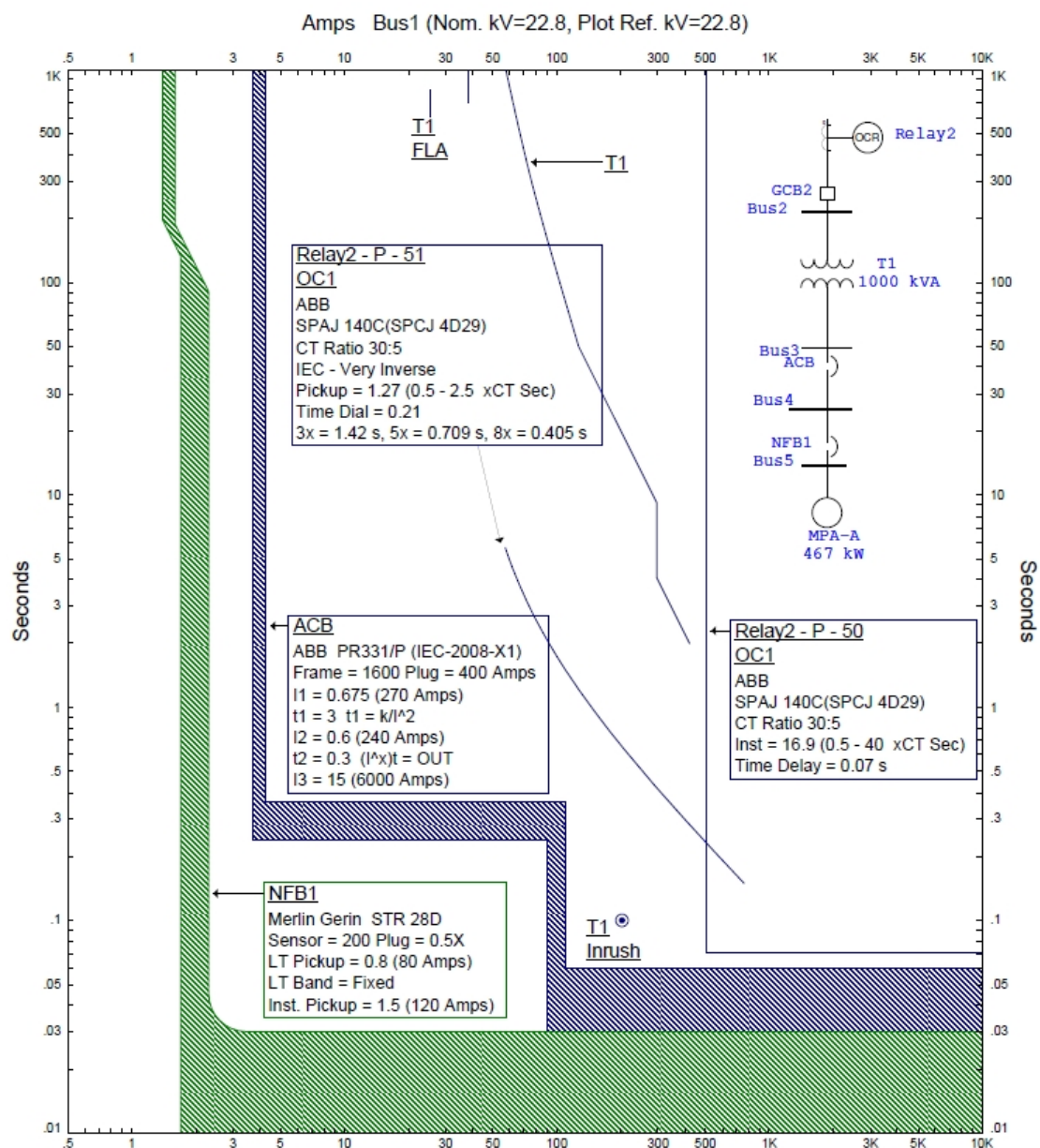


圖 69 範例系統 A 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之二

由於 Bus3 電壓等級低於 1kV，因此增加利用 85% 弧光電流做弧光燃燒時間之估算，能量計算後發現降低之弧光電流所產生之能量較大，因此 Bus3 進行分析之電流，採用為 85% 弧光電流，Bus3 發生故障時，流經 Relay2 之弧光電流為 0.181kA，Relay2 跳脫時間為 0.986 秒；Bus4 發生故障時，流經 ACB 之弧光電流為 11.28kA，經過轉換電流基底至 22.8kV 側，弧光電流為 0.188kA，ACB 跳脫時間為 0.06 秒；Bus5 發生故障時，流經 NFB1 之弧光電流為 3.18kA，轉換電流基底後，弧光電流為 0.053kA，NFB1 跳脫時間為 0.03 秒。

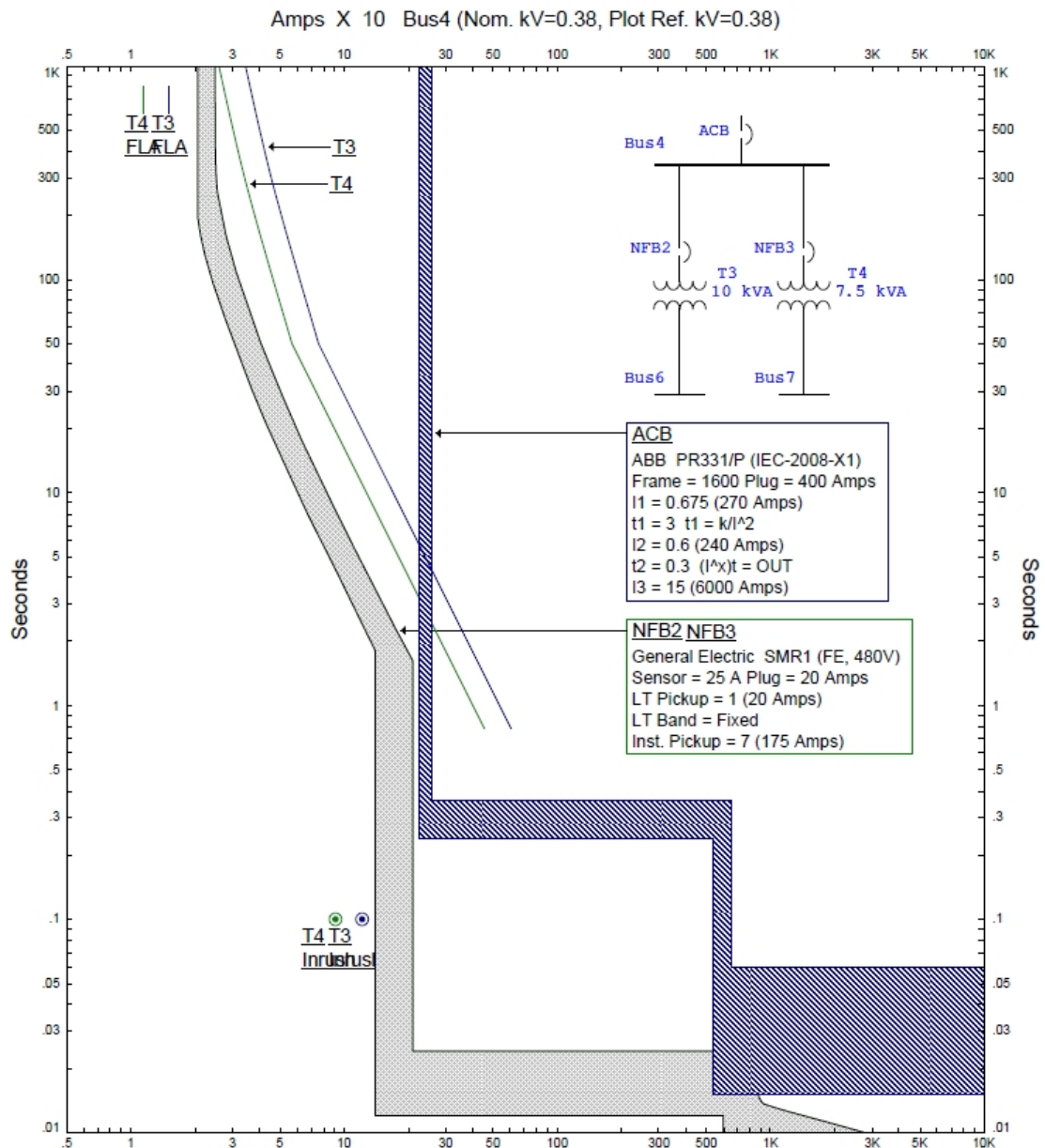


圖 70 範例系統 A 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之三

兩台小型變壓器 T3 與 T4 選用相同型號之斷路器，Bus6 發生故障時，流經 NFB2 之弧光電流為 0.408kA，NFB2 跳脫時間為 0.024 秒；Bus7 發生故障時，流經 NFB3 之弧光電流為 0.446kA，NFB3 跳脫時間同樣為 0.024 秒。

三、 弧光能量分析與計算

計算弧光能量所需各參數可參考表 2 與表 3。Bus1 為開關箱，電壓等級 22.8kV，導線間距 G 為 153mm，工作距離 D 為 910mm; Bus2 同為開關箱，電壓等級 22.8kV，各參數與 Bus1 相同; Bus3 為開關箱，電壓等級 380V，導線間距 G 為 32mm，工作距離 D 為 610mm; Bus4 與 Bus5 皆為配電盤，電壓等級 380V，導線間距 G 為 25mm，工作距離 D 為 455mm; Bus6 為配電盤，電壓等級 110V，導線間距 G 為 25mm，工作距離 D 為 455mm; Bus7 為配電盤，電壓等級 220V，導線間距 G 為 25mm，工作距離 D 為 455mm，其他參數視不同電壓等級套用 IEEE 1584 公式而有所不同，如表 14 所示。

表 14 範例系統 A 之設備參數表

匯流排	電壓 (kV)	設備類型	K	K ₁	K ₂	C _f	G (mm)	D (mm)	x
Bus1	22.8	開關箱					153	910	0.973
Bus2	22.8	開關箱					153	910	0.973
Bus3	0.38	開關箱	-0.097	-0.555	-0.113	1.5	32	610	1.473
Bus4	0.38	配電盤	-0.097	-0.555	-0.113	1.5	25	455	1.641
Bus5	0.38	配電盤	-0.097	-0.555	-0.113	1.5	25	455	1.641
Bus6	0.11	配電盤	-0.097	-0.555	-0.113	1.5	25	455	1.641
Bus7	0.22	配電盤	-0.097	-0.555	-0.113	1.5	25	455	1.641

取得設備三相短路電流、弧光燃燒時間以及計算弧光能量所需各參數後，可參照 IEEE 1584 方程式計算弧光能量，本計畫選用之分析軟體為 Arc-Flash-Analytic v5.0.6，該分析軟體參考 IEEE 1584 能量計算，使用者只須輸入必要參數，即可分析弧光能量。各匯流排上弧光能量、危險等級與弧光危險距離如表 15 與表 16 所示，其中 IEEE 1584 規範須分析電壓最低為 208V，因此 Bus6 電壓等級 110V 無法藉由軟體分析，因此直接藉由計算基套用 IEEE 1584 公式求得。

表 15 範例系統 A 之弧光能量分析

匯流排	電壓 (kV)	短路電流 (kA)	弧光燃燒時間 (s)	弧光能量 (cal/cm ²)	能量等級
Bus1	22.8	12.8	0.355	64.3	危險
Bus2	22.8	12.8	0.13	23.6	3
Bus3	0.38	32.9	0.986	24.5	3
Bus4	0.38	32.3	0.06	3	1
Bus5	0.38	8.1	0.03	0.5	無危險
Bus6	0.11	2.2	0.024	0.1	無危險
Bus7	0.22	0.844	0.024	0.1	無危險

表 16 範例系統 A 之弧光危險距離表

匯流排	電壓 (kV)	弧光保護邊界 (mm)	限制接近邊界 (mm)	管制接進邊界 (mm)
Bus1	22.8	6662	1830	788
Bus2	22.8	4031	1830	788
Bus3	0.38	4727	1068	305
Bus4	0.38	793	1068	305
Bus5	0.38	251	1068	305
Bus6	0.11	98	1068	避免接近
Bus7	0.22	66	1068	305

四、 弧光警告標籤

弧光警告標籤的目的為警告人員，詳細觀範一般人員可接近範圍、專業人員可接近範圍以及穿著個人防護具方可進入之區域，同時讓專業人員能夠馬上的知道該配電箱(盤)詳細資訊，因此最基本須包含電壓等級、弧光能量或危險等級與各限制接近邊界資訊，本節產生之警告標籤參考 NAPF 70E 2012 規範，如圖 71 到圖 74，然而最新版本 NFPA 70E 2015 已將限制接近距離刪除，未來警告標籤無須呈現限制接近距離，且弧光能量與危險等級不得同時標示。



Warning 警告

Arc Flash and Shock Hazard 電弧和電擊危害

Appropriate Electrical PPE Required 要求適當個人防護具

Equipment Class 設備種類	22800V Switchgear
Grounding Type 接地類型	grounded
Available 3Ph Fault Current 短路電流	12.8kA
Working Distance 工作距離	910 mm
Incident Energy at Work Distance 弧光能量	64.3 cal/cm ²
Arc Flash Boundary (AFB) 弧光保護邊界	6662 mm
Incident Energy at AFB 於弧光保護邊界時之能量	1.2 cal/cm ²
Hazard Risk Category 弧光危險等級	Dangerous
Limited Approach Boundary 管制接近邊界	1830 mm
Restricted Approach Boundary 限制接近邊界	788 mm
Prohibited Approach Boundary 禁止接近邊界	245 mm

Equipment Name 設備名稱 Bus1

2014/11/21

圖 71 電壓等級 22.8kV 之弧光警告標籤



Warning 警告

Arc Flash and Shock Hazard 電弧和電擊危害

Appropriate Electrical PPE Required 要求適當個人防護具

Equipment Class 設備種類	380V Switchgear
Grounding Type 接地類型	grounded
Available 3Ph Fault Current 短路電流	32.9kA
Working Distance 工作距離	610 mm
Incident Energy at Work Distance 弧光能量	24.5 cal/cm ²
Arc Flash Boundary (AFB) 弧光保護邊界	4727 mm
Incident Energy at AFB 於弧光保護邊界時之能量	1.2 cal/cm ²
Hazard Risk Category 弧光危險等級	3
Limited Approach Boundary 管制接近邊界	1068 mm
Restricted Approach Boundary 限制接近邊界	305 mm
Prohibited Approach Boundary 禁止接近邊界	25 mm

Equipment Name 設備名稱 Bus3

2014/11/21

圖 72 電壓等級 380V 之弧光警告標籤



Warning 警告

Arc Flash and Shock Hazard 電弧和電擊危害

Appropriate Electrical PPE Required 要求適當個人防護具

Equipment Class 設備種類	220V MCC & Panels
Grounding Type 接地類型	grounded
Available 3Ph Fault Current 短路電流	0.844kA
Working Distance 工作距離	455 mm
Incident Energy at Work Distance 弧光能量	0.1 cal/cm ²
Arc Flash Boundary (AFB) 弧光保護邊界	66 mm
Incident Energy at AFB 於弧光保護邊界時之能量	1.2 cal/cm ²
Hazard Risk Category 弧光危險等級	0
Limited Approach Boundary 管制接近邊界	1068 mm
Restricted Approach Boundary 限制接近邊界	305 mm
Prohibited Approach Boundary 禁止接近邊界	Avoid Contact

Equipment Name 設備名稱 Bus7

2014/11/21

圖 73 電壓等級 220V 之弧光警告標籤



Warning 警告

Arc Flash and Shock Hazard 電弧和電擊危害

Appropriate Electrical PPE Required 要求適當個人防護具

Equipment Class 設備種類	110V MCC & Panels
Grounding Type 接地類型	grounded
Available 3Ph Fault Current 短路電流	2.2kA
Working Distance 工作距離	455 mm
Incident Energy at Work Distance 弧光能量	0.1 cal/cm ²
Arc Flash Boundary (AFB) 弧光保護邊界	98 mm
Incident Energy at AFB 於弧光保護邊界時之能量	1.2 cal/cm ²
Hazard Risk Category 弧光危險等級	0
Limited Approach Boundary 管制接近邊界	1068 mm
Restricted Approach Boundary 限制接近邊界	Avoid Contact
Prohibited Approach Boundary 禁止接近邊界	Avoid Contact

Equipment Name 設備名稱 Bus6

2014/11/21

圖 74 電壓等級 110V 之弧光警告標籤

第二節 範例系統 B 之分析

一、系統參數

範例系統 B 係國內北部某石化產業工廠，其供電系統包含 69kV、11kV、3.46kV 及 480V 四個電壓等級，然而弧光意外一般發生於低壓側，因弧光意外於高壓側發生時，其弧光電流大約等於三相短路電流，因此可視為一般三相短路故障，此範例系統中電壓等級 69kV 因電壓過高，不在 IEEE 1584 規範內，因此不分析。範例系統 B 共含三個主要饋線，分別為 SWGR1、SWGR2 及 SWGR3，如圖 75、圖 76 與圖 77，本節選用 SWGR2 進行分析，並針對 480V 與 3.46kV 兩不同電壓等級，選用兩條饋線，包含 SWGR2、Bus 1B、Bus 4B、SWBD1D 及 MCC4B 共五個匯流排進行弧光能量分析與計算。其他系統參數如表 17 到表 21 所示。

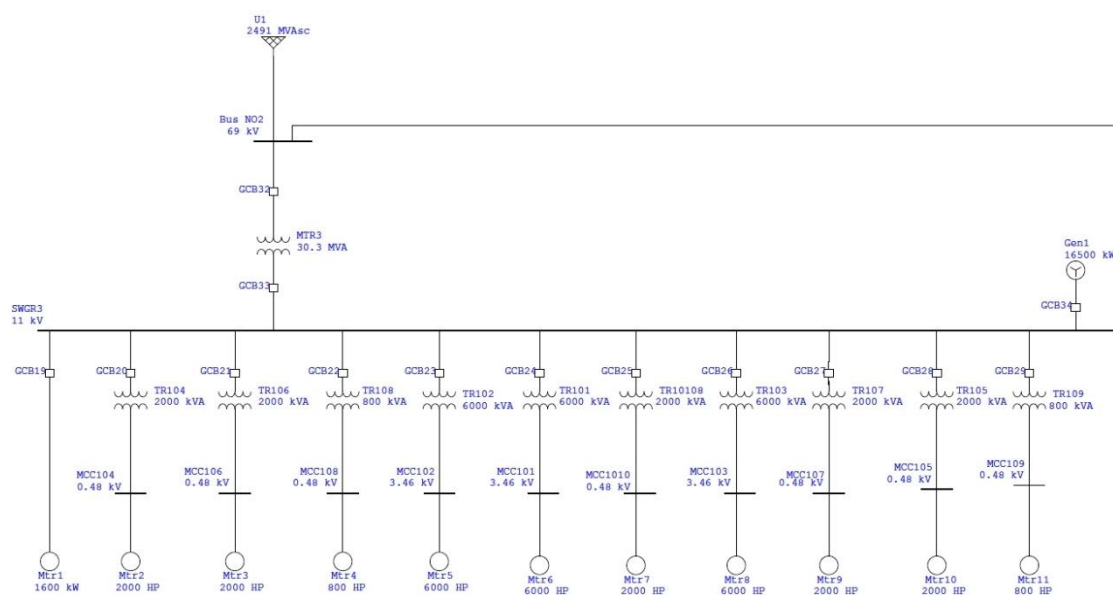


圖 75 範例系統 B 單線圖之一

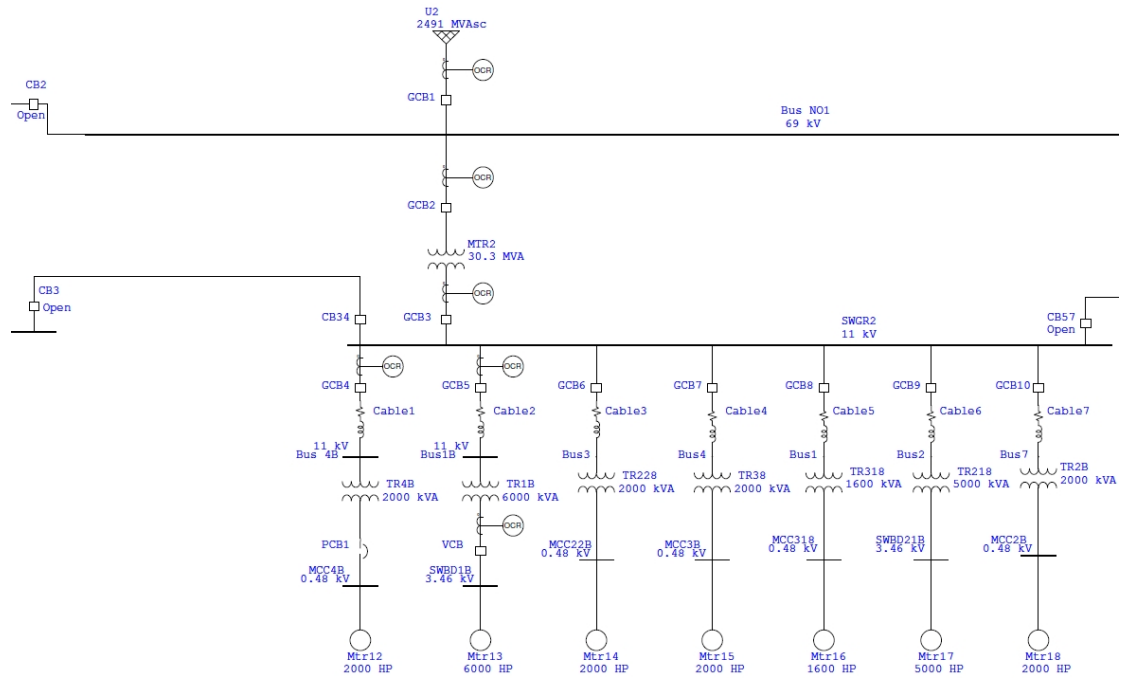


圖 76 範例系統 B 單線圖之二

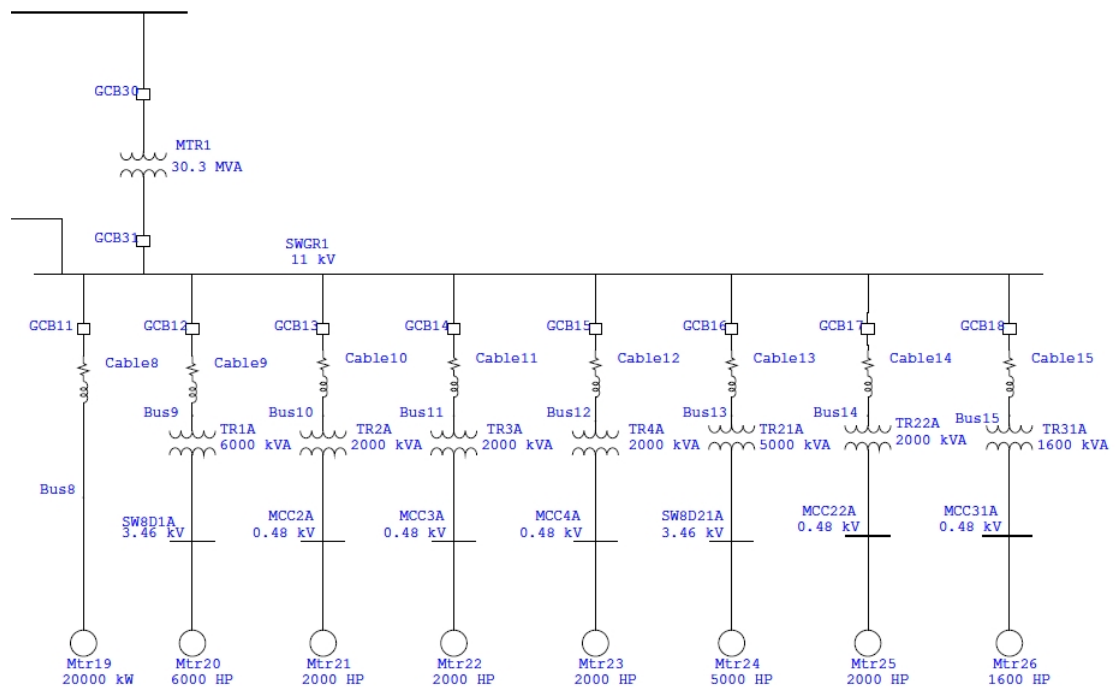


圖 77 範例系統 B 單線圖之三

表 17 範例系統 B 電力公司參數表

名稱	額定電壓(kV)	短路容量(MVA)	X/R
U1	69	2491	25
U2	69	2491	25

表 18 範例系統 B 發電機參數表

名稱	功率(kW)	PF(%)	X_d'	X_d''
Gen1	16500	90	35	26

表 19 範例系統 B 變壓器參數表

名稱	容量(MVA)	一次側(kV)	二次側(kV)	Z(%)
MTR1	30.3	69	11	11.25
MTR2	30.3	69	11	11.25
MTR3	30.3	69	11	11.25
TR1A	6	11	3.46	6.5
TR2A	2	11	0.48	7.88
TR3A	2	11	0.48	7.88
TR4A	2	11	0.48	7.88
TR21A	5	11	3.46	6.2
TR22A	2	11	0.48	6
TR31A	1.6	11	0.48	5.6

表 19 範例系統 B 變壓器參數表(續)

名稱	容量(MVA)	一次側(kV)	二次側(kV)	Z(%)
TR4B	2	11	0.48	7.88
TR1B	6	11	3.46	6.5
TR228	2	11	0.48	6
TR38	2	11	0.48	7.88
TR318	1.6	11	0.48	5.6
TR218	5	11	3.46	6.2
TR2B	2	11	0.48	7.88
TR104	2	11	0.48	7.69
TR106	2	11	0.48	7.66
TR108	0.8	11	0.48	6
TR102	6	11	3.46	6.72
TR101	6	11	3.46	6.75
TR10108	2	11	0.48	7.64
TR103	6	11	3.46	6.68
TR107	2	11	0.48	7.57
TR105	2	11	0.48	7.67
TR109	0.8	11	0.48	6

表 20 範例系統 B 電纜參數表

名稱	額定電壓(kV)	#/C	線徑(mm ²)	長度(m)
Cable1	15	3/C	300	370
Cable2	15	3/C	300	370
Cable3	15	3/C	300	150
Cable4	15	3/C	300	370
Cable5	15	3/C	300	150
Cable6	15	3/C	300	150
Cable7	15	3/C	300	370
Cable8	15	3/C	300	280
Cable9	15	3/C	300	360
Cable10	15	3/C	300	360
Cable11	15	3/C	300	345
Cable12	15	3/C	300	345
Cable13	15	3/C	300	150
Cable14	15	3/C	300	150
Cable15	15	3/C	300	150

表 21 範例系統 B 馬達參數表

名稱	額定電壓(kV)	馬力(HP)	X _M %
Mtr1	11	1,600	25
Mtr2	0.46	2,000	25
Mtr3	0.46	2,000	25
Mtr4	0.46	800	25
Mtr5	3.46	6,000	25
Mtr6	3.46	6,000	25
Mtr7	0.46	2,000	25
Mtr8	3.46	6,000	25
Mtr9	0.46	2,000	25
Mtr10	0.46	2,000	25
Mtr11	0.46	800	25
Mtr12	0.46	2,000	25
Mtr13	3.46	6,000	25
Mtr14	0.46	2,000	25
Mtr15	0.46	2,000	25
Mtr16	0.46	1,600	25
Mtr17	3.46	5,000	25
Mtr18	0.46	2,000	25
Mtr19	11	20,000	25
Mtr20	3.46	6,000	25
Mtr21	0.46	2,000	25
Mtr22	0.46	2,000	25
Mtr23	0.46	2,000	25
Mtr24	3.46	5,000	25
Mtr25	0.46	2,000	25
Mtr26	0.46	1,600	25

二、保護協調圖

本範例系統針對 SWGR2、Bus 1B、Bus 4B、SWBD1B 及 MCC4B 五個匯流排進行分析，因此只作此兩饋線之保護協調，斷路器包含 GCB1 到 GCB5、PCB1 及 VCB，發生三相短路故障時，匯流排上短路電流分別為 17.2kA、15.7kA、15.5kA、17kA 及 41.5kA，如圖 78。各保護設備動作時間列於表 22，部分斷路器間上下衛保護協調時間不滿 0.2 秒，將於後續保護協調圖解釋，保護電驛依高壓及低壓兩饋線，分為 3 張協調圖，如圖 79、圖 80 及圖 81。

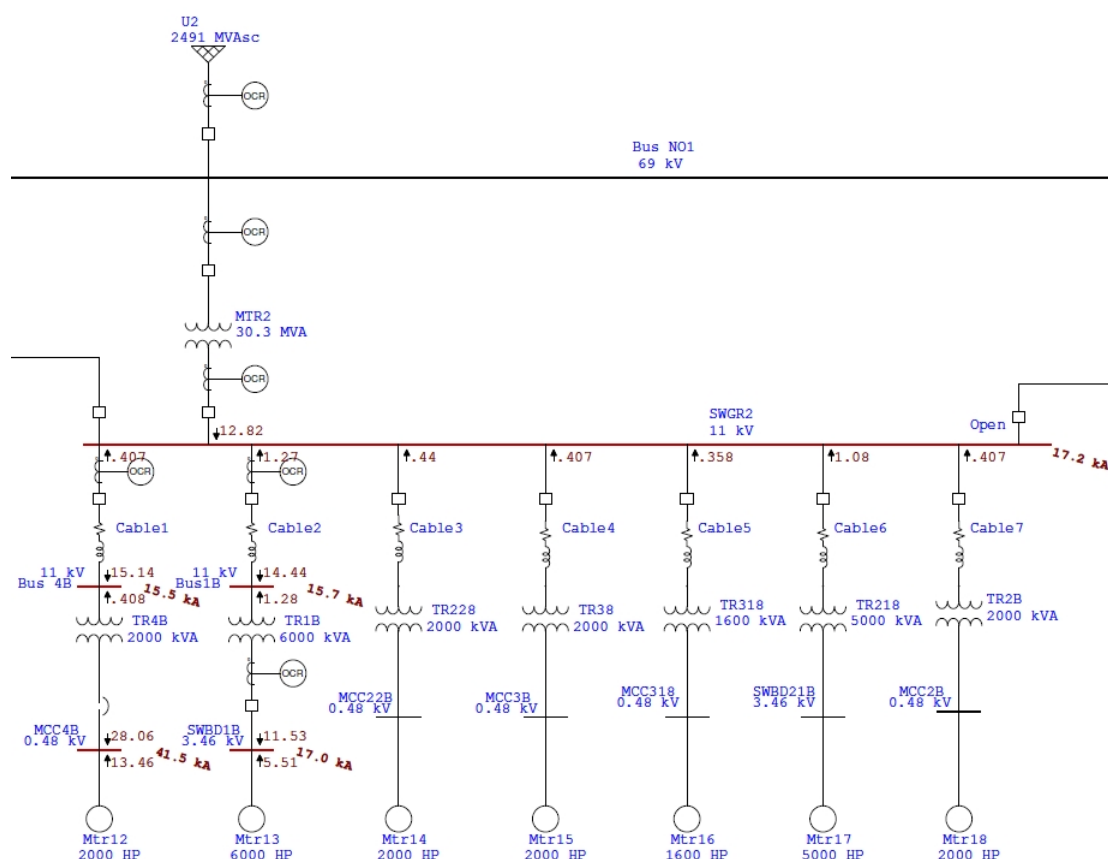


圖 78 範例系統 B 之三相短路電流圖

表 22 範例系統 B 之保護設備動作協調時間表

故障點	主保護		後衛保護		協調時間(s)
	設備名稱	動作時間(s)	設備名稱	動作時間(s)	
SWGR2	GCB3	0.380	GCB2	0.577	0.197
Bus 4B	GCB4	0.197	GCB3	0.404	0.207
MCC 4B	PCB1	0.06	GCB4	0.251	0.191
Bus 1B	GCB5	0.197	GCB3	0.402	0.205
SWBD1B	VCB	0.237	GCB5	0.252	0.015

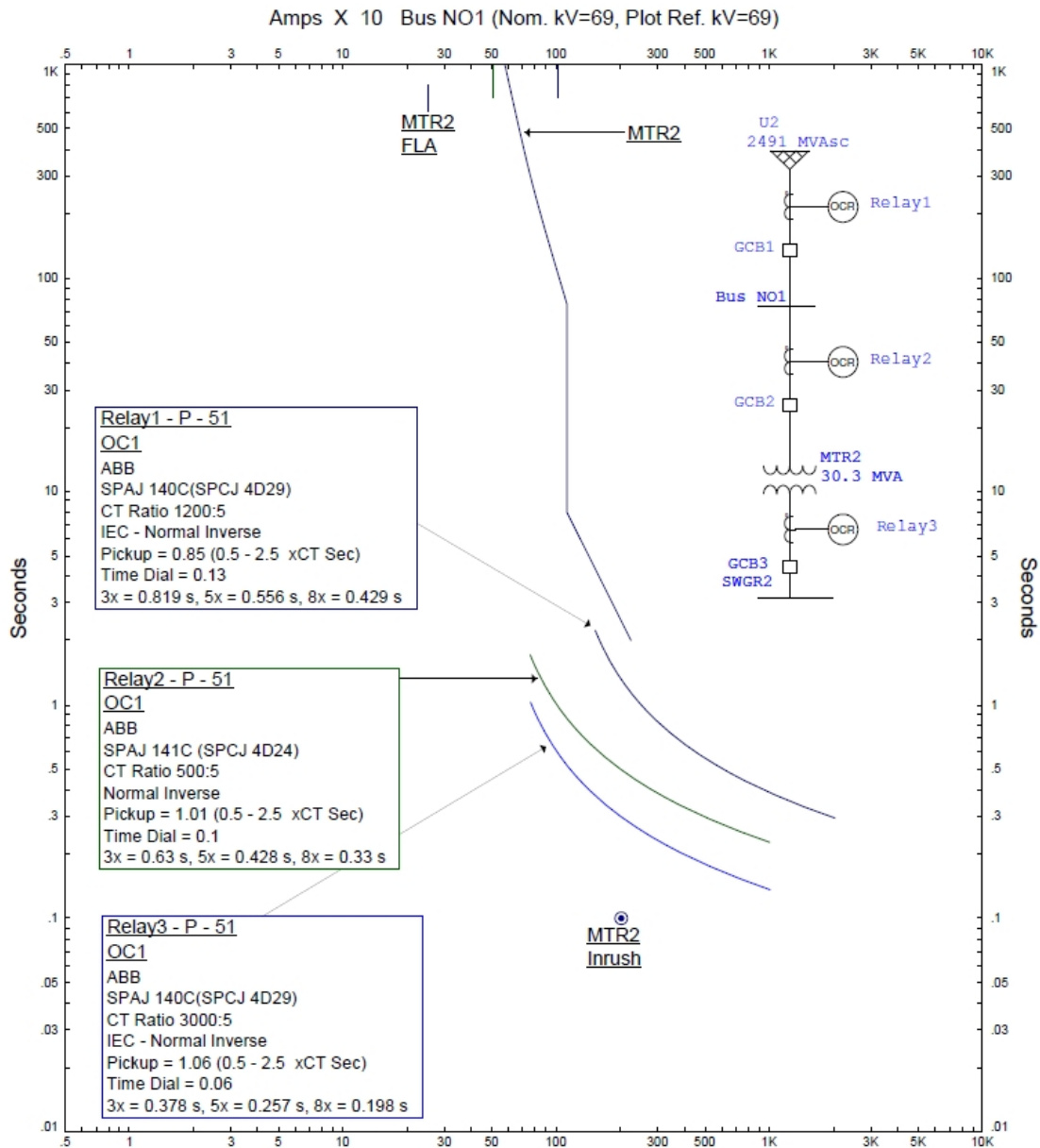


圖 79 範例系統 B 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之一

故障發生時，主保護與後衛保護協調時間至少應 0.2 秒，但有些情況台電端須確保其他用戶用電品質，上游為責任分界點之保護設備，其反時曲線會位於較為下方，使的下游協調空間不足，則須視情況犧牲協調時間，一般情況下，當下游協調空間不足時，則犧牲串聯路徑。此範例系統中 GCB2 與 GCB3 為串聯關係，因此縮短彼此協調時間，故障點位於 SWGR2 時，Relay2 與 Relay3 協調時間為 0.197 秒。Bus SWGR2 發生故障時，流經 Relay3 之弧光電流為 12.39kA，轉換電流基底後，弧光電流為 1.975kA，Relay3 跳脫時間為 0.355 秒。

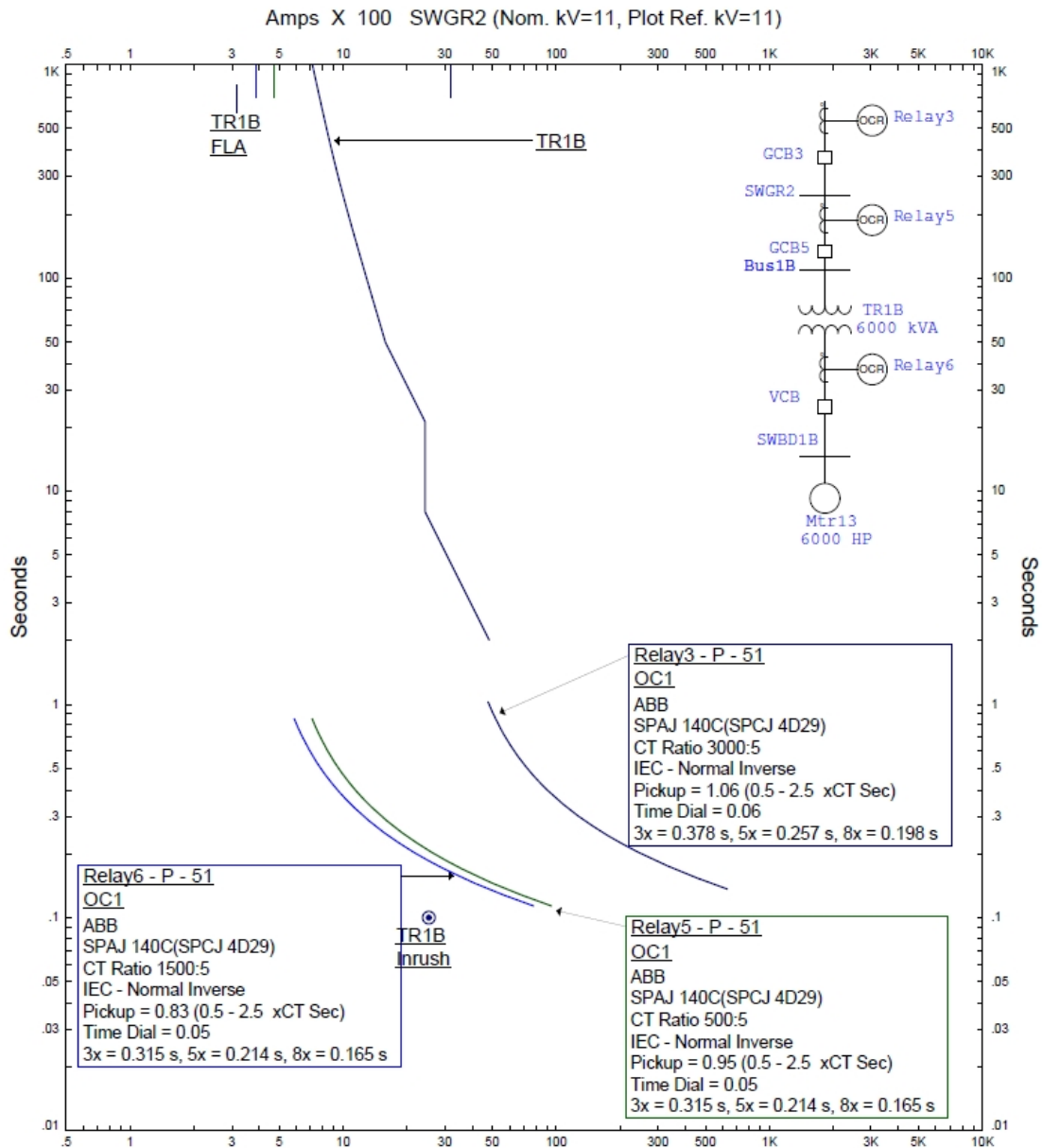


圖 80 範例系統 B 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之二

由於 Relay3 與 Relay5 並非串聯路徑，上下協調時間需 0.2 秒以上，使得下游協調空間不足，Relay5 與 Relay6 為串聯路徑，因此當故障發生時，哪一電驛先動作較無影響，故調整 Relay6 動作時間，較為貼近 Relay5 以利下游繼續協調。Bus1B 發生故障時，流經 Relay4 之弧光電流為 13.93kA，Relay5 跳脫時間為 0.173 秒；Bus SWBD1B 發生故障時，流經 Relay6 之弧光電流為 11.16kA，轉換電流基底後，弧光電流為 3.51kA，跳脫時間為 0.216 秒。

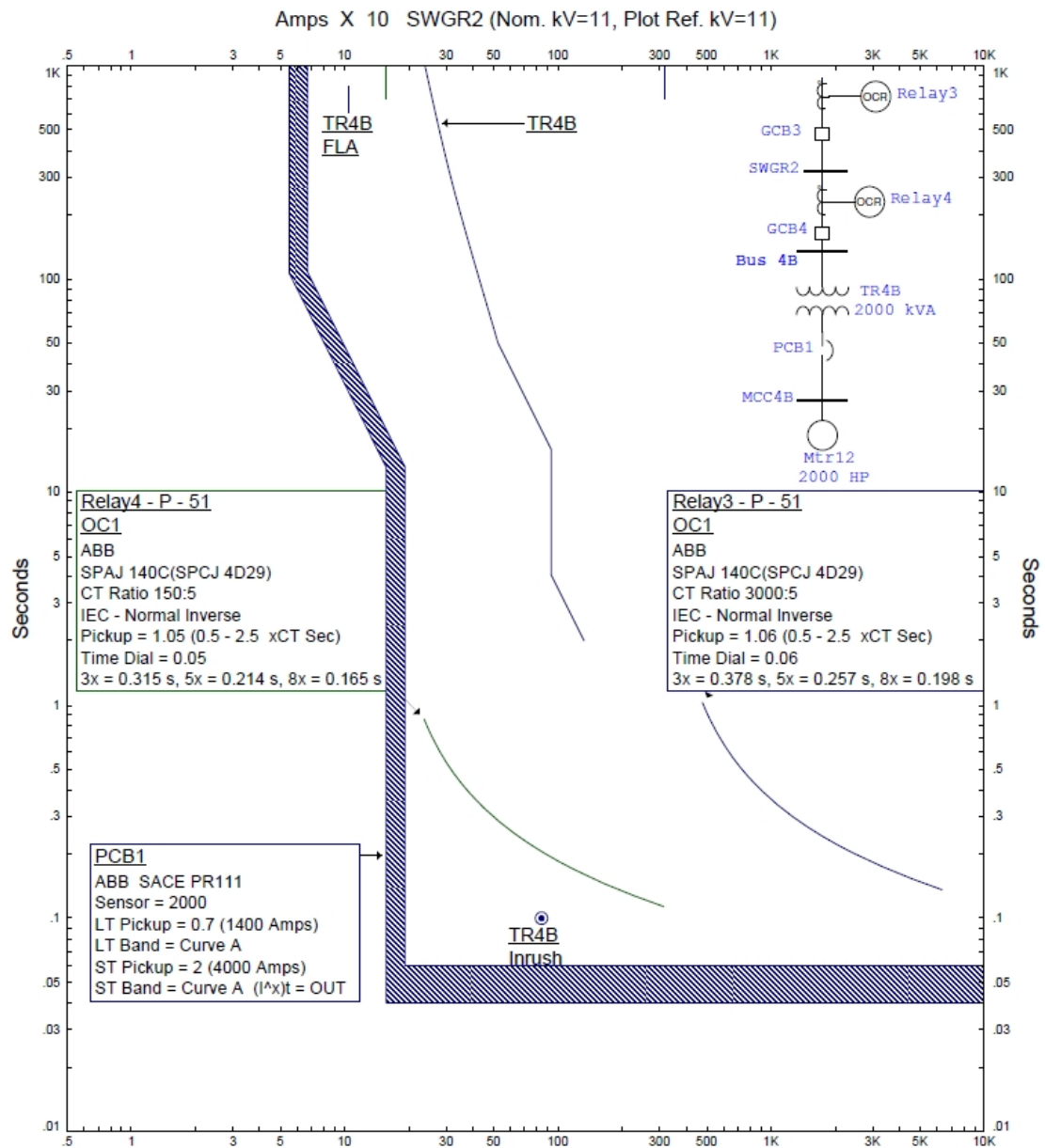


圖 81 範例系統 B 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之三

Bus 4B 發生故障時，流經 Relay4 之弧光電流為 14.59kA，Relay4 跳脫時間為 0.173 秒; Bus MCC4B 發生故障時，流經 PCB1 之弧光電流為 15.83kA，PCB1 為瞬時跳脫，跳脫時間為 0.06 秒。

三、 弧光能量分析與計算

本範例系統匯流排 SWGR2、Bus 4B、Bus 1B、SWBD1B 及 MCC4B 的設備參數如表 23 所示，SWGR2、Bus 4B 及 Bus 1B 為開關箱，電壓等級 11kV，導線間距 G 為 153mm，工作距離 D 為 910mm; SWBD1B 為開關箱，電壓等級 3.46kV，導線間距 G 為 102mm，工作距離 D 為 910mm; MCC4B 為配電盤，電壓等級 480V，導線間距 G 為 25mm，工作距離 D 為 455mm，其他參數如表 23 所示。各匯流排上弧光能量、危險等級與弧光危險距離如表 24 與表 25 所示。

表 23 範例系統 B 之設備參數表

匯流排	電壓 (kV)	設備類型	K	K ₁	K ₂	C _f	G (mm)	D (mm)	x
SWGR2	11	開關箱		-0.555	-0.113	1	153	910	0.973
Bus 4B	11	開關箱		-0.555	-0.113	1	153	910	0.973
Bus 1B	11	開關箱		-0.555	-0.113	1	153	910	0.973
SWBD1B	3.46	開關盤		-0.555	0	1	102	910	0.973
MCC4B	0.48	配電盤	-0.097	-0.555	-0.113	1.5	25	455	1.641

表 24 範例系統 B 之弧光能量分析

匯流排	電壓 (kV)	短路電流 (kA)	弧光燃燒時間 (s)	弧光能量 (cal/cm ²)	能量等級
SWGR2	11	17.2	0.355	7.9	2
Bus 4B	11	15.5	0.173	3.4	1
Bus 1B	11	15.7	0.173	3.5	1
SWBD1B	3.46	17	0.216	5.4	2
MCC4B	0.48	41.5	0.06	4.8	2

表 25 範例系統 B 之弧光危險距離表

匯流排	電壓 (kV)	弧光保護邊界 (mm)	限制接近邊界 (mm)	管制接進邊界 (mm)
SWGR2	11	6314	1524	660
Bus 4B	11	2692	1524	660
Bus 1B	11	2730	1524	660
SWBD1B	3.46	4298	1524	660
MCC4B	0.48	1053	1068	305

弧光警告標籤

本節參考 NFPA 70E 2012 之標準，以 11kV、3.46kV 及 480V 不同電壓等級為例，各取一匯流排作弧光警告標籤，如圖 82、圖 83 與圖 84，標籤應包含電壓等級、弧光能量或危險等級及各限制接近邊界等資訊，根據 NFPA 70E 規定超過 40cal/cm² 為十分危險，禁止活電作業，而最新之版本已將禁止接近邊界移除，未來將不再列為必要參數，此外，弧光能量與危險等級不得同時標示。



Warning 警告

Arc Flash and Shock Hazard 電弧和電擊危害

Appropriate Electrical PPE Required 要求適當個人防護具

Equipment Class 設備種類	11000V Switchgear
Grounding Type 接地類型	grounded
Available 3Ph Fault Current 短路電流	17.2kA
Working Distance 工作距離	910 mm
Incident Energy at Work Distance 弧光能量	7.9 cal/cm ²
Arc Flash Boundary (AFB) 弧光保護邊界	6314 mm
Incident Energy at AFB 於弧光保護邊界時之能量	1.2 cal/cm ²
Hazard Risk Category 弧光危險等級	2
Limited Approach Boundary 管制接近邊界	1524 mm
Restricted Approach Boundary 限制接近邊界	660 mm
Prohibited Approach Boundary 禁止接近邊界	148 mm
Equipment Name 設備名稱	SWGR2

2014/11/21

圖 82 電壓等級 11kV 之弧光警告標籤



Warning 警告

Arc Flash and Shock Hazard 電弧和電擊危害

Appropriate Electrical PPE Required 要求適當個人防護具

Equipment Class 設備種類	3460V Switchgear
Grounding Type 接地類型	ungrounded
Available 3Ph Fault Current 短路電流	17kA
Working Distance 工作距離	910 mm
Incident Energy at Work Distance 弧光能量	5.4 cal/cm ²
Arc Flash Boundary (AFB) 弧光保護邊界	4298 mm
Incident Energy at AFB 於弧光保護邊界時之能量	1.2 cal/cm ²
Hazard Risk Category 弧光危險等級	2
Limited Approach Boundary 管制接近邊界	1524 mm
Restricted Approach Boundary 限制接近邊界	660 mm
Prohibited Approach Boundary 禁止接近邊界	148 mm

Equipment Name 設備名稱 SWBD1B

2014/11/21

圖 83 電壓等級 3.46kV 之弧光警告標籤



Warning 警告

Arc Flash and Shock Hazard 電弧和電擊危害

Appropriate Electrical PPE Required 要求適當個人防護具

Equipment Class 設備種類	480V MCC & Panels
Grounding Type 接地類型	grounded
Available 3Ph Fault Current 短路電流	41.5kA
Working Distance 工作距離	455 mm
Incident Energy at Work Distance 弧光能量	4.8 cal/cm ²
Arc Flash Boundary (AFB) 弧光保護邊界	1053 mm
Incident Energy at AFB 於弧光保護邊界時之能量	1.2 cal/cm ²
Hazard Risk Category 弧光危險等級	2
Limited Approach Boundary 管制接近邊界	1068 mm
Restricted Approach Boundary 限制接近邊界	305 mm
Prohibited Approach Boundary 禁止接近邊界	25 mm

Equipment Name 設備名稱 MCC4B

2014/11/21

圖 84 電壓等級 480V 之弧光警告標籤

第三節 範例系統 C 之分析

一、系統參數

範例系統 C 係國內南部某半石化產業工廠，其供電系統包含 69kV、3.3kV 及 480V 三個電壓等級，然而 69kV 電壓不在 IEEE 1584 規範範圍內，因此只分析 3.3kV 與 480V 兩電壓等級匯流排。此系統分為 B 與 C 兩饋線，中間有一常閉斷路器 VCB-2FH，因此平時為並聯，而 K2/531B、P2/534B、P2/922B、P2/923B、P2/924B、P2/927B 及 F2/530E 等動力負載平時為預備使用，此範例系統不列入分析，其單線圖如圖 85、圖 86。其他參數如表 26 到表 30。

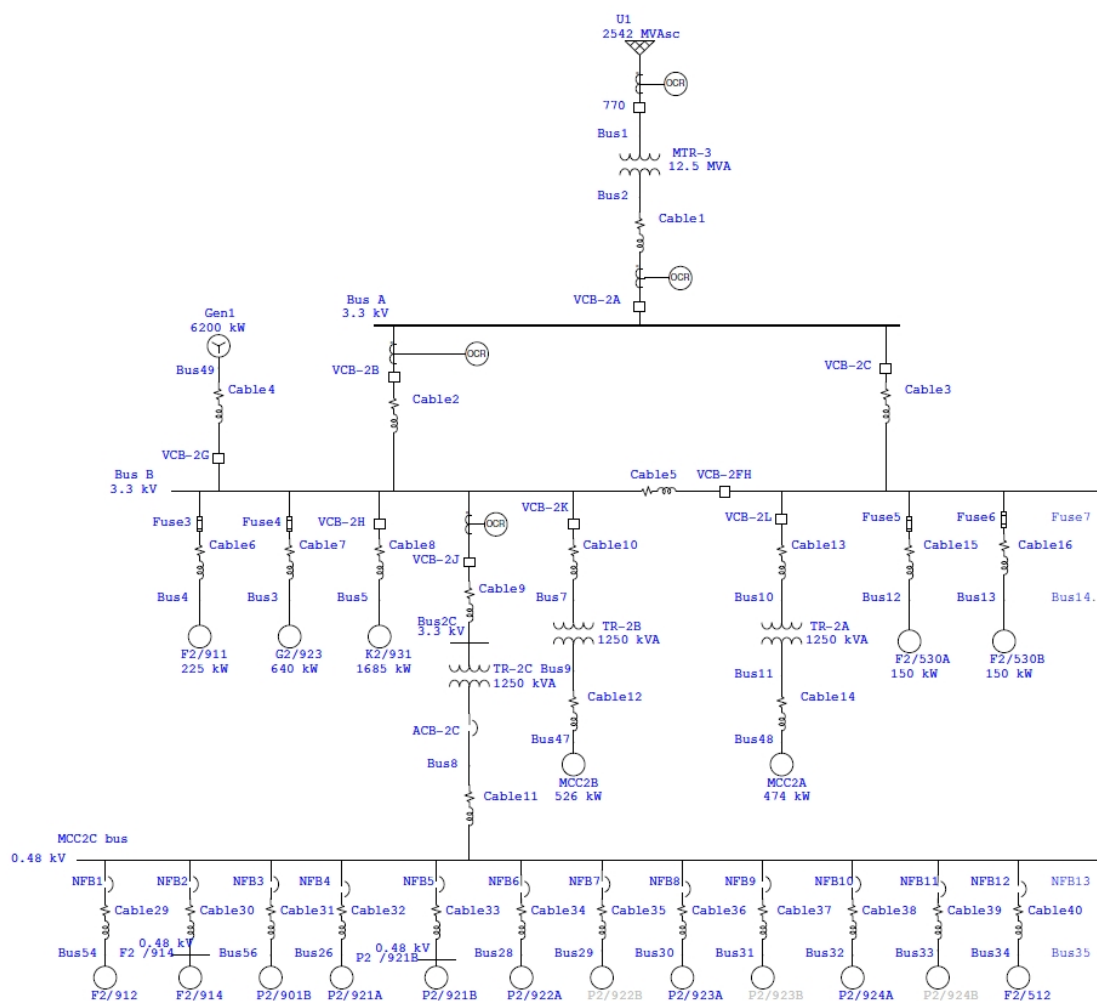


圖 85 範例系統 C 單線圖之一

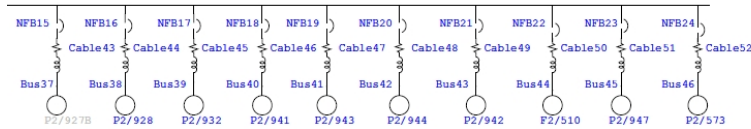
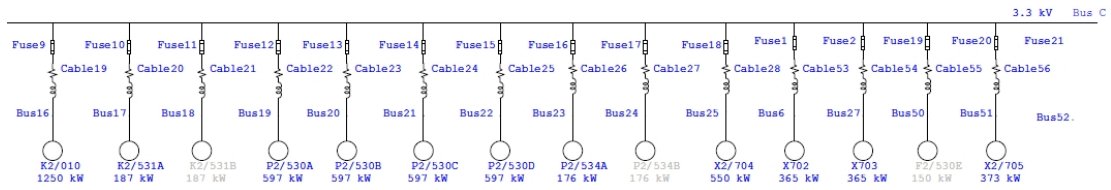


圖 86 範例系統 C 單線圖之二

表 26 範例系統 C 電力公司參數表

名稱	額定電壓(kV)	短路容量(MVA)	X/R
U1	69	2642	25

表 27 範例系統 C 發電機參數表

名稱	功率(kVA)	PF(%)	X_d'	X_d''
Gen1	7750	80	25	15

表 28 範例系統 C 變壓器參數表

名稱	容量(MVA)	一次側(kV)	二次側(kV)	Z(%)
MTR-3	12.5	69	3.3	9.62
TR-2A	1.25	3.3	0.48	6
TR-2B	1.25	3.3	0.48	6
TR-2C	1.25	3.3	0.48	6

表 29 範例系統 C 電纜參數表

名稱	額定電壓(kV)	#/C	線徑	長度(m)
Cable1	5	4-3/C	750 mcm	55
Cable2	5	4-3/C	500 mcm	289
Cable3	5	4-3/C	500 mcm	289
Cable4	5	2-3/C	750 mcm	160
Cable5	5	2-3/C	750 mcm	18
Cable6	5	3/C	AWG #4	335
Cable7	5	3/C	70 mm ²	270
Cable8	5	3/C	500 mcm	223
Cable9	5	3/C	AWG #4/0	183
Cable10	5	3/C	AWG #4/0	178
Cable11	0.6	15-1/C	300 mcm	11
Cable12	0.6	15-1/C	300 mcm	11
Cable13	5	3/C	AWG #4/0	161
Cable14	0.6	15-1/C	300 mcm	11
Cable15	5	3/C	AWG #4	87
Cable16	5	3/C	AWG #4	96
Cable17	5	3/C	AWG #4	106
Cable18	5	3/C	AWG #4	116
Cable19	5	3/C	500 mcm	180
Cable20	5	3/C	AWG #4	177
Cable21	5	3/C	AWG #4	179
Cable22	5	3/C	AWG #2/0	145
Cable23	5	3/C	AWG #2/0	142
Cable24	5	3/C	AWG #2/0	140
Cable25	5	3/C	AWG #2/0	133
Cable26	5	3/C	AWG #4	150
Cable27	5	3/C	AWG #4	153
Cable28	5	3/C	AWG #2/0	183
Cable29	0.6	3-1/C	AWG #2	170
Cable30	0.6	3-1/C	AWG #1/0	184

表 29 範例系統 C 電纜參數表(續)

名稱	額定電壓(kV)	#/C	線徑	長度(m)
Cable31	0.6	3-1/C	AWG #12	119
Cable32	0.6	3-1/C	AWG #4/0	174
Cable33	0.6	3-1/C	AWG #4/0	173
Cable34	0.6	3-1/C	AWG #4/0	145
Cable35	0.6	3-1/C	AWG #4/0	141
Cable36	0.6	3-1/C	AWG #10	163
Cable37	0.6	3-1/C	AWG #10	162
Cable38	0.6	3-1/C	AWG #8	139
Cable39	0.6	3-1/C	AWG #8	139
Cable40	0.6	3-1/C	AWG #10	150
Cable41	0.6	3-1/C	AWG #10	138
Cable42	0.6	3-1/C	AWG #4	145
Cable43	0.6	3-1/C	AWG #12	142
Cable44	0.6	3-1/C	AWG #12	170
Cable45	0.6	3-1/C	AWG #10	140
Cable46	0.6	3-1/C	AWG #1/0	122
Cable47	0.6	3-1/C	AWG #6	143
Cable48	0.6	3-1/C	AWG #12	125
Cable49	0.6	3-1/C	AWG #4/0	134
Cable50	0.6	3-1/C	AWG #10	160
Cable51	0.6	3-1/C	AWG #12	140
Cable52	0.6	3-1/C	AWG #8	180
Cable53	5	3/C	AWG #2/0	65
Cable54	5	3/C	AWG #2/0	138
Cable55	5	3-1/C	AWG #4	168
Cable56	5	3-1/C	AWG #4/0	138
Cable57	5	3/C	AWG #4	335

表 30 範例系統 C 馬達參數表

名稱	額定電壓(kV)	馬力(kW)
F2/911	3.3	225
G2/923	3.3	640
K2/931	3.3	1685
MCC2A	3.3	526
MCC2B	3.3	474
F2/530A	3.3	150
F2/530B	3.3	150
F2/530C	3.3	150
F2/530D	3.3	150
K2/010	3.3	1250
K2/531A	3.3	187
K2/531B	3.3	187
P2/530A	3.3	597
P2/530B	3.3	597
P2/530C	3.3	597
P2/530D	3.3	597
P2/534A	3.3	176
P2/534B	3.3	176
X2/704	3.3	550
X702	3.3	365
X703	3.3	365
F2/530E	3.3	150
X2/705	3.3	373
K2/911	3.3	150
F2/912	0.48	29.8
F2/914	0.48	37.3
P2/901B	0.48	3.8
P2/921A	0.48	75
P2/921B	0.48	75
P2/922A	0.48	75
P2/922B	0.48	75
P2/923A	0.48	5.5

表 30 範例系統 C 馬達參數表(續)

名稱	額定電壓(kV)	馬力(kW)
P2/923B	0.48	5.5
P2/924A	0.48	3.73
P2/924B	0.48	3.73
F2/512	0.48	7.5
P2/926	0.48	7.5
P2/927A	0.48	30
P2/927B	0.48	30
P2/928	0.48	3.7
P2/932	0.48	6.6
P2/941	0.48	37.3
P2/943	0.48	14.9
P2/944	0.48	3.73
P2/942	0.48	74.6
F2/510	0.48	7.5
P2/947	0.48	5.5
P2/573	0.48	18.65

二、保護協調圖

本範例系統針對左側饋線 Bus B 及 MCC2C 進行分析，共包含 Bus A、Bus B、Bus 2C、MCC2C、F2/914 及 P2/921B 共六個匯流排，包含斷路器 770、VCB-2A、VCB-2B、VCB-2J、ACB-2C、NFB2 及 NFB5，發生三相短路故障時，匯流排故障電流分別為 38.9kA、38.3kA、22.8kA、25.1kA、3.4kA 及 5.5kA，如圖 87。故障發生時，保護設備上下游動作時間如**錯誤! 找不到參照來源**。所示，其中，當 Bus B 發生故障時，其主保護應為 VCB-2B，但由於該範例系統 VCB-2FH 為常閉接點，其故障電流分流至兩饋線，造成 Relay3 偵測到故障電流降低，使得 VCB-2A 先跳脫。保護協調圖依最高壓 69kV、中壓 3.3kV 及低壓 480V，共四張，相關保護電驛設定皆標示於圖內，如圖 88 到圖 91。

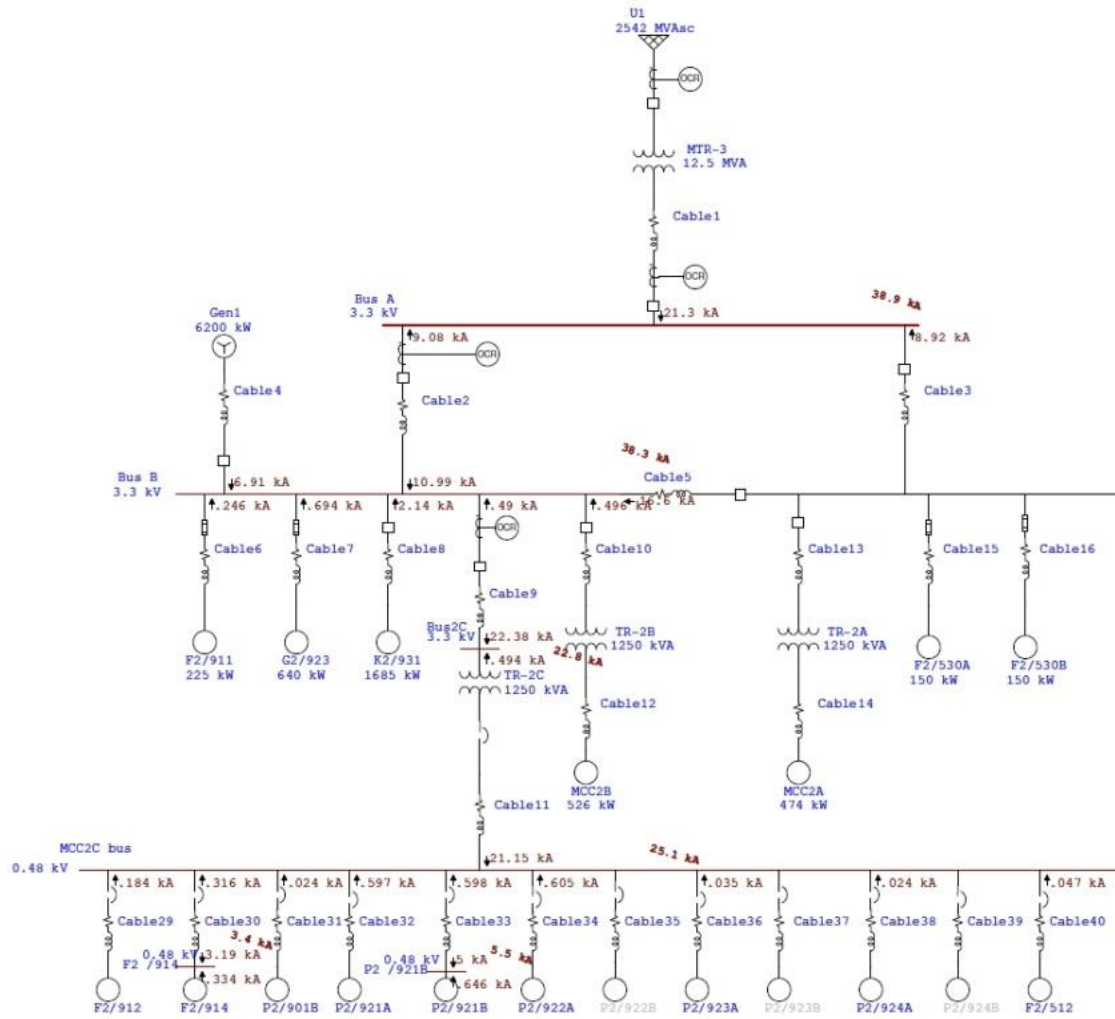


圖 87 範例系統 C 之三相短路電流圖

表 31 範例系統 C 之保護設備動作協調時間表

故障點	主保護		後衛保護		協調時間(s)
	設備名稱	動作時間(s)	設備名稱	動作時間(s)	
Bus A	VCB-2A	0.279	770	0.587	0.308
Bus B	VCB-2A	0.302	VCB-2B	0.573	0.271
Bus2C	VCB-2J	0.284	VCB-2A	0.73	0.446
MCC2C	ACB-2C	0.288	VCB-2J	0.46	0.172
F2/914	NFB2	0.04	ACB-2C	27.296	27.256
P2/921B	NFB5	0.04	ACB-2C	10.813	10.773

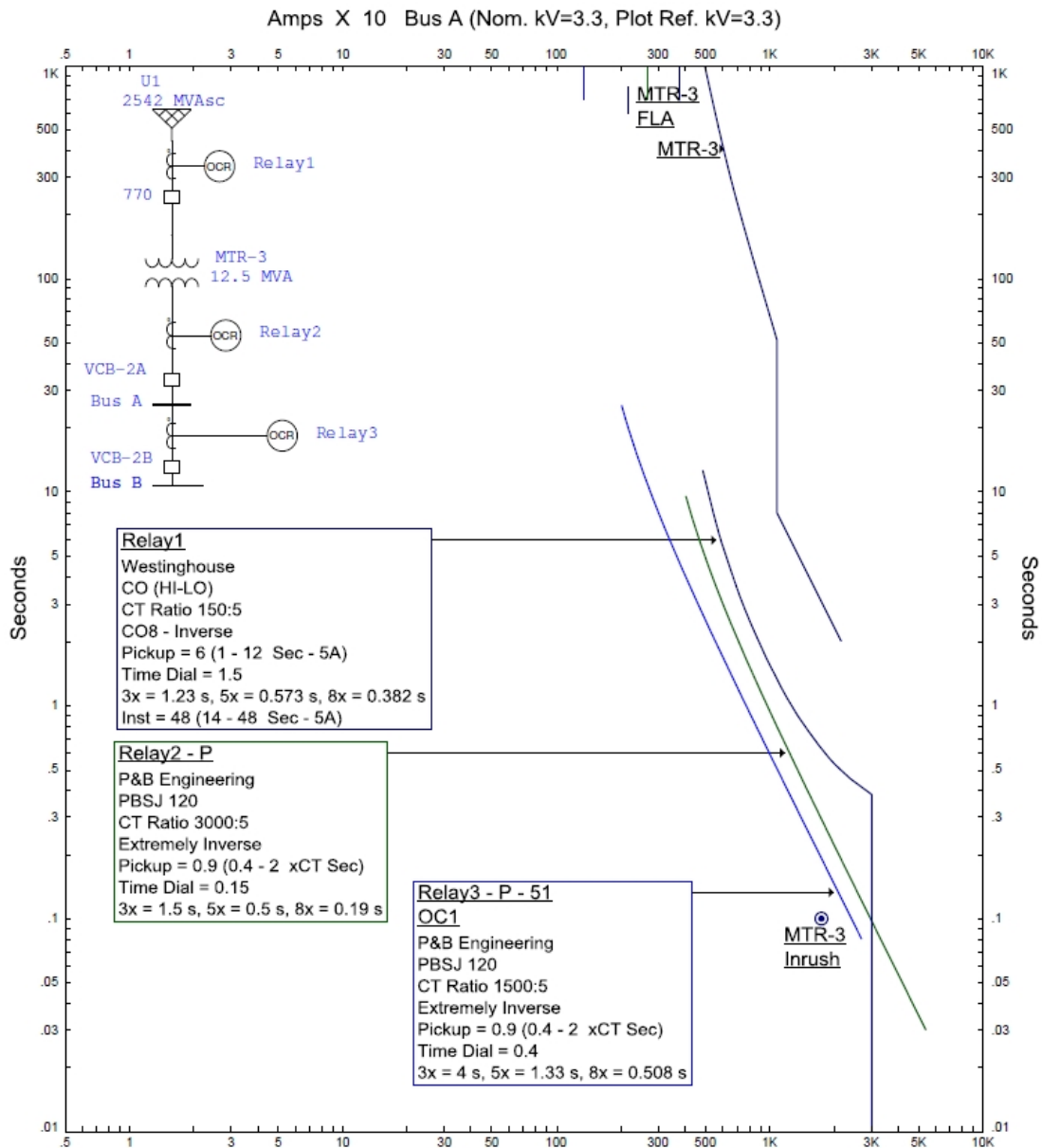


圖 88 範例系統 C 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之一

Bus A 發生故障時，流經 Relay2 之弧光電流為 20.41kA，Relay2 跳脫時間為 0.274 秒；Bus B 發生故障時，流經 Relay2 之弧光電流為 19.35kA，由於 VCB-2FH 為常閉接點，造成故障電流分流，流經 Relay3 之弧光電流為 10.54kA，因此根據保護協調圖 Relay2 跳脫時間為 0.296 秒，Relay3 跳脫時間為 0.591，因此 VCB-2A 較早動作。

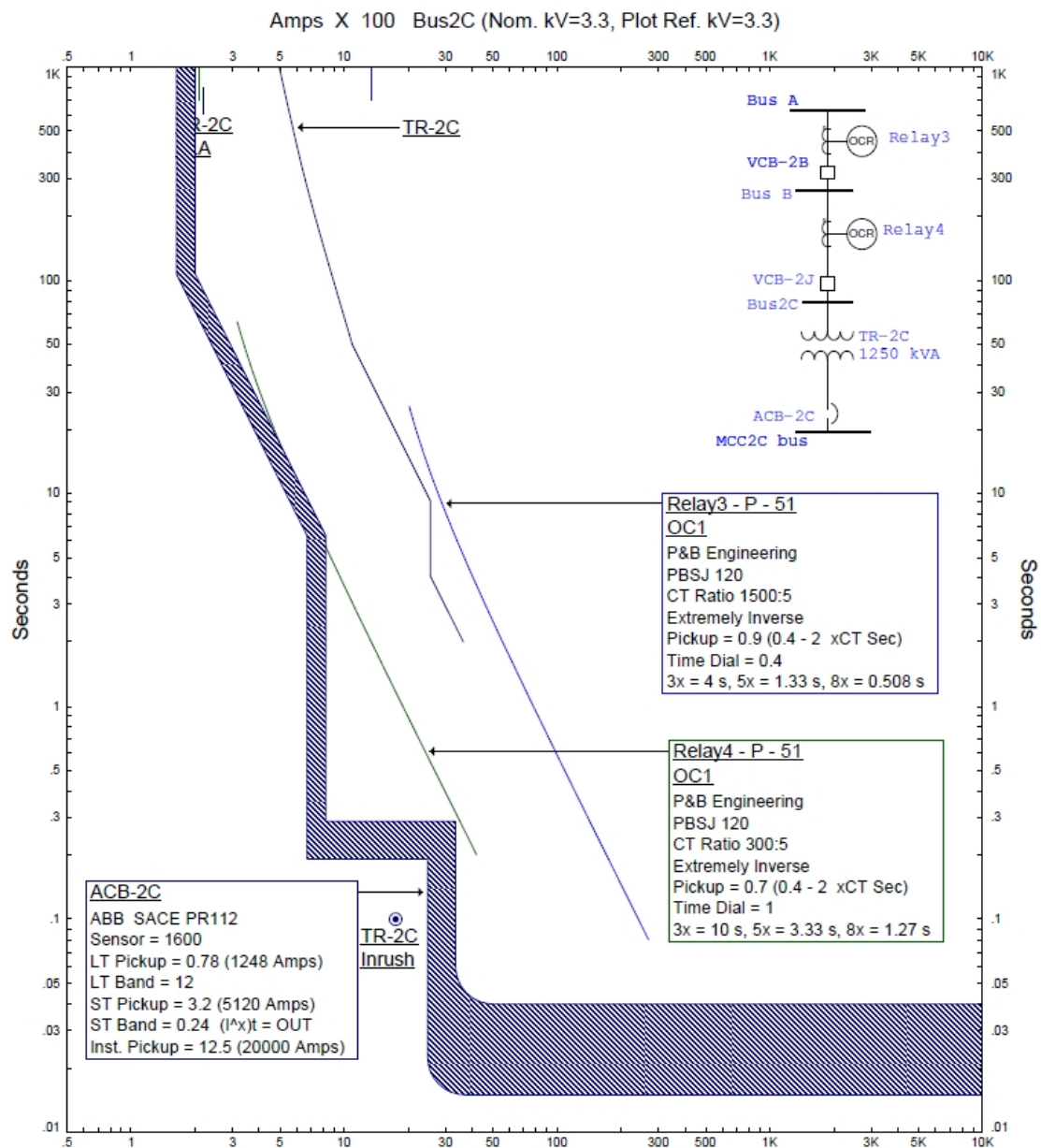


圖 89 範例系統 C 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之二

Bus2C 發生故障時，流經 Relay4 之弧光電流為 21.43kA，Relay4 跳脫時間為 0.261 秒；MCC2C 發生故障時，流經 ACB-2C 之弧光電流為 12.4kA，轉換電流基底後，弧光電流為 1.804kA，ACB-2C 跳脫時間為 0.288 秒。

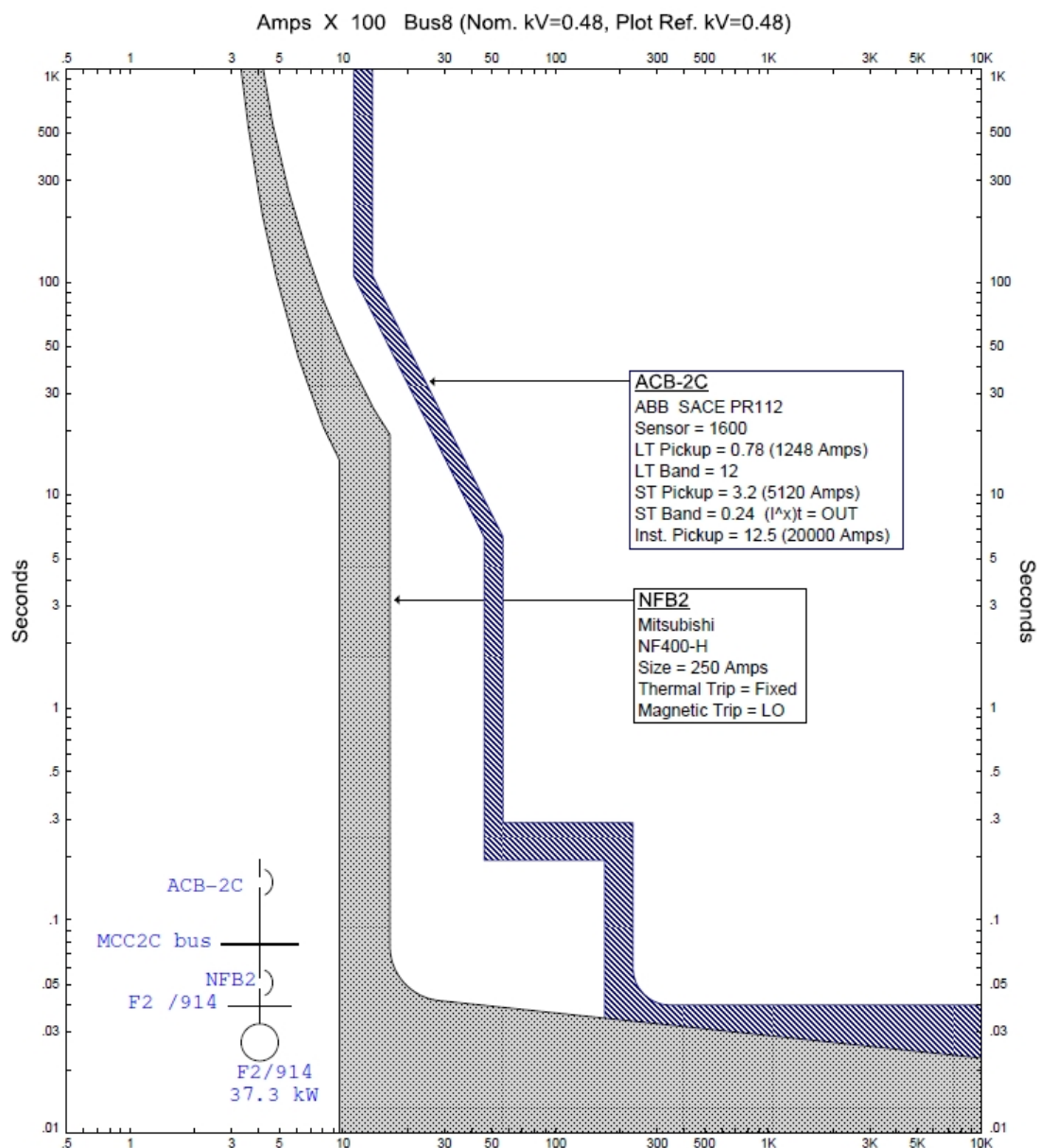


圖 90 範例系統 C 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之三

F2/914 發生故障時，流經 NFB2 之弧光電流為 2.47kA，NFB2 為瞬跳，跳脫時間為 0.043 秒，而後衛保護跳脫時間為 27.296 秒，協調時間過長，可藉由調整短延時設定(Short time setting)，降低其協調時間。

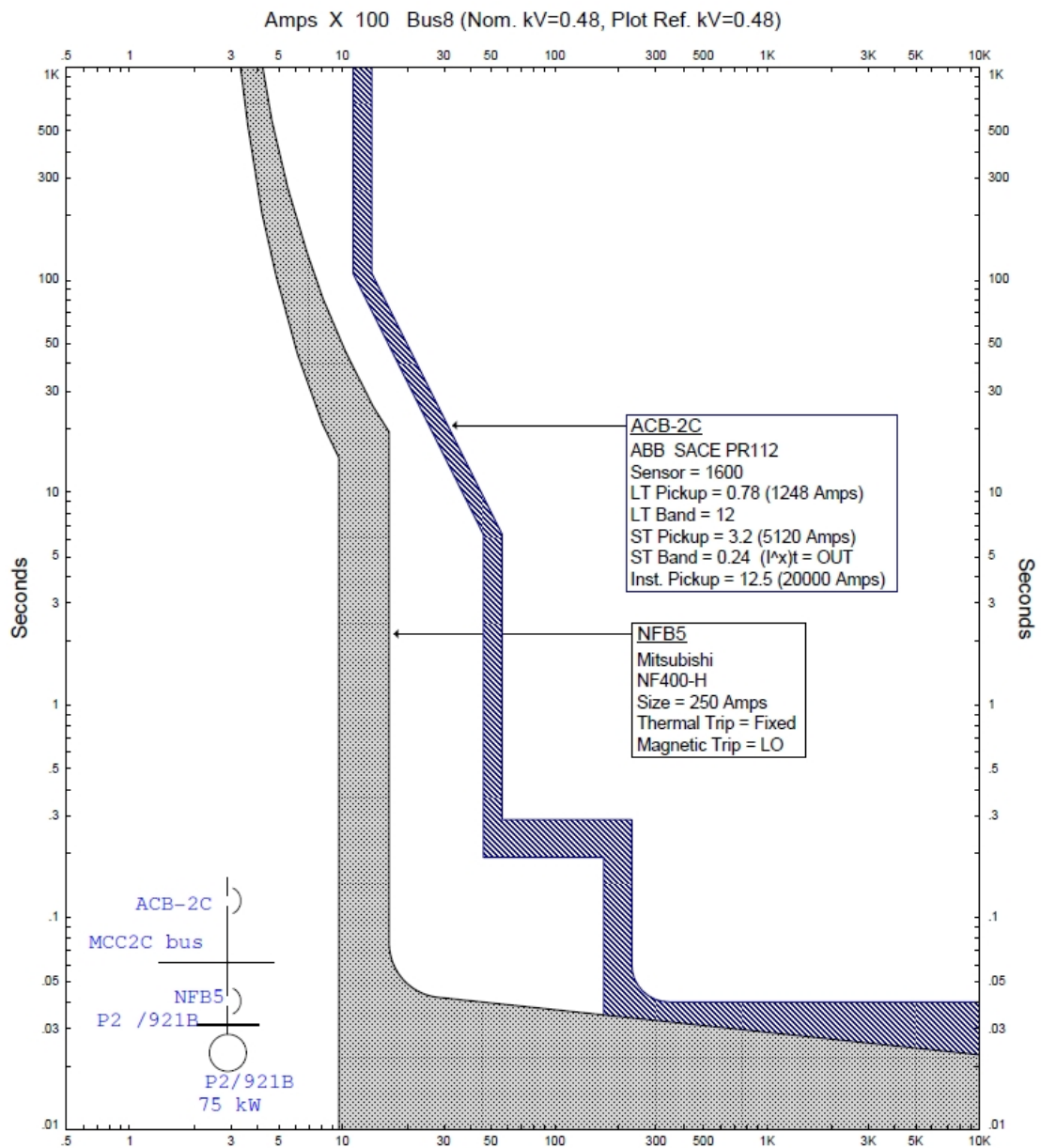


圖 91 範例系統 C 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之四

P2/921B 發生故障時，流經 NFB5 之弧光電流為 3.63kA，NFB5 為瞬跳，跳脫時間為 0.041 秒，而後衛保護跳脫時間為 10.813 秒，協調時間過長，可藉由調整短延時設定(Short time setting)，降低其協調時間。

三、 弧光能量分析與計算

本範例系統進行弧光分析之設備參數如表 32 所示，Bus A、Bus B 及 Bus 2C 為開關箱，電壓等級 3.3kV，導線間距 G 為 102mm，工作距離 D 為 910mm；MCC2C、F2/914 與 P2/921B 為配電盤，電壓等級 480V，導線間距 G 為 25mm，工作距離 D 為 455mm。各匯流排上弧光能量、危險等級與弧光危險距離如表 33 與表 34 所示。

表 32 範例系統 C 之設備參數表

匯流排	電壓 (kV)	設備類型	K	K ₁	K ₂	C _f	G (mm)	D (mm)	x
Bus A	3.3	開關箱	/	-0.555	0	1	102	910	0.973
Bus B	3.3	開關箱		-0.555	0	1	102	910	0.973
Bus 2C	3.3	開關箱		-0.555	0	1	102	910	0.973
MCC2C	0.48	配電盤	-0.097	-0.555	-0.113	1.5	25	455	1.641
F2/914	0.48	配電盤	-0.097	-0.555	-0.113	1.5	25	455	1.641
P2/921B	0.48	配電盤	-0.097	-0.555	-0.113	1.5	25	455	1.641

表 33 範例系統 C 之弧光能量分析

匯流排	電壓 (kV)	短路電流 (kA)	弧光燃燒時間 (s)	弧光能量 (cal/cm ²)	能量等級
Bus A	3.3	38.9	0.274	16.6	3
Bus B	3.3	38.3	0.296	17.7	3
Bus 2C	3.3	22.8	0.261	9	3
MCC2C	0.48	25.1	0.288	14.3	3
F2/914	0.48	3.4	0.043	0.3	無危險
P2/921B	0.48	5.5	0.041	0.5	無危險

表 34 範例系統 C 之弧光危險距離表

匯流排	電壓 (kV)	弧光保護邊界(mm)		限制接近邊界(mm)	管制接進邊界(mm)
Bus A	3.3	13,554		1,524	660
Bus B	3.3	14,426		1,524	660
Bus 2C	3.3	7,194		1,524	660
MCC2C	0.48	2,063		1,068	305
F2/914	0.48	210		1,068	305
P2/921B	0.48	268		1,068	305

四、 弧光警告標籤

本節標籤參考自 NFPA 70E 2012 規定之內容，取 3.3kV 與 480V 兩電壓等級產生弧光警告標籤，如圖 92 與圖 93 所示，標籤內容至少應包含電壓等級、弧光能量或危險等級，以及各限制接近邊界，而最新 NFPA 70E 2015，已將最內層之禁止接近邊界刪除，未來無需標示，且弧光能量與危險等級不得同時標註。



Warning 警告

Arc Flash and Shock Hazard 電弧和電擊危害

Appropriate Electrical PPE Required 要求適當個人防護具

Equipment Class 設備種類	3300V Switchgear
Grounding Type 接地類型	ungrounded
Available 3Ph Fault Current 短路電流	38.9kA
Working Distance 工作距離	910 mm
Incident Energy at Work Distance 弧光能量	16.6 cal/cm ²
Arc Flash Boundary (AFB) 弧光保護邊界	13554 mm
Incident Energy at AFB 於弧光保護邊界時之能量	1.2 cal/cm ²
Hazard Risk Category 弧光危險等級	3
Limited Approach Boundary 管制接近邊界	1524 mm
Restricted Approach Boundary 限制接近邊界	660 mm
Prohibited Approach Boundary 禁止接近邊界	148 mm

Equipment Name 設備名稱
BusA

2014/11/21

圖 92 電壓等級 3.3kV 之弧光警告標籤



Warning 警告

Arc Flash and Shock Hazard 電弧和電擊危害

Appropriate Electrical PPE Required 要求適當個人防護具

Equipment Class 設備種類	480V MCC & Panels
Grounding Type 接地類型	grounded
Available 3Ph Fault Current 短路電流	25.1kA
Working Distance 工作距離	455 mm
Incident Energy at Work Distance 弧光能量	14.3 cal/cm ²
Arc Flash Boundary (AFB) 弧光保護邊界	2063 mm
Incident Energy at AFB 於弧光保護邊界時之能量	1.2 cal/cm ²
Hazard Risk Category 弧光危險等級	3
Limited Approach Boundary 管制接近邊界	1068 mm
Restricted Approach Boundary 限制接近邊界	305 mm
Prohibited Approach Boundary 禁止接近邊界	25 mm
Equipment Name 設備名稱	MCC2C

2014/11/21

圖 93 電壓等級 480V 之弧光警告標籤

第八章 結論與建議

第一節 結論

- 一、電弧閃光事故的發生，主要都為外部物體侵入、人為疏失、不慎的接觸與不恰當的工作程序所造成，而電弧閃光發生時，所伴隨的高溫高壓將產生爆炸，並對設備及人員造成包括視力或聽力的損害、燒傷、灼傷，嚴重的話甚至會死亡，國內外亦有許多電弧閃光案例，因此為了保持作業安全，工作人員應盡量避免活電作業，以降低電弧閃光的危害。
- 二、美國 NEC 詳細規定具有弧光危險區域需標註警告標籤，OSHA 明訂員工暴露於電氣危險場合時，雇主與勞工間之法律責任，IEEE 1584 則專門為弧光能量計算方法而編之指導文件，NFPA 70E 詳細規範個人防護具。然而國內卻無專門針對弧光意外之相關法規。
- 三、電弧閃光事故之預防，必須先進行弧光分析與危險等級評估，以為雇主與勞方於弧光事故預防與改善之參考，國外弧光危害分析主要仍依據 IEEE 1584 與 NFPA 70E。IEEE 1584 於考慮的環境條件比 NFPA 70E 嚴謹許多，於危害等級分析，NFPA 70E 採用查表方式雖較為簡單與快速，但較難完整的涵蓋所有的電氣條件。
- 四、現場訪視發現國內事業單位對於人員電氣事故皆相當重視，並有許多相關保護措施，為防止電氣設備維修時發生意外，維修前各廠家皆要求維修申請證以及在維修之配電箱上掛牌，告知其他人員設備處於故障狀態並不得送電。但對於電弧閃光的認識，多數廠家並未具有充足之相關知識，不了解電弧閃光發生時之嚴重性，因此並未進行弧光分析，在個人防護具方面，也不一定能在適當的時機穿著。
- 五、本研究依典型事業單位之電氣系統，建立配電箱(盤)電弧閃光灼傷危害計算之實際範例，並進行弧光事故分析，並產生各母線之警告標籤。
- 六、在傳統的電力系統過電流保護架構中，保護設備間須能協調，越下游匯流排，其短路電流標么值也越小，因此經由弧光分析可知，弧光能量係依上下

序遞減，電壓等級越低能量也隨之減少。

第二節 建議

- 一、國內對於弧光的認識近幾年才開始，隨著整個電力系統越來越大，弧光的危險也是隨之增加，建議透過教育訓練或宣導活動，讓工程界人員深入了解弧光事故對設備及人員的危害。
- 二、建議國內未來於弧光危害等級之評估與分析方式，包含電弧閃光保護邊界之決定與個人防護具之選用，採用 IEEE 1584 標準較為適當。
- 三、歐洲產製之配電箱(盤)有部分具有耐電弧與洩壓閥之構造，建議國內也可進行配電箱(盤)結構上之研究，並制定配電箱使用之標準。
- 四、建議持續進行改善個人防護具之研究，降低因太重不易移動或視線不佳，造成工作時意外增加等問題。
- 五、短路電流與弧光燃燒時間為決定弧光能量的最主要因素，在整個系統架構確定的情況下，短路電流為定值，因此縮短弧光燃燒時間為減少弧光能量的主要方法，建議針對降低弧光能量進行研究，藉由改善保護設備結構或弧光電驛等方式，降低斷路器跳脫時間，以減低弧光能量。

誌謝

本研究計畫參與人員除本所蘇文源副研究員外，另包括國立臺灣科技大學電機工程系辜志承教授、賴皓鋒、沈牧民、陳泰宇研究生，私立華夏技術學院電機工程系關錦龍副教授等，謹此敬表謝忱。

參考文獻

- [1] 李建基,「開關設備中的故障電弧及其防護」,電力設備,第5卷,第2期,第41-43頁,2004。
- [2] ALLIANT ENERGY 網站 <http://www.alliantenergy.com/index.htm>
- [3] http://70earcprotection.com/Home_Page.html
- [4] 曾元超,「電弧危害的防範」,台電月刊五月號,第545期,第31-36頁,2008。
- [5] National Fire Protection Association. NFPA 70E: Standard for Electrical Safety in the Workplace. Ma, U.S.A.; 2015.
- [6] D. R. Doan, J. K. Slivka, C. J. Bohrer, “A summary of arc flash hazard assessments and safety improvements,” IEEE Transactions on industry applications, vol. 45, no. 4, pp. 1210~1216, July/August 2009.
- [7] <http://www.epochtimes.com/b5/6/4/4/n1276927.htm>
- [8] 徐明定,「電弧防護裝備選用實務」,台電公司工安環保處,2009。
- [9] <http://news.e2.com.tw/utf-8/2013-9/5298424.htm>
- [10] <http://www.safetyandhealthmagazine.com/articles/human-error-often-causes-arc-flash-accidents-2>
- [11] <http://ecmweb.com/arc-flash/case-deadly-arc-flash>
- [12] <http://www.hse.gov.uk/press/2011/coi-nw-46hayes.htm>
- [13] <http://press.hse.gov.uk/2013/firm-fined-after-electrician-suffers-burns/>
- [14] <http://www.wokv.com/news/news/local/two-workers-hospitalized-following-csx-incident-un/nfhrN/>
- [15] 張瑞村,「數位局部放電測量應用於高壓電纜終端接頭絕緣狀態之評估」,碩士論文,國立台灣科技大學,2005。
- [16] Occupational Safety and Health Administration. 29 CFR Part 1910: Occupational Safety and Health Standards. D.C., U.S.A.; 2010.

- [17] http://en.wikipedia.org/wiki/National_Electrical_Code
- [18] National Fire Protection Association. NFPA 70: Nation Electrical Code. Ma, U.S.A.; 2014.
- [19] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE 1584: IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations; 2002.
- [20] 施耐得電機網站 <http://www.schneider-electric.com>

附錄一 各範例系統保護電驛設定值

一、範例系統 A 之保護電驛設定

(一) 高壓斷路器

設備名稱	製造商	型號	特性曲線	CT 比	設定值		
					TAP	TIME DIAL	INST.
Relay1	ABB	SPAJ 140C	正常反時	150:5	0.51	0.13	
Relay2	ABB	SPAJ 140C	極度反時	30:5	1.27	0.21	16.9

(二) 低壓斷路器

設備名稱	製造商	型號	Ir	Is	Ii	Tl	Ts
ACB	ABB	PR331/P	0.675	0.6	15	3	0.3
NFB1	MG	STR 28D	0.8		1.5	Fixed	
NFB2	GE	SMR1	1		7	Fixed	
NFB3	GE	SMR1	1		7	Fixed	

二、範例系統 B 之保護電驛設定

(一) 高壓斷路器

設備名稱	製造商	型號	特性曲線	CT 比	設定值		
					TAP	TIME DIAL	INST.
Relay1	ABB	SPAJ 140C	正常反時	1200:5	0.85	0.13	
Relay2	ABB	SPAJ 140C	正常反時	500:5	1.01	0.1	
Relay3	ABB	SPAJ 140C	正常反時	3000:5	1.06	0.06	
Relay4	ABB	SPAJ 140C	正常反時	150:5	1.05	0.05	
Relay5	ABB	SPAJ 140C	正常反時	500:5	0.95	0.05	
Relay6	ABB	SPAJ 140C	正常反時	1500:5	0.83	0.05	

(二) 低壓斷路器

設備名稱	製造商	型號	Ir	Is	Ii	Tl	Ts
PCB1	ABB	SACE PR111	0.7	2		Curve A	Curve A

三、範例系統 C 之保護電驛設定

(一) 高壓斷路器

設備名稱	製造商	型號	特性曲線	CT 比	設定值		
					TAP	TIME DIAL	INST.
Relay1	W-H	CO8	正常反時	150:5	6	1.5	48
Relay2	P&B	PBSJ 120	極度反時	3000:5	0.9	0.15	
Relay3	P&B	PBSJ 120	極度反時	1500:5	0.9	0.4	
Relay4	P&B	PBSJ 120	極度反時	300:5	0.7	1	

(二) 低壓斷路器

設備名稱	製造商	型號	Ir	Is	Ii	Tl	Ts
ACB-2C	ABB	SACE PR112	0.78	3.2	12.5	12	0.24
NFB2	Mitsubishi	NF 400-H	Fixed				
NFB5	Mitsubishi	NF 400-H	Fixed				

附錄二 防止配電箱（盤）電氣作業產生電弧閃 光灼傷危害之技術指引

本技術指引參考美國NEC、NFPA 70E、IEEE 1584標準及OSHA 29 CFR等規範。

本指引的內容包含：

- 一、簡介。
- 二、適用範圍。
- 三、詞彙。
- 四、電弧灼傷危害之可能要因。
- 五、相關技術規定與做法。
- 六、電弧灼傷危害分析。
- 七、實際範例。
- 八、結語
- 九、參考文件。

一、簡介

本技術指引目的係在建立配電箱（盤）電氣作業之電弧閃光灼傷危害分析與計算的相關技術規定與做法及實際範例等，以提供相關事業單位規劃及執行的參考，減低工作人員因電氣作業電弧閃光導致的灼傷事故。

電弧閃光危害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，在單位面積用電量越來越大下，變壓器容量也不斷提升，這也造成變電站短路電流提高，若在配電盤發生電弧閃光事故，其電弧閃光能量會非常容易造成人員與設備嚴重的傷亡與損失。

電弧閃光事故的危害是可以減低的，其關鍵在於減少故障電流大小與電弧閃光持續時間。在系統方面，可透過系統設計規劃來降低故障電流的大小。在保護設備方面，縮短斷路器與電力熔絲的跳脫時間、保護協調重新規劃調整或使用專門的電弧閃光保護系統等，都可以減少電弧閃光的持續時間，降低電弧閃光事故發生時的電弧閃光能量。

此外，在可能發生電弧閃光事件的工作區域，也必須張貼警告標示，在此區域從事

活電作業的工作人員，也須穿著適合的個人防護裝備，以免電弧閃光事故發生時，人員遭受到電弧閃光事故的危害。

本索引的重點在於分析與計算配電盤的電弧閃光能量與電弧閃光保護邊界，產生電弧閃光警告標示，作為國內事業單位參考改進依據。

二、適用範圍

(一) 涵蓋

為受雇人員的工作場所，如電導體的安裝、檢查及與安全相關的維護、更新和其他管理上的控制。

- (1) 電導體和提供電力連接的設備如配電箱（盤）。
- (2) 由電力公司供電的場所，如辦公大樓、倉庫、車庫、機械工場和發變電廠或控制中心。

(二) 不涵蓋。

- (1) 船舶、漂浮的建築物、火車、航空器及汽車車輛。
- (2) 通信設備。

三、詞彙

配電箱(盤)：依據電氣接線要求將開關設備、測量儀錶、保護電器和輔助設備組裝在封閉或半封閉金屬櫃中，所構成的低壓配電裝置。

電弧閃光：由於電場過強，氣體發生電崩潰而持續形成電漿體，使得電流通過了通常狀態下的絕緣介質（例如空氣）的現象，所產生的瞬間火花。

故障電流：電氣設備在工作過程中，因某種原因喪失原規定功能或危害電力系統安全所產生的電流。

斷路器：又稱為遮斷器，為一種過電流保護之裝置，可使用於室內配線上使用之總開關與分電流控制開關，亦可有效的保護電器的重要元件，主要用作短路保護和防止嚴重超載，工業機器上的馬達負載保護也會指定使用斷路器做為保護裝置之一。

電弧閃光保護邊界：為 1.2cal/cm^2 (或 5J/cm^2)能量時電弧閃光源與工作者的距離，也就是皮膚受到可治癒的 2 級灼傷的最小距離。

個人防護裝備：穿著能耐受所計算的電弧能量，分為 4、8、25、40 cal/cm² 等四個電弧閃光能量等級。

電弧閃光警告標示：在此區域從事活電作業的工作人員，必須穿著適合的個人防護裝備，以免電弧閃光事故發生時，人員遭受到電弧閃光事故的危害。內容包含了該設備的弧光保護邊界、事故能量、危險等級與各種限制接近邊界等資訊

四、電弧灼傷危害之可能要因

(一)配電箱(盤)電弧閃光之原因

電弧閃光短路的導因，主要可以分成兩個部分，第一個部分為外部的物體侵入，包括昆蟲或動物的入侵、雜質、灰塵汙染或濕氣結露滲透等；或者人為疏失，如工具不小心觸碰到電源、工具遺落在盤內，導致與電源接觸和不恰當的工作程序等。第二部分為設備故障，例如缺乏定期維護保養，導致設備或導電體絕緣劣化破壞，此外，保護協調時間設定不當，過電壓、過電流與過載等因素也會造成設備故障。當導電體絕緣劣化時，劣化的導電體會產生部分放電，並且產生熱、光、聲音與化學反應一起擴散出現，導致電弧閃光短路的發生[1]。

(二)電弧閃光之現象

在兩根電極之間加電壓，彼此慢慢的靠近，當兩根電極靠近到一定距離時，電極間會產生火花，此時導體電流由一電極，經過以游離化氣體路徑，流到另一根電極，所產生的高溫氣體導電現象，就像是電焊機正常操作時出現電弧閃光，這就是所謂的電弧閃光短路。

當空氣溫度升高時，空氣將具有導電性，電弧閃光電組的大小不一定，電弧閃光短路電流的大小也不一定，電弧閃光是一種隨時間變化的非線性電阻元件，而電弧閃光故障也是一種可以用數學統計方法描述的隨機物理現象[1]。

當電弧閃光發生時，將發生下列現象[2]：

- A. 當電弧閃光短路現象發生時，發生點將產生極高的溫度，大約為太陽表面溫度的 4 倍高(20,000°C)，周圍物品會被這高溫所加熱熔化。
- B. 銅金屬被電弧閃光短路產生的巨大高溫所氣化，體積膨脹約 76,000 倍。
- C. 周圍的金屬設備因為電弧閃光短路產生的巨大高溫，也開始融化。

- D.電弧閃光短路會導致可見光與不可見光的放射，距離發生點約 6 到 7 公尺處，所產生的照度可達 9,000 勒克斯。
- E.燃燒中的電弧閃光會使周圍空氣升溫，造成空氣膨脹擴散，於配電盤內部產生巨大的壓力。
- F.電弧閃光產生的壓力達臨界，爆炸的壓力波開始向外擴散。
- G.在電弧閃光短路所產生的爆炸同時，巨大的聲響產生。
- H.被電弧閃光短路高溫所熔化的碎片隨著爆炸的產生，一同迸射出來。

此外，電弧閃光故障的電弧閃光以 100m/s 的速度快速移動，是非常危險且具破壞性的，電弧閃光源快速移動，沒有一定的路徑，特別是引發燃燒效應時，設備與導線被高溫熔斷，接地故障可在 0.1ms 內快速的擴大變成三相接地故障。

電弧閃光的燃燒常常發生在盤門、盤壁及匯流排等地方，燃燒效應會熔斷設備與導線，因而釀成火災。在配電盤附近的工作人員，身體會因高溫而灼傷，衣服也因為著火熔化，使傷勢加重。爆出的氣體可能含有一氧化碳、銅或鋁氣等有毒氣體，造成身體的傷害[1]。

(三)電弧閃光之影響

電弧閃光造成的傷害很多，就人員的傷害來說，包括視力或聽力的損害、燒傷、灼傷，嚴重的話甚至需要進行皮膚移植與復健，再更嚴重的話，可能會導致死亡。電弧閃光也會造成儀器與設備的損毀，包括配電盤體、斷路器、比流器、比壓器等設備。電弧閃光會造成光害，使人目眩、與暫時失明，也會產生高溫與高壓，釀成爆炸與火災。電弧閃光造成設備燒毀，人員傷亡，對於人們的生命與財產上，都是重大的危害[3]。

根據美國燒傷協會(American Burn Association, ABA)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，除了感電防護外，如何避免電弧閃光發生時被灼傷，尤其是衣服的點燃與熔化，熔化的衣服質料會增加傷口清理費時，這是防範電弧閃光傷害的重點之一。嚴重電弧閃光事故，也可能使受害者遭受視力損害、聽力損失以及呼吸、肌肉、骨骼或神經系統的損傷[4]。

電弧閃光危害分析最重要也最根本的要素就是電弧閃光能量的預測，電弧閃光能

量單位一般以 cal/cm² 或 J/cm² 表示，IEEE 1584 與 NFPA 70E 有詳細的計算方程式，利用這些方程式可以求得電弧閃光保護邊界，也就是皮膚受到可治癒的 2 級灼傷，電弧閃光能量為 1.2cal/cm²(或 5J/cm²)能量時電弧閃光源與工作者的距離[1]。若要進入此邊界內進行活電作業，則需再計算距離電弧閃光發生點的工作者身上所承受的電弧閃光能量，並且要穿著能耐受所計算電弧能量的個人防護裝備。NFPA 70E 2015 年表格 130.7(c)(16)將電弧閃光個人防護具 (Arc Flash PPE) 分為 4、8、25、40 cal/cm² 等四個電弧閃光能量等級並且搭配建議保護衣著裝備。如果在電弧閃光能量可能大於 40 cal/cm² 的風險場所工作，則建議應採取停電作業。

五、相關技術規定與做法

(一)NEC

美國國家電氣規範 (National Electrical Code, NEC)由 19 個法律編定與相關技術委員會所制定，並被美國國家標準學會(ANSI)批准，正式名稱為 ANSI/NFPA 70，首次出版於 1897 年，並每三年發布一次，2014 年為最新版本。儘管 NEC 被稱為電氣最低標準，仍被美國許多管轄區視情況添加或刪減法條並使用[5]。

其中 NEC 110.16 規定:「所有於送電中須進行測試、調整及維護之電氣設備，諸如開關盤、配電盤、工業控制盤或電動機控制盤，必須在可能會發生電弧閃絡的設備上標示”電弧閃絡危險”之警告標記」，如圖 1[6]。



圖 1 美國電器規範之電弧閃光標記

(二)OSHA

美國職業安全衛生署(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)，係一執行法規之機構，其中 OSHA 29 CFR 1910.333 至 OSHA 29 CFR 1910.335，主要內容為員工暴露於電氣危險之區域時，員工與業主兩者間之法律責任等相關規定，如以下規定。

1.OSHA 1910.132(d)

需於弧光保護邊界內執行工作時，應進行弧光閃烙故障分析，業主並應文件說明工作人員可能遭受之事故能量等級(cal/cm²)。

2.OSHA 1910.269(I)(6)

員工依於執行特定任務所可能遭受到之事故能量，須穿抗燃性衣著及相應之個人防護具。OSHA 將會調查嚴重之工安事故，要求調閱員工電氣安全訓練紀錄及弧光閃烙危害等級之評估報告，若忽略以上任何一項，將可能遭受罰款及受傷員工所提起之法律訴訟。

3.OSHA 1910.333

員工於工作時，若可能曝露於附近有帶電體之環境中，除非業主能證明若斷電將導致或增加不可預測的危險性，否則此帶電體應先斷電，基本要求是將任何對地電壓高於 50V 之帶電體予以斷電。

4.OSHA 1910.335(a)(1)(i)

員工於具有潛在電氣危險之區域工作時，應裝配或具備於工作時足以適當保護身體特定部位之電氣保護設備。

(三)IEEE 1584

美國電機與電子工程協會(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)之 IEEE 1584[7]，係美國編訂 NESC 法規的 IEEE(編訂 NESC 之組織)，專為計算電弧閃絡的故障電流、危害邊界與事故能量而編的指導文件，此文件特別之處是因所使用之計算公式較複雜，所以使用者依需要可與設計妥之 Excel 軟體程式一起購買。2002 年提出弧光能量數學計算模型，這些計算式根據 1990 年起執行的實驗資料，經過分析研究後而發展出之弧光能量分析公式，主要功能為分析開關箱之弧光能量與弧光危險距離，與 NFPA 的弧光能量計算式比較，參數相對於複雜與繁多，但是計算結果較為準確，應用範圍也更加廣泛，是弧光能量計算上重要的里程碑。

(四)NFPA 70E

NFPA 70E 是美國編訂 NEC 規範的美國防火協會(NFPA)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，對活電工作防範弧光閃絡危害等相關措施有一系列標準做法與建議，最新的 2015 年版，包括弧光危害評估、弧光計算與分類、防護配備標準以及防護具如何搭配選用等都詳細規範[8]。

1.電弧閃光發生之接近邊界

(1)觸電分析

觸電分析應包括電壓等級、保護邊界以及個人保護配備，以降低處電人員觸電的可能性。

(2)電弧閃光接近邊界

電弧閃光接近邊界包含管制接近邊界、限制接近邊界與弧光保護邊界，其中管制接近邊界與限制接近邊界的決定無須計算，根據電壓等級將有對應之邊界距離。

2.個人保護配備

NFPA 70E 將弧光能量的危險等級(Hazard / Risk Category)共分成四類，危險等級代表危險的標準，不同的危險等級須配合不同的個人防護具(Personal Protective Equipment, PPE)，個人保護配備須具有可移動性及可視性，當進入弧光保護邊界時，須穿著個人保護配備才可入。NFPA 70E 依據身體不同部位，分別規範適當的個人保護配備，如下所示。

(1)弧光保護套裝(Arc flash suits)

弧光保護套裝之設計應使人員在穿著後，能容易且快速地移動，且整體保護套裝(包含頭罩之面罩)之弧光等級須能承受弧光能量。

(2)頭部保護

在弧光保護邊界內應戴用弧光等級面罩(face shield)與弧光等級大絨帽(balaclava)，而允許弧光等級頭罩(hood)取代弧光等級面罩與弧光等級大絨帽。

當弧光能量超過 12 cal/ cm²時，應戴用弧光等級頭罩。

(3)臉部保護

面罩之弧光等級須能承受弧光能量，並且有綁緊之護罩完整的包覆臉部、下巴、額頭、耳朵、脖子等區域。穿戴面罩或頭罩時，應戴用安全眼鏡或安全護目鏡等眼睛保護裝置。

(4)手部保護

當進入弧光保護邊界時，人員須穿戴防護手套，根據電弧閃光強度不同，而有不同的保護材質。

A.觸電保護

在有可能觸電或接觸帶電導體的情況下，人員須穿著橡膠絕緣手套，NFPA 70E 內詳細規範橡膠絕緣手套的使用情況。

B.電弧閃光保護

當人員處於可能發生電弧閃光能量場合時，需穿著厚(heavy-duty)皮革手套或弧光等級手套。

當穿戴膠絕緣手套防止感電時，皮革保護套應穿於橡膠絕緣手套外部。

(5)足部保護

厚皮革工作鞋可提供足部某些弧光保護，當弧光能量大於 4 cal/cm^2 時，人員須穿著厚皮革工作鞋。

NFPA 70E 規定身體各部位所需之個人保護配備後，根據弧光能量的危險等級，要求各危險等級所需之保護衣物及保護設備。

(五)國內防止電弧閃光灼傷危害相關法規

儘管國外以有許多電弧相關文獻及研究，但國內尚未真正重視電弧閃光灼傷危害的嚴重性，多數國內企業單位也並未擁有電弧相關知識，因此目前並無明確定義電弧灼傷危害的相關法規，但根據「職業安全衛生法第 6 條第 1 項第 3 點」，內容提及：雇主對下列事項應有符合規定之必要安全衛生設備及措施(三、防止電、熱或其他之能引起之危害)，因此法規雖無詳細規範電弧意外發生之責任，但雇主仍有義務防止電弧的發生，以及確保人員的安全。

六、電弧灼傷危害分析

弧光閃絡事故造成人員與設備相當大的生命與財產上的威脅，為了減少弧光閃絡事故的危害，第一步就是要做現場與設備的弧光危險評估，根據 IEEE 1584 與 NFPA 70E 所提供的弧光分析模型，預測弧光危險區的弧光能量，並依照 NFPA 70E 建議的危險等級區分，做好相對應個人防護裝備的挑選，此外，在弧光危險區也需標示弧光警告標示，如此一來才能有效的減少弧光事故所帶來的傷害與損失。

(一)分析流程

為了減少弧光事故的傷害與損失，弧光閃絡的分析是不可或缺的，本文之分析方式參考自 IEEE 1584 之指導文件[7]，其分析流程如下：

1.蒐集系統與現場安裝資料

收集系統單線圖，包括變壓器、傳輸線、迴路分佈、保護電驛、電容器、含保護設備之斷路器、無熔絲開關型號、電壓等級等等，各元件之參數。

2.決定系統操作方式

除了系統參數外，系統的操作方式也將影響短路電流的大小，例如系統含一個或多個饋線、備用匯流排斷路器開關狀態、MCC 由一個或多個饋線供應、發電機使用中或備用等等。

3.計算三相短路電流

根據系統單線圖，利用商業軟體計算出短路電流，並考慮電流反時特性曲線，而弧光分析所需之短路電流為三相短路電流。

4.計算弧光閃絡電流

利用三相短路電流將可計算弧光閃絡電流，由於電弧產生時將帶有電弧阻抗，因此一般而言弧光電流將會比三相短路電流小，在 1kV 以下之低壓系統尤其明顯。

5.依據保護方式預測故障清除時間

電弧閃光燃燒時間將影響電弧能量的大小，根據電流反時特性曲線及不同保護設備，須選用不同的時間，如保險絲由清除時間來決定持續時間、斷路器由跳脫時間來決定。

6.蒐集系統電壓及導線間距

蒐集每個匯流排之系統電壓及導線間距，IEEE 1584 與 NFPA 70E 皆有導線間距典型值之相關規範。

7.選擇工作距離

電弧閃光能量定義為電弧閃光發生地點與人員之臉與胸接觸面之距離，而非與手的距離，因此在電弧閃光分析上，將採用 IEEE 1584 規範之典型值。

8.計算弧光能量

透過 IEEE 1584 與 NFPA 70E 之經驗公式，帶入以上參數並計算弧光能量以決定適當之個人防護具。

9.計算弧光保護邊界

利用計算弧光能量之公式反推，並帶入人可承受之最低弧光能量 1.2 cal/cm^2 ，得到弧光保護邊界。

(二)能量模型

IEEE 1584 與 NFPA 70E 是國際間弧光分析重要的參考標準，IEEE 1584 所提供的弧光能量計算方程式，適用範圍電壓從 208V 到 15kV，短路電流從 0.7kA 到 106kA，而 NFPA 70E 附錄 D 中規範，電壓等級 600V 以上之開放式無箱體設備(open air)，其弧光能量與弧光危險距離之計算參考 Lee 所提出的計算公式，且其計算之能量隨電壓等級增加而越趨保守；電壓等級 600V 以下，則參考 Doughty, et al.提出之計算公式，適用範圍短路電流從 16kA 到 50kA。因此從適用的電壓與短路電流範圍作比較，IEEE 1584 適用範圍明顯比 NFPA 70E 寬廣許多，IEEE 1584 作弧光分析之前，必須收集系統參數，如系統電壓、短路電流、導體間距、接地類型與設備類型等，方程式的變數較 NFPA 70E 的變數為多，NFPA 70E 在弧光能量計算，相對保守許多，IEEE 1584 因為計算繁複，準確度也比較高。而且 NFPA 70E 的計算方程式適用於低壓的配電系統，於中高壓的輸電系統並不在其適用範圍。

弧光閃絡產生的弧光能量單位一般以 cal/cm^2 或 J/cm^2 表示，弧光閃絡的熱效應比一般火焰還嚴重，可以耐燃或防感電的質料未必可以抵抗。雖然弧光事故發生週期甚短(通常少於 1 秒)，但是弧光能量有可能超過 100 cal/cm^2 以上，而且有金屬融化物噴出，而火焰事件能量僅達 30 cal/cm^2 間，也沒有濺出物，因此弧光閃絡的危險特性是遠大於火焰。若在封閉空間發生弧光閃絡事故，其威力比在開放空間發生時大 3 倍以上，亦即發生在封閉開關箱中的弧光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，箱體受弧光閃絡的破壞，將會融化與變形，噴出物可能傷及附近的工作人員與設備，所以美、加等國早已開始設計產製與應用各種類型的耐弧光故障的開關設備，相關抗電弧 (Arc-Resistant) 開關設備規範如 IEEE C37.20.7 與 IEC 62271 等文件[1]。

1. IEEE 1584

IEEE 1584 的弧光分析方程式，係透過三相短路電流計算，以討論弧光電流、弧光能量與弧光危險距離之關係。其中弧光分析輸入參數參考表分別如表 1、表 2 及表 3 所示[7]。表 1、表 2 及表 3 別為系統電壓與典型導體間距及距離係數、設備電壓等級與典型的工作距離、及設備電壓等級與典型母線間距對照表，是參考 IEEE 1584 提供的弧光分析輸入參數參考對照表，使用者可依據計算的現場電壓等級與設備類型

選擇適當的典型工作距離、典型導體間距與距離係數來計算弧光電流、弧光能量與弧光危險距離。

表 1 系統電壓與典型導體間距及距離係數對照表

系統電壓(kV)	設備種類	典型導體間距(mm)	距離係數(x)
0.208~1	開放式	10~40	2.000
	開關箱	32	1.473
	馬達控制中心與配電盤	25	1.641
	電纜	13	2.000
>1~5	開放式	102	2.000
	開關箱	13~102	0.973
	電纜	13	2.000
>5~15	開放式	13~153	2.000
	開關箱	153	0.973
	電纜	13	2.000

表 2 設備種類與典型工作距離對照表

設備電壓等級	典型工作距離(mm)
15KV 開關箱	910
5KV 開關箱	910
低壓開關箱	610
低壓馬達控制中心及配電盤	455
電纜	455
其他	依現場情況決定

表 3 設備種類與典型母線間距

設備種類	典型母線間距(mm)
15kV 開關箱	152
5kV 開關箱	104
低壓開關箱	32
低壓馬達控制中心及配電盤	25
電纜	13
其它	未要求

(1)弧光電流

IEEE 1584 依短路電流用於計算弧光電流(I_a)之公式根據電壓範圍來區分，分別為 208V~1.0kV 與 1.0kV~15kV，而超過 15kV 以上，則使用 Lee Method 來計算。不同電壓範圍的弧光電流公式如(1)、(2)及(3)所示[7]。

(a)系統電壓：0.208kV~1.0kV

$$\lg I_a = K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.0966V + 0.000526G + 0.5588V(\lg I_{bf}) - 0.00304G(\lg I_{bf}) \quad (1)$$

(b)系統電壓：1.0kV~15kV

$$\lg I_a = 0.00402 + 0.983 \lg I_{bf} \quad (2)$$

(c)系統電壓：15kV 以上

$$I_a = I_{bf} \quad (3)$$

其中

lg : \log_{10}

I_a : 弧光電流(kA)

K : 箱體係數(開放式取-0.153，密閉式取-0.097)

I_{bf} : 短路電流(kA)

V : 系統額定電壓(kV)

G : 導體間距離(mm)

(1)與 (2)式經整理後可得弧光電流 I_a 為：

$$I_a = 10^{\lg I_a} \quad (4)$$

由於弧光電流難以精準預測，因此透過大量實驗取得經驗公式以計算弧光電流，並利用弧光電流估測保護電驛動作時間，而弧光電流小幅的變動，可能對保護電驛動作時間造成很大的改變。如圖 2，IEEE 1584 比較實際量測之弧光電流與計算所得弧光電流，從菱形曲線中發現大約有 45%至 50%的弧光計算電流比量測值高，最高誤差為 50%，而平均值為-4.2%，而保護電驛反時曲線中，電流越低跳脫時間越長，因此誤差為負值計算出的能量將會相對保守。

IEEE 1584 嘗試將計算之弧光電流降低 85%後重新比較，結果如三角形曲線所示，整體平均值左移為-18.4%，但弧光計算電流比實際量測值高的情況只剩 8.5%，而在有限的參數下欲計算弧光電流，此結果較為符合實際狀況。

因此 IEEE 1584 於 2011 年新增修訂版 IEEE 1584a，規定電壓等級 1kV 以下時，需再次計算 85%的弧光電流，並比較透過兩種弧光電流所求得的弧光能量，取較大的能量做為最後的計算結果。

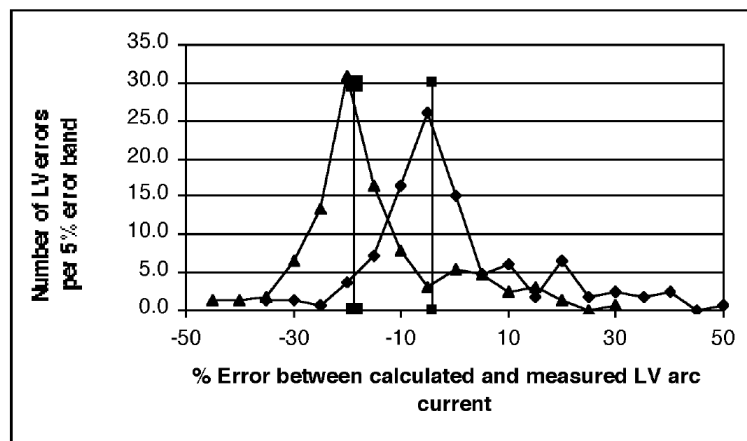


圖 2 低壓弧光電流誤差比較圖

(2)弧光能量

IEEE 1584 依短路電流用於計算弧光能量(E_n)之公式根據電壓範圍來區分，為 0.208kV~15kV 與 15kV 以上，而超過 15kV 以上，則使用 Lee Method 來計算。不同電壓範圍的弧光能量公式如(5)、(6)、(7)及(8)所示。

(a)系統電壓：0.208kV~15kV

$$\lg E_n = K_1 + K_2 + 1.081 \lg I_a + 0.0011G \quad (5)$$

(5)式整理改寫後，如(6)式所示：

$$E_n = 10^{\lg E_n} \quad (6)$$

弧光能量(E)如(7)式所示：

$$E = C_f E_n \left(\frac{t}{0.2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \quad (7)$$

(b)系統電壓：15kV 以上

$$E = 5.12 \times 10^5 V I_{bf} \left(\frac{t}{D^2}\right) \quad (8)$$

其中

lg：log10

E_n ：在弧光持續 0.2 秒，工作距離 610mm 條件下之弧光能量(J/cm²)

E：弧光能量(Incident Energy)(cal/cm²)

C_f ：電壓係數(電壓大於 1kV 取 1，電壓小於 1kV 取 1.5)

D：弧光故障點到人接觸面的距離(mm)

x：導體間距離係數

t：弧光電流持續時間(sec)

K_1 ：箱型係數(開放式取-0.792，密閉式取-0.555)

K_2 ：接地系統係數(接地系統取-0.113，非接地及高阻抗接地系統取 0)

2.NFPA 70E

(1)系統電壓 600V 以下

NFPA 70E 在 600V 以下時，依短路電流用於計算弧光能量之公式，可分成兩類：在開放式無箱體設備的最大弧光能量(E_{MA})，及 20 in.箱體最大弧光能量(E_{MB})，如開關箱、馬達控制中心或其他箱體的電器設備。

(a)開放式無箱體設備的最大弧光能量(E_{MA})

開放式無箱體設備的最大弧光能量(E_{MA})如(9)式所示，其中弧光故障點到人接觸面的距離 D_A 範圍在 18 in.或以上；短路電流 F 範圍從 16kA 到 50kA。

$$E_{MA} = 5271 D_A^{-1.9593} t_A [0.0016 F^2 - 0.0076 F + 0.8938] \quad (9)$$

其中

E_{MA} ：最大開放式無箱體設備弧光能量(cal/cm²)

D_A ：弧光故障點到人接觸面的距離(in.)

t_A ：弧光電流持續時間(sec)

F：短路電流(kA)

(b) 20 in.箱體最大弧光能量(E_{MB})，單面開放式

$$E_{MB} = 1038.7D_A^{-1.4738}t_A[0.0093F^2 - 0.3453F + 5.9675] \quad (10)$$

(2)系統電壓 600V 以上

$$E = \frac{793 \times F \times V \times t_A}{D^2} \quad (11)$$

其中

E：弧光能量(cal/cm²)

D：弧光故障點到人接觸面的距離(in.)

F：短路電流(kA)

V：相對相電壓(kV)

t_A：弧光電流持續時間(sec.)

(三)危險等級與個人防護具之選用

透過電弧閃光分析之公式計算，將可得到電弧閃光發生時之弧光能量，NFPA 70E 將弧光能量分成四種危險等級，不同的危險等級須配合不同的個人防護具，危險等級 0 幾乎沒有危險，危險等級 4 是四個等級中最危險者。隨著危險等級的增加，所需之個人防護具也越多，厚重的防護具將造成移動與操作上的不便，因此個人防護具並非等級越高越佳，選擇適當等級的防護才能最有效的保護工作人員的安全。

1.危險等級之決定

根據 IEEE 1584 與 NFPA 70E 不同之規範，有兩種方法能決定危險等級，IEEE 1584 為應用弧光分析之公式，對應不同的危險等級，NFPA 70E 則為查表的方法，並依據危險等級決定個人防護具，如圖 3，2010 年版 NFPA 70E 規定個人防護具之防護材質為耐火等級(Fire-resistant, FR)，2012 年版則已修定為弧光等級(Arc-rated, AR)。

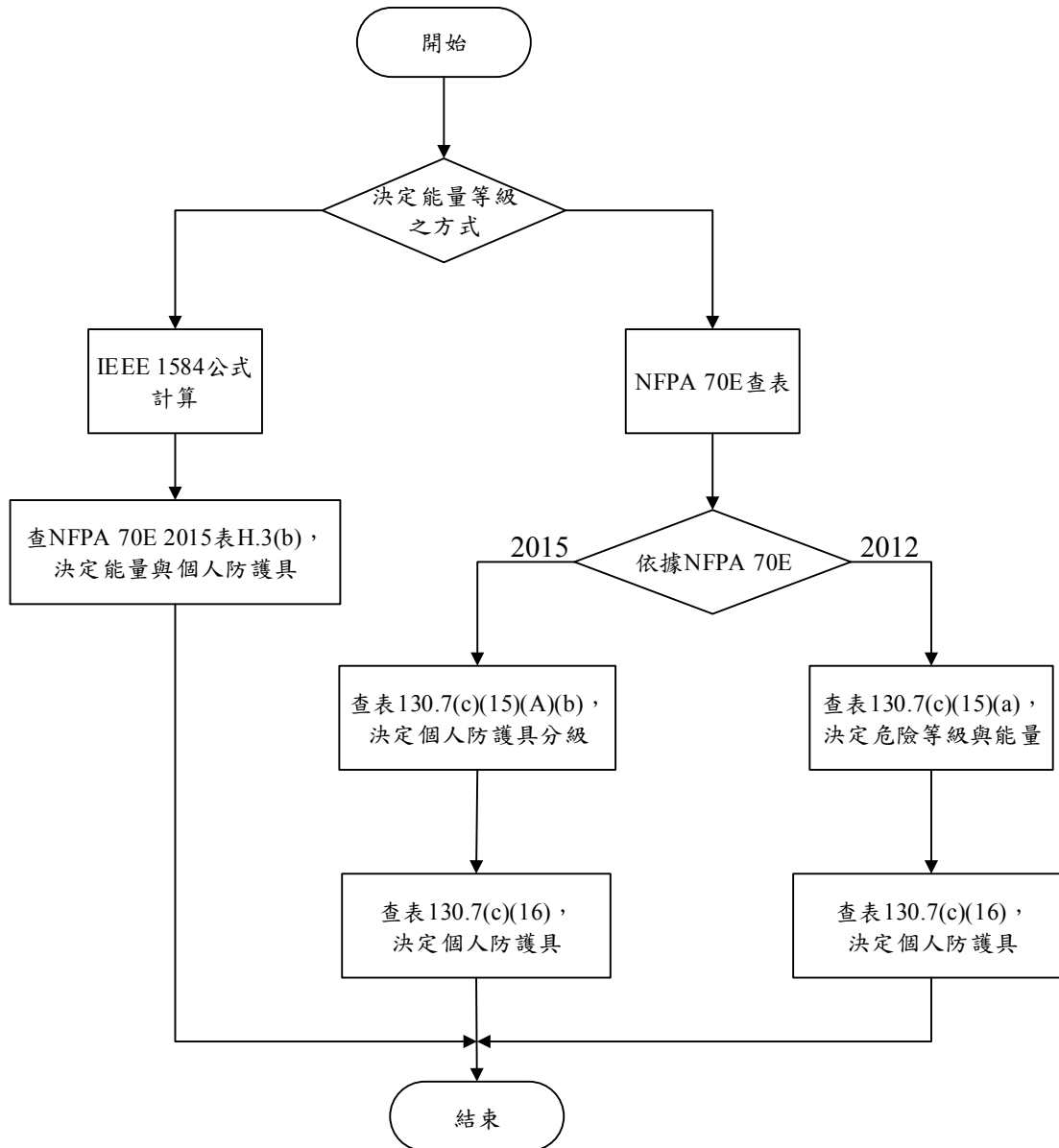


圖 3 弧光能量等級決定與個人防護具選用流程圖

(1)IEEE 1584

透過 IEEE 1584 公式計算可得弧光能量，IEEE 1584 將弧光能量以 $12\text{cal}/\text{cm}^2$ 為基準，簡單分為兩個能量等級，在個人防護具的選擇上，只需依據計算所得之弧光能量，選用足夠承受該能量之個人防護具即可，如表 4 所示。

表 4 弧光危險等級與個人防護具選用

弧光能量	防護衣物	其他個人防護具
小於 1.2 cal/cm ²	不會融化(符合 ASTM F 1506)或未處理之天然纖維的長袖上衣與長褲或衣褲相連工作服(coverall)	防護射出物之面罩(視情況穿戴) 安全眼鏡或安全護目鏡 聽力保護(耳塞) 厚(heavy-duty)皮革手套或橡膠絕緣手套與皮革保護套(視情況穿戴)
介於 1.2 到 12 cal/cm ²	AR 等級長袖上衣與長褲或 AR 等級衣褲相連工作服或電弧閃光套裝(arc flash suit) AR 等級套裝頭罩或 AR 等級面罩與 AR 等級大絨帽(balaclava) AR 等級夾克、風雪大衣(parka)、雨衣、硬殼帽內襯(視情況穿戴)	硬殼帽 安全眼鏡或安全護目鏡 聽力保護(耳塞) 厚(heavy-duty)皮革手套或橡膠絕緣手套與皮革保護套 皮革工作鞋
大於 12 cal/cm ²	AR 等級長袖上衣與長褲或 AR 等級衣褲相連工作服(coverall)及/或電弧閃光套裝(arc flash suit) AR 等級套裝頭罩 AR 等級夾克、風雪大衣、雨衣、硬殼帽內襯(視情況穿戴)	硬殼帽 安全眼鏡或安全護目鏡 聽力保護(耳塞) AR 等級手套或橡膠絕緣手套與皮革保護套 皮革工作靴

(2)NFPA 70E

NFPA 70E 2015 表 130.7(C)(15)(A)(b)根據不同電壓等級、短路電流及電弧燃燒時間等參數，訂定查詢表格，若所有參數都符合規定與條件，可直接選用該防護等級與弧光保護邊界，透過該表取得個人防護具等級後，參考 NAPA 70E 2015 表 130.7(C)(16)選用對應之個人防護具，如表 5。

然而台灣保護設備與系統大多與美國不同，在查表的使用上較難符合條件，且查表所得之弧光等級過於保守，較不建議使用，常見方法仍為透過能量分析方式取得弧光能量及選用個人防護具。

表 5 個人防護具

個人防護具分級	AR 等級衣物	其他個人防護具
1 最小弧光額定能量 4 cal/cm ²	AR 等級長袖上衣與長褲或 AR 等級衣褲相連工作服 (coverall) AR 等級面罩或 AR 等級套 裝頭罩 AR 等級夾克、風雪大衣 (parka)、雨衣、硬殼帽內襯 (視情況穿戴)	硬殼帽 安全眼鏡或安全護目鏡 聽力保護(耳塞) 厚(heavy-duty)皮革手套 皮革工作鞋(視情況穿戴)
2 最小弧光額定能量 8 cal/cm ²	AR 等級長袖上衣與長褲或 AR 等級衣褲相連工作服 AR 等級套裝頭罩或 AR 等 級面罩與 AR 等級大絨帽 (balaclava) AR 等級夾克、風雪大衣、雨 衣、硬殼帽內襯(視情況穿戴)	硬殼帽 安全眼鏡或安全護目鏡 聽力保護(耳塞) 厚皮革手套 皮革工作鞋
3 最小弧光額定能量 25 cal/cm ²	AR 等級長袖上衣 AR 等級長褲 AR 等級衣褲相連工作服 AR 等級套裝夾克 AR 等級套裝長褲 AR 等級套裝頭罩 AR 等級手套 AR 等級夾克、風雪大衣、雨 衣、硬殼帽內襯(視情況穿戴)	硬殼帽 安全眼鏡或安全護目鏡 聽力保護(耳塞) 皮革工作鞋
4 最小弧光額定能量 40 cal/cm ²	AR 等級長袖上衣 AR 等級長褲 AR 等級衣褲相連工作服 AR 等級套裝夾克 AR 等級套裝長褲 AR 等級套裝頭罩 AR 等級手套 AR 等級夾克、風雪大衣、雨 衣、硬殼帽內襯(視情況穿戴)	硬殼帽 安全眼鏡或安全護目鏡 聽力保護(耳塞) 皮革工作鞋

2.個人防護具選用之簡化

當整個電力設備過於龐大、系統過於複雜的情況下，可能需要不同等級的個人防護具，在面對這種情形下，70E Annex H 將個人防護具的分級做適當的簡化，變為兩個等級，如表 6。

表 6 個人防護具選用之簡化

適用之弧光危險等級	防護衣物 ¹
適用弧光危險等級 1 及等級 2	每日工作服 AR 等級長袖上衣與長褲(最低 8 cal/cm ²)或 AR 等級衣褲相連工作服(最低 8 cal/cm ²)
適用弧光危險等級 3 及等級 4	電弧閃光套裝(arc flash suit) 整套衣物防護系統包括: AR 等級長袖上衣與長褲，及/或 AR 等級衣褲相連工作服，及/或 AR 等級外套(coat)與長褲 (衣服防護系統最低 40 cal/cm ²)

註 1：標示於表 6 之其他個人防護具，包含 AR 等級面罩、AR 等級套裝頭罩、AR 等級硬殼帽內襯、安全眼鏡或安全護目鏡、硬殼帽、聽力保護、厚皮革手套、橡膠絕緣手套與皮革保護套等可能被要求穿戴。

(四)弧光危險距離之決定

為了保持用電安全，工作人員應盡量避免活電作業，但當活電作業不可避免時，於接近活電設備的邊界地區工作，需遵守弧光保護的規定。

1.弧光危險距離

NFPA 70E 規定的危險距離標示如圖 4，由中心點開始，分別為活電區、限制區(Restricted space)、限制接近邊界(Restricted approach boundary)、管制區(Limited space)、管制接近邊界(Limited approach boundary)與弧光保護邊界(Arc flash boundary)。

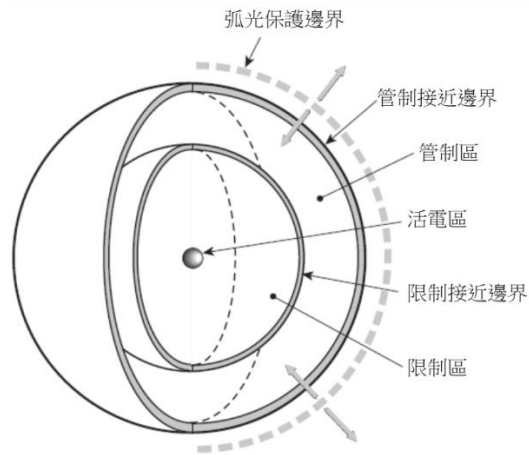


圖 4 電弧閃光接近邊界圖

(1)弧光保護邊界

定義為弧光能量等於 1.2 cal/cm^2 (5 J/cm^2)時，人員與弧光發生處的距離。

(2)管制接近邊界

僅受訓合格人員，方可接近可能暴露活電設備部分的邊界地區，未具資格人員除非有合格人員陪同，否則不可進入。

(3)限制接近邊界

唯有合格人員並需具有適當的電擊防護及個人防護設備，才可進入可能接觸到暴露活電部分的邊界地區。

表 7 接近邊界距離表

系統電壓	管制接近邊界		限制接近邊界
	外露的可移動導體	外露的固定線路部分	
0~50V	無明確規定	無明確規定	無明確規定
50~150V	3.0 m (10 ft 0 in.)	1.0 m (3 ft 6 in.)	避免接近
151~750	3.0 m (10 ft 0 in.)	1.00 m (3 ft 6 in.)	0.3 m (1 ft 0 in.)
751~15kV	3.0 m (10 ft 0 in.)	1.5 m (5 ft 0 in.)	0.7 m (2 ft 2 in.)
15.1~36kV	3.0 m (10 ft 0 in.)	1.8 m (6 ft 0 in.)	0.8 m (2 ft 7 in.)
36.1~46kV	3.0 m (10 ft 0 in.)	2.5 m (8 ft 0 in.)	0.8 m (2 ft 9 in.)
46.1~72.5kV	3.0 m (10 ft 0 in.)	2.5 m (8 ft 0 in.)	1.0 m (3 ft 3 in.)
72.6~121kV	3.3 m (10 ft 8 in.)	2.5 m (8 ft 0 in.)	1.0 m (3 ft 4 in.)
138~145kV	3.4 m (11 ft 0 in.)	3.0 m (10 ft 0 in.)	1.2 m (3 ft 10 in.)
161~169kV	3.6 m (10 ft 0 in.)	3.6 m (8 ft 0 in.)	1.3 m (3 ft 3 in.)
230~242kV	4.0 m (10 ft 8 in.)	4.0 m (8 ft 0 in.)	1.7 m (3 ft 4 in.)
345~362kV	4.7 m (11 ft 0 in.)	4.7 m (10 ft 0 in.)	2.8 m (3 ft 10 in.)
500~550kV	5.8 m (10 ft 8 in.)	5.8 m (8 ft 0 in.)	3.6 m (3 ft 4 in.)
765~800kV	7.2 m (11 ft 0 in.)	7.2 m (10 ft 0 in.)	4.9 m (3 ft 10 in.)

2. 弧光保護邊界之計算

利用弧光保護邊界之定義，弧光能量等於 1.2 cal/cm^2 (5J/cm^2)時，人員與弧光發生處的距離。因此不論是 IEEE 1584 或 NFPA 70E 皆可利用公式的反推，將 $E=1.2(\text{cal/cm}^2)$ 代入弧光能量分析的計算公式，此時得到的弧光危險距離即為弧光保護邊界。

(1) IEEE 1584

電壓範圍在 $1\text{kV}\sim 15\text{kV}$ 時，弧光危險距離可由(7)式反推，如

(11)式所示：

$$D = 610 \left[C_f \left(\frac{E_n}{1.2} \right) \left(\frac{t}{0.2} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (11)$$

電壓 15kV 以上時，弧光危險距離可由(8)式反推，如(12)式所示：

$$D = \sqrt{5.12 \times 10^5 V I_{bf} \left(\frac{t}{1.2} \right)} \quad (12)$$

(2) NFPA 70E

開放式無箱體設備之弧光危險距離可由(9)式反推，如(13)式所示：

$$D_A = \left\{ \frac{1.2}{5271 t_A [0.0016 F^2 - 0.0076 F + 0.8938]} \right\}^{-1.9593} \quad (13)$$

20 in.箱體之弧光危險距離可由(10)式反推，如(14)式所示：

$$D_A = \left\{ \frac{1.2}{1038.7 t_A [0.0093 F^2 - 0.03453 F + 5.9675]} \right\}^{-1.4738} \quad (14)$$

系統電壓 600V 以上設備之弧光危險距離可由(11)式反推，如(15)式所示：

$$D = \frac{793 \times F \times V \times t_A}{1.2^2} \quad (15)$$

(五) 電弧閃光危險警告標示

NFPA 70E 2012 內詳細規範弧光危險警告標示內應包含下列三點：

1. 該設備之電壓等級
2. 禁止接近邊界、限制接近邊界、管制接近邊界及弧光保護邊界
3. 至少應包含下列一項：

- (1) 弧光能量
- (2) 防護衣物最少應承受之能量
- (3) 個人防護具等級 (Hazard/Risk Category and PPE Level)

新版 NFPA 70E 2015 中，將禁止接近邊界移除，危險警告標籤不須註明此項，此

外計算所得之弧光能量不得與查表所得之個人防護具等級同時存在，新舊版之弧光警告標籤分別如圖 5 及圖 6 示。

在這些標示中，工作人員可以清楚的獲得工作現場設備的弧光危險資訊，NFPA 70E 規定的弧光保護邊界、管制接近邊界、限制接近邊界與危險等級等資訊，為了就是提醒工作人員在作業時能保持適當的安全距離並根據弧光警告標示穿著適當的個人防護具，如此一來便可降低弧光閃絡事故造的危害，減少生命與財產損失。

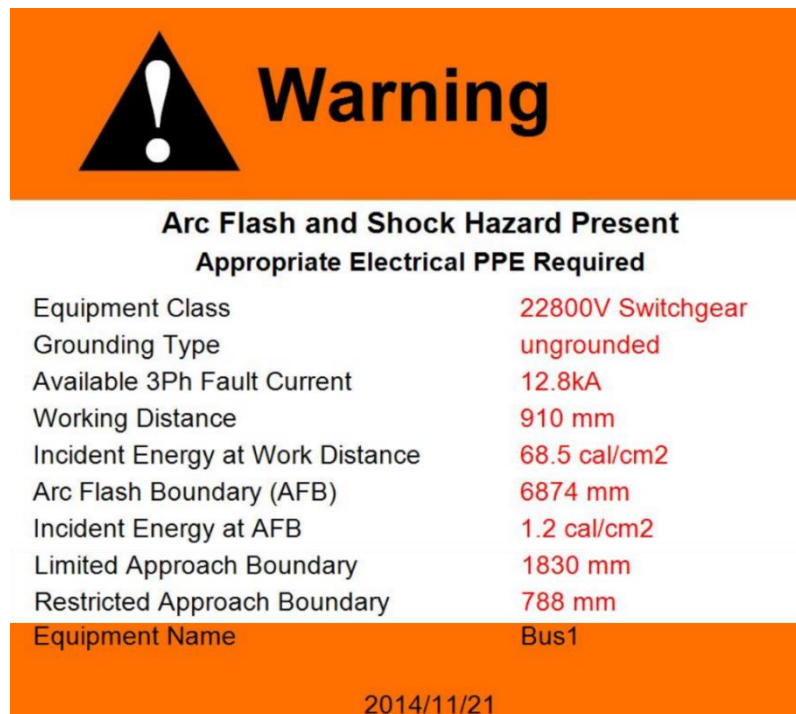


圖 5 NFPA 70E 2015 弧光危險警告標示圖

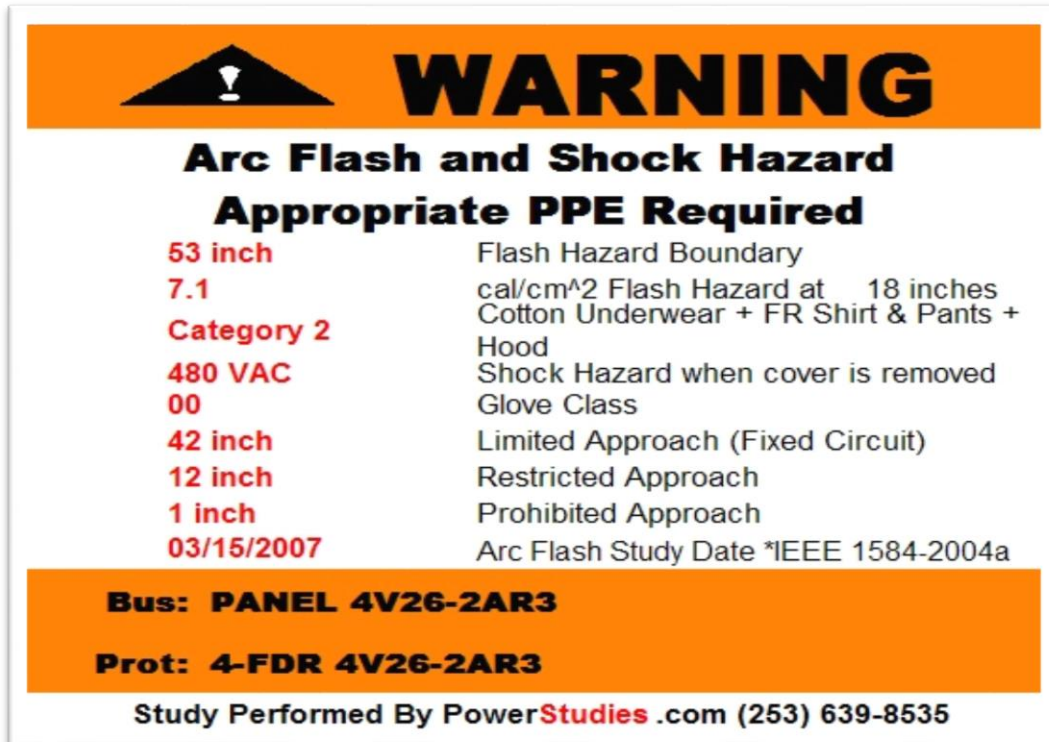


圖 6 NFPA 70E 2012 弧光危險警告標示圖

七、實際範例

弧光事故對於人員與設備來說是不可忽視的威脅，在保護的方式上，傳統的過電流保護是最常被使用的，但是由於上下游的保護設備彼此必須協調，必須延遲跳脫時間，造成弧光能量的增加。本索引將實際建立一個範例系統，探討在傳統保護模式下，依據其短路電流、斷路器動作時間等，計算各電壓等級之弧光能量，最後產生警告標籤。

(一)系統參數

範例系統 A 係國內南部某半導體產業工廠，其供電系統包含 22.8kV、0.38kV、220V 及 110V 四個電壓等級，並針對 Bus1 至 Bus7 七個匯流排進行分析，其中包括變壓比分別為 380/110V 與 380/220V 之兩台變壓器，其二次側主要為燈力負載，其單線圖如圖 7 所示。系統元件參數如表 8 至表 11 所示，其中馬達為等效總動力負載量，考慮其參差因數不會同時滿載運轉，因此部分負載降載運轉。

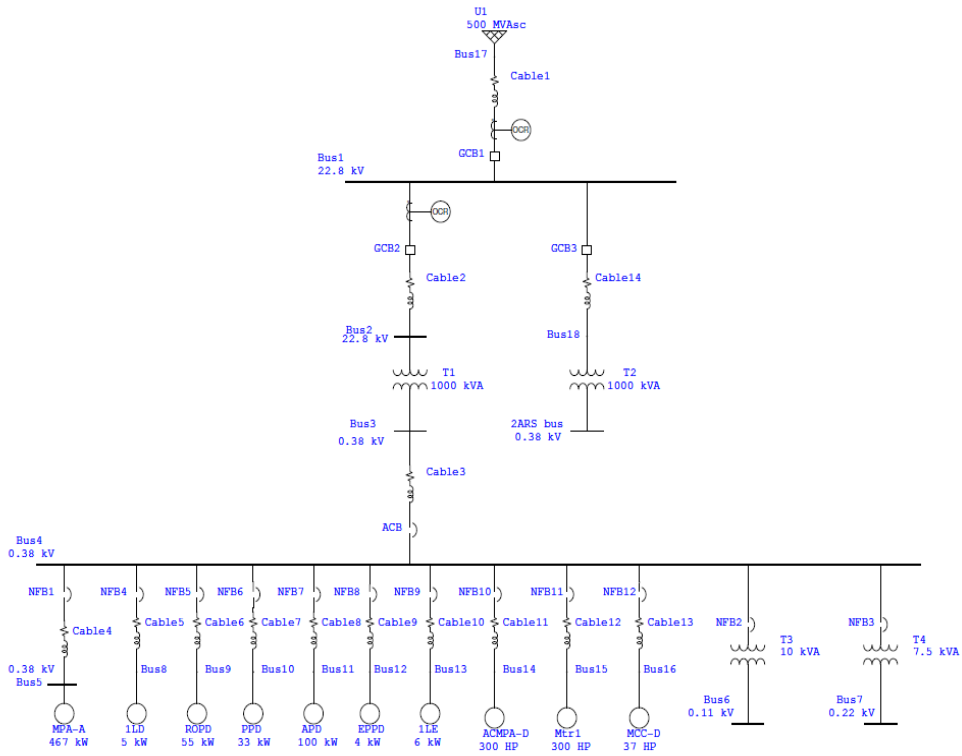


圖 7 範例系統 A 單線圖

表 8 範例系統 A 電力公司參數表

名稱	額定電壓(kV)	短路容量(MVA)	X/R
U1	22.8	500	25

表 9 範例系統 A 變壓器參數表

名稱	容量(kVA)	一次側(kV)	二次側(kV)	Z(%)
T1	1000	22.8	0.38	6
T2	1000	22.8	0.38	6
T3	10	0.38	0.11	2.3
T4	7.5	0.38	0.22	2.3

表 10 範例系統 A 電纜參數表

名稱	額定電壓(kV)	#/C	線徑(mm ²)	長度(m)
Cable1	30	3/C	70	3
Cable2	30	3/C	50	3
Cable3	0.6	2-3/C	240	5
Cable4	0.6	1/C	120	183
Cable5	0.6	1/C	25	18
Cable6	0.6	1/C	25	30
Cable7	0.6	1/C	95	54
Cable8	0.6	1/C	15	55
Cable9	0.6	1/C	6	54
Cable10	0.6	1/C	35	170
Cable11	0.6	2-3/C	150	21
Cable12	0.6	2-3/C	240	40
Cable13	0.6	1/C	25	26
Cable14	30	3/C	50	3

表 11 範例系統 A 馬達參數表

名稱	額定電壓(kV)	馬力(kW)	X _M %	X/R	負載量(%)
MPA-A	0.38	467	16.4	20	50
ILD	0.38	5	13.5	2	
ROPD	0.38	55	15.7	6.6	
PPD	0.38	33	15.4	5	
APD	0.38	100	16	9	80
EPPD	0.38	4	13.3	1.8	
ILE	0.38	6	13.8	2	
ACMPA-D	0.38	224	15.3	13.4	50
Mtr1	0.38	224	16.3	13.4	50
MCC-D	0.38	28	15.2	4.7	80

(二) 保護協調圖

本章節主要探討各電壓等級弧光能量分析與計算之範例，因此只選用單一饋線進行示範，本範例系統選用包含斷路器 GCB1、GCB2、ACB 與 NFB1 到 NFB3 之左側饋線。各匯流排發生三相短路故障時，故障電流分別為 12.8kA、12.8 kA、32.9 kA、32.3 kA、8.1 kA、2.2 kA 與 0.844kA，如圖 所示，然而保護電驛跳脫時間由流經電驛之故障電流決定，其電流值將小於匯流排上之三相短路電流。當三相短路發生時，因考慮主保護設備與後衛保護設備動作協調時間相差至少 0.2 秒如表 12 所示。各保護電驛反時曲線之設定除上下協調外，同時考慮變壓器啟動時之湧入電流(inrush point)，反時特性曲線須置於湧入電流上方，以避免變壓器啟動時造成誤動作，保護電驛設定值皆直接標示於保護協調圖內，如圖 9、圖 10 及圖 11 所示。

表 12 範例系統 A 之保護設備動作協調時間表

故障點	主保護		後衛保護		協調時間(s)
	設備名稱	動作時間(s)	設備名稱	動作時間(s)	
Bus1	GCB1	0.378	無	無	
Bus2	GCB2	0.153	GCB1	0.378	0.225
Bus3	GCB2	0.375	GCB1	0.617	0.242
Bus4	ACB	0.06	GCB2	0.384	0.324
Bus5	NFB1	0.03	ACB	0.36	0.33
Bus6	NFB2	0.024	ACB	0.36	0.33
Bus7	NFB3	0.024	ACB	0.36	0.33

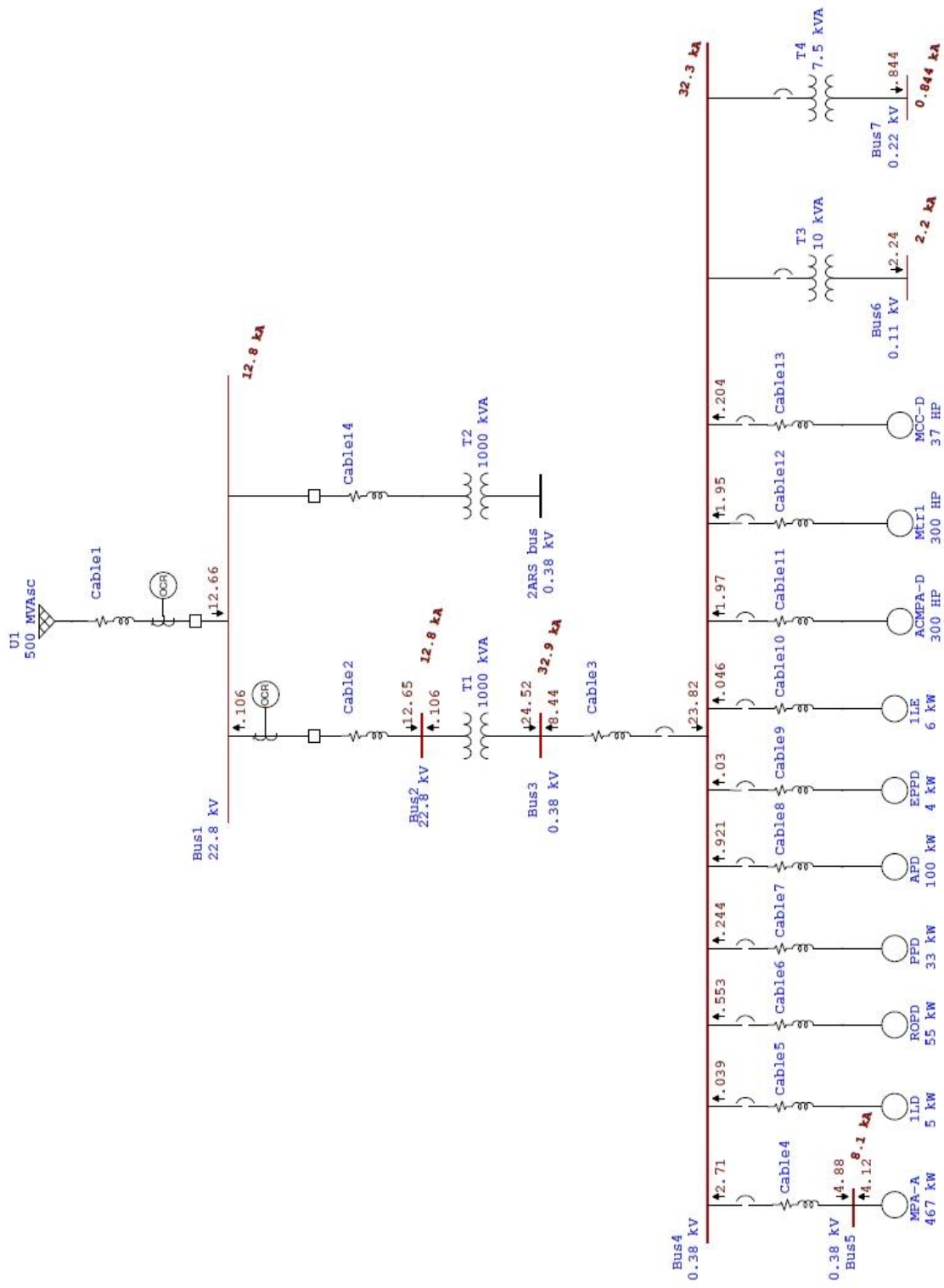


圖 8 範例系統 A 之三相短路電流圖

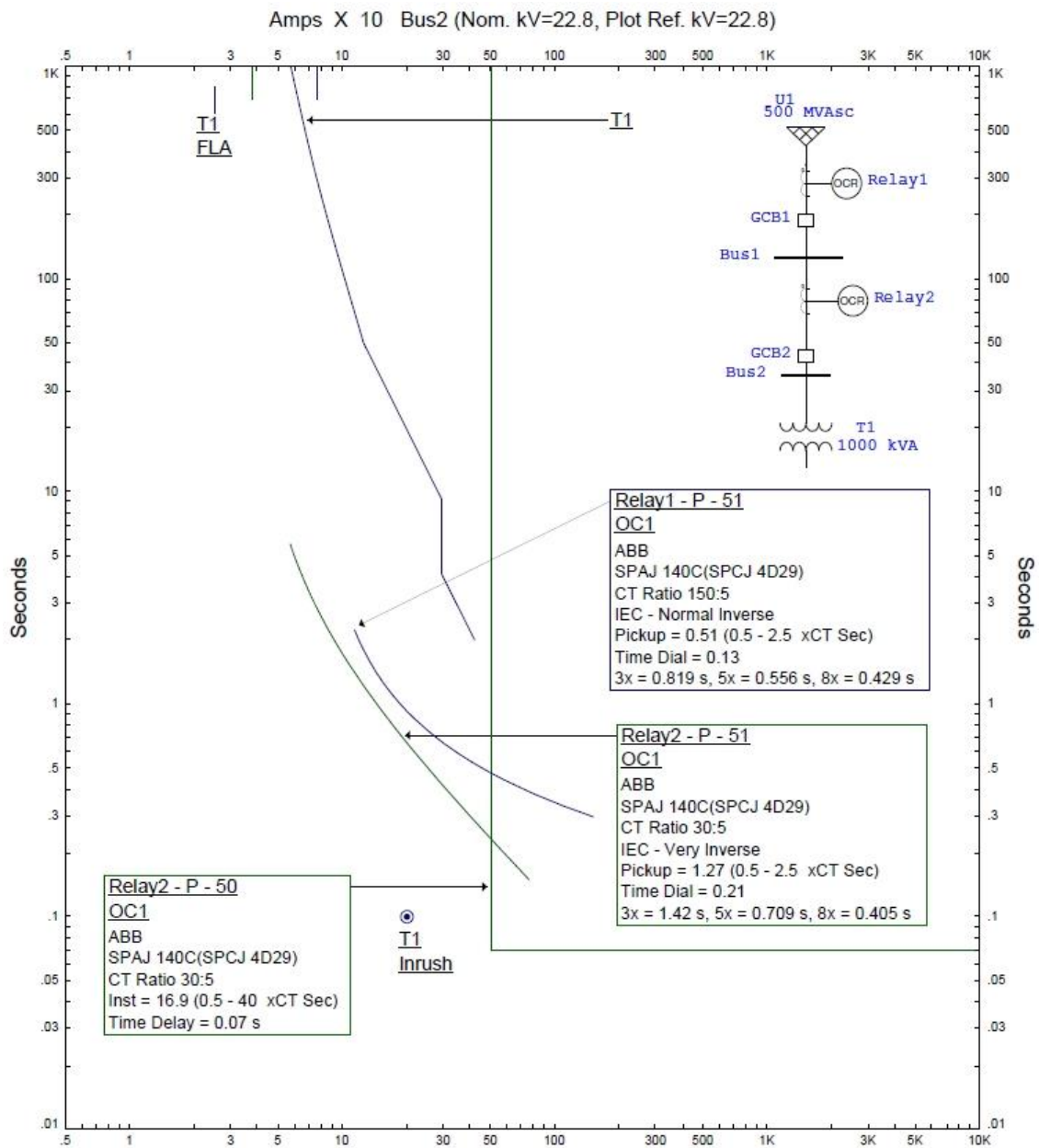


圖 9 範例系統 A 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之一

Bus1 發生故障時，流經 Relay1 之弧光電流為 12.66kA，Relay1 跳脫時間為 0.355 秒；Bus2 發生故障時，流經 Relay2 之弧光電流為 12.65kA，Relay2 為瞬時跳脫，跳脫時間為 0.13 秒。

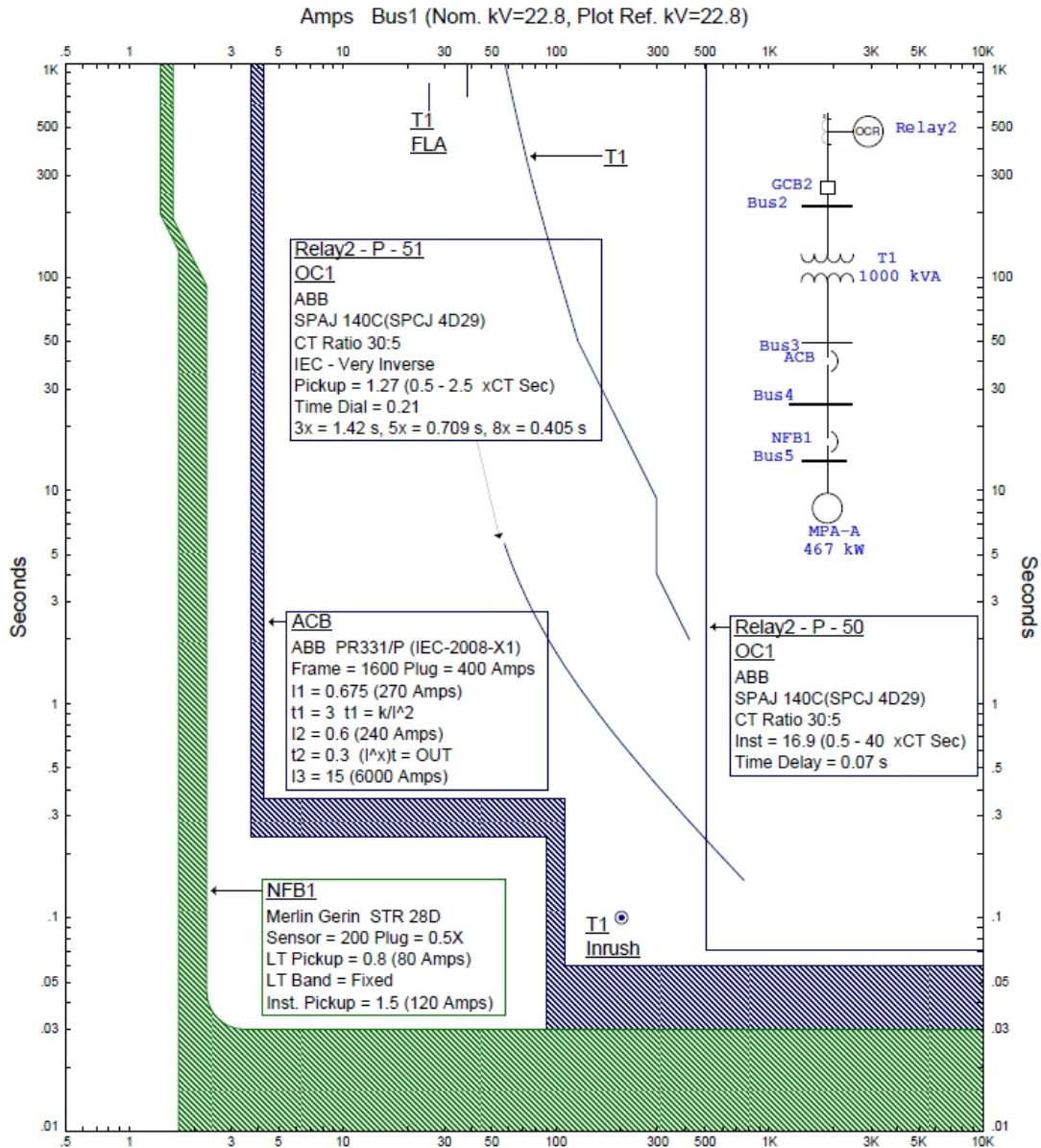


圖 10 例系統 A 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之二

由於 Bus3 電壓等級低於 1kV，因此增加利用 85%弧光電流做弧光燃燒時間之估算，能量計算後發現降低之弧光電流所產生之能量較大，因此 Bus3 進行分析之電流，採用為 85%弧光電流，Bus3 發生故障時，流經 Relay2 之弧光電流為 0.181kA，Relay2 跳脫時間為 0.986 秒；Bus4 發生故障時，流經 ACB 之弧光電流為 11.28kA，經過轉換電流基底至 22.8kV 側，弧光電流為 0.188kA，ACB 跳脫時間為 0.06 秒；Bus5 發生故障時，流經 NFB1 之弧光電流為 3.18kA，轉換電流基底後，弧光電流為 0.053kA，NFB1 跳脫時間為 0.03 秒。

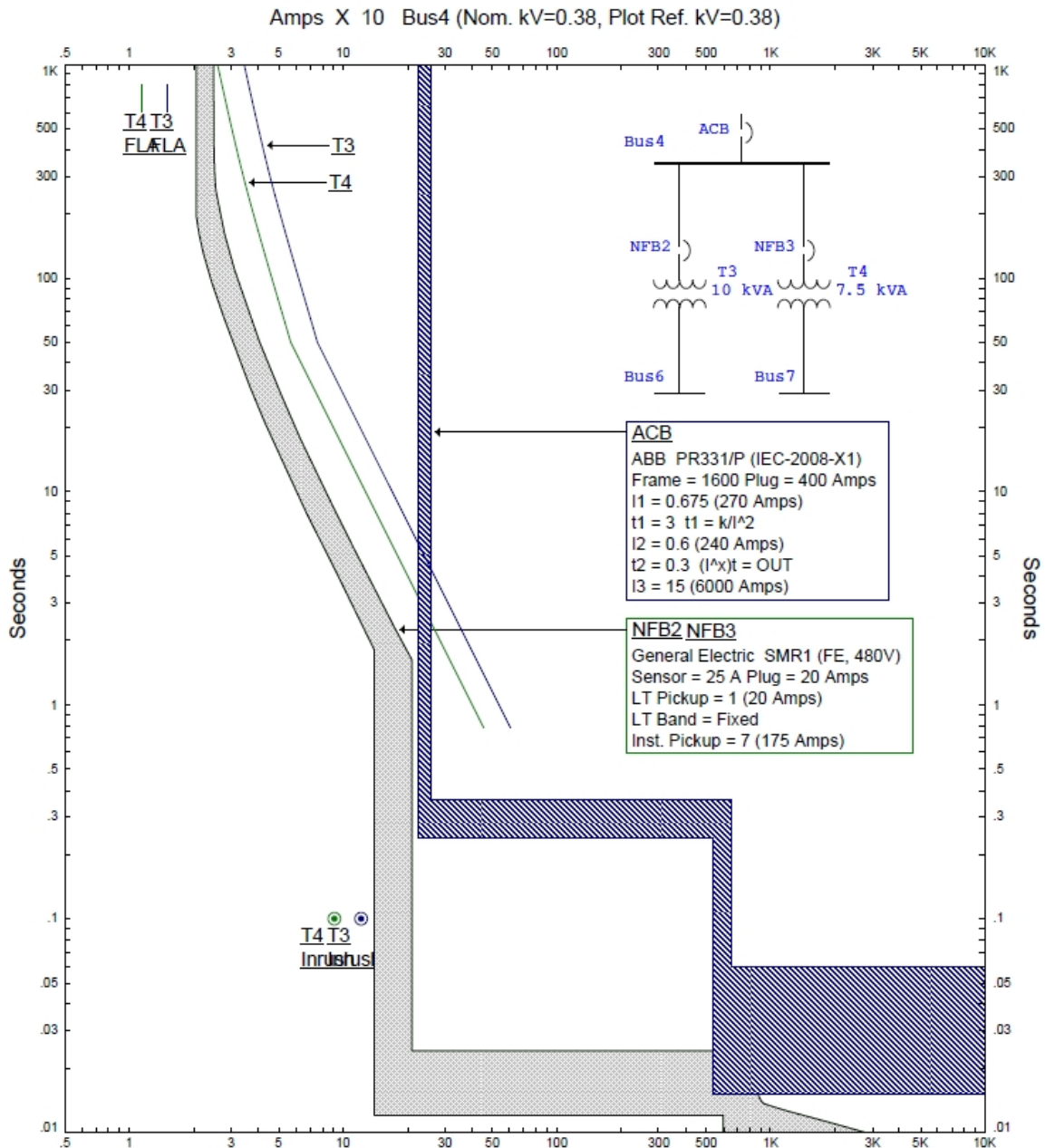


圖 11 例系統 A 供電饋線過電流保護設備間保護協調圖之三

兩台小型變壓器 T3 與 T4 選用相同型號之斷路器，Bus6 發生故障時，流經 NFB2 之弧光電流為 0.408kA，NFB2 跳脫時間為 0.024 秒；Bus7 發生故障時，流經 NFB3 之弧光電流為 0.446kA，NFB3 跳脫時間同樣為 0.024 秒。

(三) 弧光能量分析與計算

計算弧光能量所需各參數可參考表 與表 。Bus1 為開關箱，電壓等級 22.8kV，導線間距 G 為 153mm，工作距離 D 為 910mm; Bus2 同為開關箱，電壓等級 22.8kV，各參數與 Bus1 相同; Bus3 為開關箱，電壓等級 380V，導線間距 G 為 32mm，工作距離 D 為 610mm; Bus4 與 Bus5 皆為配電盤，電壓等級 380V，導線間距 G 為 25mm，工作距離 D 為 455mm; Bus6 為配電盤，電壓等級 110V，導線間距 G 為 25mm，工作距離 D 為 455mm; Bus7 為配電盤，電壓等級 220V，導線間距 G 為 25mm，工作距離 D 為 455mm，其他參數視不同電壓等級套用 IEEE 1584 公式而有所不同，如表 13 所示。

表 13 範例系統 A 之設備參數表

匯流排	電壓 (kV)	設備類型	K	K ₁	K ₂	C _f	G (mm)	D (mm)	x
Bus1	22.8	開關箱					153	910	0.973
Bus2	22.8	開關箱					153	910	0.973
Bus3	0.38	開關箱	-0.097	-0.555	-0.113	1.5	32	610	1.473
Bus4	0.38	配電盤	-0.097	-0.555	-0.113	1.5	25	455	1.641
Bus5	0.38	配電盤	-0.097	-0.555	-0.113	1.5	25	455	1.641
Bus6	0.11	配電盤	-0.097	-0.555	-0.113	1.5	25	455	1.641
Bus7	0.22	配電盤	-0.097	-0.555	-0.113	1.5	25	455	1.641

取得設備三相短路電流、弧光燃燒時間以及計算弧光能量所需各參數後，可參照 IEEE 1584 方程式計算弧光能量，本計畫選用之分析軟體為 Arc-Flash-Analytic v5.0.6，該分析軟體參考 IEEE 1584 能量計算，使用者只須輸入必要參數，即可分析弧光能量。各匯流排上弧光能量、危險等級與弧光危險距離如表 14 與表 15 所示，其中 IEEE 1584 規範須分析電壓最低為 208V，因此 Bus6 電壓等級 110V 無法藉由軟體分析，因此直接藉由計算機套用 IEEE 1584 公式求得。

表 14 範例系統 A 之弧光能量分析

匯流排	電壓 (kV)	短路電流 (kA)	時間 (s)	弧光能量 (cal/cm ²)	能量等級
Bus1	22.8	12.8	0.355	64.3	危險
Bus2	22.8	12.8	0.13	23.6	3
Bus3	0.38	32.9	0.986	24.5	3
Bus4	0.38	32.3	0.06	3	1
Bus5	0.38	8.1	0.03	0.5	無危險
Bus6	0.11	2.2	0.024	0.1	無危險
Bus7	0.22	0.844	0.024	0.1	無危險

表 15 範例系統 A 之弧光危險距離表

匯流排	電壓 (kV)	弧光保護邊界 (mm)	限制接近邊界 (mm)	管制接進邊界 (mm)
Bus1	22.8	6662	1830	788
Bus2	22.8	4031	1830	788
Bus3	0.38	4727	1068	305
Bus4	0.38	793	1068	305
Bus5	0.38	251	1068	305
Bus6	0.11	98	1068	避免接近
Bus7	0.22	66	1068	305

(四)弧光警告標籤

弧光警告標籤的目的為警告人員，詳細觀範一般人員可接近範圍、專業人員可接近範圍以及穿著個人防護具方可進入之區域，同時讓專業人員能夠馬上的知道該配電箱(盤)詳細資訊，因此最基本須包含電壓等級、弧光能量或危險等級與各限制接近邊界資訊，本節產生之警告標籤參考 NAPF 70E 2012 規範，如圖 12 到圖 15 版本 NFPA 70E 2015 已將限制接近距離刪除，未來警告標籤無須呈現限制接近距離，且弧光能量與危險等級不得同時標示。



Warning 警告

Arc Flash and Shock Hazard 電弧和電擊危害

Appropriate Electrical PPE Required 要求適當個人防護具

Equipment Class 設備種類	22800V Switchgear
Grounding Type 接地類型	grounded
Available 3Ph Fault Current 短路電流	12.8kA
Working Distance 工作距離	910 mm
Incident Energy at Work Distance 弧光能量	64.3 cal/cm ²
Arc Flash Boundary (AFB) 弧光保護邊界	6662 mm
Incident Energy at AFB 於弧光保護邊界時之能量	1.2 cal/cm ²
Hazard Risk Category 弧光危險等級	Dangerous
Limited Approach Boundary 管制接近邊界	1830 mm
Restricted Approach Boundary 限制接近邊界	788 mm
Prohibited Approach Boundary 禁止接近邊界	245 mm

Equipment Name 設備名稱 Bus1

2014/11/21

圖 12 電壓等級 22.8kV 之弧光警告標籤



Warning 警告

Arc Flash and Shock Hazard 電弧和電擊危害

Appropriate Electrical PPE Required 要求適當個人防護具

Equipment Class 設備種類	380V Switchgear
Grounding Type 接地類型	grounded
Available 3Ph Fault Current 短路電流	32.9kA
Working Distance 工作距離	610 mm
Incident Energy at Work Distance 弧光能量	24.5 cal/cm ²
Arc Flash Boundary (AFB) 弧光保護邊界	4727 mm
Incident Energy at AFB 於弧光保護邊界時之能量	1.2 cal/cm ²
Hazard Risk Category 弧光危險等級	3
Limited Approach Boundary 管制接近邊界	1068 mm
Restricted Approach Boundary 限制接近邊界	305 mm
Prohibited Approach Boundary 禁止接近邊界	25 mm

Equipment Name 設備名稱 Bus3

2014/11/21

圖 13 電壓等級 380V 之弧光警告標籤



Arc Flash and Shock Hazard 電弧和電擊危害
Appropriate Electrical PPE Required 要求適當個人防護具

Equipment Class 設備種類	220V MCC & Panels
Grounding Type 接地類型	grounded
Available 3Ph Fault Current 短路電流	0.844kA
Working Distance 工作距離	455 mm
Incident Energy at Work Distance 弧光能量	0.1 cal/cm ²
Arc Flash Boundary (AFB) 弧光保護邊界	66 mm
Incident Energy at AFB 於弧光保護邊界時之能量	1.2 cal/cm ²
Hazard Risk Category 弧光危險等級	0
Limited Approach Boundary 管制接近邊界	1068 mm
Restricted Approach Boundary 限制接近邊界	305 mm
Prohibited Approach Boundary 禁止接近邊界	Avoid Contact

Equipment Name 設備名稱 Bus7

2014/11/21

圖 14 電壓等級 220V 之弧光警告標籤



Arc Flash and Shock Hazard 電弧和電擊危害
Appropriate Electrical PPE Required 要求適當個人防護具

Equipment Class 設備種類	110V MCC & Panels
Grounding Type 接地類型	grounded
Available 3Ph Fault Current 短路電流	2.2kA
Working Distance 工作距離	455 mm
Incident Energy at Work Distance 弧光能量	0.1 cal/cm ²
Arc Flash Boundary (AFB) 弧光保護邊界	98 mm
Incident Energy at AFB 於弧光保護邊界時之能量	1.2 cal/cm ²
Hazard Risk Category 弧光危險等級	0
Limited Approach Boundary 管制接近邊界	1068 mm
Restricted Approach Boundary 限制接近邊界	Avoid Contact
Prohibited Approach Boundary 禁止接近邊界	Avoid Contact

Equipment Name 設備名稱 Bus6

2014/11/21

圖 15 電壓等級 110V 之弧光警告標籤

八、結語

在傳統的電力系統保護中，主要為過電流的架構，保護協調由上而下做協調，通常越下游匯流排，其短路電流也越小，因此從弧光分析中可以發現弧光能量依序遞減，電壓等級越低能量也隨之減少。而短路電流與弧光燃燒時間為決定弧光能量的最主要因素，在整個系統架構確定的情況下，短路電流為定值，因此縮短弧光燃燒時間為減少弧光能量的主要方法，然而傳統的過電流保護，因為選擇性保護，必須延遲跳脫動作時間，因此在不更動設備設定的情況下，建議加裝弧光保護電驛，透過偵煙偵光等方法，有效的降低弧光燃燒時間。

根據統計指出，弧光故障主要發生於低壓系統，在電壓等級 15kV 以下時，弧光電流通常小於短路電流，對於傳統反時性的過電流保護而言，較長的跳脫時間意味弧光燃燒時間增加，弧光能量也隨時間累積變大，釋放能量時造成的爆炸均對設備及作業人員造成極大的傷害。

根據 IEEE 1584 與 NFPA 70E 弧光能量公式，限制弧光能量大概可以分為三種方法，分別為降低短路電流、增加工作距離已及縮短弧光燃燒時間。而最主要且直接的方法為縮短弧光燃燒時間，可以藉由安裝高速斷路器、設定瞬跳功能及弧光保護電驛等方式來降低弧光燃燒時間的目的，限制弧光能量的累積。

九、參考文件

- [1] ALLIANT ENERGY 網站 <http://www.alliantenergy.com/index.htm>.
- [2] 李建基，「開關設備中的故障電弧及其防護」，電力設備，第 5 卷，第 2 期，第 41-43 頁，2004。
- [3] http://70earcprotection.com/Home_Page.html.
- [4] 曾元超，「電弧危害的防範」，台電月刊五月號，第 545 期，第 31-36 頁，2008。
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/National_Electrical_Code
- [6] National Fire Protection Association. NFPA 70: Nation Electrical Code. U.S.A.; 2014.
- [7] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE 1584: IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations; 2002.
- [8] National Fire Protection Association. NFPA 70E: Standard for Electrical Safety in the Workplace. Ma, U.S.A.; 2015.

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

防止電弧閃光灼傷之研究 / 蘇文源, 辜志承著. -- 1 版. -- 新北市 : 勞動部勞研所, 民 104.03

面 ; 公分

ISBN 978-986-04-4665-4(平裝)

1.職業災害 2.勞工安全

555.56

104005882

防止電弧閃光灼傷之研究

著(編、譯)者: 蘇文源、辜志承

出版機關: 勞動部勞動及職業安全衛生研究所

22143 新北市汐止區橫科路 407 巷 99 號

電話: 02-26607600 <http://www.iosh.gov.tw/>

出版年月: 中華民國 104 年 4 月

版(刷)次: 1 版 1 刷

定價: 250 元

展售處:

五南文化廣場

台中市區中山路 6 號

電話: 04-22260330

國家書店松江門市

台北市松江路 209 號 1 樓

電話: 02-25180207

- 本書同時登載於本所網站之「出版中心」, 網址為:
http://www.iosh.gov.tw/Book/Report_Publish.aspx
- 授權部分引用及教學目的使用之公開播放與口述, 並請注意需註明資料來源; 有關重製、公開傳輸、全文引用、編輯改作、具有營利目的公開播放行為需取得本所同意或書面授權。

GPN:"3232622949

ISBN: 978-986-04-4665-4

