



# 台電工程月刊

MONTHLY JOURNAL OF TAIPOWER'S ENGINEERING  
 第812期 105年4月號 Vol.812 April 2016

## 再生能源：

- 考慮電壓變動與三相不平衡下離島配電系統太陽光電最大併入量之研究.....吳元康 等.....(1)
- 太陽能電池及模組的ATP模型.....王耀諄 等.....(23)

## 核能發電：

- 壓水式反應器壓力槽壓力熱震衝擊之破裂風險評估.....黃金城 等.....(33)

## 輸變電：

- 不同接地方式對高樓建築物遭受直接雷擊時之大地電位升的分析.....李建興 等.....(48)
- 輸電設備巡檢管理系統及地理圖資環域分析系統之開發研究.....林桐斌 等.....(62)

## 能源與環境：

- 台電公司溫室氣體減量與碳權經營模式規劃研究.....蔡顯修 等.....(77)
- 民營電廠氣候變遷風險評估案例研究.....羅彗璋 等.....(83)

## 資訊與電腦：

- 台電系統負載模型參數量測與驗證（二）：動態負載模型參數識別及統計分析程式LM\_ID開發與應用.....李盛輝 等.....(97)

## 其他：

- 筒式煤倉安全監測系統之規劃.....黃伯璘.....(117)

誠信      關懷      服務      成長  
 Integrity      Caring      Service      Growth



台灣電力公司編印



# 台電工程月刊

第 812 期  
中華民國 37 年 9 月創刊  
中華民國 105 年 4 月出版

## 【出版宗旨】

1. 介紹最新電力科技
2. 鼓勵從業人員發表實務經驗論文
3. 推廣研究成果之應用，提昇電力技術水準

【發行人】：朱文成  
【主任委員】：蒯光陸  
【總編輯】：林正義  
【副總編輯】：徐豪傑  
【外文編輯委員】：李琳娜 林宗賢  
【財務委員】：張兆瓊  
【編輯委員】：吳有基 吳明勳 徐真明 郭政謙 王金墩 呂天泰 沈宗華  
吳瑞賢 何錦洪 林蒼喬 花敬翰 涂秀錦 侯明亮 洪紹平  
范振理 曾重富 楊金石 蒲冠志 廖鴻徹 蔡世育 劉建勳  
劉至瑄 鄭錦榮 鍾年勉 鍾輝乾  
【顧問】：王振勇 王耀庭 田丁財 李清雲 李清課 陳永享 陳慰慈  
黃凱旋 張武侯 蔡顯修 顏德忠 簡福添 蕭勝任 籃宏偉  
【執行編輯】：詹凱婷  
【發行所】：台灣電力公司綜合研究所（100台北市中正區羅斯福路4段198號）  
【展售門市】：國家書店松山門市（104台北市松江路209號1樓，02-2518-0207）  
五南文化廣場台中總店（400台中市中山路6號，04-2226-0330）

---

【訂價】：全年 12 期 1200/1080/1440 元（紙本 / 電子 / 紙本 + 電子）  
學生經校方證明，全年 12 期 360/360/480 元（紙本 / 電子 / 紙本 + 電子）  
（國外郵資及手續費另加）  
【帳號】：58115464909990（台灣銀行公館分行）  
【戶名】：台灣電力股份有限公司  
【投稿及訂閱地址】：100 台北市中正區羅斯福路 4 段 198 號  
電話：(02)2360-1095 電子郵件：d53106@taipower.com.tw  
【排版印刷公司】：九易數碼科技印刷有限公司  
220 新北市板橋區府中路 175 號 1 樓 電話：(02)2966-0816

台北郵局許可證台北字第 2723 號

中華郵政台北誌第 544 號執照登記為雜誌交寄

# 考慮電壓變動與三相不平衡下離島配電系統 太陽光電最大併入量之研究

Research on the Maximum Amount of PV Integration in Island Distribution Systems  
Considering Voltage Variation and Three-Phase Unbalance

吳元康\*  
Wu, Yuan-Kang

鄧宇宏\*  
Deng, Yu-Hung

李清吟\*\*  
Lee, Ching-Yin

王耀村\*\*\*  
Wang, Yao-Tsun

## 摘要

理想的配電系統係將各相負載平衡配置，然而，在現實情況中，常因天然地形、負載特性、負載分佈、單相及不對稱變壓器的併入等因素，造成配電系統的電壓與電流不平衡。不平衡系統可能影響系統上設備的正常運作、增加線路損失及保護設備的誤動作。此外，由於太陽光電併入量在近幾年急速增加，因此如何能利用太陽光電改善配電系統不平衡，並在不產生過電壓的情形下盡可能增加太陽光電的併入量是現代配電系統的重要課題之一。本研究應用 OpenDSS 軟體模擬澎湖與綠島饋線系統，並因應太陽光電在配電低壓端快速增加的現況，分析太陽光電系統併入對配電系統電壓不平衡與電壓變動之影響，並嘗試藉由合適的太陽光電併入來改善系統不平衡。接著本研究利用電荷演算法尋求配電系統中太陽光電的最大可能併入量，且藉由智慧變流器改善系統過電壓，進而增加太陽光電最大併入量。

## Abstract

Ideal electric distribution systems are generally designed to operate on a balanced three-phase load. However, a number of factors can lead to the voltage or current unbalance on distribution systems, and they include terrain conditions, load characteristics, load distribution, the integration of single-phase and asymmetrical transformers. Unbalanced systems would affect the normal operation of each component on the system, increasing line losses, and causing the malfunction of protection equipment. Additionally, owing to the rapid increase in the penetration of photovoltaic (PV) power, one of the important issues of modern distribution systems is how to utilize the PV system to deal with the three-phase unbalance, and to increase the PV power integration without causing system's overvoltage. This study applies OpenDSS software to simulate the operation of some feeders in Penghu and Green Island, and analyze the effects of a large scale PV integration. Next, this study applies the Charged System Search (CSS) algorithm to search for the maximum possible amount of PV integration. This study also aims to help increase the penetration of PV power in the system and deal with the overvoltage problems by using smart inverter systems.

\*國立中正大學電機系

\*\*東南科技大學電機系

\*\*\*台灣電力公司新竹區營業處

**關鍵詞(Key Words)：**電壓不平衡 (Voltage Unbalance)、太陽光電發電(Photovoltaic Power)、配電系統(Distribution System)、太陽光電最大併入量(The Maximum Amount of PV Integration)、智慧變流器(Smart Inverter)。

## 壹、前言

電力系統中的三相平衡與否，關係到整個供電系統的品質及可靠度。三相電壓與電流之不平衡，輕則增加系統中的額外線路損失，重則使保護電驛不正常動作，致饋線斷路器跳脫。配電系統中的設備除種類繁多外，數量亦為可觀，其中包含供電導線、線路開關、電容器、電壓調整器及各式變壓器等等。其中最容易引起系統不平衡的，以變壓器為主，在臺灣配電系統中的變壓器接線方式可以說是相當的多元性，從輸電系統中常見的 Y- $\Delta$ 、 $\Delta$ - $\Delta$ 、Y-Y、 $\Delta$ -Y 等，到為了節省成本及滿足用戶用電需求，配電系統中特有的開 Y-開  $\Delta$  燈力併供變壓器，亦為相當普遍。燈力併供係由二具單相變壓器併接至高壓線路之其中二相，於其二次側則可同時供給單相及三相電源接線方式，雖然在三相電源供應上，可節省一只單相變壓器，但卻增加了系統上的不平衡。

在臺灣配電系統架構中，大量地採用燈力併供變壓器，且配電饋線除三相區段之外，亦普遍存在單相及二相分歧線路。再加上用戶之負載特性隨時間變動，皆造成配電饋線三相電流不平衡。配電饋線三相電流不平衡運轉會降低配電設備利用率及增加配電線路損失，進而增加發電成本。此外，因為三相電流不平衡造成中性線電流過高，亦可能造成接地過流電驛 (LCO) 誤動作，導致饋線斷路器跳脫，影響供電可靠度及復電困難度。同時饋線中性線之電壓亦會因中性線電流過大而造成湧升，產生配電系統安全性課題，且幹線區段三相不平衡亦會提高無停電轉供之困難，因此三相不平衡之改善是配電系統需處理的重要議題之一。

若利用開 Y-開  $\Delta$  變壓器的接線方式來供應

三相及單相負載，即使二次側維持三相平衡負載，但由於一次側與二次側繞線的 30 度相角差，使得在一次側的兩相變成不平衡。另外，由於相間電流不平衡現象而產生的不平衡電壓也會增加變壓器鐵心損失，影響用戶設備器具正常運轉。過去幾十年來，在臺灣地區隨著負載成長，越來越多的商業及住宅區使用三相三線 220V 空調系統，負載大量增加而使配電饋線電流不平衡化，特別是當兩饋線在執行無停電轉供時，由於中性線過電流過大，容易造成饋線跳脫。一般台電規劃饋線線路時，工程師根據他們的經驗和試誤法，以調整相位方式來改善線路負載平衡，其處理的過程耗費大量的人力及時間。由於配電系統的相位平衡通常會隨著用戶的負載特性而改變，所以系統的開 Y-開  $\Delta$  變壓器電路平衡狀態，通常只持續很短的時間。因此配電系統的相位平衡，經常隨用戶負載改變，通常不是最佳的狀態。為了降低三相不平衡電流並避免保護電驛誤動作造成的偶發性供電中斷，必須考量每個配電變壓器下之用戶日負載模型。

為有效改善配電饋線三相不平衡現象，必須先行探討導致配電饋線三相不平衡之原因，如此才能真正達到抑低中性線電流過高之目標。饋線中性線電流值為三相電流之相量和，當配電系統負載平衡時，三相電流數值相同且各相間之角度差為 120 度，則中性線電流值為零；當配電系統負載不平衡時，亦即三相電流數值不同或各相間之角度差非 120 度時，則產生中性線電流值。配電饋線之三相電流數值或相角愈不平衡則中性線電流值將越高。本文將探討引起饋線三相電流不平衡而使得中性線電流偏高之原因，並將分析配電饋線三相不平衡之時變特性，以作為三相不平衡改善策略擬定之參考。

在改善策略上，本研究提出利用太陽光電併

入饋線之方法來解決饋線上常有的三相不平衡，同時探討配電系統可併入之太陽光電最大併入量，並以電荷演算法尋求配電系統最大太陽光電併入量之模擬，最後本研究提出採用智慧變流器(Smart Inverter)控制策略，以利於增加太陽光電最大可併入量。

首先評估目前這些饋線的電壓變動以及是否存在較大的三相不平衡，並分析燈力併供變壓器對於系統三相不對稱的影響。接著本計畫將評估高占比的太陽光電併入上述系統後對於這些系統電壓以及三相不平衡的影響，並設計一個併入指標來決定太陽光電最佳併入點。本計畫最後將設計智慧變流器的控制策略，嘗試找出最佳的控制機制來增加這些饋線的太陽光電占比。換言之，本計畫將利用太陽光電的併入來降低原系統三相不平衡或電壓變動，並提高太陽光電發電占比。

## 貳、文獻回顧

文獻<sup>[1]</sup>利用 OpenDSS 模擬 IEEE-33 Bus 測試系統併入分散式電源後，其併入點位置對於系統線路損失的影響。分散式電源併入位置包括鄰近變電所、饋線中段以及饋線末端三種情況。文獻<sup>[2]</sup>介紹應用 OpenDSS 解決配電系統操作上的能力。OpenDSS 為國際間公認的配電系統模擬工具，且能搭配 HOMER(Hybrid Optimization Model for Electric Renewables)以及 Matlab 軟體進行模擬分析。此外，該文獻亦討論配電系統併入分散式電源、儲能系統、以及不確定性的負載對於系統操作的影響。文獻<sup>[3]</sup>考慮五種不同類型的負載，並利用 OpenDSS 軟體模擬 IEEE 123 node 測試饋線的系統操作。研究結果指出不同的負載類型對於系統不平衡的影響會有所差異，此外，該文獻亦提出未來配電系統將可能大量採用 Volt/Var 控制技術。文獻<sup>[4]</sup>指出低壓配電系統中分散式電源可運用變流器(Inverter)的電壓控制策略，一般變流器單相或三相中的控制策略包含功

率因數、實功以及虛功控制，其控制目的為因應分散式電源併入系統後而引起的電壓變動，且使用控制策略後，確實使併入分散式電源後的系統更趨穩定。文獻<sup>[5]</sup>以太陽光電作為分散式電源之代表，並將太陽光電併入一個擁有 37 個節點之測試饋線。模擬中採用不同併入點的情境分析。包括併入於變電站附近、饋線中段、以及饋線末端。該模擬結果顯示分散式電源併入系統後將可改善電壓降，但併入點的選擇非常重要。例如若是只併入到饋線末端，可發現饋線前端電壓如同未併入分散式電源般，電壓開始下降，但在末端則又回復如同變電站送出之電壓值。文獻<sup>[6]</sup>敘述 OpenDSS 中元件物件模型(Component Object Model, COM)介面之功能，藉由 COM 介面可將 OpenDSS 與其他分析運算工具相互結合，各取其優點進行模擬。該文獻亦探討 OpenDSS 即時模擬運算的功能，並藉由模擬 IEEE 13-Bus 測試系統來顯示 OpenDSS 在即時模擬下的運算能力。文獻<sup>[7]</sup>除了探討太陽光電併入配電系統的衝擊影響外，並同時利用 PSCAD 與 OpenDSS 進行配電系統模擬分析。經由模擬分析得到非常近似的結果，但 OpenDSS 的模擬所需時間較短，因此 OpenDSS 或許比 PSCAD 更適合模擬更大的系統以及提供更短的模擬時間。

文獻<sup>[8]</sup>將配電系統中的配電變壓器細分成八種不同的類型，並分別探討配電系統中電壓與電流的三相不平衡分析。由分析結果得知，即使系統中併入對稱變壓器，仍可能造成系統上些微的不平衡，然而在台灣配電系統上已過多的使用不對稱變壓器，使得配電系統不平衡率更加嚴重。文獻<sup>[9-15]</sup>指出當配電系統使用不對稱變壓器對於系統不平衡的影響，特別是針對燈力併供變壓器(Open-Wye Open-Delta Transformer)最具探討性。其中文獻<sup>[9-14]</sup>確切提到燈力併供變壓器會造成電流及電壓角度偏移，並因此造成系統電壓與電流的不平衡，甚至對於中性線電流以及線路損耗帶來一定程度的影響。文獻<sup>[16-18]</sup>指出由於台電配電系統大量使用燈力併供變壓器於低壓配電

端，且配電饋線除三相區段之外，亦普遍存在單相及二相分歧線路(Radial Distribution Feeder)。由於燈力併供變壓器大量使用以及系統架構之不平衡，再加上用戶之負載特性隨時間變動，造成饋線三相不平衡之情況相當嚴重。其中文獻<sup>[18]</sup>將高雄鳳山區處饋線資料應用巨集程式擷取配電調度控制系統(Distribution Dispatch Control System, DDSCS)運轉資料庫內，針對各饋線出口全年每小時之三相及中性電流值，進行三相不平衡分析並選定較嚴重之饋線進行改善。該研究建置三相不平衡改善規則庫，並結合具有啟示性規則之專家系統，進而推導配電饋線三相不平衡電流的改善策略，提供台電公司進行分歧線與配電變壓器之現場換相作業，並分析比較饋線換相前後之三相電流值與中性線電流值，驗證換相策略對饋線三相不平衡之改善效能。文獻<sup>[19-20]</sup>指出分散式電源併入可有效地減少系統的損耗，並利用 OpenDSS 對 IEEE 34-Bus 測試系統進行模擬，找出最適合之併入量與併入點。文獻<sup>[21]</sup>討論三相四線配電系統中的不平衡議題，並介紹 IEEE 以及 NEMA 對於不平衡的定義，該文獻亦提供實際案例進行分析。文獻<sup>[22]</sup>利用巴西某一配電系統進行案例分析，此系統存在單相以及雙相負載。該文獻亦提供 EN50160 以及 NRS-048 有關於電壓不平衡限制之規範，並將模擬結果與量測結果進行分析。結果顯示只要電壓不平衡不對系統造成衝擊或是不超過規範限制，在實際的配電系統中存在些許電壓不平衡是可以接受的。文獻<sup>[23]</sup>提出利用最佳電力潮流法對於不平衡的配電系統進行系統損耗的改善，同時亦將電動車以及智慧電表的控制管理引入配電系統中，降低系統損耗及不平衡率。

文獻<sup>[24]</sup>指出在三相不平衡負載的狀況下，電壓不平衡率隨著負載的增加呈線性增加的關係。該文獻提出利用併入太陽光電改善三相不平衡，並同時討論太陽光電占比與系統電壓不平衡率的關係。由模擬結果得知，在平衡負載的狀況下，太陽光電的併入對系統電壓平衡的改善有

限，然而若在不平衡負載的狀況下，則可以帶來較大的助益。文獻<sup>[25]</sup>提出在低壓住宅饋線上利用太陽光電與其他電壓補償的電力設備，如動態電壓調節器(Dynamic Voltage Regulator, DVR)以及 D-STACOM 來改善電壓不平衡。研究結果可得 DVR 以及 D-STACOM 的併入點位置會影響電壓平衡改善的結果，且這些補償設備確實可改善電壓不平衡。對低壓配電用戶提供確切的幫助。文獻<sup>[26]</sup>探討太陽光電併入配電系統後若其出力在滿載或是半載狀態下對於電壓不平衡以及電壓變動的影響。研究結果顯示應可求得最佳併入量來降低電壓不平衡。文獻<sup>[27]</sup>探討在馬來西亞某處併網型太陽光電住宅系統的電壓，該研究藉由模擬來探討太陽光電對電壓的影響、太陽光電逆送電力與電纜規格差異的關係、以及系統平衡與不平衡狀況下太陽光電併入後的差異。由模擬結果可得知太陽光電的併入確實造成系統電壓上升、太陽光電併入後必須考慮電力逆送的情形與改善的措施、以及使用較大截面積的電纜可改善電壓升的情況。

文獻<sup>[28]</sup>探討高占比太陽光電對於配電饋線的影響，該研究考慮的因素包含雲層的遮蔽效應，並分析輻射型饋線以及集中型饋線受雲層影響的程度差異。經由分析的結果可得，不同饋線受雲層影響的程度最嚴重可導致電壓變化 1.74%，且變化的程度也與太陽光電及負載位置有關。文獻<sup>[29]</sup>探討各種分散式電源的 control 方式，包含功率因數為一、固定功因控制、以及虛功控制等三種 control 模式，並利用這些 control 策略探討在輕載、中載以及重載下的電壓變動以及線路損耗的差異。文獻<sup>[30]</sup>指出太陽光電的尖峰出力與負載尖峰很可能位於不同的時段，並探討太陽光電在高占比的情況下對於系統的影響。由模擬結果可知占比的提高確實可以使系統的損耗降低，但若占比過高則反而可能增加線路損耗，因此併入的太陽光電應有一定的最佳化占比。文獻<sup>[31]</sup>探討不同饋線型式與太陽光電占比的關係，主要討論照度、P-V 曲線、以及占比量之間的關係。文獻<sup>[32]</sup>

探討太陽光電併入低壓配電系統的影響，並對於澳洲一個實際的配電系統進行模擬。經由模擬結果可得出，在太陽光電正常運轉的情況下，可明顯改善電壓不平衡以及線路損耗，但必須規劃合適的併入量。文獻<sup>[33]</sup>彙整電壓不平衡相關之定義，並比較各定義的差異性。同時指出若在較嚴謹的要求下，使用負序電壓不平衡率  $d2\%$  以及零序電壓不平衡率  $d0\%$  可能是較為妥當的，該文獻亦指出不平衡的定義除了考慮電壓大小，亦應同時考慮電壓的角度。文獻<sup>[34]</sup>探討併入高占比太陽光電對於配電系統的影響，該研究以  $50\%$  的高占比太陽光電併入五種不同的饋線，並分析太陽光電占比對系統各相電壓的影響。研究結果顯示太陽光電的併入會隨著各相負載的差異帶來不同的影響。文獻<sup>[35]</sup>指出微電網系統為未來的趨勢，而配電系統常存在三相不平衡的課題，該研究並提供最佳化潮流分析求解三相不平衡的配電系統潮流。

除了燈力併供變壓器外也存在著其他類型的不對稱變壓器，例如文獻<sup>[36]</sup>探討史考特變壓器對於配電系統的影響，該文獻確切地指出史考特變壓器造成不平衡的原因以及影響，並提出改善的策略。文獻<sup>[37]</sup>探討有關低壓電力網路的中性線議題，此議題與電力品質有直接的相關性。該研究強調分析三相不平衡電力對用戶所造成的風險分析是必要的，換言之，在系統不平衡的情況下，提供相對應的保護措施是重要的議題。文獻<sup>[38]</sup>探討太陽光電與風力發電機同時併入不平衡配電系統後的影響，並以 IEEE 123-Bus 配電系統做為模擬範例。該研究提出將實虛功率損耗以及電壓變動作為評量指標，用以評估這些分散式電源對於系統的影響。由模擬結果可知，雖然併入太陽光電能對系統帶來降低損耗及不平衡等優點，但由於太陽光電只在日間發電，若能搭配風力發電機成為一個混合供電系統，利用其互補效益，可對配電系統帶來更大的效益。文獻<sup>[39-40]</sup>提出造成三相不平衡的可能原因，歸納其主要原因為負載用戶時變性、配電系統線路不對稱、以及

燈力併供變壓器對設備所帶來之影響。文獻<sup>[40]</sup>提出利用啟發性規則以及圖資系統來分析及改善配電系統的三相不平衡。研究結果指出系統饋線可利用重構的方式改善系統不平衡，此種方法的優點是不需要加入額外的設備。文獻<sup>[41-43]</sup>探討藉由太陽光電的變流器控制來穩定系統的電壓。其控制方式包含功因控制、電壓/乏控制 (Voltage/Var) 及電壓/瓦特 (Voltage/Watt) 等控制方法。文獻<sup>[44-47]</sup>提出在配電系統併入分散式電源的議題可規劃最佳化的併入量以解決系統損耗或不平衡率等議題，由這些文獻可彙整出國內外學者提出的最佳化方法包含：蒙特卡羅法、多目標最佳化、NSGA-II、啟示性規則演算法、基因演算法、以及蟻群演算法等。

### 參、模擬系統之饋線資料

本研究將針對台灣配電系統進行實際的模擬分析，模擬案例以澎湖重光、西衛、司法饋線，以及綠島所有的饋線為主。這些饋線的傳輸電壓等級均為  $11.45\text{kV}$ 。本研究首先以實際系統參數進行分析，利用 OpenDSS 進行負載潮流模擬。由於模擬系統採用實際的參數，因此研究結果將具有高度的實用性。澎湖地區西衛饋線，如圖 1 所示，總長為  $17.35$  公里，用戶數約為  $2810$  戶，夏季平均負載量為  $2631.3$  kW，冬季平均負載量  $1675.6$  kW。經由模擬結果得知，電壓不平衡率嚴重情況發生於夏季  $0.9611\%$  為最高，冬季則為  $0.6869\%$ ，均發生於 Bus 58 處。線路損耗分別為夏季  $59.1$  kW+j  $38.0$  kVar，冬季  $24.4$  kW+j  $15.8$  kVar。

澎湖地區重光饋線，如圖 2 所示，總長  $14.82$  公里，用戶數為  $2337$  戶，夏季平均負載量  $1864$  kW，冬季負載量  $1384$  kW，電壓不平衡率最嚴重的情況發生於夏季  $2.284\%$  為最高，冬季則為  $2.237\%$ ，均發生於 Bus 13 處。線路損耗分別為夏季  $69.9$  kW +j  $36.0$  kVar，冬季  $41.9$  kW +j  $21.4$  kVar。

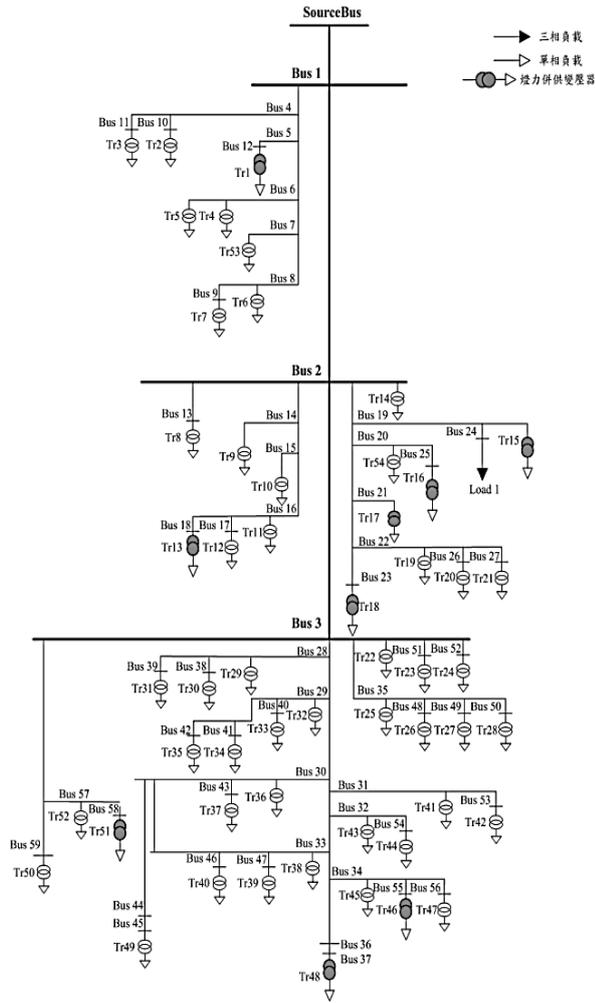


圖 1 澎湖地區西衛饋線單線圖

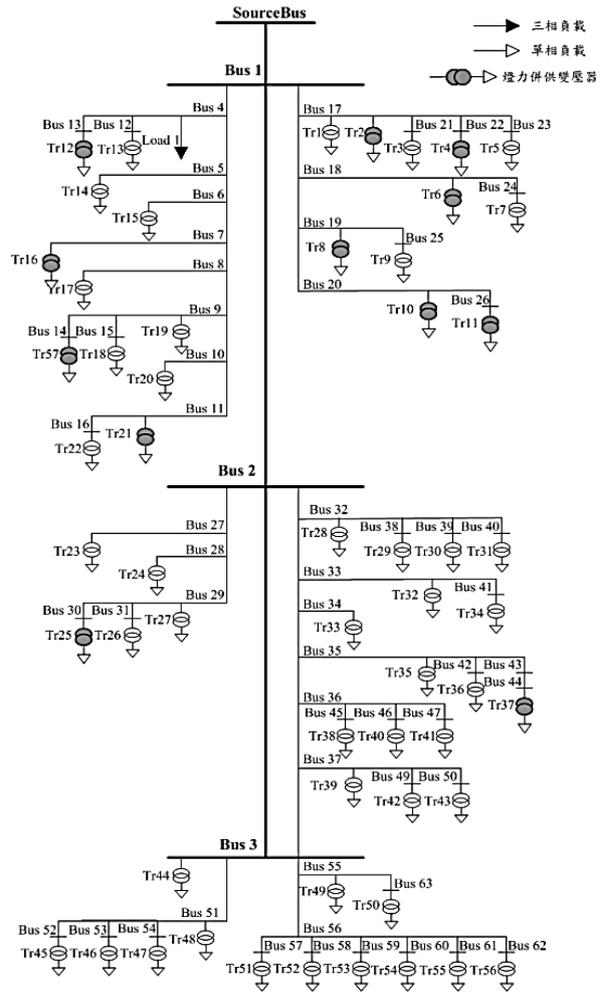


圖 2 澎湖地區重光饋線單線圖

澎湖地區司法饋線，如圖 3 所示，總長為 8.64 公里，用戶數為 423 戶，夏季平均負載量 1129 kW，冬季平均負載量 771 kW，電壓不平衡率最嚴重的情況發生於夏季 1.049%為最高，冬季則為 0.7305%，均發生於 Bus 11 處。線路損耗分別為夏季 87.8 kW +j 77.4kVar，冬季 61.1 kW +j 62.1kVar。

在綠島配電系統中(圖 4)，饋線總長度約 17.5 公里，降壓至 380/220/110V 電壓供電用戶。在綠

島系統饋線中，已有三處併入太陽光電，其裝置容量分別為 32.12kW、40.48kW、13.2kW，綠島夏季平均負載量為 1458.66 kW，電壓不平衡嚴重情況發生於 2.265%為最高，發生於 Bus 19 處。線路損耗 55.2kW+j50.2kvar。表 1 所示為所分析的各饋線線路損耗及電壓不平衡率。且不平衡率分別以負序電壓不平衡率最大值(D2%)以及零序電壓不平衡率最大值(D0%)來定義。

表 1 各饋線線路損耗及電壓不平衡率

	負序電壓不平衡率最大值(D2%)	零序電壓不平衡率最大值(D0%)	線路損耗(kW)
西衛饋線	0.9611	$2.137 \times 10^{-14}$	59.1kW+j38.0kVar
重光饋線	2.284	$1.925 \times 10^{-14}$	69.9kW+j36.0kVar
司法饋線	1.049	$1.919 \times 10^{-14}$	87.8kW +j77.4kVar
綠島饋線	2.265	$2.07 \times 10^{-14}$	55.2kW+j50.2kVar

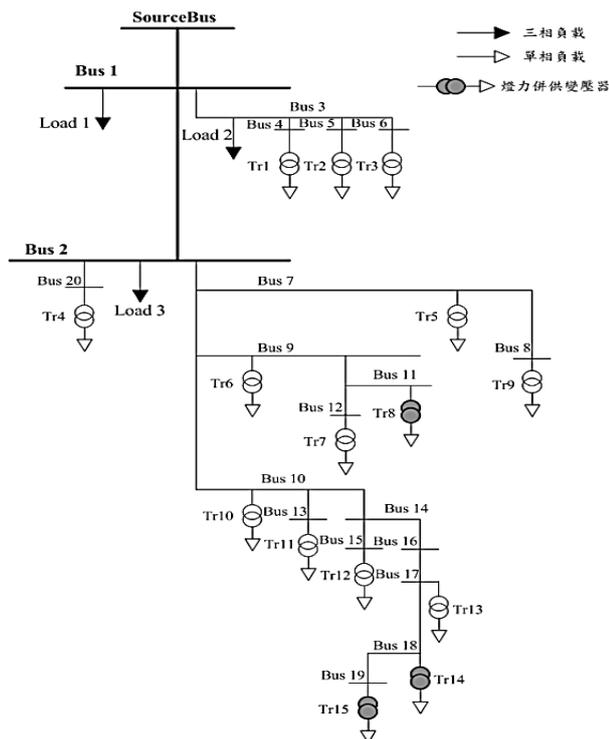


圖 3 澎湖地區司法饋線單線圖

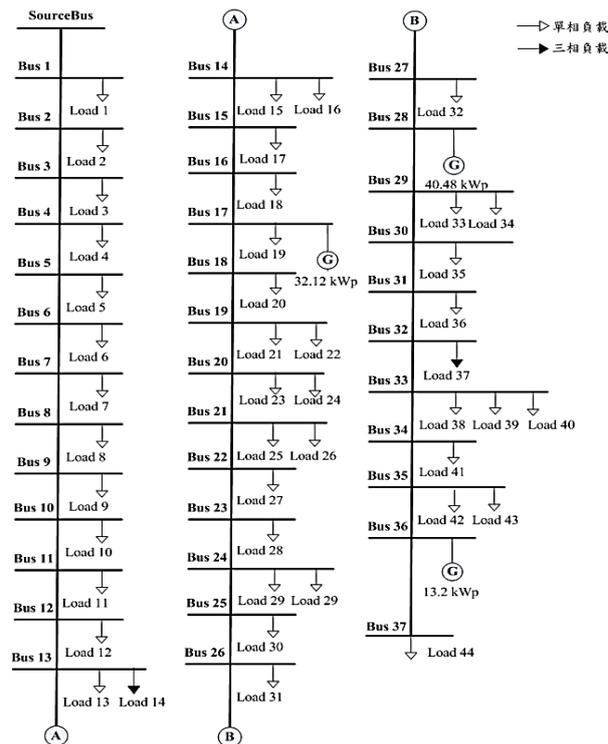


圖 4 綠島饋線單線圖

## 肆、OpenDSS 軟體介紹

### 一、OpenDSS 簡介

OpenDSS (Distribution System Simulator)是由美國 Electric Power Research Institute (EPRI)所發展，目前該軟體是開放的並分享在 SOURCEFORGE.NET 網站。OpenDSS 軟體主要用於配電系統之智慧電網研究與評估。目前全球許多顧問公司、工廠、研究機構、學校、供應商與配電自動化系統、公用工程及配電設備供應商都曾使用過這套應用軟體。

### 二、OpenDSS 功能

由於配電系統隨著負載快速成長，且設備數量眾多及複雜，智慧電網的應用將變得更加重要。分散式電源將在未來大量併入電網，這些發展需要一個完善的模擬工具做整合分析，OpenDSS 適合於多種不同的電力系統應用研究

如配電規劃分析、多相交流電路分析、分散式電源併網分析、年負載率和發電模擬、以及風力發電機規劃模擬。OpenDSS 軟體有多種內建的模組，如電力潮流、諧波、動態和故障分析等。近年來 OpenDSS 亦常被應用於太陽光電系統的模擬以及配電系統的研究<sup>[1-3, 6-7, 19-20]</sup>。

### 三、OpenDSS 程式說明

OpenDSS 有兩種執行方式，一種為獨立的執行程式，另一種以 COM 設計為導向的模式。獨立的執行程式提供了一個基本的使用者介面 (Main Simulation Engine)，而 COM 介面則可從多種的軟體平台，例如：Excel、Matlab、Python 和 Visual Basic 等，幫助使用者撰寫程式和查看求解的結果。此外，使用者可以自行定義 OpenDSS 的電路模型，透過 COM 介面執行功能，使用者可以下載程式碼，並根據其需求來進行修改，也可以開發動態連結程式庫 (Dynamic Link Library, DLL) 來插入 OpenDSS 程式，如圖 5 所示為 OpenDSS 電力應用軟體的架構，其步驟如下：

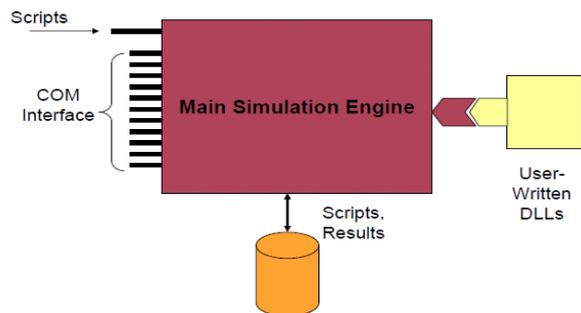


圖 5 OpenDSS 電力分析軟體架構

- 步驟一：撰寫 OpenDSS 文本(.DSS 檔)
- 步驟二：撰寫動態檔(.DLL 檔)
- 步驟三：啟動 COM 介面軟體(Matlab、Excel…等)
- 步驟四：進行模擬
- 步驟五：模擬結果可由 COM 介面軟體或 OpenDSS 呈現

## 伍、配電系統分析

本節將針對各處已完成建置之配電系統，根據模擬結果進行分析，觀察系統中三相不平衡、電壓變動及損耗能得知系統現存困境及提供改善空間。此外為提升配電系統之效能，將藉由分析出之結果得到系統改善方法的啟發，達成高效能配電系統規劃需求之目的，在此將針對三相不平衡及電壓變動進行主要探討。

### 一、線路損耗定義及成因

由於電流流經有電阻的導線，造成有效功率損耗，是造成線路損耗的最主要原因，其與線路流經電流、導線截面積、導線材料、以及線路長度有關。此外由於線路有電壓，而線間與線對地之絕緣可能遭受破壞產生漏電，及架空輸電線路帶電部分亦可能因電暈放電造成有效功率損耗。在一般正常情況下，後兩部分只佔極小份量。

減少線損提高電力傳輸的效率，是電力部門設計運行工作的主要內容之一。可以從下列幾點方面著手降低線損：一、提高電力系統的電壓等級；二、提高線路功因；三、降低線路阻抗。

### 二、電壓變動定義及規範

根據 IEEE Std.1159 規範，電壓變動的發生主要可分為：一、電壓驟升(Swell)，二、電壓驟降(Sag)，三、電壓中斷(Interruption)等三種。並可以依持續時間分為：瞬時(0.5~30 週期)、短暫(30 週期~3 秒)、暫時(3 秒~1 分鐘)等三種類型。

#### (一) 電壓驟升(Swell)

瞬間驟升的振幅範圍在 1.1~1.8pu 之間；短暫驟升為 1.1~1.4pu 之間；暫時驟升則是 1.1~1.2pu 之間。

#### (二) 電壓驟降(Sag)

電壓有效值介於 0.1~0.9pu 之間屬於電壓驟降。

#### (三) 電壓中斷(Interruption)

電壓有效值低於 0.1pu 以下時，屬電壓中斷。

## 三、三相不平衡定義及規範

電力系統上的電壓理論上以三相平衡為最理想，但由於受負載類型與配電方式的影響，導致系統三相電壓或電流之大小不相等，或是相角差不是 120 度，此一情況即為所謂的「不平衡」。不論在輸電系統或是配電系統中，一直都存在有三相不平衡的議題。

而三相電壓不平衡對於能源損耗而言扮演甚為重要的角色。「電壓不平衡率」就是用來衡量系統電壓不平衡程度的一個指標。然而，目前各界所使用的電壓不平衡率並無一致規定，計算的難易與適用時機亦不盡相同。表 2 所列為各種電壓不平衡率的定義，包含線電壓不平衡率、相電壓不平衡率、以及電壓不平衡因數。本文以電壓不平衡因數作為三相電壓不平衡的計算值，因為該因數除了包含大小外，亦考慮角度。因此定義上較為嚴謹。

## 四、三相不平衡成因

系統三相不平衡原因大致可分為正常情況與非正常情況。在配電系統中，除了三相線路外，亦存在單相及二相線路，且各個線路中也存在著各種類型的單相負載，即使系統設計分配為

三相平衡負載，但也會因負載使用時機不同而產生系統不平衡。又大多數系統並非設計時就為三相平衡，故在配電系統中三相不平衡的發生，幾乎無法完全避免。非正常情況引起之系統不平衡較正常情況嚴重，大部分原因為：線路發生開路或短路故障、開關接觸不良、設備或組件故障、一或二相熔絲熔斷、以及電動機單向運轉等。本文主要探討在正常操作情況下對系統造成不平衡的原因，可分為下列幾種類型：

(一) 配電系統架構

配電系統大部分受限於天然地形、街道巷弄及用戶分配等影響，導致除了三相線路外，亦存在放射狀單相以及二相分歧線路。系統架構上的不平衡普遍出現在配電系統，進而導致饋線產生不平衡電壓與電流。

(二) 負載用戶時變性

配電用戶大致可分為住宅型、工業型及商業型負載等。雖然配電系統設計時，單相配電變壓器大多以三相容量平衡目標建置，各單相變壓器由不同類型負載組成，因各類型負載用戶日負載曲線特性不同，及各個用戶負載投入與切離時間不定，進而導致系統產生不平衡電壓與電流。圖 6 表示不同類型用戶之典型日負載波形。

(三) 燈力併供變壓器大量併入

配電系統中有許多種設備，其中有平衡或非平衡變壓器、Y 接或△接負載、纜線、開關、以及電容器等，其中單相負載及用電特性是不平衡的主因之一。在台電配電系統中，為節省變壓器數量與空間，常使用燈力併供變壓器，可同時供電給單相(燈用)及三相(力用)用戶，因燈力併供變壓器接線方式為不對稱，會影響饋線三相不平衡。

表 2 各種電壓不平衡率之定義

名稱	定義	標準
LVUR% (線電壓不平衡率)	$LVUR\% = \frac{\text{Max}( V_{ab}-V_{avg}  \cdot  V_{bc}-V_{avg}  \cdot  V_{ca}-V_{avg} )}{V_{avg}} \times 100\%$ <p>其中 <math>V_{avg} = \frac{V_{ab}+V_{bc}+V_{ca}}{3}</math></p>	NEMA MG1-1993
PVUR(1)% (相電壓不平衡率 1)	$PVUR(1)\% = \frac{\text{Max}( V_a-V_{avg}  \cdot  V_b-V_{avg}  \cdot  V_c-V_{avg} )}{V_{avg}} \times 100\%$ <p>其中 <math>V_{avg} = \frac{V_a+V_b+V_c}{3}</math></p>	IEEE Std. 141-1993.
PVUR(2)% (相電壓不平衡率 2)	$PVUR(2)\% = \frac{\text{Max}(V_a \cdot V_b \cdot V_c) - \text{Min}(V_a \cdot V_b \cdot V_c)}{V_{avg}} \times 100\%$ <p>其中 <math>V_{avg} = \frac{V_a+V_b+V_c}{3}</math></p>	IEEE Std. 936-1987.
VUF (電壓不平衡因數，包含 D2%及 D0%)	$D_2 = d_2\% \angle \theta = \frac{V_2}{V_1} \times 100\% \angle \theta_v^2 - \theta_v^1$ $D_0 = d_0\% \angle \theta = \frac{V_0}{V_1} \times 100\% \angle \theta_v^0 - \theta_v^1$ <p>其中 V0=零相序電壓(Zero sequence voltage) V1=正相序電壓(Positive sequence voltage) V2=負相序電壓(Negative sequence voltage)</p>	IEC Pub. 34-1 IEEE Std.1959..

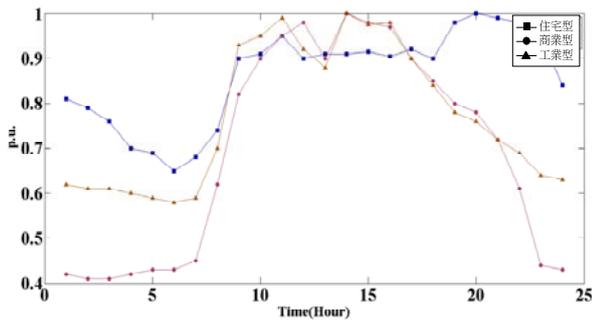


圖 6 不同類型用戶之典型日負載波形

在台電配電系統中，燈力併供變壓器(開 Y-開 D)由兩具單相變壓器連接高壓線路之二相，而低壓側可同時供電給單相及三相負載。這種接線方式雖然可節省成本與變壓器設置數量與空間，但由於接線方式不對稱，導致變壓器一次側之二相實功與虛功分配極度不平均，進而影響饋線之三相不平衡。圖 7 所示為典型燈力併供變壓器的接線圖。

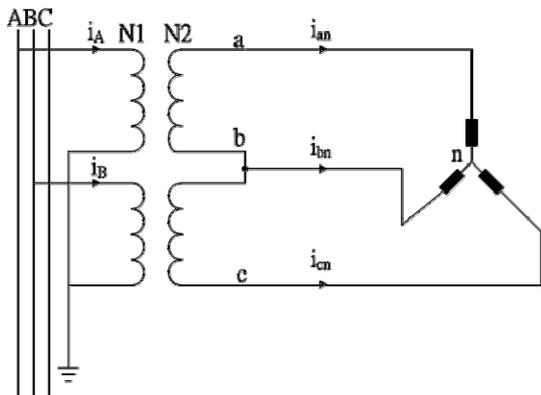


圖 7 燈力併供變壓器接線圖

圖 8 為燈力併供變壓器供給三相平衡電感性負載之電壓與電流相量圖。雖然負載為三相平衡負載，但因 A 相變壓器一次側電流落後電壓  $(30^\circ + \theta)$  度，反之在 B 相變壓器一次側電流超前電壓  $(30^\circ - \theta)$  度，導致二具單相變壓器之實功與虛功分配不平均，且會造成電流相角偏移，此為燈力併供變壓器造成三相不平衡之主要原因。

### 陸、太陽光電及智慧變流器

太陽光電發電系統主要由太陽光電電池

組、變流器、變壓器、蓄電池、系統控制器及併聯保護裝置等組成。

### 一、太陽光電發電系統併入指標

在進行配電系統分析時，可清楚得知因燈力併供變壓器以及線路架構不平衡等原因造成系統三相不平衡及線路損耗等。此外，當再生能源併入量逐步增加後，會隨著併入量的增加而造成系統過電壓。因此本研究嘗試藉由太陽光電的併入，達到降低系統三相不平衡率及線路損耗。本文參考再生能源發電系統併聯技術規範，在併入點為 600V 以下時，可併入的再生能源容量上限為 100kW，並實際應用於澎湖三個饋線以及綠島饋線。在各饋線上進行太陽光電單點併入的模擬，並比較併入量與三相不平衡率及損耗之關係。

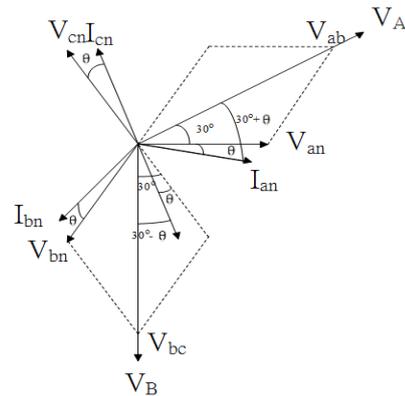


圖 8 燈力併供變壓器供給三相平衡電感性負載之電壓與電流相量圖

圖 9 及圖 10 分別為在重光饋線 Bus 13 上併入太陽光電後之併入量與電壓不平衡率及損耗的關係。由圖 9 及圖 10 可觀察到將太陽光電併入至重光饋線電壓不平衡最嚴重的匯流排 Bus 13，確實可使三相不平衡率及線路損耗下降，且隨著併入量的增加而呈接近線性的遞減。但是以上的趨勢並非在所有的併接點上發生，如圖 11 與圖 12 所示，當在司法饋線不平衡最嚴重的 Bus 11 上併入太陽光電，隨著併入量的增加，並未改善該點的電壓不平衡率以及饋線損耗。換言之，

我們應可找出太陽光電最佳併入點的位置以及相對應的敏感因子，以藉由太陽光電的併入而降低三相不平衡以及線路損耗。以下將介紹太陽光電單點併入的指標因子。

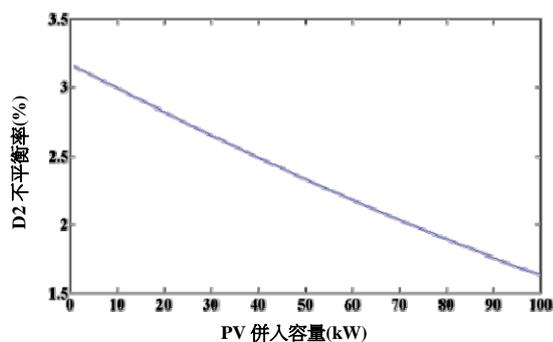


圖 9 重光饋線 PV 併入量與電壓不平衡率關係

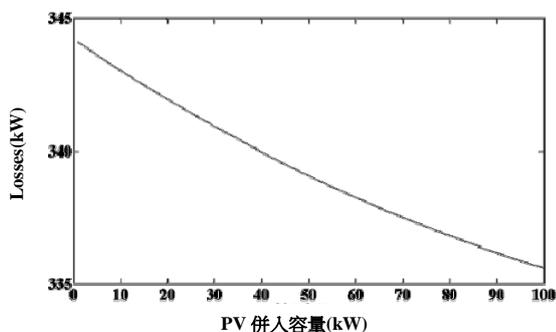


圖 10 重光饋線 PV 併入量與損耗關係

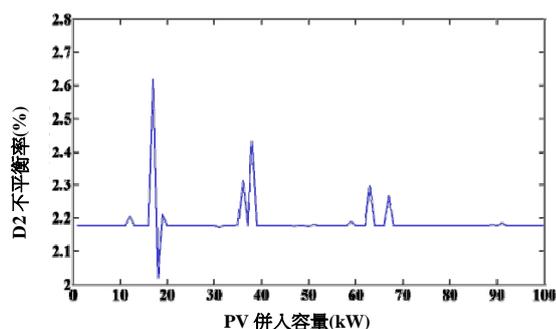


圖 11 司法饋線 PV 併入量與電壓不平衡率關係

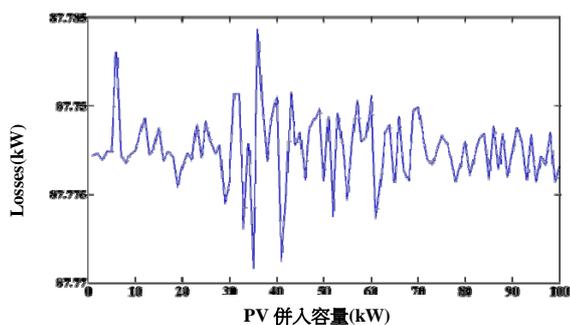


圖 12 司法饋線 PV 併入量與損耗關係

一個合適的太陽光電併入位置，可以大幅度地減少電壓不平衡率及線路損耗並提高發電效率，減少電網的發電成本。因此本文提出一個具體的併入點合適性指標，藉由觀察饋線上各匯流排併入太陽光電前後的差異，得到該匯流排是否為合適的併入位置。若某一匯流排併入太陽光電後之不平衡率小於原先不平衡率，則代表該匯流排適合併入太陽光電，反之，則不合適。併入點合適性指標值若越大，則表示該匯流排愈適合併入太陽光電，以利改善電壓不平衡率。方程式(1)為所提出的併入點合適性指標。

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{U_{original}(i) - U_{new}(i)}{U_{original}(i)} \quad (1)$$

其中

$U_{original}$ ：各匯流排原電壓不平衡率

$U_{new}$ ：各匯流排併入 PV 後之電壓不平衡率

$n$ ：饋線上匯流排總數

在此以澎湖司法饋線為例，利用式(1)可求得各匯流排的指標值  $I$ ，如表 3 所示。由表 3 所統計的指標值可得知匯流排 13 為最合適併入太陽光電之匯流排，併入後能有效改善系統電壓不平衡率及線路損耗。表 3 另外亦統計若在每個匯流排上併入 1kW 的太陽光電後，造成系統總不平衡率的數值。此數值為系統中每個匯流排不平衡率的累加值。由表 3 的指標值(第二欄)以及系統總不平衡率(第三欄)可繪出圖 13 的關係曲線。此關係曲線清楚呈現近似線性的關係，換言之，在指標值愈大的匯流排併入太陽光電，則愈可降低系統總電壓不平衡率，達到併入太陽光電的效果之一。

在先前圖 11 與圖 12 中，由於太陽光電單點併入的位置為匯流排 11，不是適當的併入點。因此在匯流排 11 併入太陽光電後並未改善系統電壓不平衡率及線路損耗。然而若在併入合適性指標  $I$  最大的匯流排 13 併入，則可隨著併入量的增加而有效降低系統總電壓不平衡率以及線路損耗。其模擬結果如圖 14 及圖 15 所示。

表 3 澎湖司法饋線合適性指標

匯流排 No.	指標值 I	系統總電壓不平衡率(%)
10	-0.03157	11.1838
5	-0.02753	11.1815
6	-0.02746	11.1815
17	-0.02311	11.1789
15	-0.02262	11.1784
7	-0.01208	11.1766
18	-0.0037	11.1704
11	0	11.1702
4	0.04342	11.1523
20	0.047414	11.1506
8	0.048058	11.1503
9	0.050913	11.1491
12	0.052085	11.1489
10	0.052577	11.1484
10	0.052817	11.1483
13	0.053022	11.1482

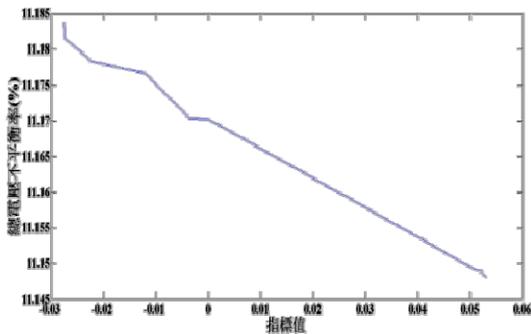


圖 13 澎湖司法饋線上的指標值與不平衡率之相關性

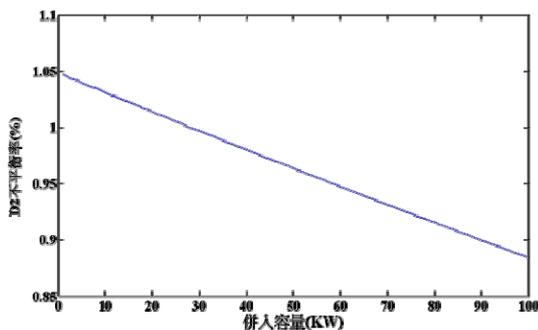


圖 14 司法饋線參考合適性指標併入太陽光電後之 PV 併入量與電壓不平衡率的關係

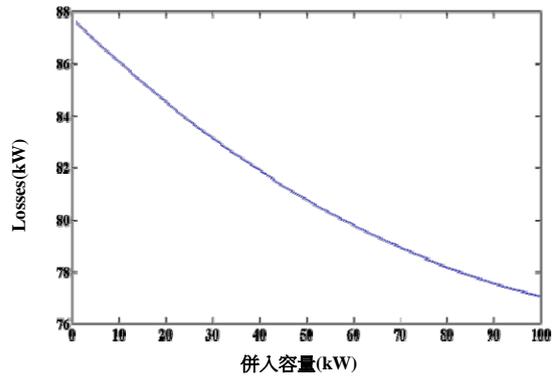


圖 15 司法饋線參考合適性指標併入太陽光電後之 PV 併入量與線路損耗的關係

## 二、智慧變流器

智慧變流器主要使用在太陽光電系統併入配電系統後，若發生電壓過高或過低的情形，可藉由吸收或提供虛功來達到降低或提升電壓的目的，其控制電壓的方法主要可分為下列三類：

- (一)功率因數控制(PF Control)
- (二)電壓/乏控制(Voltage/Var Control)
- (三)電壓/瓦特控制(Voltage/watt Control)

電壓/乏控制技術是藉由偵測系統電壓大小，控制變流器提供或吸收虛功的量，達到控制電壓之目的。圖 16 表示某一變流器之電壓/乏控制曲線，由圖 16 得知，隨著電壓增加或降低，變流器會主動控制虛功的吸收或提供的量，以達到電壓穩定的目的。舉例而言，當併接點電壓低於 1pu 時，則變流器提供虛功，且隨著電壓降低而增加虛功提供的量，但是當電壓降低至 V2 後，由於受限於變流器可控制的容量大小，則維持一固定的虛功提供量。反之，當併接點電壓大於 1pu 時，則變流器吸收虛功藉此降低電壓。

電壓/瓦特控制技術是藉由偵測系統電壓的大小，控制太陽光電的實功輸出以達到控制電壓之目的，其精神類似於切除(Curtail)部分輸出實功。如圖 17 所示，當電壓高於 V2 值，則變流器將開始降低輸出，以達到降低電壓之目的。當電壓高於 V3 時則使太陽光電完全沒有輸出。

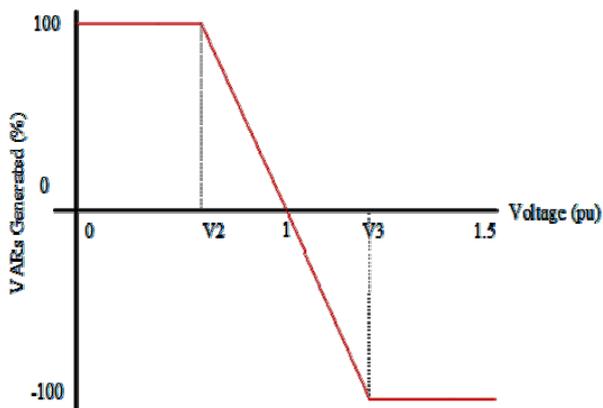


圖 16 電壓/乏控制曲線

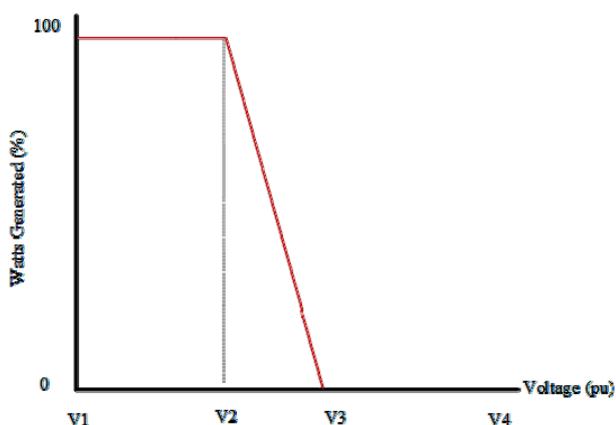


圖 17 電壓/瓦特控制

### 三、智慧變流器應用於系統過電壓情境

併入大量太陽光電容易導致併入點電壓過高，不過可使用智慧變流器控制技術來達到電壓穩定之效果。在此藉由澎湖司法饋線進行模擬驗證。假設在圖 3 的匯流排 19(饋線末端)併入大容量的太陽光電，首先觀察系統電壓升的幅度，接著利用智慧變流器來達到降低電壓的目的。圖 18 顯示本研究之智慧變流器控制流程圖。在此流程圖中，首先藉由合適性指標決定太陽光電併入點，接著逐步加大併入容量(由 1MW 逐步增加至 6MW)，最後利用智慧變流器的控制來降低電壓升。而智慧變流器的控制分別使用以下幾種不同的控制模式：功因控制(0.98 lagging、0.95 lagging)、兩種 Voltage/Var 控制、以及兩種 Voltage/Watt 控制。其中兩種 Voltage/Var 控制設

定曲線如圖 19 及圖 20 所示。而使用的二種 Voltage/Watt 控制設定曲線如圖 21 所示(兩種的設定曲線相同，但數值相異)。

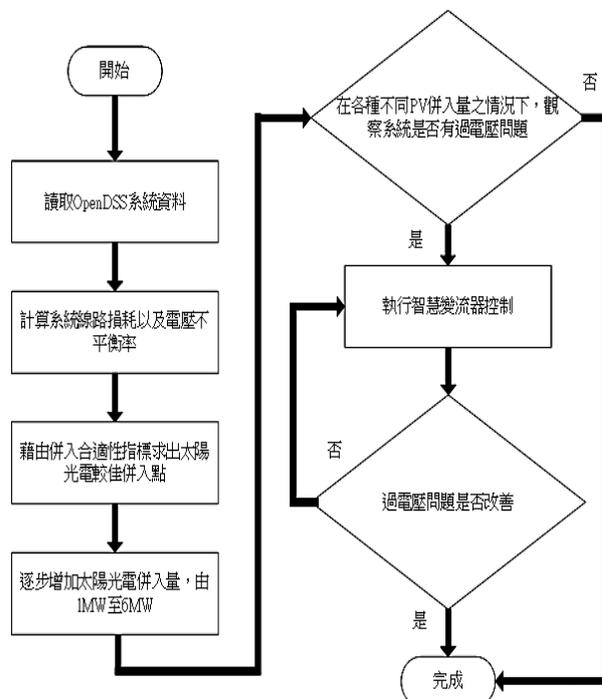


圖 18 智慧變流器之控制流程圖

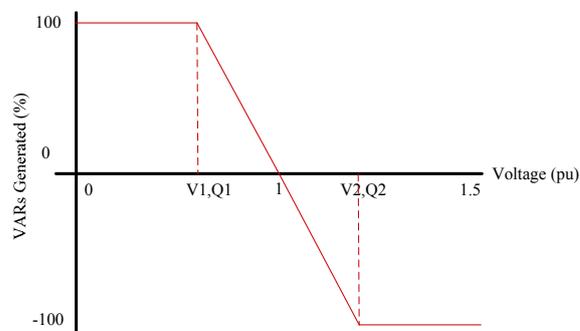


圖 19 第一種 Voltage/Var 控制設定曲線

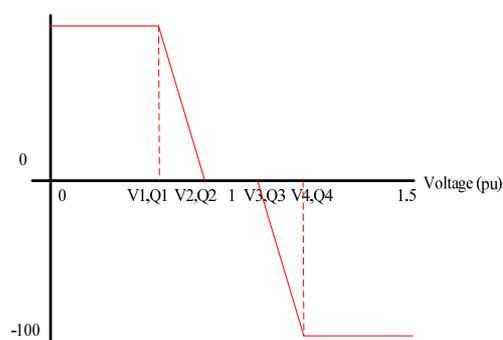


圖 20 第二種 Voltage/Var 控制設定曲線

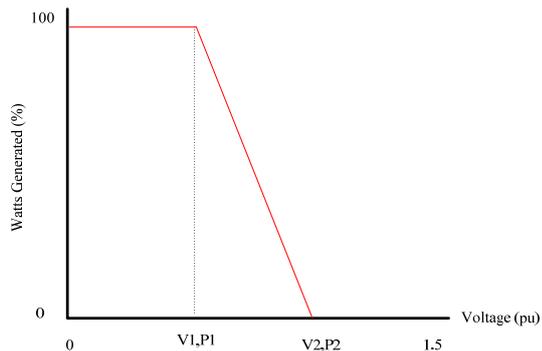


圖 21 Voltage/Watt 控制設定曲線

表 4 為利用各種不同智慧變流器控制後，對於系統電壓改善的模擬結果。若系統中沒有任何

電壓控制的機制，由表中數據(Base Case)可明顯發現隨著太陽光電併入量的增加，電壓自然會隨著提高，故以各種變流器控制方式來進行電壓調控。以模擬結果而言，當大容量的太陽光電併入，可藉由 Volt/Watt 控制模式來降低電壓，但在 6MW 太陽光電併入的情境下，實際的功率輸出已經降低至 2MW，因此這種控制方式雖然達到電壓穩定效果，卻大幅減少太陽光電的輸出。反觀在 Volt/Var 電壓控制模式下，雖然電壓無法壓低至 1pu 左右，但已經有效降低電壓升的現象，且不影響太陽光電的實功輸出。

表 4 智慧變流器控制模擬結果(併入點電壓(pu 值))彙整表

	0	1	2	3	4	5	6	備註
Base Case	0.985	0.9937	1.002	1.011	1.019	1.027	1.035	沒有任何的變流器控制模式
功因控制 (0.98 lagging)	N/A	0.9921	0.999	1.006	1.012	1.019	1.025	
功因控制 (0.95 lagging)	N/A	0.9917	0.9982	1.005	1.011	1.017	1.023	
第一種 Volt/Var 控制	N/A	0.9962	1.002	1.01	1.016	1.022	1.028	參照圖 20 (V1,V2,V3,V4 : 0.5,0.95,1.05,1.5 , Q1,Q2,Q3,Q4 : 100,100,-100,-100)
第二種 Volt/Var 控制	N/A	0.9937	1.003	1.009	1.014	1.017	1.023	參照圖 21 (V1,V2,V3,V4,,V5,V6 : 0.5,0.95,0.98,1.02,1.05,1.5 , Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6 : 100,100,0,0,-100,-100)
第一種 Volt/Watt 控制	N/A	0.994	1.002	1.008	1.012	1.013	1.001	參照圖 22 (V1,V2,V3,V4 : 0.5,0.95,1.05,1.5 , P1,P2,P3,P4 : 100,100,0,0)
第二種 Volt/Watt 控制	N/A	0.994	1.002	1.003	0.999	0.990	0.987	參照圖 22 (V1,V2,V3,V4 : 0.5,0.95,1.03,1.5 , P1,P2,P3,P4 : 100,100,0,0)

#### 四、智慧變流器應用於電壓變動情境

在現實情況中，天候因素(例如日蝕或是雲層遮蔽)以及人為因素皆有可能造成太陽光電瞬間

或短時間內失去供電能力，進而造成電壓驟變之情況。因此本研究亦模擬瞬間照度變動對於系統電壓變動的影響。在此假設將大容量太陽光電(裝置容量為 5.5MW)併入於澎湖司法饋線匯流排 19

上，並觀察在照度劇烈變動的情形下，對於電壓變動的影響。最後比較系統在有無智慧變流器控制的情況下，電壓變動率之差異。本研究中所採用的智慧變流器控制模式為 Volt/Var 控制，其設定曲線如同表 4 中第一種 Volt/Var 控制的設定。本研究的目的是模擬因照度劇烈變化下，是否可利用智慧變流器將電壓變動控制在台電公司再生能源發電系統併聯規範中電壓變動率 2.5% 的限制內。圖 22 所示為假設的太陽光電照度變動曲線。

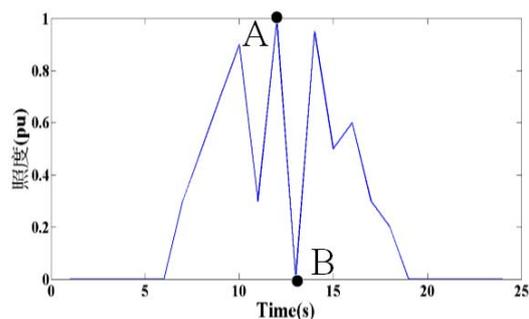


圖 22 照度變化圖

圖 23 所示為在沒有智慧型變流器控制下，系統 4 個匯流排的電壓變化。其中匯流排 19 與 18 靠近太陽光電併接點，而匯流排 10 與匯流排 2 離併入點較遠。由圖 23 可以發現鄰近太陽光電併入點的電壓極易受到照度變動的影響，造成較劇烈的電壓變動。若採用智慧變流器，則系統 4 個匯流排的電壓變化如圖 24 所示。可以發現藉由智慧變流器的控制，可以降低電壓變動的幅度。表 5 顯示澎湖司法饋線在照度變化下對電壓變動之影響，並比較有無智慧變流器的控制對於電壓變動的差異。表 5 中照度變化前是指圖 22 中的 A 點，表示太陽光電滿載輸出，而照度變化後是指圖 22 中的 B 點，表示照度降低至 0。本案例是考慮非常極端的情境。

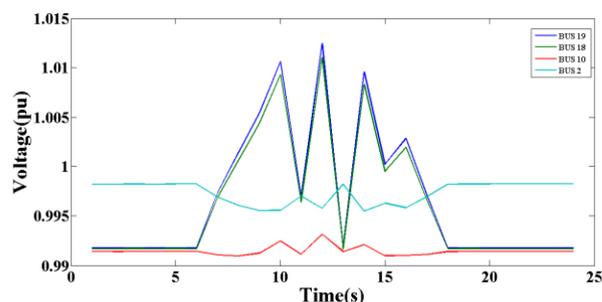


圖 23 四個匯流排在無智慧變流器控制下的電壓變化曲線

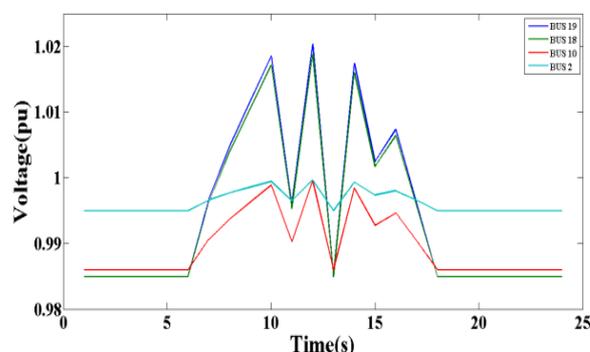


圖 24 四個匯流排在有智慧變流器控制下的電壓變化曲線

表 5 澎湖司法饋線照度變化對電壓變動之影響 (考量有無智慧變流器的控制情境)

無智慧變流器控制				
位置	照度變化前(pu)	照度變化後(pu)	電壓變動率(%)	備註
Bus 2	0.9996	0.9950	0.46	
Bus 10	0.9995	0.9860	1.35	
Bus 18	1.0189	0.9850	3.33	超過電壓變動率 2.5%
Bus 19	1.0204	0.9850	3.47	超過電壓變動率 2.5%
有智慧變流器控制				
Bus 2	0.9982	0.9982	0	參照圖 20 (V1,V2,V3,V4 : 0.5,0.95,1.05,1.5 , Q1,Q2,Q3,Q4 : 100,100,-100,-100)
Bus 10	0.9931	0.9914	0.17	
Bus 18	1.0111	0.9917	1.92	
Bus 19	1.0125	0.9918	2.04	

## 柒、太陽光電最大併入量探討

經濟部能源局規劃於 2030 年達到太陽光電發電系統設置容量的目標為 8,700 MW，以建立我國太陽光電設置應用完善環境，積極推動太陽光電發電系統。推動策略採「逐步擴大、先屋頂後地面」，並以穩健成長、負責任的態度來帶領國內太陽光電能源永續發展。依據經濟部能源局推動「陽光屋頂百萬座」計畫，2012 年規劃設置目標為 100MW，2013 年原訂目標 130MW 因國內太陽光電安裝需求旺盛，設置目標上調至 175MW，2014 年設置目標提升至 210MW，以鼓勵屋頂型太陽光電系統為主，預定 2015 年完成 1,115MW，2020 年達到 3,180MW、2025 年達到 6,200 MW 的太陽光電發電系統設置，2030 年臺灣太陽光電發電設置容量目標 8,700 MW，以建立國內設置實績，達成產業、環境等多重效益。

然而大量太陽光電的併入勢必對電網造成衝擊，因此各饋線可併接的最大容量估計是一項重要的議題。本研究嘗試以電荷演算法(Charged System Search, CSS)進行饋線最大可併接容量的估算，研究結果將可提供系統規劃與操作者的重要參考。

### 一、電荷演算法簡介

電荷演算法是一種新型且高效率的最佳化演算法，它使用帶電法和牛頓力學法來引導搜索過程，而不是使用仿生演算法的隨機搜索。電荷演算法的搜索過程可概述如下。

步驟 1：每個帶電粒子分配一個隨機位置，而每個帶電粒子的帶電量大小由下式計算：

$$q_i = \frac{fit(i) - fitworst}{fitbest - fitworst}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

其中  $fitbest$  和  $fitworst$  分別為到目前為止適應值最好和最壞的粒子； $fit(i)$ 代表第  $i$  個帶電粒子的

適應值； $N$  是帶電粒子的數量。兩個帶電粒子間的距離  $r_{ij}$  可由下式計算：

$$r_{ij} = \frac{\|X_i - X_j\|}{\|(X_i + X_j)/2 - X_{best}\| + \varepsilon}, \quad (3)$$

其中  $X_i$  和  $X_j$  分別為第  $i$  個和第  $j$  個帶電粒子的位置， $X_{best}$  為目前最好帶電粒子的位置， $\varepsilon$  是一個避免奇異解的很小正數。

步驟 2：帶電粒子的初始位置隨機放置在搜尋空間裡

$$x_{i,j}^{(0)} = x_{i,\min} + rand \cdot (x_{i,\max} - x_{i,\min}), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

其中  $x_{i,j}^{(0)}$  為對第  $j$  個帶電粒子的第  $i$  個變數決定其初始值； $x_{i,\min}$  和  $x_{i,\max}$  分別為第  $i$  個變數的最小和最大值； $rand$  為介於 0 至 1 的隨機變數。帶電粒子的初始速度為 0，表示成：

$$v_{i,j}^{(0)} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

步驟 3：每個帶電粒子移動的機率透過下式來決定：

$$p_{ij} = \begin{cases} 1 & \frac{fit(i) - fitbest}{fit(j) - fit(i)} > rand \quad \vee \quad fit(j) > fit(i) \\ 0 & else. \end{cases} \quad (6)$$

作用於帶電粒子的合力  $F_j$  由下式計算：

$$F_j = q_j \sum_{i,i \neq j} \left( \frac{q_i}{a^3} r_{ij} \cdot i_1 + \frac{q_i}{r_{ij}^2} \cdot i_2 \right) \cdot p_{ij} \cdot (X_i - X_j), \quad \begin{cases} j = 1, 2, \dots, N, \\ i_1 = 1, i_2 = 0 \Leftrightarrow r_{ij} < a, \\ i_1 = 0, i_2 = 1 \Leftrightarrow r_{ij} \geq a, \end{cases} \quad (7)$$

其中  $F_j$  是作用在第  $j$  個帶電粒子的合力，如圖 26 所示， $a$  是每個帶電粒子的半徑，由下式計算：

$$a = 0.10 \times \max\{x_{i,\max} - x_{i,\min} \mid i = 1, 2, \dots, n\} \quad (8)$$

步驟 4：每個帶電粒子的更新位置和更新速度由下式計算：

$$X_{j,new} = rand_{j1} \cdot k_a \frac{F_j}{m_j} \cdot \Delta t^2 + rand_{j2} \cdot k_v \cdot V_{j,old} \cdot \Delta t + X_{j,old}, \quad (9)$$

$$V_{j,new} = \frac{X_{j,new} - X_{j,old}}{\Delta t} \quad (10)$$

其中  $k_a$  和  $k_v$  代表加速度和速度的係數，由下式計算： $k_v = 0.5(1 - iter/iter_{max})$ ,  $k_a = 0.5(1 + iter/iter_{max})$  其中  $iter$  為實際疊代的次數，而  $iter_{max}$  為疊代次數的最大值， $m_j$  為第  $j$  個帶電粒子的質量， $\Delta t$  設定為 1。

## 二、應用電荷演算法決定太陽光電最大併入量

本研究以澎湖重光、西衛、司法饋線以及綠島饋線為例，以電荷演算法尋求饋線中可併接的最大太陽光電容量，同時需滿足各饋線的電壓不平衡率在 2% 以下、11.4kV 傳輸容量為 10MVA 以下、以及操作電壓保持在 0.975p.u. 至 1.025p.u. 之間的限制條件(台電公司目前實際在配電系統的運轉操作中，儘量維持供電端穩態系統電壓介於 0.975p.u. 至 1.025p.u. 之間)。其目標函數以及限制條件如下所示：

$$\text{目標函數： } Max \sum_{i=1}^N P_i \quad (11)$$

限制式：

$$0.975pu \leq V_i \leq 1.025pu \quad (12)$$

$$V_{i,unbalance} \leq 2\% \quad (13)$$

$$P_{ij} \leq 10MVA \quad (14)$$

其中  $P_i$  表示在第  $i$  個匯流排上的太陽光電發電量； $V_i$  表示在第  $i$  個匯流排上的電壓； $P_{ij}$  表示匯流排  $i$  至匯流排  $j$  的傳輸容量。

本研究中的目標函數是求得最大太陽光電總併入量。在限制條件中，電壓不平衡率參考德國規範 VDE-AR-N 4105 中所規範的 2% 限制值，線路容量則以 500MCM 電纜的 10MVA 為限制。此外，由於夏季的太陽光電發電量較大，因此本研究主要以夏季可併入的最大太陽光電為研究目標。

圖 25 為電荷演算法用在太陽光電最大併入量最佳化佈局上的流程圖。藉由此流程圖的模擬程序，可將每個匯流排上的最佳太陽光電併入量計算而得，且最後可獲得饋線上最大的太陽光電併入量。

本研究首先考慮未裝設智慧變流器下的模擬結果，如表 6 所示。例如澎湖司法饋線可併入的最大太陽光電值為 3.499MW，此時該饋線的總負載量為 1.129MW。換言之，約有 2.37MW 的太陽光電發電量逆送。在相同的案例下，若考慮太陽光電的智慧變流器控制，則可提升太陽光電的總併入容量。例如在第一種 Volt/Var 控制模式下，太陽光電的總併入量可增加至 5.366MW。表 6 中的各種控制模式定義與表 4 相同，在此不再贅述。

表 6 四條饋線在不同智慧變流器控制模式下之太陽光電最大併入量

饋線	總負載量 (MW)	Base Case	第一種 Volt/Var 控制	第二種 Volt/Var 控制	第一種 Volt/Watt 控制	第二種 Volt/Watt 控制
司法饋線總併入量(MW)	1.129	3.499	5.366	9.248	5.145	5.054
西衛饋線總併入量(MW)	2.631	1.938	2.699	4.053	2.699	2.699
重光饋線總併入量(MW)	1.864	2.078	2.696	3.320	2.557	2.493
綠島饋線總併入量(MW)	1.458	1.884	5.042	7.870	4.371	3.281

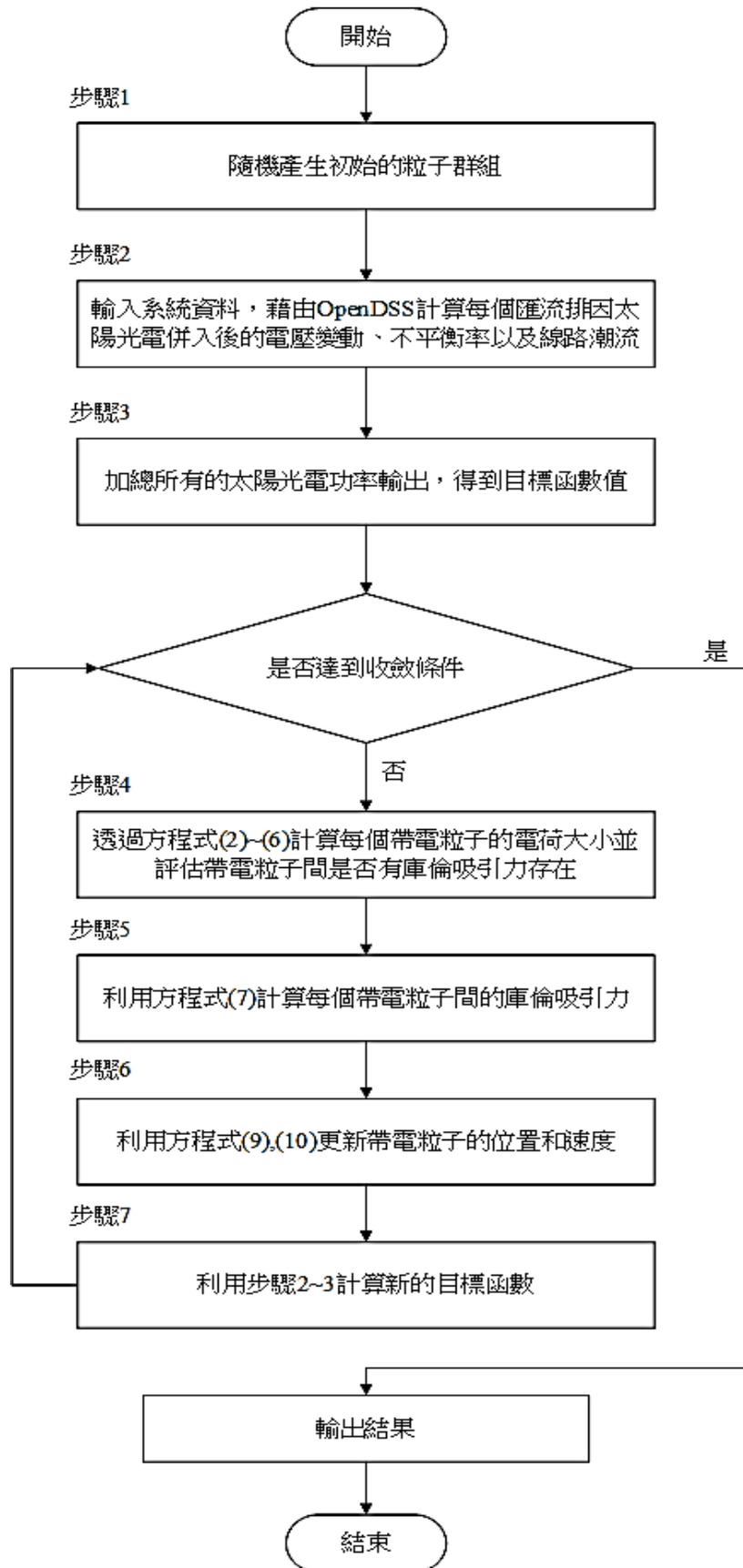


圖 25 電荷演算法用在太陽光電最大併入量最佳化佈局上的流程圖

## 捌、結論

本論文首先針對配電系統中三相不平衡課題進行探討，並在模擬中明顯證實燈力併供變壓器對於配電系統的影響。但在單、雙相及三相低壓配電系統中，似乎線路不平衡更加顯著。根據澎湖系統西衛饋線、重光饋線、司法饋線，以及綠島系統饋線藉由 OpenDSS (Distribution System Simulator) 的模擬分析結果可知，燈力併供變壓器會影響饋線各相電流分布，造成線路損耗上升以及中性線電流增加。中性線電流增加將可能觸發過電流電驛的誤動作，因此或許可藉由單相太陽光電併入來降低系統三相不平衡。然而太陽光電並非隨意併入便可降低不平衡，例如在某些饋線的匯流排上併入太陽光點並不會降低系統不平衡。因此本研究提出合適性指標來篩選有利的匯流排進行併入，而指標值的計算是由 OpenDSS 與 Matlab 進行介面連接，自動計算每個匯流排在併入太陽光電後的不平衡率變化。就模擬結果而言，此提出的合適性指標的實用性是肯定的，確實能有效地改善系統中的三相不平衡，不過此一指標也有一些缺點，例如僅考慮不平衡率因素而未考慮其他因素(例如線損)。此外，由於太陽光電只有在白天有日照時才能進行發電，所以利用太陽光電進行改善的策略只有在白天可以進行，在夜晚可能需要其他再生能源設備或儲能系統進行輔佐。

大量的太陽光電併入會造成系統電壓升，若適當的應用智慧變流器的控制來降低電壓升，便可增加系統的太陽光電發電占比。智慧變流器具備補償虛功及調節太陽光電實功的能力，藉此改善大量併入太陽光電情境下的電壓升現象。一般智慧變流器的控制方法涵蓋功因控制、電壓/乏(Volt/Var)控制、以及電壓/瓦特(Volt/Watt)控制。其中電壓/瓦特(Volt/Watt)控制雖然可大幅降低電壓升，但同時亦犧牲太陽光電實功的輸出。因為其控制策略是降低輸出實功以達到電壓穩定的功能。對於提升太陽光電併入量的目標，或許利

用電壓/乏的控制模式可達到更好的效果，其控制策略是藉由智慧變流器吸收虛功，而達到電壓下降的效果，進而提升太陽光電併入量。

太陽光電最大併入量一直是熱門討論的議題，本論文利用電荷演算法來尋求饋線上太陽光電的最大併入量，並以線路傳輸容量、電壓不平衡率、以及正常操作電壓範圍為限制條件進行模擬。此外，由於大量太陽光電的併入將造成電壓升，因此本研究利用智慧變流器的控制來改善系統電壓升，且在抑制電壓升的同時可增加太陽光電的併入量。由模擬結果可發現，在增加太陽光電最大併入容量上，電壓/乏控制模式確實優於電壓/瓦特控制，但可能因其控制曲線設定的不同而影響太陽光電最大併入量增加的程度。

## 玖、參考文獻

- [1] Song Nie, Xiao-Peng Fu, Peng Li, Fei Gao, Cheng-Di Ding, Hao Yu and Cheng-Shan Wang, "Analysis of the Impact of DG on Distribution Network Reconfiguration Using OpenDSS," *IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia*, May 2012.
- [2] Juan A. Martinez and Jacinto Martin-Arnedo, "Distribution Load Flow Calculations Using Time Driven and Probabilistic Approaches," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, July 2011.
- [3] Naveen Venkatesan<sup>1</sup>, Jignesh Solanki<sup>1</sup> and Sarika KhushalaniSolanki<sup>1</sup>, "Demand response model and its effects on voltage profile of a distribution system," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, July 2011.
- [4] R. Caldon, M. Coppo and R. Turri, "Distributed voltage control strategy for LV networks with inverter-interfaced generators," *Electric Power Systems Research*, vol. 107, pp. 85-92, February 2014.
- [5] Syafii, Khalid Mohamed Nor and Mamdouh Abdel-Akher, "Analysis of Three Phase Distribution Networks with Distributed Generation," *IEEE International Power and*

- Energy Conference*, Dec. 2008, pp. 1563-1568.
- [6] D. Montenegro, M. Hernandez and G. A. Ramos, "Real time OpenDSS framework for distribution systems simulation and analysis," *Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution : Latin America Conference and Exposition*, 2012.
- [7] Dominic Paradis, Farid Katiraei and Barry Mather, "Comparative analysis of time-series studies and transient simulations for impact assessment of PV integration on reduced IEEE 8500 node feeder," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2013.
- [8] Arash Dehestani Kolagar, Pegah Hamedani and Abbas Shoulaie, "The effects of transformer connection type on voltage and current unbalance propagation," *Power Electronics and Drive Systems Technology*, 2012, pp. 308-314.
- [9] Hong-Chan, Chin Ren-Jin, Chung Yuh-Sheng and Su Han-Hao Sun, "Application of the ant colony system for open wye-open delta transformer's phase sequence adjustment," *IEEE Region 10 Conference*, vol. 3, pp. 432-435, 2004.
- [10] Tsai-Hsiang Chen and Jeng-Tyan Cherng, "Evaluation of load division among transformers of different capacities in the grounded wye-delta and open wye-open delta banks under balanced loading and various power factor conditions," *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 563-573, 2000.
- [11] Surya Santoso and Roger C. Dugan, "Experiences with the new open wye-open delta transformer test cases for distribution system analysis," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 1, pp. 884-889, 2005.
- [12] T. H. Chen and J. D. Chang, "Open wye-open delta and open delta-open delta transformer models for rigorous distribution system analysis," *IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*, vol. 139, issue 3, pp. 227-234, May 1992.
- [13] L. C. Caverley and J. V. Sastry, "Sequence Networks for Faults on Open-Wye Open-Delta Transformer Banks [includes discussion]," *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 72, issue 2, Jan. 1953
- [14] J. C. Neupauer, "Unbalanced Open-Wye Open-Delta Transformer Banks [includes discussion]," *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 75, Issue 3, Jan. 1956.
- [15] W. H. Kersting, "Causes and Effects of Unbalanced Voltages Serving an Induction Motor," *Rural Electric Power Conference*, 2000, pp. B3/1-B3/8.
- [16] Chao-Shun Chen, Chia-Hung Lin, Wei-Lin Hsieh, Cheng-Ting Hsu and Te-Tien Ku, "Enhancement of PV Penetration With DSTATCOM in Taipower Distribution System," *IEEE Power Systems*, vol. 28, Issue 2, pp. 1560-1567, 2012. Dec. 2012.
- [17] Lepadat. I., Helerea. E. and Abagiu. S., "Effect of the Neutral Interruption on the Unbalanced Three-Phase Consumers," *International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, 2014, pp.192-197.
- [18] Chuo-Yean Chang, Jen-Shun Yu and Chao-Shun Chen, "Effects of open-wyeopen-delta transformers on the operation of distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol.10, issue 3, pp. 167-174, May 1986.
- [19] Adnan Anwar and H. R. Pota, "Loss reduction of power distribution network using optimum size and location of distributed generation," *Universities Power Engineering Conference*, Australasian, 2011.
- [20] Adnan Anwar and H. R. Pota, "Optimum Allocation and Sizing of DG Unit for Efficiency Enhancement of Distribution System," *IEEE International Power Engineering and Optimization Conference*, Malaysia, 2012, pp. 165-170.
- [21] M. Tavakoli Bina and A. Kashefi, "Three-phase unbalance of distribution systems\_Complementary analysis and experimental case study," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 35, Issue 1, pp.201-209, Feb. 2012.
- [22] Paulo Vinicius Santos Valois, Carlos Marcio Vieira Tahan, Nelson Kagan and Hector Arango, "Voltage unbalance in low voltage distribution networks," *International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, 2001.
- [23] Sumit Paudyal, Claudio A. Cañizares and

- Kankar Bhattacharya, "Optimal Operation of Distribution Feeders in Smart Grids," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, Issue10, pp. 4495-4503, Feb. 2011.
- [24] Kein Huat Chuaa, Jianhui Wonga, Yun Seng LimaPhil Taylorb, Ezra Morrissa and Stella Morris, "Mitigation of Voltage Unbalance in Low Voltage Distribution Network with High Level of Photovoltaic System," *The Proceedings of International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies*, vol. 12, pp. 495-501, 2011.
- [25] Farhad Shahnia, Arindam Ghosh, Gerard Ledwich and Firuz Zare, "Voltage unbalance improvement in low voltage residential feeders with rooftop PVs using custom power devices," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 55, pp. 362-377, Feb. 2014.
- [26] Aramizu. J and Vieira, J.C.M., "Analysis of PV generation impacts on voltage imbalance and on voltage regulation in distribution networks," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2013.
- [27] Chin Ho Tie and Chin Kim Gan, "Impact of grid-connected residential PV systems on the Malaysia low voltage distribution network," *IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference*, 2013, pp. 670-675.
- [28] Tzartzev, R., Grady, W.M. and Patel, J., "Impact of high-penetration PV on distribution feeders," *IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies*, Oct. 2012.
- [29] Aghatehrani, R. and Golnas, A., "Reactive power control of photovoltaic systems based on the voltage sensitivity analysis," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012.
- [30] Solanki, S. K., Ramachandran, V. and Solanki, J., "Steady state analysis of high penetration PV on utility distribution feeder," *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2012, pp. 1-6.
- [31] Chao-Shun Chen, Chia-Hung Lin, Wei-Lin Hsieh, Cheng-Ting Hsu, Te-Tien Ku and Chin-Ying Ho, "Effect of load transfer to penetration level of PV generation in distribution system," *IEEE Innovative Smart Grid Technologies*, 2012, pp. 1-6.
- [32] Alam, M.J.E., Muttaqi, K.M. and Sutanto, D., "A comprehensive assessment tool for solar PV impacts on low voltage three phase distribution networks," *International Conference on Developments in Renewable Energy Technology*, Australia, 2012, pp. 1-5.
- [33] Tsai-Hsiang Chena, Cheng-Han Yanga and Nien-Che Yangb, "Examination of the definitions of voltage unbalance," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol.49, pp. 380-385, July 2013.
- [34] Ramachandran. V, Solanki, S.K. and Solanki, J., "Steady state analysis of three phase unbalanced distribution systems with interconnection of photovoltaic cells," *IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, 2011, pp. 1-7.
- [35] Bruno. S., Lamonaca. S., Rotondo. G., Stecchi. U. and La Scala. M., "Unbalanced Three-Phase Optimal Power Flow for Smart Grids," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, Issue10, pp. 4504-4513, January 2011.
- [36] Aihara. Y., Miyazawa. R. and Koizumi. H., "A Study on the Effect of the Scott Transformer on the Three-phase Unbalance in Distribution Network with Single-phase Generators," *IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, 2012, pp. 283-290.
- [37] Chia-Hung Lin, Chao-Shun Chen, Hui-Jen Chuang and Cheng-Yu Ho, "Heuristic Rule-Based Phase Balancing of Distribution Systems by Considering Customer Load Patterns," *IEEE Transactions on power system*, vol.20, no.2, pp. 709-716, May 2005.
- [38] Mahmoud. K. and Abdel-Akher. M., "Analysis of Hybrid Photovoltaic and Wind Energies Connected to Unbalanced Distribution Systems," *IEEE International Conference on Power and Energy*, 2010, pp. 79-84.
- [39] 楊承翰,「電壓不平衡率之定義及電壓不平衡對系統與設備影響之研究」, 碩士論文, 國立台灣科技大學, 中華民國 96 年。
- [40] 黃明陽,「應用停限電運轉圖資系統支援配電饋線三相不平衡分析與改善」, 博士論文, 國立中

山大學，中華民國 97 年 7 月。

- [41] Zhaoyu Wang, Hao Chen, Jianhui Wang and Begovic. M., “Inverter-Less Hybrid Voltage\_Var Control for Distribution Circuits With Photovoltaic Generators,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol.5, issue 6, pp. 2718-2728, September 2014.
- [42] Smith. J.W. , Sunderman. W., Dugan. R. and Seal. B., “Smart Inverter Volt\_Var Control Functions for High Penetration of PV on Distribution Systems,” *IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, 2011, pp. 1-6.
- [43] Reno. M. J. , Broderick. R. J. and Grijalva, S., “Smart inverter capabilities for mitigating over-voltage on distribution systems with high penetrations of PV,” *IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2013, pp. 3153-3158.
- [44] Juan A. Martinez and Gerardo Guerra, “A Monte Carlo approach for distribution reliability assessment considering time varying load and system reconfiguration,” *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2013, pp. 1-5.
- [45] Juan A. Martinez and Gerardo Guerra, “Optimum placement of distributed generation in three-phase distribution systems with time varying load using a Monte Carlo approach,” *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1-7.
- [46] Payman Dehghaniana, Seyed Hamid Hosseinia, Moein Moeini-Aghtaiea and Amirsaman Arabalib, “Optimal siting of DG units in power systems from a probabilistic multi-objective optimization perspective,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 51, pp. 14-26, October 2013.
- [47] Anil Swarnkar, Nikhil Gupta and K.R. Niazi, “Adapted ant colony optimization for efficient reconfiguration of balanced and unbalanced distribution systems for loss minimization,” *Swarm and Evolutionary Computation*, vol.1, issue 3, pp. 129-137, September 2011.

# 太陽能電池及模組的 ATP 模型

ATP Models for Photovoltaic Cells and Modules

王耀諄\*  
Wang, Yaw-Juen

黃珀祥\*  
Huang, Po-Hsiang

## 摘 要

本文介紹如何以在 ATP 軟體中快速的建立太陽能電池及模組的模型。ATP 軟體的前處理程式 ATPDraw 在最近更新的版本中已經開始支援非線性的蕭克萊二極體模型，此一模型的出現，使得太陽能電池及模組可在 ATP 的環境下快速且精確的模擬。雖然 ATP 一直是電力系統最常用的模擬軟體之一，所支援的電力系統元件非常豐富，也廣受全世界各大學的使用，但對於太陽能電池及模組的模型卻付之闕如，此一缺失使 ATP 在太陽光電的研究領域黯然失色。本文提出使用 ATPDraw 支援的蕭克萊二極體模型，建立接地型及浮接型的太陽能電池及模組的電路模型，並將所建立的模型應用於太陽能電池陣列的部份遮蔽分析，ATP 的模擬結果將與解析模型的結果比較，以印證本文所建立的 ATP 模型的正確性。

## Abstract

This paper introduces the establishment of a circuit models for photovoltaic (PV) cells and modules in the environment of the ATP (Alternative transients program). The latest edition of the ATPDraw, the graphical preprocessor of the ATP, supports the nonlinear Shockley diode model, which allows models for PV cells and modules to be easily and precisely simulated in the ATP. Although the ATP has been one of by far the most widely used simulation tools for power systems, it has been rarely mentioned in the studies related to PV generation system for lack of an ATP model for PV cell and module. In this paper, authors employ the Shockley's diode model supported by the ATPDraw to build grounded and floating models for PV cells and modules, which are used to simulate a partial shading problem in a PV array. The ATP simulation results have been compared with those obtained by an analytical model to verify the validity of the proposed ATP model for PV module.

**關鍵詞(Key Words)：**電磁暫態程式(Alternative Transients Program, ATP)、二極體(Diode)、太陽能電池(Photovoltaic Cell)、太陽能模組(Photovoltaic Module)、部份遮蔽(Partial Shading)、蕭克萊二極體模型(Shockley's Diode Model)。

### 壹、主要符號及縮寫表

$G$	日射量 ( $W/m^2$ )	$I_{0m}$	模組等效二極體之逆向飽和電流 (A)
$I$	太陽能電池電流 (A)	$I_a$	陣列電流 (A)
$I_0$	逆向飽和電流 (A)	$I_d$	二極體電流(A)
		$I_{dm}$	模組等效二極體之電流 (A)
		$I_L$	光電流 (A)
		$I_{Lm}$	模組等效電路之光電流 (A)
		$I_m$	模組電流 (A)

\*國立雲林科技大學電機系

$k$	波茲曼常數(J/K)
$m$	模組中之串聯太陽能電池數目
$n$	理想因數
$n_m$	模組之等效理想因數
$P_a$	陣列之輸出電功率 (W)
$P_m$	模組之輸出電功率 (W)
$q$	電子之電荷量 (C)
$R_F$	虛擬電阻 ( $\Omega$ )
$R_p$	並聯電阻 ( $\Omega$ )
$R_{pm}$	模組之等效並聯電阻 ( $\Omega$ )
$R_s$	串聯電阻 ( $\Omega$ )
$R_{sm}$	模組之等效串聯電阻 ( $\Omega$ )
$s$	模組中受遮蔽之電池數目
$T$	溫度 (K)
$V_a$	陣列電壓 (V)
$V_d$	二極體電壓 (V)
$V_{dm}$	模組等效二極體之電壓 (V)
$V_m$	模組輸出電壓 (V)
ATP	Alternative Transients Program
MPP	Maximum Power Point

## 貳、前言

面對化石燃料日漸枯竭及石油價格飛漲的威脅，以及減低溫室氣體排放的政策壓力，各國政府對太陽光電的推廣與獎勵都不遺餘力。政府及民間對太陽光電的興趣，也鼓舞了更多的學術研究團隊紛紛投入太陽光電能的研究。在太陽能電池的應用上，太陽能電池的電路模擬軟體對於設計、分析、改善及系統的最佳化等，扮演了十分重要的角色。由於太陽能電池的電流與電壓存在特殊的非線性特性，而且該特性對日射量及電池溫度十分敏感，因此太陽能電池的電路模擬較一般電力元件來得複雜。

太陽能電池的模擬軟體一般可分為特用軟體 (Special-purpose Software) 及開放架構軟體 (Open-architecture Tools)。前者指專為設計太陽光電系統而撰寫的專業軟體程式，如 PVsyst<sup>[1]</sup>、PV F-CHART<sup>[2]</sup>、PV\*SOL<sup>[3]</sup>等，後者指一般工程界使用的通用軟體工具，如 Matlab/Simulink、Mathcad、Pspice 及 EMTP (Electromagnetic Transients Program) 等常用的電路模擬軟體。由於

EMTP 程式的發展後來分歧為許多不同的版本，本文所討論的版本為 ATP 版的 EMTP。特用軟體的優點是其專業程度高，除了提供太陽能電路的模擬與設計，也提供全世界一百多個國家個主要城市的歷史氣象資料，完整的日射量與陰雨日資料庫可節省設計者許多時間，快速設計出理想的系統，但軟體價格昂貴則是其缺點。開放架構軟體提供一般電路模擬或數學運算的功能，使用者可自行建立模型，一般適用於教育訓練及科學研究。

太陽能電池的模擬方法，可分為方程式導向法及電路導向法兩大類。前者將包含太陽能電池或模組的電路，依電路理論之克希荷夫電壓及電流定律，列出在特定日射量、溫度及負載條件下的電壓、電流方程式，然後求解。因為太陽能電池本身的電壓－電流特性呈現非線性，因此必須使用數值方法來求解。例如 Quaschnig 及 Hanitsch<sup>[4]</sup>就使用牛頓拉福森法求解受遮蔽的太陽能陣列的非線性聯立方程組，Kawamura<sup>[5]</sup>等人的研究也使用牛頓拉福森法來解部份遮蔽的太陽能電池電路。另外，有許多太陽能發電系統的研究是使用比較流行的 Matlab 來撰寫程式，寫出系統的方程式模型，例如 Patel 與 Agarwal<sup>[6]</sup>以 Matlab 分析部份遮蔽的太陽能陣列；Walker<sup>[7]</sup>則以 Matlab 建立太陽能電池的模型來模擬最大功率追蹤器的性能。

在另一方面，電路導向法直接使用時域電路模擬軟體來模擬太陽能電池的等效電路，依照所使用的程式不同，太陽能電池的電路導向模型在原理、精確度及複雜程度上也有很大的不同，不過不論使用哪一種模擬工具，都必須解決二極體的非線性特性問題。在現有的文獻中，Pspice<sup>[8, 9]</sup>、PSIM<sup>[10]</sup>、PSCAD<sup>[11]</sup>及 ATP<sup>[12]</sup>等電路模擬軟體都曾用來模擬太陽能電池。值得一提的是 Wang 與 Hsu<sup>[12]</sup>所使用的片段線性並聯支路模型 (Piecewise Linear Parallel Branches, PLPB) 是特別針對 ATP<sup>[13]</sup>的環境所開發的模型，該模型將許多線性支路並聯起來，以便近似二極體的非線性特

性，支路的數目越多，近似的效果就優越。雖然 PLPB 模型已成功在 ATP 環境下模擬許多太陽能系統的遮蔽問題且得到滿意的結果，不過其缺點是模型較為複雜，使用者必須對該模型的原理有一定的瞭解才能得心應手。

ATP 的前處理程式(Preprocessor) ATPDraw<sup>[14]</sup>在新的版本中已開始支援蕭克萊二極體模型，本文就以蕭克萊二極體的電路模型來建立太陽能電池及模組在 ATP 環境下的電路模型，這樣開發出來的模型比 PLPB 模型簡單易懂，運算速度也較快，非常適合工程教學與實務上的應用。ATPDraw 並非 ATP 唯一的前處理程式，但因為它是免費且可公開下載的軟體，所以已成為 ATP 最常使用的圖形界面輸入程式，使用者在 ATPDraw 直接繪出電路圖之後，即可由 ATP 模擬出電路的暫態響應。ATPDraw 自 2006 年起開始支援蕭克萊二極體模型，經過數年的改版與除錯，目前已臻成熟。ATPDraw 的蕭克萊二極體模型其實相當於一個由使用者「逐點」(Point-by-point)定義的非線性電阻器，使用者在某個電壓範圍內將電阻器電壓與電流的關係逐點列表，但新版的 ATPDraw 已支援由程式根據蕭克萊方程式在使用者指定的電壓範圍內，自動產生 NP 個等距的點來定義非線性電阻器，NP 之值及二極體的參數都由使用者事先輸入。在建立太陽能電池或模組模型時，電壓範圍一般選擇從零電壓至略大於電池或模組的開路電壓，NP 的數目則依所需的精密度而定。本文先介紹如何使用 ATPDraw 的蕭克萊二極體模型介面，再說明如何結合蕭克萊二極體模型與其他電路元件來建立太陽能電池的模型，並說明如何擴充太陽能電池模型成為 PV 模組及陣列，其電流－電壓(I-V)特性及功率－電壓(P-V)特性會與解析法所得之結果比較，以驗證模型的正確性。

### 參、蕭克萊二極體模型

P-N 介面二極體電壓與電流的關係可由蕭克

萊方程式來計算

$$I_d = I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_d}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中  $I_d$  與  $V_d$  分別為二極體的電流與電壓， $I_0$  為逆向飽和電流， $q$  為電子之電荷量( $q=1.602 \times 10^{-19}$  C)， $n$  為二極體的理想因數，一般介於 1 與 2 之間， $k$  表波茲曼常數( $k = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K)， $T$  為二極體的絕對溫度。新版的 ATPDraw 提供了四種二極體模型供使用者選擇：理想、二段式、蕭克萊及點列式。理想二極體模型相當於一個開關，二極體順偏時開關閉合，逆偏時開關開啟；二段式模型是用兩條直線來近似二極體的 I-V 特性曲線；點列式模型由使用者逐點輸入二極體的 I-V 特性。蕭克萊模型是由 ATPDraw 根據(1)式所列之方程式，自動在零電壓與一指定的最大電壓之間，產生等間距的 I-V 特性座標點。最大電壓與座標點的數目都由使用者輸入。圖 1 為蕭克萊二極體的符號圖形與參數(含預設值)，蕭克萊二極體模型共有六個參數必須輸入，圖中  $U_{ig}$ 、 $R_f$ 、 $R_b$ 、 $I_s$ 、 $V_{max}$  及 NP 分別表示點火電壓(Ignition Voltage)、順向電阻、逆向電阻、逆向飽和電流、最大電壓及點數，其中點火電壓就是二極體的理想因數  $n$  乘以熱電壓(Thermal Voltage)，可依下式計算

$$U_{ig} = \frac{nkT}{q} \quad (2)$$

式中  $kT/q$  的單位為伏特，因其正比於絕對溫度  $T$ ，因此就稱為熱電壓。

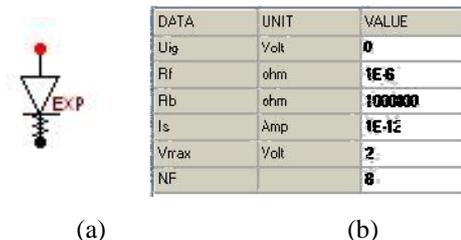


圖 1 ATPDraw 所支援的蕭克萊二極體模型:(a)元件圖形; (b)參數輸入對話窗與預設值

## 肆、太陽能電池及模組之模型

圖 2(a)是太陽能電池的等效電路，其中  $I_L$  為光電流，正比於電池所接受的日射量， $R_s$  與  $R_p$  為串聯與並聯電阻， $I$  與  $V$  為電池的輸出電流與電壓。由  $m$  片相同電氣規格的電池串聯組成的 PV 模組，其等效電路如圖 2(b)所示，圖 2(b)與圖 2(a)的電路完全相同，但是電路參數<sup>[15]</sup>須修正如下。

$$I_{Lm} = I_L, I_{0m} = I_0 \quad (3a)$$

$$n_m = m \cdot n, R_{pm} = m \cdot R_p, R_{sm} = m \cdot R_s \quad (3b)$$



圖 2 (a)太陽能電池等效電路；(b) PV 模組等效電路

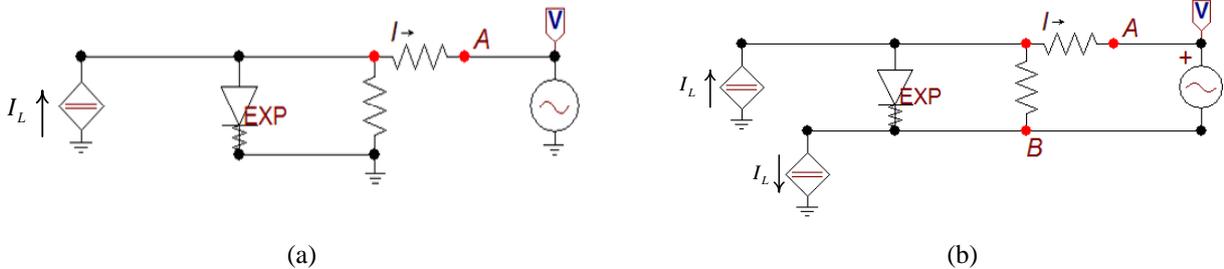


圖 3 太陽能電池在 ATPDraw 中之模型(a)接地模型；(b)浮接模型

## 二、具有部份遮蔽的 PV 模組

當一個由  $m$  片相同的電池串聯而組成的 PV 模組，其中有  $s$  片受到遮蔽時，假設未受遮蔽的  $(m-s)$  片太陽能電池所受的日射量為  $G_1$ ，受遮蔽的  $s$  片電池所受的日射量為  $G_2$ ，則我們可將該模組視為兩個串聯的子模組，分別包含  $(m-s)$  片及  $s$  片太陽能電池，其等效電路如圖 4(a)所示，其對應的 ATP 模型就如圖 4(b)所示。圖 4(b)中的交流電

## 一、單一電池或 PV 模組的 ATP 模型

圖 2 所示的等效電路可直接在 ATPDraw 中建立太陽能電池或模組的模型。圖 3(a)是使用 ATPDraw 所繪出的太陽能電池模型，電池的兩個輸出端為節點 A 及接地點，該模型必須以接地點為參考，因此為太陽能電池的接地模型，我們在節點 A 接上一個低頻的交流電壓源作為拂掠電壓(Sweeping Voltage)，這樣就可描繪出電池的 I-V 特性曲線。在許多應用上，例如模擬許多太陽能電池或 PV 模組串接的電路，使用接地模型非常不便，因此必須另外開發非接地模型。圖 3(b)將圖 3(a)中的接地端改接一只方向相反的電流源，一進一出的光電流使原來的接地模型變為浮接模型，電池的輸出點為 A、B 兩個浮接的節點。

壓源是作為拂掠電壓之用，電壓源的兩端都分別串聯一個很小的電阻，這些小電阻並不影響電路的特性，但是可以改善 ATP 的連接性(Connectivity)。當電壓源、電流源、開關及二極體等元件連接到同一節點時，ATP 自行建立的節點導納矩陣有時會產生病態矩陣(Ill-condition Matrix)，此時只要再串接一些虛擬的微小電阻(Fictitious Resistance)就可改善此種情況。當兩個子模組串聯時，我們就必須使用模組的浮接模型，在圖 4(b)中的兩個子模組都使用了浮接模型。

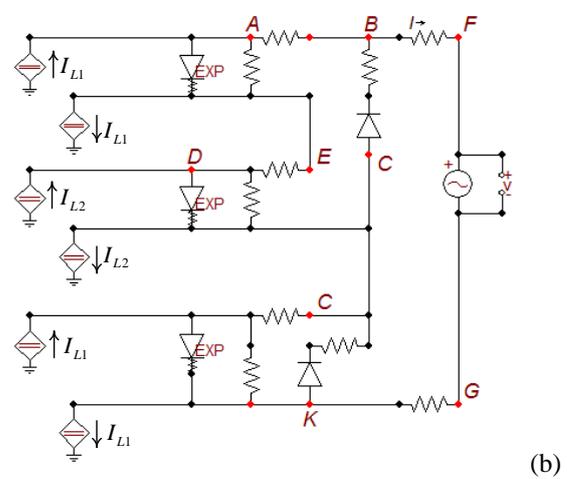
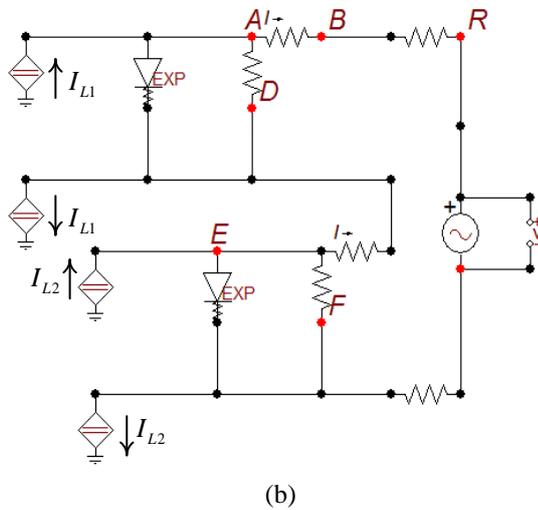
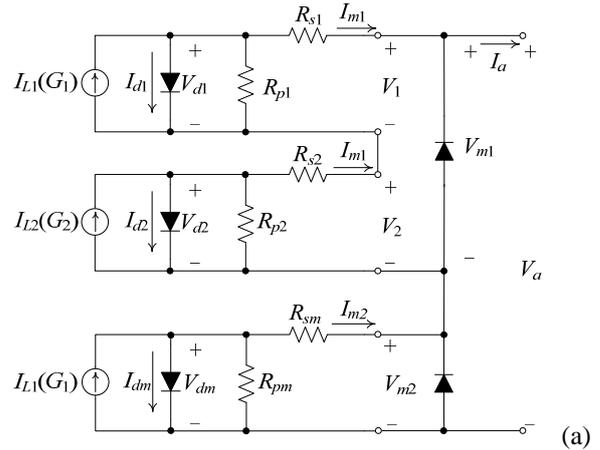
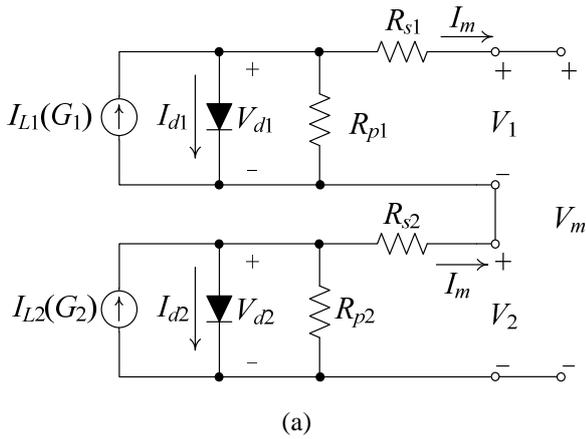


圖 4 受部份遮蔽的 PV 模組：(a)等效電路；(b)使用非接地電路的 ATP 模型

圖 5 由兩片串聯模組所構成的 PV 陣列，其中一片模組受到部份遮蔽：(a)等效電路；(b)ATP 模型

### 三、由兩片串聯 PV 模組所構成的陣列

我們可進一步建立更複雜的 PV 陣列模型，假設兩片串聯的模組構成一 PV 陣列，每一模組都裝設了旁路二極體，其中一片模組受到部份遮蔽，正常的電池日射量為  $G_1$ ，受遮蔽的電池所受的日射量為  $G_2$ ，圖 5(a)繪出這個系統的等效電路，其對應的 ATP 模型則示於圖 5(b)中，其中旁路二極體的模型是用一個理想二極體串聯一個  $0.2\Omega$  的電阻器，圖中的交流電壓源仍是作為拂掠電壓之用。

### 四、不同朝向的串聯模組

某些 PV 陣列會由不同朝向的模組所組成，這些模組因為朝向不同，因此所接受的日射量也不同，最常見的例子是建築物外牆鋪設 PV 模組，由於模組必須牽就建築物外牆或屋頂的方向，所以就無可避免的會有許多不同的朝向，各模組所接受的日射量就可能不同。圖 6(a)是三片接受不同日射量  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$  的串聯模組的等效電路，其對應的 ATP 模型如圖 6(b)所示。在圖 6(b)中，我們另外嘗試了使用浮接電壓源的方法。圖 3(b)、圖 4(b)及圖 5(b)都是使用一進一出的接地電流源讓電路保持浮接，新版的 ATPDraw 並不支援浮接的電流源，但卻支援浮接的電壓源，於是我們可利用虛擬的大電阻將浮接電流源

以浮接電壓源近似之。圖 7 說明這種近似法，一個理想的電流源  $I_L$  可以並聯一個很大的虛擬電阻  $R_F$  而不致影響電路的響應，因此就可得到諾頓等效電路，然後我們將所得到的諾頓等效電路轉換為戴維寧等效電路，就可使用浮接的電壓源，電壓源之值就等於原來的電流源之值乘以虛擬電阻值。在本文中，我們使用的  $R_F$  之值為  $1\text{ M}\Omega$ ，於是一個  $3\text{ A}$  的電流源就會以一個  $3\text{ MV}$  的電壓源串聯一個  $1\text{ M}\Omega$  的電阻來近似。

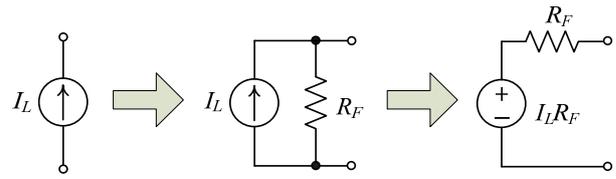


圖 7 使用浮接電壓源及虛擬電阻  $R_F$  來近似浮接電流源  $I_L$  的方法。浮接電壓源之值等於  $I_L$  與  $R_F$  之乘積。

### 五、解析模型

圖 2 至圖 6 的等效電路，除了可以使用 ATP 模擬之外，也可以用解析法來求解。解析法的原理不外乎寫出電路的克希荷夫電壓與電流方程式，在含有非線性二極體時，就必須將(1)式包含在聯立方程式中，因為有非線性方程式，用解析法列出系統的聯立方程式後仍然必須使用數值方法(如常用的牛頓-拉福森法)求解。以解析法分析 PV 陣列的詳細內容可參考文獻<sup>[15]</sup>，因為篇幅所限，本文不再詳述。

### 伍、範例研討

本文採用士林電機所生產的 SM50 太陽能模組之參數作為 ATP 模型的模擬範例，模擬的結果也將與解析模型的結果比較。表 1 列出 SM50 模組在標準測試條件(Standard Test Conditions, STC)下的規格，STC 表示模組在日射量  $G=1.0\text{ W/m}^2$ ，溫度  $25^\circ\text{C}$ ，空氣質量(Air Mass)  $AM=1.5$  的環境條件。在 STC 條件下，我們利用最小平方曲線擬合法，計算出電池的參數列在表 2 中。

表 1 SM50 PV 模組在標準測試條件下之規格

電氣特性	數值 (單位)
電池數	36
額定功率	50.2 (W)
最大功率點電流	2.9 (A)
最大功率點電壓	17.3 (V)
短路電流	3.3 (A)
開路電壓	21.9 (V)

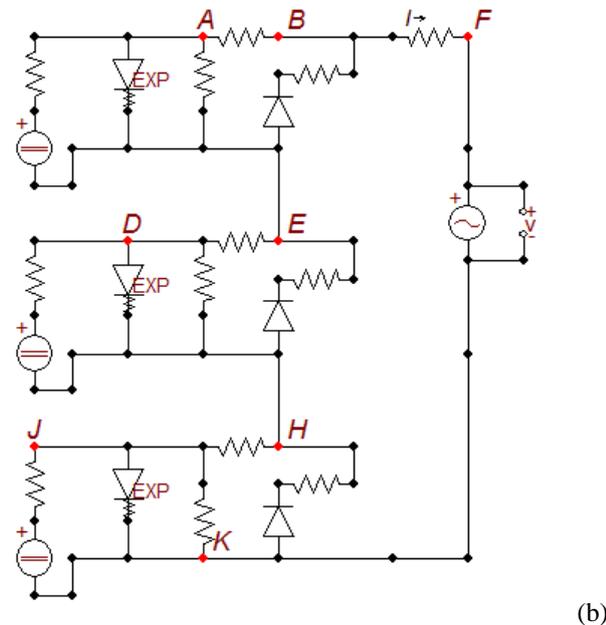
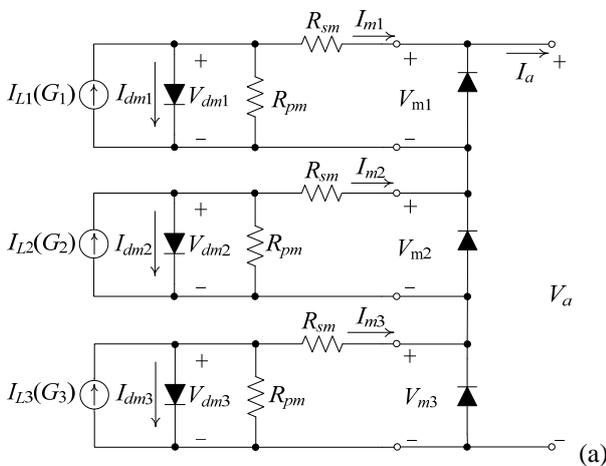
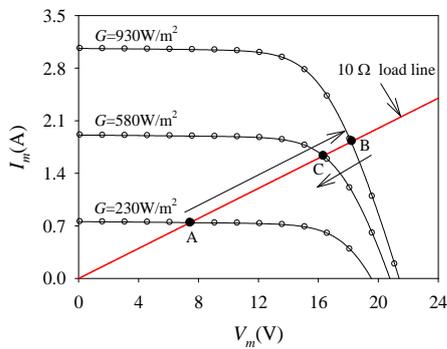


圖 6 由三片不同朝向的串聯模組所構成的 PV 陣列：(a)等效電路；(b)使用浮接電壓源的 ATP 模型

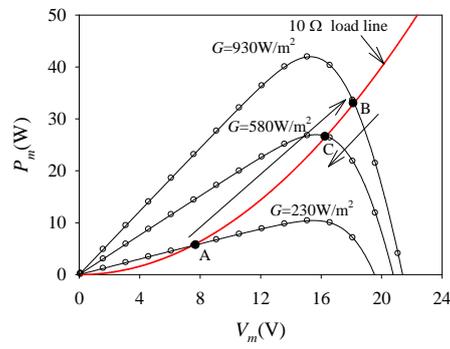
表 2 SM50 PV 模組在標準測試條件下之參數值

參數 (符號)	數值 (單位)
25 °C 時之逆向飽和電流 ( $I_0$ )	$2 \times 10^{-7}$ (A)
理想因數 ( $n$ )	1.4
串聯電阻 ( $R_s$ )	0.031 ( $\Omega$ )
並聯電阻 ( $R_p$ )	15 ( $\Omega$ )
在參考日射量時之光電流 ( $I_{L0}$ )	3.3 (A)
參考日射量 ( $G_0$ )	1.0 ( $\text{kW/m}^2$ )

我們的測試範例包括(一)單片模組在不同日射量與溫度下的 I-V 及 P-V 特性；(二)由兩面串聯模組所構成的陣列，其中一片遭到部份遮蔽時



(a)



(b)

圖 8 在不同日射量下之基本測試：(a) I-V 特性曲線；(b) P-V 特性曲線

圖中之實線為 ATP 的模擬結果，離散點為解析法求解的結果，二者相當一致。圖中另繪出 10 Ω 負載線，線上有 A、B、C 三個點，表示日射量從 230  $\text{W/m}^2$  變至 930  $\text{W/m}^2$ ，再變化至 580  $\text{W/m}^2$  時，模組的工作點。圖 8(b)另外繪出對應的 P-V 特性曲線，離散點為解析解，實線則為模擬結果，10 Ω 負載線在 P-V 平面上為一拋物線，拋物線上 A、B、C 三點為對應的工作點。從圖 8(b)可看出 C 點非常接近  $G=580 \text{ W/m}^2$  時的最大

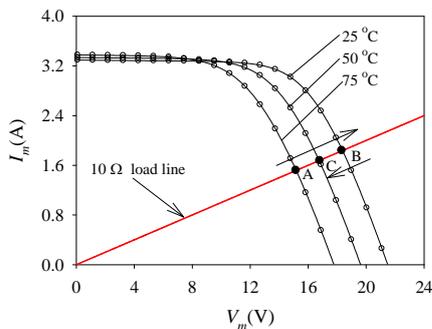
的 I-V 及 P-V 特性；(三)由三片不同朝向串聯模組所構成的陣列的 I-V 及 P-V 特性。雖然這些範例都十分簡單，但是對於測試 ATP 模擬太陽能電池及模組的能力卻相當重要，由這些範例也能看出部份遮蔽對 PV 系統的影響。

### 一、單一模組的基本測試

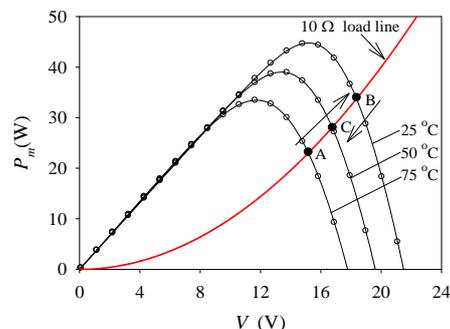
我們以圖 3(a)所示單一 PV 模組的 ATP 模型來模擬模組在固定溫度 25 °C 但不同日射量下的電氣特性。模組的 I-V 特性曲線如圖 8(a)所示，

功率點(MPP)。

同樣的單片模組在固定日射量  $G=1000 \text{ W/m}^2$  但不同溫度下的 I-V 特性曲線如圖 9(a)所示，圖中也比較了模擬(實線)與解析(離散點)的結果，對應的 P-V 特性曲線則呈現於圖 9(b)中，圖中可看出 10 Ω 負載線與 P-V 特性曲線的交點都離最大功率甚遠，可見在  $G=1000 \text{ W/m}^2$  的日射量之下得到最大功率的電阻值應小於 10 Ω。



(a)

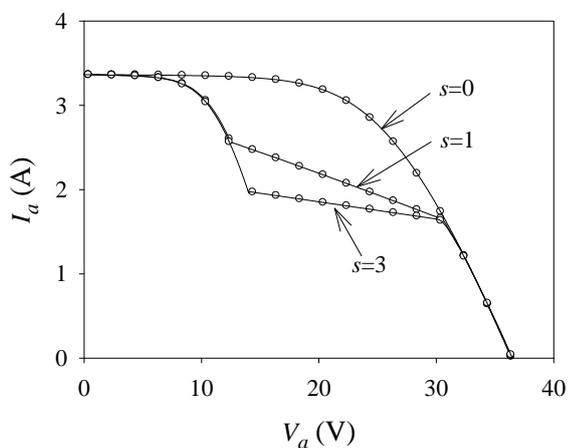


(b)

圖 9 在不同溫度下之基本測試：(a) I-V 特性曲線；(b) P-V 特性曲線

## 二、具有受遮蔽電池的 PV 陣列

我們測試一個由兩片模組串聯而成的 PV 陣列，其中一片受到部份遮蔽，此陣列的等效電路如圖 5(a)所示，我們就用圖 5(b)的 ATP 模型來模擬。假設兩片模組均裝設旁路二極體，上方的模組有  $s$  片受遮蔽，下方的模組則未受遮蔽，受遮蔽之電池日射量為  $500 \text{ W/m}^2$ ，溫度為  $45.16^\circ\text{C}$ ，未受遮蔽之電池日射量為  $1000 \text{ W/m}^2$ ，溫度為  $69.06^\circ\text{C}$ 。圖 10(a)為該陣列受遮蔽電池數  $s=0, 1, 3$ ，



3 時的 I-V 特性曲線，實線為 ATP 的模擬結果，離散點為解析求解的結果。 $s=0$  的情況即為未發生遮蔽的特殊情形。由於旁路二極體的作用，在遮蔽發生時，I-V 特性曲線有不規則性的變化。圖 10(b)為對應的 P-V 特性曲線，在遮蔽發生時，P-V 特性曲線很明顯的會呈現「雙峰」的特性，這會使最大功率追蹤發生錯誤，有時會追縱至功率的次高峰，這些特性 ATP 模型都能準確的模擬出來。

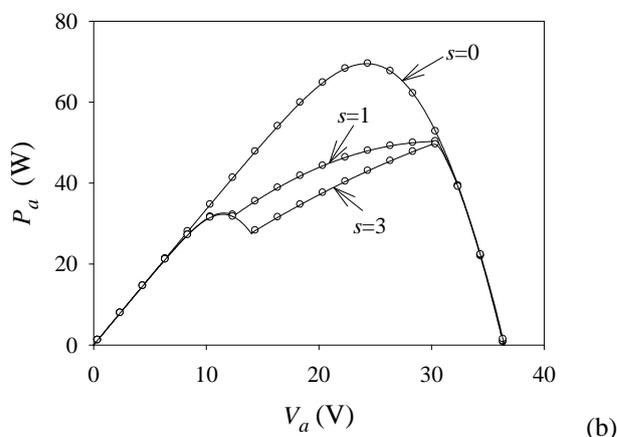


圖 10 受遮蔽電池片數的影響：(a) I-V 特性曲線；(b) P-V 特性曲線

## 三、具有不同朝向串聯模組之 PV 陣列

不同朝向的模組經常發生在建築一體化的 PV 系統(Building-integrated PV Systems)，我們模擬三片不同朝向的模組串聯組成的 PV 陣列，三片模組分別接受日射量  $G_1=1000 \text{ W/m}^2$ 、 $G_2=667 \text{ W/m}^2$  及  $G_3=333 \text{ W/m}^2$ ，其等效電路如圖 6(a)所示，圖 6(b)為對應之 ATP 模型，ATP 之模擬結果如圖 11 所示，圖中繪出 I-V 特性曲線(藍色)及 P-V 特性曲線(紅色)，離散點為解析模型的計算結果。三片模組發生失配(Mismatch)現象時，I-V 特性因旁路二極體的作用出現階梯狀的曲線，P-V 特性就會呈現三峰的形狀，最大功率追蹤器因此常常會追縱到局部的最大功率點，造成轉換效率的下降。ATP 模型在模擬多片模組受各種不同程

度的遮蔽時，都能模擬出正確的結果，和解析模型的解答十分吻合。

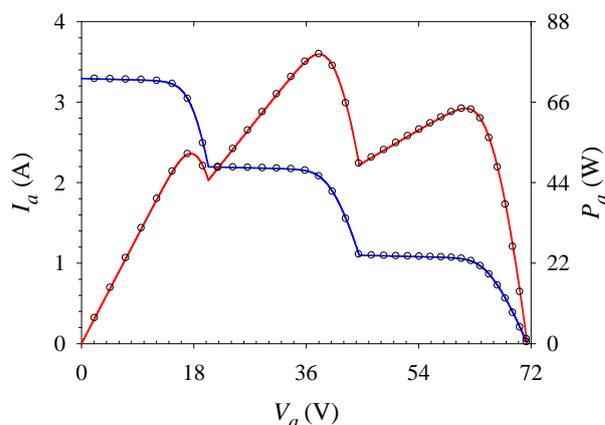


圖 11 由三片接受不同日射量的 PV 模組串聯而成的陣列的 I-V 特性曲線(藍色)及 P-V 特性曲線(紅色)

## 陸、結論

本文說明如何使用新版 ATPDraw 所支援的蕭克萊二極體元件來建立適合 ATP 環境下太陽能電池及模組的電路模型。由於 ATP 仍是目前使用最廣的電力模擬軟體之一，具有非常豐富及成熟的電力系統元件庫及使用經驗，如果能開發出實用的太陽能電池及模組的模型，對於使用 ATP 來模擬具有太陽能發電裝置的電力網路，將有極大的價值與實用性。本文所開發的太陽能電池及模組的 ATP 模型，經過基本日射量暨溫度變動測試、串聯模組部份遮蔽測試及串聯模組不同朝向測試，均與解析模型的計算結果一致，表示本文的 ATP 模型在各種理想及非理想條件下均能正確的模擬出太陽能電池及模組之特性。

以蕭克萊二極體為基礎的太陽能電池及模組的 ATP 模型非常容易建立。從工程教育訓練的觀點來看，這個太陽能電池模型能讓學生在短短的二至三小時內開發出自己的測試電路，觀察太陽能電池及模組的各種電氣特性。未來可陸續應用此模型的教學單元及研究主題包括最大功率追蹤器原理暨各種新型演算法之比較、市電併聯型 PV 系統、孤島偵測與運轉、太陽能發電系統故障分析及衝擊分析等。此模型已在筆者任教的系所使用一段時間，學生均表現出高度的興趣與接受度，並且不斷嘗試許多有創意的應用。筆者相信太陽能電池及模組 ATP 模型的推廣除了能讓 ATP 進一步發揮其效用，也能對國內的能源教育盡一份微薄的心力。

本文所提出的模型在各種工作條件下均有優異的性能表現，但是仍有一些缺點待克服。最主要的缺點在於蕭克萊二極體的溫度必須預先由使用者從對話視窗鍵入，這樣太陽能電池的溫度就只能是一個預設的常數，無法當作一個變數在模擬程式中受到控制，所以在模擬日射量隨時間變化時，我們只能控制光電流的變化，卻無法讓溫度隨著日射量變化，這樣模擬的結果就會與事實有更大的差異。我們目前的研究已經針對這

個特性，希望能透過外部電路的補償修正這個缺點，能在未來的 ATP 模型中有所改良。

## 柒、參考文獻

- [1] PVSyst Photovoltaic software, July 2015, [Online]. Available: <http://www.pvsyst.com/en/>.
- [2] PV F-CHART Photovoltaic Systems Analysis, July 2015, [Online]. Available: <http://www.fchart.com/pvfchart/>.
- [3] PV\*SOL and PV\*SOL premium, July 2015, [Online]. Available: <http://www.valentin-software.com/en>
- [4] V. Quaschnig and R. Hanitsch, "Numerical simulation of photovoltaic generators with shaded cells," in *proc. 30th Universities Power Engineering Conf*, London (UK), 1995, pp. 583-586.
- [5] H. Kawamura and Kazuhito Naka and Norihiro Yonekura and Sanshiro Yamanaka and Hideaki Kawamura and H. Ohno, "Simulation of I-V characteristics of a PV module with shaded PV cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 75, no. 3-4, pp. 613-621, 2003.
- [6] H. Patel and V. Agarwal, "Matlab-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 302-310, 2008.
- [7] G. Walker, "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model," *J. Electr. Electron. Eng.*, Australia vol. 21, no. 1, pp. 49-56, 2001.
- [8] J. Gow and C. Manning, "Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies," *IEE Pro.-Electric Power Appl*, vol. 146, no. 2, pp. 193-200, 1999.
- [9] L. Castaner and S. Silvestre, "Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice," New York (U.S.)- John Wiley & Sons, 2003.
- [10] M. Veerachary, "PSIM circuit-oriented simulator model for the nonlinear photovoltaic sources," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 42, no. 2, pp. 735-740, 2006.

- [11] B. Perera and S. Pulikanti and P. Ciufu and S. Perera, "Simulation model of a grid-connected single-phase photovoltaic system in PSCAD/EMTDC," *IEEE International Conf. on Power System Technology*, Auckland (New Zealand), Oct. 30 – Nov. 2, 2012, pp. 1-6.
- [12] Y. Wang and P. Hsu, "Modelling of solar cells and modules using piecewise linear parallel branches," *IET Renewable Power Generation*, vol. 5, no. 3, pp. 215-222.
- [13] W. Meyer and T. Liu, *Alternative Transients Program (ATP) Rule Book*, Oregon (US), Canadian/American EMTP User Group, 1987.
- [14] L. Prikler and H. Hoidalen, *ATPDraw User's Manual*, Siegen (Germany), European EMTP-ATP Users Group (EEUG), 2009.
- [15] Y. Wang and P. Hsu, "Analytical modelling of partial shading and different orientation of photovoltaic modules," *IET Renewable Power Generation*, vol. 4, no. 3, pp. 272-282, 2010.

### 台電工程月刊徵稿啟事

\* 為使本刊物之內容更臻完善，歡迎有關火（水）力發電、核能發電、再生能源、輸變電、配電、電力系統、能源與環境、化學與材料、資訊與電腦、工程技術及其他等相關論著、技術經驗及譯者踴躍投稿，以饗讀者。

\* 投稿相關事宜，若有任何疑問，請聯絡我們，謝謝您！

☎ (02)2360-1095 ✉ u117212@taipower.com.tw

# 壓水式反應器壓力槽壓力熱震衝擊之破裂風險評估

Fracture Risk Assessment for the Pressurized Water Reactor Pressure

Vessels under Pressurized Thermal Shock

黃金城\*

Huang, Chin-Cheng

周雄偉\*

Chou, Hsoun-Wei

劉如峯\*

Liu, Ru-Feng

張敬信\*

Chang, Ching-Hsin

沈祐宇\*

Shen, Yu-Yu

張漢洲\*\*

Chang, Han-Jou

謝楊正\*\*

Hsieh, Yang-Cheng

(101~104 年度研究計畫論文)

## 摘 要

本研究應用美國橡樹嶺國家實驗室(ORNL)開發之 FAVOR 程式，以機率破裂力學分析我國壓水式反應器壓力槽遭遇壓力熱震事故之結構破裂風險。分析條件依據美國 NRC 制定新版壓力熱震管制法規 10 CFR 50.61a 之分析基礎，包含壓力熱震事故下之溫度、壓力與熱對流傳遞係數歷時，以及事故發生頻率分佈等，並採用美國西北太平洋國家實驗室(PNNL)之裂紋分佈模式，結合核三廠反應器壓力槽腹帶區輻射脆化參數，建立機率破裂力學分析模型，以評估核三廠反應器壓力槽之壓力熱震破裂風險。基於與美國管制法規相同之制定基準，分析結果顯示於目前核定運轉終期，或未來可能之預期運轉終期條件下，核三廠反應器壓力槽皆表現出極低之破裂風險。同樣地，以 NUREG-1874 風險預測式評估亦可獲得一致之結果，證明核三廠反應器壓力槽腹帶區材料有充分之破裂韌性抵抗壓力熱震事件之衝擊，於運轉期間能提供極佳之可靠度與結構完整性。

## Abstract

The failure risks of the Taiwan domestic pressurized water reactor pressure vessels (RPVs) subject to pressurized thermal shock (PTS) events have been evaluated using the ORNL's probabilistic fracture mechanics (PFM) analysis code, FAVOR. The loading conditions such as temperature histories, pressure histories, heat transfer coefficient histories, and PTS event frequency distributions were in accordance with the technical basis of USNRC's new PTS rule, 10 CFR 50.61a. Meanwhile, the PNNL's flaw distribution models were also employed. Based on the specific embrittlement parameters of Maanshan plant's RPVs, the PFM models were established and analyzed. The PFM analysis results indicate that the Maanshan RPVs will continue to present insignificant failure risks until the license expiration dates or during the proposed extended operation periods, a finding that is consistent with the results of NUREG-1874 fracture risk prediction calculation. Present results demonstrate that the Maanshan plant's RPVs have sufficient fracture toughness to withstand the hypothetical PTS attacks, as well as provide excellent reliability and structural integrity during operation.

\*原子能委員會核能研究所

\*\*台灣電力公司核能安全處

**關鍵詞(Key Words)：**壓水式反應器(Pressurized Water Reactor)、壓力熱震(Pressurized Thermal Shock)、輻射脆化(Radiation Embrittlement)、機率破裂力學(Probabilistic Fracture Mechanics)。

## 壹、前言

核能電廠反應器壓力槽(Reactor Pressure Vessel, RPV)屬於一大型銲接結構,運轉時承受高溫、高壓,與高輻射等環境作用,為核能電廠最重要之壓力邊界組件。考慮 RPV 鋼材受輻射脆化(Radiation Embrittlement)效應因素,需防止 RPV 結構因長期運轉導致材料脆化發生之脆性破裂,造成輻射外洩意外。壓水式反應器(Pressurized Water Reactor, PWR)有別於沸水式反應器(Boiling Water Reactor, BWR),因其系統配置與運轉特性,須針對可能發生之壓力熱震(Pressurized Thermal Shock, PTS)意外事件加以評估。PTS 事件主要起因為較低溫水突然接觸 RPV 壁體造成熱震(Thermal Shock)現象,因 RPV 內外壁溫度梯度增加,導致內壁部位受熱張應力作用。此時若伴隨高壓狀態,將加劇 RPV 壁體預存裂縫之張應力。此外,RPV 金屬材料破裂韌性,亦將因長期運轉伴隨之中子脆化影響而降低,故上述三條件若同時發生,將嚴重衝擊 RPV 之結構完整性。對於 PWR RPV 承受可能之 PTS 衝擊的安全性要求,法規 10 CFR 50.61<sup>[1]</sup>規範 PWR 電廠於持照終止(End of Licence, EOL)時之 RPV 殼壁材料脆轉參考溫度( $RT_{NDT}$ )值,以避免電廠運轉期間因發生 PTS 事件對 RPV 壁體造成結構完整性衝擊。後續美國核管會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)因應境內電廠延役需求,再藉由重新分析評估之結果,發佈 10 CFR 50.61a<sup>[2]</sup>,作為境內電廠申請延役評估之替代準則。

早期核能電廠重要組件結構完整性之安全評估技術,主要以決定論(Determinism)為主。然而以決定論做為安全評估之方式,常因各項分析變因之變異性存在,須以過度保守之假設條件加

以涵蓋。以 RPV 評估為例,其影響因素便包含中子照射通量(Neutron Flux)、金屬材料化學組成、暫態條件(Transient)、裂紋分佈...等,這些參數常因資料不足、試驗誤差及量測不確定性等而影響最後分析結果,或需以許多保守因子加以涵蓋之,造成分析結果過於保守。因此,以機率破裂力學(Probabilistic Fracture Mechanics, PFM)評估核能電廠 RPV 之結構完整性,便可獲得較客觀的結果,並於近二十年來逐漸受到重視,目前美國核能發電業界與管制單位已將 PFM 技術作為評估 RPV 完整性之主要方式。前述壓水式反應器之壓力熱震管制法規 10 CFR 50.61 與 10 CFR 50.61a 亦皆為依據 PFM 之分析結果所制定,相關法規之理論基礎與制定依據,可參閱文獻<sup>[3]</sup>。

美國 NRC 於 1998~2009 年間成立大規模研究計畫,進行之 PWR RPV 於 PTS 事件下之破裂機率安全評估,研究領域包含裂紋分佈、機率風險評估(Probabilistic Risk Assessment, PRA)、輻射脆化預測、熱流(Thermal Hydraulic, TH)分析等分析條件輸入參數研究,再應用機率破裂力學分析結果,以  $1 \times 10^{-6}/\text{year}$  之容許裂縫貫穿風險,修訂新版審查準則,於 2010 年 2 月發佈 10 CFR 50.61a,作為境內 PWR 電廠申請延役運轉之替代評估準則。其中 PFM 分析部分,係以美國橡樹嶺國家實驗室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)所研發之 FAVOR 程式(Fracture Analysis of Vessels - Oak Ridge)進行分析。核研所台電公司委託計畫,與美國橡樹嶺國家實驗室交流合作引進 FAVOR 程式,建立 PFM 分技術,進行國內核能電廠相關安全評估。本文針對核三廠兩座機組 RPV 進行壓力熱震安全評估,應用 FAVOR 程式,分析 RPV 實際遭遇 PTS 事件之破裂風險。依據美國 NRC 制定 10 CFR 50.61a 之理論基礎<sup>[4,5]</sup>,包含輻射脆化模式、分析暫態條件,

裂紋分佈模型等，並配合核三廠電廠特性(Plant Specific)參數進行機率破裂力學分析，以評估國內壓水式電廠發生 PTS 事件之 RPV 破裂機率。

此外，本文亦採用 NUREG-1874 報告<sup>[5]</sup>中美國 NRC 依據機率破裂力學分析結果推導之 RPV 裂縫貫穿頻率預測式，計算核三廠兩座 RPV 之破裂風險，以驗證本研究之 PFM 分析結果。相關評估之結果，可確認國內壓水式電廠 RPV 之結構可靠度，並可作為國內壓水式電廠運轉破裂風險之參考依據，亦有助於國內核能電廠反應器壓力槽於各種意外或暫態條件下之機率破裂力學分析應用與發展。

## 貳、壓力熱震事件

正常條件下，RPV 壁體處於高溫狀態之環境，此時較無脆性破裂之虞。然而當某些設備發生故障或意外事故發生時，將造成 RPV 突然填注冷水，以致反應器冷卻水(Reactor Coolant Water, RCW)溫度急遽下降，造成 RPV 壁體遭遇熱震衝擊。若此時 RPV 亦處於高壓狀態下，此現象便定義為壓力熱震(PTS)事件。造成 RPV 壓力熱震事件發生之因素，主要可區分為<sup>[4]</sup>：(1)一次系統管路破裂(Pipe Breaks in the Primary System)，即喪失冷卻水意外(Loss of Coolant Accident, LOCA)。(2)一次系統安全釋壓閥卡開(Stuck-Open Primary Safety Relief Valves, SO-1)。(3)二次系統管路破裂(Pipe Breaks in the Secondary System)，包含主蒸氣管線破裂(Mean Steam Line Break, MSLB)與 SO-2。(4)其他，如蒸汽產生器管束斷裂(Steam Generator Tube Rupture, SGTR)，或一、二次側混合型意外等。以下將主要引起壓力熱震之意外，作一概略性之描述。

### 一、一次系統管路破裂(LOCA)

圖 1 為 PWR 電廠之一、二次系統主要組件運作配置圖<sup>[4]</sup>。當 PWR 一次系統發生管路破裂，導致喪失冷卻水事故(LOCA)，將造成反應器冷

卻水喪失，以致調壓槽(Pressurizer)水位下降，進而造成反應器冷卻水系統(Reactor Coolant System, RCS)壓力降低。若 RCS 或調壓槽水位下降太快，將邏輯啟動反應器保護系統(Reactor Protection System, RPS)，插入控制棒，中止核分裂過程。此外，亦將啟動緊急爐心冷卻水系統(Emergency Core Cooling System, ECCS)，注入冷卻水，以提供緊急爐心冷卻水(Emergency Core Cooling, ECC)至 RCS。若注水來源為安全注水槽(Safety Injection Tank, SIT)內較低溫的水(約大氣溫度)，將導致一次系統與 RPV 壁體迅速降溫。

若 LOCA 之破管尺寸愈大，壓降愈急遽，造成更大量之 ECCS 注水，將導致 RPV 內部降流區(Downcomer)溫度迅速下降，造成 RPV 壁體承受熱震衝擊。至於該暫態之溫度下降速率與最終到達之最低溫度，將決定熱震效應之嚴重性。惟因 RCS 壓力並不高，故由 RPV 內壓力造成之影響並不顯著，主要由降流區溫度急遽下降造成之熱應力所主宰。

### 二、一次系統安全釋壓閥卡開(SO-1)

此意外之發生為假設安全釋壓閥(Safety Relief Valve, SRV)因某些因素卡開，後續並可能突然關閉。當 SRV 處於卡開之狀態，其現象很類似小尺寸破口之 LOCA 發生，故 HPI 將隨之啟動，以維持 RCS 水位與壓力。然而後續閥門重新關閉，HPI 仍可能持續注水。假設操作人員因操作失當致 HPI 未適時停止注水，將導致 RCS 壓力急遽升高，最終到達 2,500 psi 時，造成 SRV 二次開啟。

由上述可知，閥門之卡開時間長短與卡開數量，攸關於 HPI 注水量之多寡，將影響 RPV 內降流區溫度下降程度；至於閥門關閉後之再加壓，則決定了該暫態之最高壓力，故於此 PTS 事件類型下，降流區溫度下降與後續閥門關閉造成 RCS 壓力之急遽增加，皆為重要之影響因子。

### 三、二次系統管路破裂(MSLB & SO-2)

二次系統管路破裂，包含蒸汽系統管路破裂，與一個或多個控制或安全閥卡開意外。同樣地，閥門卡開之意外，亦可視為破管意外之發生。與一次系統之 LOCA 相同，閥門卡開時間長短或破管尺寸大小將決定暫態之影響。破管尺寸愈大，將加速 PTS 暫態產生，造成較嚴重之冷卻效應。

主蒸汽管破裂(MSLB)，或主蒸汽安全閥(Main Steam Safety Valve, MSSV)卡開、大氣排放閥(Atmospheric Dump Valve, ADV)卡開.....等發生時，將造成二次系統及蒸汽產生器(Steam Generator)壓力降低，使得蒸汽產生器內之水溫降低，進而降低一次側通過蒸汽產生器之水溫。此較低溫水將藉由一次系統自然循環至 RPV 降流

區內，造成 PTS 事件發生。雖然二次側破管意外導致之 PTS 事件水溫將高於一次側意外之 PTS 事件(212°F~250°F)，但因此時一次系統可能仍未及時洩壓，故 RPV 內仍維持高壓狀態。故此類型之意外，溫度與壓力皆為重要之影響因子。

由以上敘述可知，當一次系統發生意外導致之 PTS 事件，因水溫較二次系統意外之 PTS 事件低，不僅熱震效應造成之熱應力較大，RPV 壁體金屬材料亦較脆，故將對 RPV 壁體有較大之衝擊。經美國 NRC 分析評估結果，發現 SO-1 類型之 PTS 事件因可能的後續閥門再關閉伴隨之再加壓，將主宰 RPV 受 PTS 事件暫態衝擊之裂縫貫穿行為。

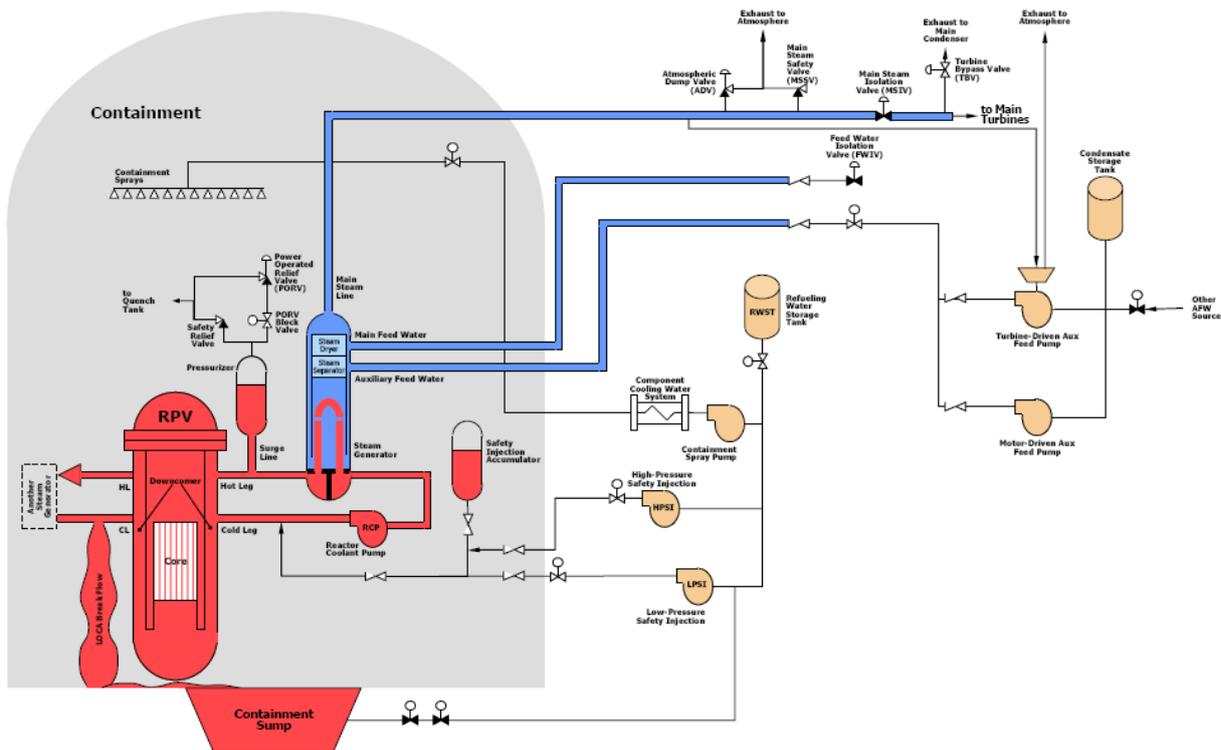


圖 1 PWR 電廠一、二次系統之主要組件配置圖<sup>[4]</sup>

### 參、FAVOR 程式分析流程

反應器壓力槽機率破裂力學分析程式

FAVOR，主要分為三個執行程式，分別為 FAVLoad、FAVPFM 與 FAVPOST。FAVLoad 屬前處理程式，用於計算分析暫態下 RPV 壁體溫度、應力、應力強度因子(Stress Intensity Factor)

等隨壁厚之分佈歷時；FAVPFM 則為 FAVOR 程式計算 RPV 破裂機率之主要運算核心，運用蒙地卡羅模擬法(Monte Carlo Simulations)，透過大量樣品分析之取樣，計算出 RPV 破裂機率；FAVPOST.exe 則為後處理程式，由於 FAVPFM 分析獲得為 RPV 於單一暫態下之平均條件破裂或裂縫貫穿機率，須經由後處理程式進行每次模擬之分析結果數據分析，並讀取分析暫態之發生頻率分佈，以獲得實際 RPV 整體之破裂風險度與統計分佈區間數據。圖 2 所示為 FAVOR 程式分析 RPV 破裂機率之分析流程圖。其中前處理 FAVLoad 之執行需讀取輸入檔 FAVLoad.in，內容包含 RPV 之尺寸條件，例如內徑、壁厚與不鏽鋼覆焊層(Cladding)厚度等；材料機械性質，包含焊道與覆焊層材料隨溫度變化之楊氏模數、柏松比、熱膨脹係數、比熱與熱傳導係數等；最後再輸入欲分析之暫態條件，PTS 事件暫態之溫度、壓力與熱對流傳遞係數歷時。經由 FAVLoad 讀取計算後，匯出一輸出檔 FAVLoad.out，內容則包含各暫態下 RPV 壁厚方向之溫度、應力，以及應力強度因子之歷時分佈。此輸出檔將由

FAVPFM 讀取進行 PFM 運算，以計算各模擬裂紋是否將產生破裂之依據。

除了 FAVLoad.out 外，FAVPFM 之 PFM 運算尚需讀取裂紋分佈性質與材料輻射脆化相關條件檔案(FAVPFM.in)。經分析執行後即可獲得 RPV 腹帶區遭遇各別 PTS 事件衝擊之條件開裂初始機率(Conditional Probability of Initiation, CPI)，與條件損壞機率(Conditional Probability of Failure, CPF)，即裂紋開裂初始發生後持續成長深度至一定壁厚比例之機率(一般為 80%)。FAVPFM 分析獲得之 CPI 與 CPF 為經過每次遞迴後之平均值，但於分析過程將產生 INITIATE.dat 檔與 FAILURE.dat 檔，紀錄每次分析之各項數據，以供後處理統計分析使用。

後處理 FAVPOST 程式除讀取 PFM 分析產生之 INITIATE.dat 檔與 FAILURE.dat 檔外，亦須讀取後處理輸入檔(FAVPOST.in)，其內容為各項分析暫態之發生頻率分佈與對應權重，以進行 RPV 之實際裂縫開裂與裂縫貫穿頻率計算(單位為每年發生機率，/year)，並進行統計分析，以獲得各信心度區間對應之 RPV 破裂機率。

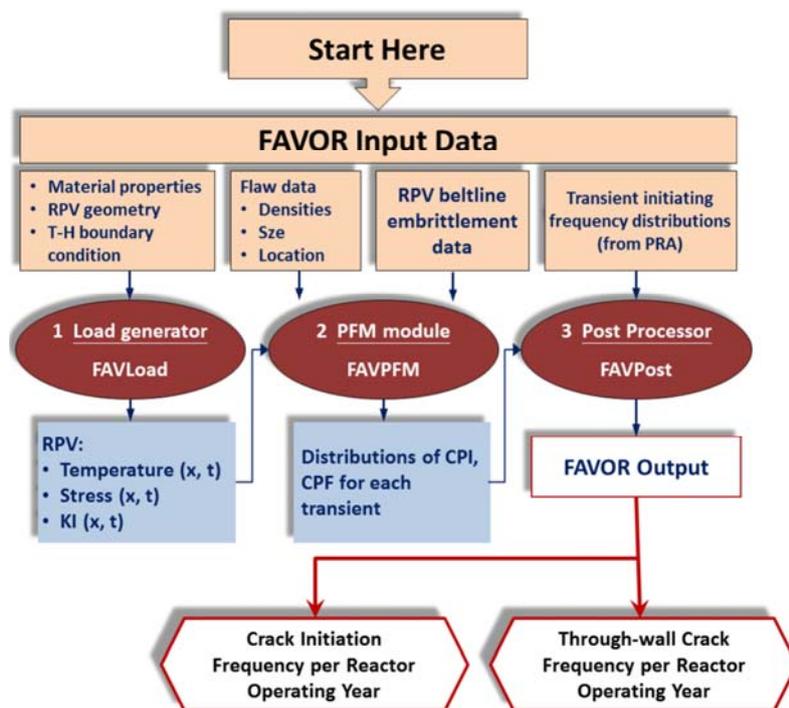


圖 2 FAVOR 程式分析之分析流程

## 肆、分析輸入參數

### 一、RPV 尺寸形狀與材料機械性質

核三廠反應器屬西屋公司 3 迴路(Loop)型式 PWR。RPV 主體所使用之材料為 ASME SA533 Type B 碳鋼，內壁之不鏽鋼覆焊層材料則為 309 不鏽鋼。分析所需之各項機械性質，包含熱傳導係數、比熱、楊氏模數、伯松比與熱膨脹係數等，為依據美國 NRC Reactor Vessel Integrity Database, Revision 2 (RVID2)中之材料性質查得。由於資料庫中之材料性質為對應固定溫度間距之值。分析時任意溫度下之各項數值，FAVOR

程式將依據三階內插函數之方法計算獲得<sup>[6]</sup>。

核三廠 RPV 外殼之製造，主要係先將數片鋼板捲成圓弧狀，以縱向焊接之方式相互接合成一圓環結構，再將數個圓環結構及頂部與底部元件，以水平方向焊接成 RPV 主體，最後內部再施作一層不鏽鋼覆焊層，以增加其耐久性。核三廠 RPV 的相關尺寸為：內徑 78.5 英吋、腹帶區壁厚 8.04 英吋，包含 0.16 英吋之不鏽鋼覆焊層厚度。核三廠 1、2 號機 RPV 之腹帶區配置與範圍，如圖 3 所示。分別依據文獻 WACP-14840<sup>[7]</sup>與 WCAP-14972<sup>[8]</sup>之有效燃料高度配置，以及依據文獻 WACP-11433<sup>[9]</sup>與 WCAP-11636<sup>[10]</sup>報告之中子照射通量分佈，所整理繪得。

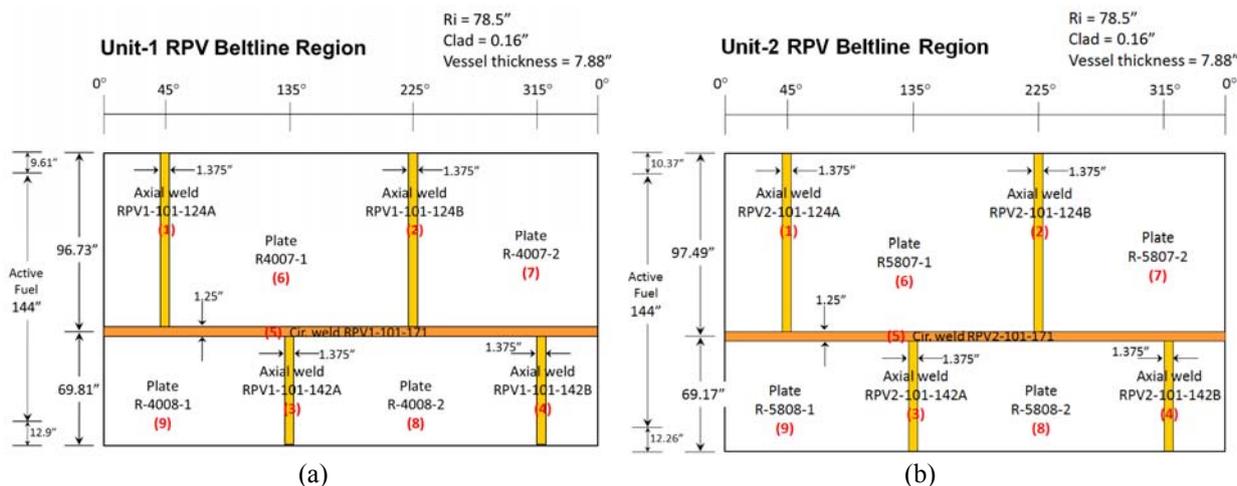


圖 3 核三廠(a) 1 號機、(b) 2 號機 RPV 腹帶區材料部位配置與範圍

### 二、PTS 暫態輸入

美國 NRC 制定 10 CFR 50.61a 之理論基礎 (NUREG-1806 與 NUREG-1874)所分析之 PTS 暫態，由美國馬里蘭大學(University of Maryland)之風險與可靠度中心(Center for risk and reliability)研究團隊所執行。該團隊應用 RELAP5/MOD3 程式<sup>[11]</sup>，調查美國 3 座代表性電廠可能發生之 PTS 事故，分析其暫態條件，作為 FAVOR 程式前處理 FAVLoad 之載重輸入條件。其 3 座代表性電廠分別為 Beaver Valley 電廠、

Palisades 電廠，以及 Oconee 電廠。其中 Beaver Valley 電廠之 PWR RPV 同樣為西屋公司 3 迴路型式 PWR，且尺寸大小與有效燃料範圍皆與核三廠 RPV 相同，故其 PTS 暫態將有很大之代表性，並可作為國內 PWR 電廠運轉之參考依據。因此，本研究之 PTS 分析暫態，將採用 Beaver Valley 電廠所模擬之暫態條件作為載重之輸入。

Beaver Valley 電廠經模擬共有 61 種可能發生之 PTS 事故，表 1 為 61 種 PTS 暫態之事故類型分類，其中共計 9 個 LOCA 類型，28 個 SO-1 類型，8 個 MSLB 類型，8 個 SO-2 類型，以及其

他類型共 8 個。其詳細暫態發生成因、溫度、壓力，以及熱對流傳遞係數歷時等，皆紀錄於文獻<sup>[12]</sup>中，並擷取輸入於 FAVLoad.in 內，提供

FAVLoad 讀取並輸出 FAVLoad.out 提供 FAVOR 程式進行 PFM 運算。

表 1 Beaver Valley 電廠 61 種模擬 PTS 事故類型

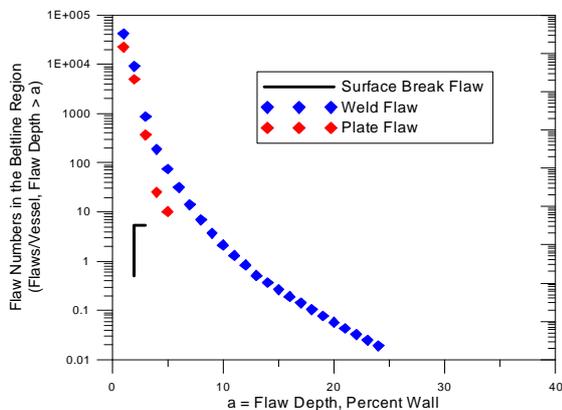
事故類型		事故編號	總計
LOCA	小尺寸	2, 3, 114, 115	4
	中、大尺寸	7, 9, 56, 116, 117	5
SO-1	閥門未關閉	14, 34, 64, 94	4
	後續閥門關閉	59, 60, 61, 62, 66, 67, 69, 70, 71, 92, 93, 97, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130	24
MSLB		74, 81, 102, 103, 104, 105, 106, 107	8
SO-2		78, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 118	8
其他	Feed and Bleed	31	8
	Overfeed	76	
	一、二次側混和型	65, 68, 72, 73, 82, 83	

註：事故編號紅字者為 Beaver Valley 主宰暫態

### 三、裂紋尺寸分佈與存在特性

FAVOR 程式需讀取 RPV 腹帶區之表面開裂裂紋(Surface Breaking Flaw)分佈檔 S.dat、焊道鑲埋裂紋(Weld Embedded Flaw)分佈檔 W.dat，以及板材鑲埋裂紋(Plate Embedded Flaw)分佈檔 P.dat，各裂紋分佈檔描述各類型裂紋之尺寸、形狀與數量分佈等。本研究分析所使用之裂紋分佈檔，與美國 NRC 同樣使用 PNNL 所開發之 VFLAW 程式所產生<sup>[13]</sup>。經調查發現裂紋分佈與數量主要和焊接方式與其比例、焊珠(Weld Bead)尺寸、材料部位、RPV 幾何條件等相關。核三廠 1 號機 RPV 經 VFLAW 透過 1000 次蒙地卡羅模擬之壁體預存裂紋平均數量分佈，如圖 4 所示。

圖 4 VFLAW 程式模擬核三廠 1 號機 RPV 腹帶區平均裂紋數量分佈



### 四、核三廠電廠特性參數

#### (一) 輻射脆化相關性質

影響 RPV 壁體材料破裂韌性之因素，包含環境溫度、材料化學組成及中子照射影響等。溫度越高，其破裂韌性將越佳。至於快中子照射之影響程度，則與材料化學組成相關。描述焊道因中子照射劣化造成破裂韌性變差之現象，法規上使用  $RT_{NDT}$  作為監視金屬材料破裂韌性變化之依據。 $RT_{NDT}$  愈高，代表材質愈脆，破裂韌性將愈差。有關材料  $RT_{NDT}$  與破裂韌性  $K_{IC}$  間之關係，一般依據 ASME 規範提供之關係式加以判斷，如下式所示：

$$K_{IC} = 33.2 + 20.734 \exp[0.02(T - RT_{NDT})] (Ksi \sqrt{in}) \quad (1)$$

至於 FAVOR 程式中模擬裂紋破裂機率之計算理論依據，則依據材料破裂韌性試驗 Master Curve 所推導<sup>[6]</sup>。分析方法為求出每一取樣裂紋尖端承受 PTS 暫態下之應力強度因子  $K_I$  與裂紋尖端溫度分佈歷時，再以韋布分佈(Weibull Distribution)模式計算此取樣裂紋尖端之破裂機率  $c_{pi}$ ，如下式所示：

$$cpi = \begin{cases} 0, & K_I \leq a_{K_{IC}} \\ 1 - \exp\left(\frac{-(K_I - a_{K_{IC}})}{b_{K_{IC}}^{c_{K_{IC}}}}\right), & K_I > a_{K_{IC}} \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$a_{K_{IC}}(T - RT_{NDT}) = 19.35 + 8.335 \exp[0.02254 \cdot (T - RT_{NDT})]$$

$$b_{K_{IC}}(T - RT_{NDT}) = 15.61 + 50.132 \exp[0.008 \cdot (T - RT_{NDT})]$$

$$c_{K_{IC}} = 4$$

焊道輻射脆化之預測，依據 10 CFR 50.61a 提供之最新輻射脆化預測公式<sup>[2, 5]</sup>計算。影響 RPV 輻射脆化之化學組成參數，包含銅、鎳、磷、錳等。表 2 整理核三廠兩座 RPV 腹帶區各材料(焊道與板材)之化學組成與材料初始 RT<sub>NDT</sub> 平均值，作為新版輻射脆化評估之參數輸入。

(二) 中子照射量分佈

依據文獻 WCAP-11433<sup>[9]</sup>與 WCAP-11636 報告<sup>[10]</sup>，可分別獲得核三廠 1、2 號機 RPV 腹帶區垂直方向與圓周方向之相對中子照射強度分佈，進而可求得核三廠 1、2 號機 RPV 腹帶區整體相對中子照射通量強度分佈，如圖 5 所示，此

圖並疊合核三廠 RPV 腹帶區各部位相對位置，如此便可求得各材料部位實際所遭受之最大快中子照射通量比例，如表 3 所列。

依據核三廠小幅度功率提昇計畫之 RPV 中子照射評估報告<sup>[14, 15]</sup>，核三廠於 36 有效全功率運轉年(Effective Full Power Years, EFPY)與 54 EFPY 所對應之 RPV 殼壁最大中子累積通量，分別為 1 號機：4.96×10<sup>19</sup> n/cm<sup>2</sup> 與 7.32×10<sup>19</sup> n/cm<sup>2</sup>；2 號機：4.65×10<sup>19</sup> n/cm<sup>2</sup> 與 6.80×10<sup>19</sup> n/cm<sup>2</sup>。將其最大之中子累積通量依據腹帶區各部位所承受之中子照射強度比例，便可計算各材料於 36 EFPY 與 54 EFPY 之最大中子照射量，同樣整理於表 3 中。

至於裂紋尖端位置因中子照射量受到 RPV 壁體阻擋之衰減，則依據式(3)推估<sup>[16]</sup>：

$$f = f_{surf}(e^{-0.24x}) \quad (3)$$

f<sub>surf</sub> 為內壁表面之中子照射量，x 為距內壁表面之深度，單位須為英尺。

表 2 核三廠 RPV 腹帶區材料化學組成與初始性質

Unit-1							Unit-2								
材料編號	Major Region	Cu (%)	Ni (%)	P (%)	Mn (%)	RT <sub>NDT(U)</sub> (°F)	材料編號	Major Region	Cu (%)	Ni (%)	P (%)	Mn (%)	RT <sub>NDT(U)</sub> (°F)		
垂直 焊道	101-124A	1	0.03	0.1	0.008	1.25	-60	垂直 焊道	101-124A	1	0.08	0.065	0.008	1.5	-50
	101-124B	2	0.06	0.11	0.006	1.34	-60		101-124B	2	0.08	0.065	0.008	1.5	-50
	101-142A	3	0.02	0.11	0.002	1.19	-60		101-142A	3	0.08	0.065	0.008	1.5	-50
	101-142B	4	0.02	0.11	0.002	1.25	-60		101-142B	4	0.08	0.065	0.008	1.5	-50
水平 焊道	101-171	5	0.042	0.129	0.017	1.39	-30	水平 焊道	101-171	5	0.08	0.065	0.008	1.5	-50
板材	R4007-1	6	0.063	0.613	0.006	1.34	10	板材	R5807-1	6	0.065	0.615	0.006	1.33	0
	R4007-2	7	0.064	0.597	0.005	1.45	10		R5807-2	7	0.065	0.607	0.007	1.30	10
	R4008-1	8	0.053	0.62	0.01	1.54	10		R5808-1	8	0.07	0.67	0.01	1.37	-30
	R4008-2	9	0.07	0.67	0.007	1.36	10		R5808-2	9	0.08	0.665	0.007	1.37	-30

表 3 RPV 腹帶區各部位之中子照射量最大值

Unit-1						Unit-2					
材料編號		Major Region	相對強度 (%)	36 EFPY 累積通量 ( $10^{19}$ n/cm <sup>2</sup> )	54 EFPY 累積通量 ( $10^{19}$ n/cm <sup>2</sup> )	材料編號		Major Region	相對強度 (%)	36 EFPY 累積通量 ( $10^{19}$ n/cm <sup>2</sup> )	54 EFPY 累積通量 ( $10^{19}$ n/cm <sup>2</sup> )
垂直 焊道	101-124A	1	30	1.488	2.196	垂直 焊道	101-124A	1	29	1.349	1.972
	101-124B	2	30	1.488	2.196		101-124B	2	29	1.349	1.972
	101-142A	3	30	1.488	2.196		101-142A	3	30	1.395	2.04
	101-142B	4	30	1.488	2.196		101-142B	4	30	1.395	2.04
水平 焊道	101-171	5	100	4.96	7.32	水平 焊道	101-171	5	100	4.65	6.80
板材	R4007-1	6	99	4.91	7.25	板材	R5807-1	6	100	4.65	6.80
	R4007-2	7	99	4.91	7.25		R5807-2	7	100	4.65	6.80
	R4008-1	8	100	4.96	7.32		R5808-1	8	100	4.65	6.80
	R4008-2	9	100	4.96	7.32		R5808-2	9	100	4.65	6.80

1 號機 36 EFPY 最大中子累積通量為  $4.96 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>；54 EFPY 最大中子累積通量為  $7.32 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>  
 2 號機 36 EFPY 最大中子累積通量為  $4.65 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>；54 EFPY 最大中子累積通量為  $6.80 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>

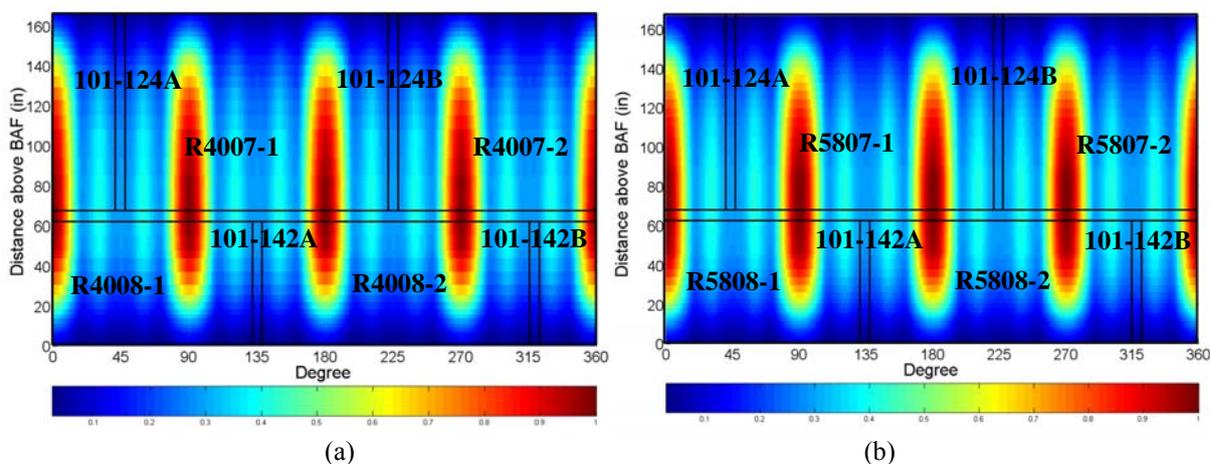


圖 5 核三廠 RPV 腹帶區快中子照射通量相對強度分佈與各部位疊合圖(a)1 號機，(b)2 號機

### 五、後處理暫態頻率輸入

經 FAVOR 之主程式 FAVPFM.exe 分析獲得之條件破裂機率，需再考慮分析暫態之發生頻率以計算 RPV 之實際破裂頻率(單位為/yr)。當暫態發生頻率為常數時，可直接相乘獲得，但當暫態發生頻率為分佈型態時，便可利用 FAVOR 之後

處理程式 FAVPOST.exe 進行統計分析。本研究分析之 PTS 暫態發生頻率分佈，為美國 Sandia 國家實驗室 Whitehead 等學者以 SAPHIRE (Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations)程式，針對 Beaver Valley 電廠之 PTS 事故暫態所分析獲得<sup>[17]</sup>，並擷取輸入於 FAVPost.in 內。依據 FAVPFM 每次 PFM 遞迴

運算之結果，FAVPOST 將依各暫態之發生頻率分佈，計算 RPV 整體破裂與裂縫貫穿頻率、各暫態造成 RPV 破裂頻率比例，以及分析結果之信心度區間統計分析等。

## 伍、分析結果討論

### 一、機率破裂力學分析結果

本研究進行之機率破裂力學分析，皆由執行 10 萬次之蒙地卡羅模擬疊代所獲得，以確保其收斂性。表 4 所列為核三廠 1、2 號機 RPV 腹帶區各部位材料於 36 EFPY 與 54 EFPY 之  $RT_{NDT}$  預測值。由表中可發現，核三廠兩座 RPV 腹帶區各部位的  $RT_{NDT}$  皆遠低於法規 10 CFR 50.61a 的管制要求(焊道 269°F，板材 352°F)，顯示其輻射脆化非常輕微。

表 5 與表 6 分別陳列為核三廠 1、2 號機 RPV 的 FAVOR 分析結果，包含各個 PTS 暫態條件性破裂機率(CPI, CPF)，以及各個 PTS 暫態對 RPV 整體之平均 FCI (Frequency of Crack Initiation)以及平均 TWCF (Through-Wall Cracking Frequency) 之個別貢獻度。表中僅列出主導(Dominant)暫態 (FCI 或 TWCF 貢獻度超過 1%)的分析結果。由分析結果發現，隨著輻射脆化增加，RPV 破裂機率與主導暫態數量將因此增加。分析 61 個 Beaver Valley 事故暫態條件下，造成 RPV 潛在破裂風險的 PTS 主導暫態，1 號機 RPV 於 36 EFPY 條件下僅事故編號 70、71、124、129 等，54 EFPY 時則增加為編號 7、56、70、71、123、124、129 等 PTS 暫態，但僅編號 70、71、123、124、129 等 5 事故造成最終裂縫貫穿風險。至於 2 號機 RPV 於 36 EFPY 條件下的破裂風險，由編號 56、71、120、124 等暫態主導，54 EFPY 時則增加為編號 7、56、71、97、120、124、129、130 等，但編號 7、56 等 2 事故並不會對 RPV 造成裂縫貫穿風險。

PFM 分析結果指出，由於核三廠兩座 RPV

輻射脆化皆非常輕微，故 PTS 暫態對 RPV 造成的破裂風險皆非常低。1 號機 RPV 腹帶區之整體 TWCF，於 36 EFPY 時，僅約  $1.91 \times 10^{-16}/\text{yr}$ ，54 EFPY 時亦僅為  $2.17 \times 10^{-15}/\text{yr}$ 。至於 2 號機 RPV 腹帶區之整體 TWCF，於 36 EFPY 時，約為  $4.52 \times 10^{-14}/\text{yr}$ ，54 EFPY 時亦僅為  $1.61 \times 10^{-13}/\text{yr}$ 。以上結果皆遠小於法規 10 CFR 50.61a 中規定之  $1 \times 10^{-6}/\text{yr}$  容許裂縫貫穿風險。因此，基於與美國管制分析相同基準之 PFM 分析結果，可證明核三廠兩座 RPV 因 PTS 事件造成之裂縫貫穿風險極低，能提供足夠之運轉可靠度。

表 7 所列表 5 與表 6 中核三廠各項 PTS 主導暫態的事故整理，可發現最終會造成核三廠 RPV 裂縫貫穿風險之事故，皆屬一次系統安全釋壓閥卡開(SO-1)，並伴隨後續閥門關閉之類型。至於事故編號 7、56 等中大尺寸之 LOCA 類型，雖造成 54 EFPY 條件 RPV 產生裂紋開裂初始，但並未造成裂紋持續成長至貫穿。

圖 6 與圖 7 分別為造成核三廠 1、2 號機 RPV 發生條件破裂機率 CPF 最嚴重之事故暫態(1 號機為事故編號 70，2 號機為事故編號 124)溫壓歷時與事故發生頻率分佈圖，圖 8 則為造成 54 EFPY 條件 RPV 僅發生 CPI 事故中最嚴重之事故暫態(事故編號 56)溫壓歷時與事故發生頻率分佈圖。由圖 6(a)至圖 7(a)可發現，事故編號 70 與 124 因低溫狀態再伴隨後續之再加壓，故造成之 CPI 與 CPF 皆最高。然而觀察 LOCA 類型之事故，例如圖 8(a)事故編號 56 之溫壓歷時，由於僅低溫條件存在，無後續之再加壓，且因核三廠 RPV 輻射脆化輕微，破裂韌性佳，當裂紋於低溫產生開裂初始行為後，因無持續增加之  $K_I$ ，此時裂紋尖端材料因 Warm Prestress (WPS)效應增加其視破裂韌性(Apparent Fracture Toughness)，若於無更大之  $K_I$  施加下將終止後續成長。因此，諸如 LOCA 等 PTS 事故類型，由於僅有低溫條件存在，故對輻射脆化並不嚴重之核三廠 RPV，最多僅造成開裂初始之行為。此外，因二次側事故造成之 PTS 暫態，雖然 RPV 內壓仍存在，但因

爐壁溫度較高，故無任何破裂機率經分析獲得。

比較表 5 與表 6 之分析結果，可發現就條件破裂機率而言，雖然事故編號 70 或 124 之 PTS 暫態分別對核三廠 1、2 號機 RPV 所造成之 CPI 與 CPF 最高，顯示此事故暫態對 RPV 之結構完整性衝擊最大，但因其暫態平均發生頻率較低(僅  $5.30 \times 10^{-8}/\text{yr}$  與  $3.83 \times 10^{-7}/\text{yr}$ )，故最終之 FCI 與 TWCF 貢獻度降低。反觀事故編號 129 或 71 之 PTS 暫態因發生頻率較高，儘管其溫壓衝擊非最

嚴重者，但因發生機會大，故分別貢獻核三廠 1、2 號機 RPV 最大之 TWCF。至於事故編號 56 之 LOCA 類型 PTS 暫態，因其暫態發生頻率最高(平均為  $1.52 \times 10^{-4}/\text{yr}$ )，故有 94.36% 之 FCI 貢獻度(2 號機 RPV 54 EFPY)，但卻無任何 TWCF 之發生機會。觀察圖 8(a)，可發現該暫態之壓力極低，即使裂紋尖端於低溫狀態下發生開裂初始行為，因無足夠內壓施加，將造成止裂(Arrest)現象，而不會成長至貫穿。

表 4 核三廠 RPV 腹帶區材料之  $RT_{NDT}$  預測值

Unit-1					Unit-2				
材料編號		Major Region	36 EFPY $RT_{NDT}$ (°F)	54 EFPY $RT_{NDT}$ (°F)	材料編號		Major Region	36 EFPY $RT_{NDT}$ (°F)	54 EFPY $RT_{NDT}$ (°F)
垂直 焊道	101-124A	1	-21.76	-13.45	垂直 焊道	101-124A	1	-4.56	3.70
	101-124B	2	-22.09	-13.85		101-124B	2	-4.56	3.70
	101-142A	3	-24.10	-16.29		101-142A	3	-4.08	4.30
	101-142B	4	-24.01	-16.19		101-142B	4	-4.08	4.30
水平 焊道	101-171	5	37.97	52.75	水平 焊道	101-171	5	17.93	30.93
板材	R4007-1	6	74.97	89.11	板材	R5807-1	6	63.60	77.16
	R4007-2	7	75.03	89.19		R5807-2	7	74.05	87.71
	R4008-1	8	81.42	96.95		R5808-1	8	37.09	51.40
	R4008-2	9	76.18	90.57		R5808-2	9	52.32	66.22

表 5 核三廠 1 號機 RPV 機率破裂力學 FAVOR 分析結果

1 號機 RPV 36 EFPY 分析結果*						
事故 編號	平均條件破裂機率			平均破裂風險 $FCI_{(Total)}=1.909 \times 10^{-16}/\text{yr}$ , $TWCF_{(Total)}=1.909 \times 10^{-16}/\text{yr}$		
	$CPI_{(mean)}$	$CPF_{(mean)}$	Ratio CPF/CPI	暫態平均發生頻率 (/yr)	FCI 貢獻度 (%)	TWCF 貢獻度 (%)
70	$1.608 \times 10^{-9}$	$1.606 \times 10^{-9}$	0.9991	$5.30 \times 10^{-8}$	30.38	30.38
71	$2.476 \times 10^{-12}$	$2.476 \times 10^{-12}$	1	$8.15 \times 10^{-6}$	6.80	6.81
124	$2.628 \times 10^{-10}$	$2.627 \times 10^{-10}$	0.9998	$3.83 \times 10^{-7}$	24.34	24.34
129	$2.221 \times 10^{-12}$	$2.221 \times 10^{-12}$	1	$6.25 \times 10^{-5}$	38.47	38.48
1 號機 RPV 54 EFPY 分析結果*						
事故 編號	平均條件破裂機率			平均破裂風險 $FCI_{(Total)}=4.269 \times 10^{-14}/\text{yr}$ , $TWCF_{(Total)}=2.169 \times 10^{-15}/\text{yr}$		
	$CPI_{(mean)}$	$CPF_{(mean)}$	Ratio CPF/CPI	暫態平均發生頻率 (/yr)	FCI 貢獻度 (%)	TWCF 貢獻度 (%)
7	$4.700 \times 10^{-10}$	0	0	$6.41 \times 10^{-6}$	11.78	0
56	$1.149 \times 10^{-9}$	0	0	$1.52 \times 10^{-4}$	83.05	0
70	$4.318 \times 10^{-9}$	$4.238 \times 10^{-9}$	0.9815	$5.30 \times 10^{-8}$	0.35	6.65
71	$5.425 \times 10^{-11}$	$5.425 \times 10^{-11}$	1	$8.15 \times 10^{-6}$	0.54	10.54
123	$4.374 \times 10^{-11}$	$3.148 \times 10^{-11}$	0.7197	$3.83 \times 10^{-7}$	0.07	1.01
124	$9.252 \times 10^{-10}$	$9.246 \times 10^{-10}$	0.9994	$3.83 \times 10^{-7}$	0.46	8.99
129	$3.955 \times 10^{-11}$	$3.955 \times 10^{-11}$	1	$6.25 \times 10^{-5}$	3.68	72.48

\*僅陳列 FCI 或 TWCF 貢獻度超過 1% 之暫態分析結果

表 6 核三廠 2 號機 RPV 機率破裂力學 FAVOR 分析結果

2 號機 RPV 36 EFPY 分析結果*						
事故編號	平均條件破裂機率			平均破裂風險		
	CPI <sub>(mean)</sub>	CPF <sub>(mean)</sub>	Ratio CPF/CPI	FCI <sub>(Total)</sub> =2.904×10 <sup>-13</sup> /yr, TWCF <sub>(Total)</sub> =4.516×10 <sup>-14</sup> /yr	暫態平均發生頻率 (yr)	FCI 貢獻度 (%)
56	1.256×10 <sup>-9</sup>	0	0	1.52×10 <sup>-4</sup>	84.22	0
71	2.617×10 <sup>-9</sup>	2.584×10 <sup>-9</sup>	0.9873	8.15×10 <sup>-6</sup>	14.24	90.25
120	2.926×10 <sup>-10</sup>	2.891×10 <sup>-10</sup>	0.9881	2.26×10 <sup>-6</sup>	0.85	5.43
124	1.420×10 <sup>-8</sup>	1.411×10 <sup>-8</sup>	0.9939	3.83×10 <sup>-7</sup>	0.52	3.32
2 號機 RPV 54 EFPY 分析結果*						
事故編號	平均條件破裂機率			平均破裂風險		
	CPI <sub>(mean)</sub>	CPF <sub>(mean)</sub>	Ratio CPF/CPI	FCI <sub>(Total)</sub> =4.507×10 <sup>-12</sup> /yr, TWCF <sub>(Total)</sub> =1.607×10 <sup>-13</sup> /yr	暫態平均發生頻率 (yr)	FCI 貢獻度 (%)
7	4.208×10 <sup>-9</sup>	0	0	6.41×10 <sup>-6</sup>	1.48	0
56	2.514×10 <sup>-8</sup>	0	0	1.52×10 <sup>-4</sup>	94.36	0
71	7.778×10 <sup>-9</sup>	7.681×10 <sup>-9</sup>	0.9875	8.15×10 <sup>-6</sup>	2.67	74.75
97	5.972×10 <sup>-10</sup>	5.643×10 <sup>-10</sup>	0.9450	8.15×10 <sup>-6</sup>	0.02	5.3
120	1.707×10 <sup>-9</sup>	1.690×10 <sup>-9</sup>	0.9897	2.26×10 <sup>-6</sup>	0.32	8.87
124	2.838×10 <sup>-8</sup>	2.823×10 <sup>-8</sup>	0.9948	3.83×10 <sup>-7</sup>	0.07	1.88
129	1.704×10 <sup>-11</sup>	1.704×10 <sup>-11</sup>	1	6.25×10 <sup>-5</sup>	0.05	1.56
130	8.926×10 <sup>-11</sup>	7.855×10 <sup>-11</sup>	0.8800	6.25×10 <sup>-5</sup>	0.29	7.18

\*僅陳列 FCI 或 TWCF 貢獻度超過 1%之暫態分析結果

表 7 造成核三廠 RPV 破裂風險之主導 PTS 事故整理

事故編號	事故描述	操作行為	事故分類	影響條件
7	20.32 cm (8 in ) surge line 破口	無	LOCA (medium and large)	Unit-1: 54 EFPY FCI Unit-2: 54 EFPY FCI
56	10.16 cm (4.0 in) surge line 破口	無	LOCA (medium and large)	Unit-1: 54 EFPY FCI Unit-2: 36, 54 EFPY FCI
70	反應器/氣輪機跳閘 w/兩個調壓槽 SRV 卡開，於 6,000 秒再關閉	無	SO-1	Unit-1: 36, 54 EFPY FCI & TWCF Unit-2: 36, 54 EFPY FCI & TWCF
71	反應器/氣輪機跳閘 w/一個調壓槽 SRV 卡開，於 6,000 秒再關閉	無	SO-1	Unit-1: 36, 54 EFPY FCI & TWCF Unit-2: 36, 54 EFPY FCI & TWCF
97	反應器/氣輪機跳閘 w/一個調壓槽 SRV 卡開，一個於 3,000 秒再關閉	無	SO-1	Unit-2: 36, 54 EFPY FCI & TWCF
120	反應器/氣輪機跳閘 w/兩個調壓槽 SRV 卡開，於 6,000 秒再關閉	操作員控制 HHSI(10 分鐘延遲)，更新操作邏輯	SO-1	Unit-1: 54 EFPY FCI & TWCF Unit-2: 36, 54 EFPY FCI & TWCF
123	反應器/氣輪機跳閘 w/兩個調壓槽 SRV 卡開，於 3,000 秒再關閉	操作員控制 HHSI(10 分鐘延遲)，更新操作邏輯	SO-1	Unit-1: 54 EFPY FCI & TWCF Unit-2: 36, 54 EFPY FCI & TWCF
124	反應器/氣輪機跳閘 w/兩個調壓槽 SRV 卡開，於 6,000 秒再關閉	操作員控制 HHSI(10 分鐘延遲)，更新操作邏輯	SO-1	Unit-1: 36, 54 EFPY FCI & TWCF Unit-2: 36, 54 EFPY FCI & TWCF
129	反應器/氣輪機跳閘 w/一個調壓槽 SRV 卡開，於 6,000 秒再關閉	操作員控制 HHSI(10 分鐘延遲)，更新操作邏輯	SO-1	Unit-1: 36, 54 EFPY FCI & TWCF Unit-2: 36, 54 EFPY FCI & TWCF
130	反應器/氣輪機跳閘 w/一個調壓槽 SRV 卡開，於 3,000 秒再關閉	操作員控制 HHSI(10 分鐘延遲)，更新操作邏輯	SO-1	Unit-2: 54 EFPY FCI & TWCF

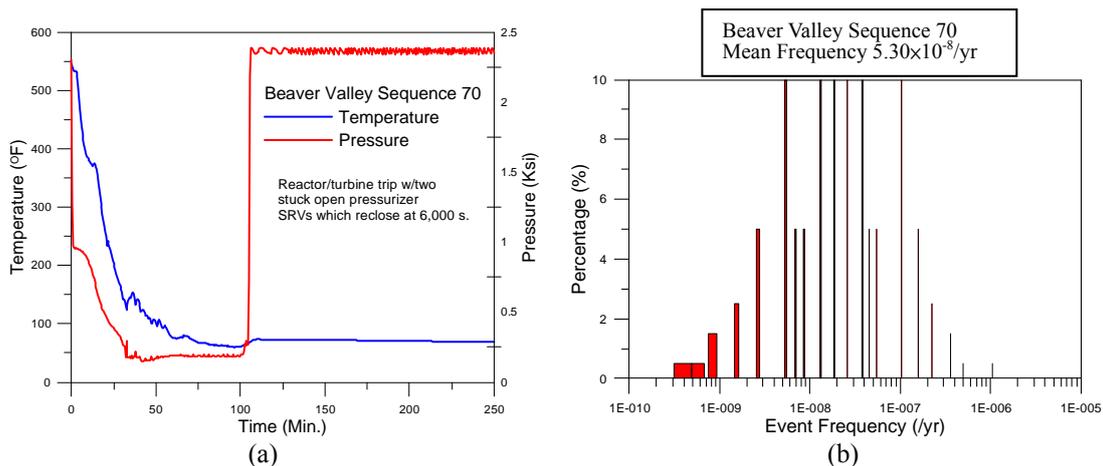


圖 6 事故編號 70 之(a)暫態溫壓歷時與(b)事故發生頻率分佈

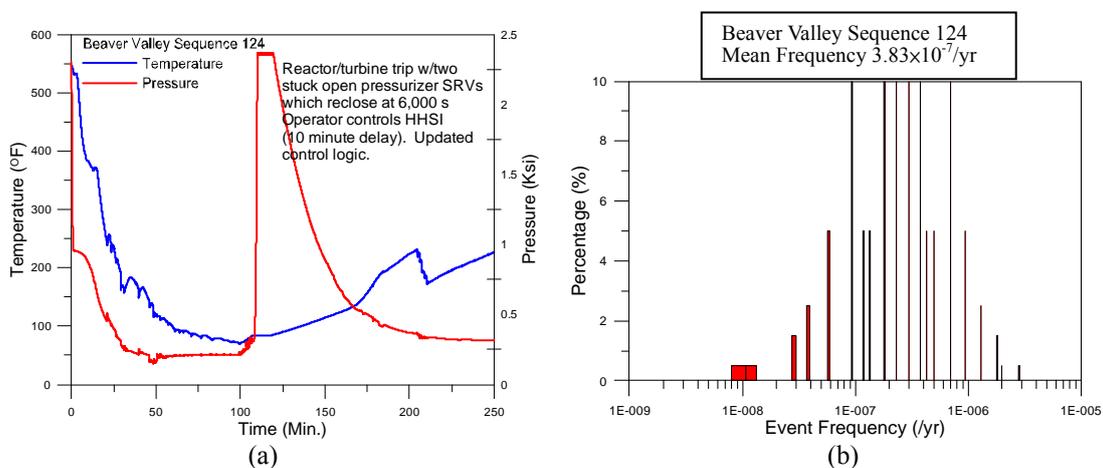


圖 7 事故編號 124 之(a)暫態溫壓歷時與(b)事故發生頻率分佈

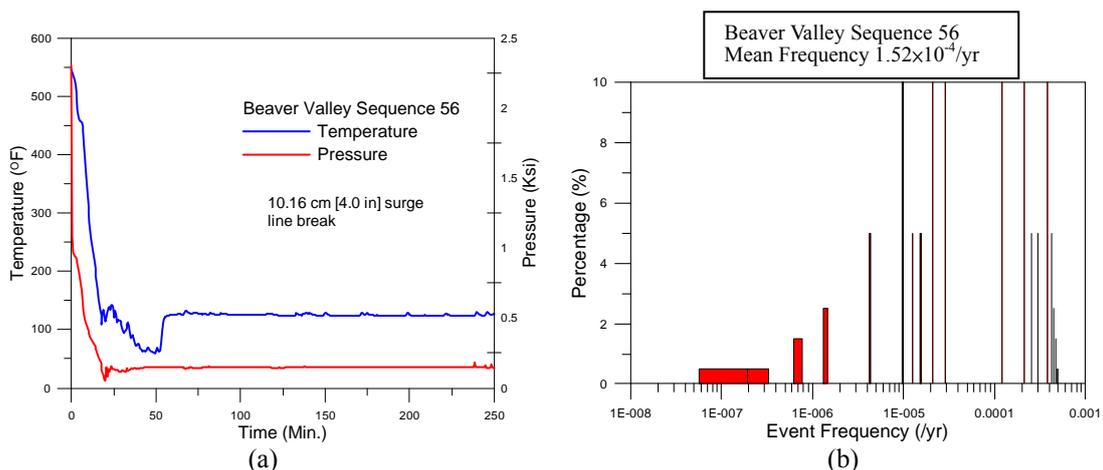


圖 8 事故編號 56 之(a)暫態溫壓歷時與(b)事故發生頻率分佈

## 二、NUREG-1874 風險預測評估

美國 NRC 於 NUREG-1874 報告<sup>[5]</sup>推導新版

壓力熱震審查準則(RT<sub>PTS</sub>)之過程中，依據各分析電廠機率破裂力學分析結果，建立一壓水式反應器壓力槽裂縫貫穿風險預測評估公式，相關公式

推導可參閱文獻<sup>[3]</sup>的敘述。本文亦依據 NUREG-1874 風險預測式，評估核三廠 RPV 的 PTS 破裂風險，以驗證本研究 PFM 之分析結果。

依據 NUREG-1874，板材焊接型式 RPV 依據機率破裂力學分析結果其 TWCF 可由下式推估：

$$TWCF_{Total} = \left\{ \begin{matrix} \alpha_{AW} \cdot TWCF_{AW} + \\ \alpha_{PL} \cdot TWCF_{PL} + \\ \alpha_{CW} \cdot TWCF_{CW} \end{matrix} \right\} \times \beta \leq 1 \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中 $\alpha$ 為考慮 SO-1 類型事故於低輻射脆化條件時之加權因子，定義如下：

當  $RT_{MAX-XX} \leq 625 R$ ， $\alpha = 2.5$ ，

當  $RT_{MAX-XX} \geq 875 R$ ， $\alpha = 1$ ，

當  $625 R < RT_{MAX-XX} < 875 R$ ，

$$\alpha = 2.5 - \frac{1.5}{250} (RT_{MAX-XX} - 625)$$

式中下標  $XX$  代表 RPV 腹帶區之材料種類，包含垂直焊道(AW)、板材(PL)，與水平焊道(CW)。 $\beta$ 則為 RPV 厚度之影響因子，定義為：

$\beta = 1$  for  $T_{WALL} \leq 9\frac{1}{2}$  -in

$\beta = 1 + 8 \cdot (T_{WALL} - 9\frac{1}{2})$  for  $9\frac{1}{2} < T_{WALL} < 11\frac{1}{2}$  -in

$\beta = 17$  for  $T_{WALL} \geq 11\frac{1}{2}$  -in

由於核三廠 RPV 腹帶區壁厚為 8.04 英吋，故 $\beta = 1$ 。

式(4)中之  $TWCF_{Total}$  為各種類材料 TWCF 值 ( $TWCF_{AW}$ 、 $TWCF_{PL}$ 、 $TWCF_{CW}$ ) 之總和，各項  $TWCF_{XX}$  則可由下式計算：

$$TWCF_{XX} = \exp \{ m \cdot \ln(RT_{MAX-XX} - RT_{TH-XX}) + b \} \quad (5)$$

$RT_{TH-XX}$  為發生 TWCF 之  $RT_{NDT}$  門檻值，經由迴歸分析計算獲得，各溫度皆以絕對溫度作為溫度單位(Rankine,  $R = Fahrenheit + 459.69$ )，式(5)中各項迴歸係數如下：

**Regressor**

Variable	m	b	$RT_{TH}[R]$
$RT_{MAX-AW}$	5.5198	-40.542	616
$RT_{MAX-PL}$	23.737	-162.36	300
$RT_{MAX-CW}$	9.1363	-65.066	616

因此，可代入核三廠 RPV 腹帶區材料之  $RT_{MAX-XX}$ ，推估可能之 PTS 破裂風險。

表 8 所列為核三廠 RPV 依據 NUREG-1874 風險預測式計算的結果，並與 PFM 結果相互比較。評估結果發現兩種方式分析結果皆可獲得極低之 PTS 破裂風險，再次證明核三廠 RPV 即使考慮美國 Beaver Valley 電廠所有假想 PTS 事故條件，仍可表現出遠低於  $1 \times 10^{-6}/yr$  的法規容許風險，呈現出相當高的結構可靠度，此乃因其輻射脆化非常輕微，經長期運轉後材料破裂韌性仍佳所致。

表 8 NUREG-1874 風險預測式計算結果比較

輻射脆化條件	分析方法	RPV TWCF (/yr)	
		Unit-1	Unit-2
36 EFPY	NUREG-1874	$2.708 \times 10^{-14}$	$1.296 \times 10^{-14}$
	PFM	$1.909 \times 10^{-16}$	$4.516 \times 10^{-14}$
54 EFPY	NUREG-1874	$1.191 \times 10^{-13}$	$4.989 \times 10^{-14}$
	PFM	$2.169 \times 10^{-15}$	$1.607 \times 10^{-13}$

**陸、結論**

本文針對我國核三廠兩座反應器壓力槽，進行壓力熱震事件衝擊下之破裂風險評估。評估方法包含機率破裂力學分析與風險預測式計算。機率破裂力學之分析，依據美國 NRC 制定新版壓力熱震管制法規 10 CFR 50.61a 之分析理論基礎，包含壓力熱震暫態之溫度、壓力，與熱傳導係數歷時，事故發生頻率分佈，以及 VFLAW 裂紋分佈等，再代入核三廠 RPV 腹帶區輻射脆化相關參數，以 FAVOR 程式進行 PFM 分析。分析結果指出，核三廠兩座 RPV 之 PTS 破裂風險，即使考慮至 54 EFPY，仍皆遠低於法規容許之  $1 \times 10^{-6}/yr$  裂縫貫穿風險，並已達可忽略之程度。證明我國壓水式反應器之核三廠 RPV 即使保守

考慮美國同型機種 61 個 PTS 事故暫態，破裂風險仍極低。

以 NUREG-1874 報告中之風險預測式驗證評估核三廠 RPV 之裂縫貫穿頻率，最高亦僅呈現約  $10^{-13}/\text{yr}$  之風險度，再次證明我國核三廠 RPV 腹帶區材料具有充分之破裂韌性抵抗壓力熱震事件之衝擊，可提供極佳之可靠度與結構安全

## 柒、誌謝

本論文為台電核安處編號 054010000101 之計畫。由於台電公司的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

## 捌、參考文獻

- [1] 10CFR50.61, "Fracture Toughness Requirements for Protection against Pressurized Thermal Shock Events," Code of Federal Regulations.
- [2] 10 CFR 50.61a, "Alternative Fracture Toughness Requirements for Protection against Pressurized Thermal Shock Events," Code of Federal Regulations.
- [3] 周雄偉，黃金城，張漢洲，「新版壓力熱震管制法規與管制準則推導」，台電核能月刊，第 379 期，第 56~73 頁，2014 年 7 月。
- [4] M. T. EricksonKirk et al., "Technical Basis for Revision of the Pressurized Thermal Shock (PTS) Screening Limit in the PTS Rule (10 CFR 50.61)," NUREG-1806, U. S. NRC, August, 2007.
- [5] M. T. EricksonKirk and T. L. Dickson, "Recommended Screening Limits for Pressurized Thermal Shock (PTS)," NUREG-1874, U. S. NRC, March, 2010.
- [6] P. T. Williams, T. L. Dickson and S. Yin, "Fracture Analysis of Vessels-Oak Ridge FAVOR, v09.1, Computer Code: Theory and Implementation of Algorithms, Methods, and Correlations," ORNL/TM-2010/5, Oak Ridge National Laboratory, USA, 2010.
- [7] Westinghouse, "The Nuclear Design and Core Physics Characteristics of the Maanshan Unit 1 Nuclear Power Plant Cycle 11," WCAP-14840, March, 1997.
- [8] Westinghouse, "The Nuclear Design and Core Physics Characteristics of the Maanshan Unit 2 Nuclear Power Plant Cycle 11," WCAP-14972, October, 1997.
- [9] Westinghouse, "Analysis of Capsule U from the Taiwan Power Company Maanshan Unit 1 Reactor Vessel Radiation Surveillance Program," WCAP-11433, March, 1987.
- [10] Westinghouse, "Analysis of Capsule U from the Taiwan Power Company Maanshan Unit 2 Reactor Vessel Radiation Surveillance Program," WCAP-11636, October, 1987.
- [11] Y. H. J. Chang, A. Mosleh, and K. Almenas, "Thermal Hydraulic Uncertainty Analysis in Pressurized Thermal Shock Risk Assessment," NUREG/CR-6899, U. S. NRC, November, 2004.
- [12] W. C. Arcieri et al., "RELAP5 Thermal Hydraulic Analysis to Support PTS Evaluations for the Oconee-1, Beaver Valley-1, and Palisades Nuclear Power Plants," NUREG/CR-6858, U. S. NRC, September, 2004.
- [13] F. A. Simonen, S. R. Doctor, G. J. Schuster, and P. G. Heasler, "A Generalized Procedure for Generating Flaw-Related Inputs for the FAVOR Code," NUREG/CR-6817, U. S. NRC, October, 2003.
- [14] Westinghouse, "Maanshan Unit 1 RPV Fluence Evaluation to Support the MUR Uprate Program, Rev. 0," CN-REA-07-3, 2007.
- [15] Westinghouse, "Maanshan Unit 2 RPV Fluence Evaluation to Support the MUR Uprate Program, Rev. 0," CN-REA-07-4, 2007.
- [16] Regulatory Guide 1.99, Revision 2, "Radiation embrittlement of reactor vessel materials," U.S. NRC, 1998.
- [17] D. L. Whitehead, et al., "Beaver Valley Pressurized Thermal Shock (PTS) Probabilistic Risk Assessment (PRA)," ADAMS #ML042880454, September, 2004.

# 不同接地方式對高樓建築物遭受直接雷擊時之 大地電位升的分析

Analysis of Ground Potential Rises in a High-Rise Building during a Direct Lightning Stroke  
under Different Grounding Schemes

李建興\*  
Lee, Chien-Hsing

張正男\*\*  
Chang, Cheng-Nan

## 摘要

本文係使用 CDEGS(Current Distribution Electromagnetic Grounding and Soil structure analysis)軟體來模擬整體長、寬、高約為 39 m x 13 m x 21 m 商業辦公大樓經直接雷擊後，於頻域及時域分析三種不同接地方式所產生之暫態大地電位升。此三種接地方式分別為避雷單獨接地、避雷接地系統下導體以建築物鋼筋架構等電位共同接地後引接至土壤內之垂直接地電極(稱為型式 A 接地)及環狀接地電極(稱為型式 B 接地)。由模擬結果得知，當使用等電位共同接地且土壤內接地端系統為環狀接地電極時，因易取得較大接地面積再加上建築物金屬架構之分流，其能有效降低大地電位升且能達到各樓層間等電位，以使整體建築物形成一法拉第籠；而若採用單獨接地系統時，因受限於接地面積之故，將導致無法獲得如共同接地般之低阻抗，倘發生雷擊時可能產生較高大地電位升，進而與附近地區形成高電位差，恐有人員傷亡及設備破壞之疑慮。

## Abstract

This paper utilizes CDEGS software to calculate the transient ground potential rise (GPR) that is caused by direct lightning strokes at a commercial building with a land base area of 39 m x 13 m and a building height of 21 m. The influences of soil resistivity, location of the lightning strike point, and the wave shape of the lightning current on the transient GPRs of three scenarios for the building are analyzed. The scenarios selected for analysis include: devices that are grounded independently; devices that are grounded via vertical ground electrodes that are connected to each down conductor fixed on the outside of the building (called Type A grounding); and devices that are grounded via a ring ground electrode to be sited around the periphery of the building (called Type B grounding). The results show that the ring ground electrode provides effective protection against lightning and therefore is recommended since it provides a large surface area for grounding and passes lightning currents into all the metal parts of the building, forming a Faraday's Cage. In contrast, it will not provide a low impedance path if independent grounding is used to transfer lightning energy, which may result in a higher grounding potential rise and cause harm to surroundings.

\*國立成功大學系統系

\*\*台灣電力公司中區施工處

**關鍵詞(Key Words)：**雷擊(Lightning Strike)、單獨接地系統(Independent Grounding System)、共同接地系統(Equipotential Common Grounding System)、避雷保護系統(Lightning Protection System)、大地電位升(Ground Potential Rise)。

## 壹、前言

雷害問題存於世界各國，台灣亦是如此，台灣隸屬亞熱帶地區，春夏之季發生雷雨機率相當高，而雷雨下之閃電便成為破壞主因。經學者對台灣歷年落雷統計，每年發生雷擊次數至少上萬次以上，再加上人口眾多且受限於土地條件下，建築物逐漸往高樓層發展將提高遭受雷擊機率。而於強大雷擊破壞力下，如何確保建築物內人員及設備安全，因應之道則須有一套完整避雷接地系統。

所謂完整避雷接地系統，其須能提供建築物外部與內部之保護，而雖名為避雷保護系統，但其工作原理是將雷電引導至預定雷擊位置，再經由接地端系統將能量釋放於大地。依據 IEC-62305 標準中提及建築物避雷保護系統 LPS(Lightning Protection System) 架構係由兩部分所組成，分別為外部及內部避雷保護系統<sup>[1-2]</sup>，外部避雷保護系統主要功能是攔截建築物直擊雷與建築物兩側之閃絡，將雷擊突波電流從雷擊點導引至大地以避免產生熱效應或機械損失，用以減少產生危險火花於易發生火災和爆炸之處；而內部避雷保護系統主要防止剩餘雷擊突波或感應電流經由線路亂竄，進而破壞電子設備，此系統之組成主要由突波保護器 SPD (Surge Protective Device) 及等電位連接 EB (Equipotential Bonding) 組成。

上述外部避雷保護系統包括露空接收端 (Air-termination System)、下導體(Down-conductor System) 及接地端(Earth-termination System) 等三個子系統，如圖 1 所示。其中露空接收端為接受直接雷擊之金屬體，將雷電引導至預定雷擊位置，其裝設於欲保護建築物或區域頂端以構成保

護區，如：避雷針、避雷器、架空地線等；下導體則連接露空接收端與接地端系統之金屬導體(如：裸軟銅線或建築物金屬結構物)，其功能是将露空接收端所接收之雷擊突波電流疏導至接地端系統；另接地端系統之目的則將雷擊突波電流快速疏散至較深地層，一般係由接地棒或裸硬銅線構成，該接地端系統於 IEC 標準將其區分為型式 A 及型式 B 等兩種方式。型式 A 接地端系統係以建築物鋼筋架構搭接後於土壤內採垂直方式之接地電極，而型式 B 則以建築物鋼筋架構搭接後於土壤內另採環狀接地電極<sup>[1-5]</sup>。

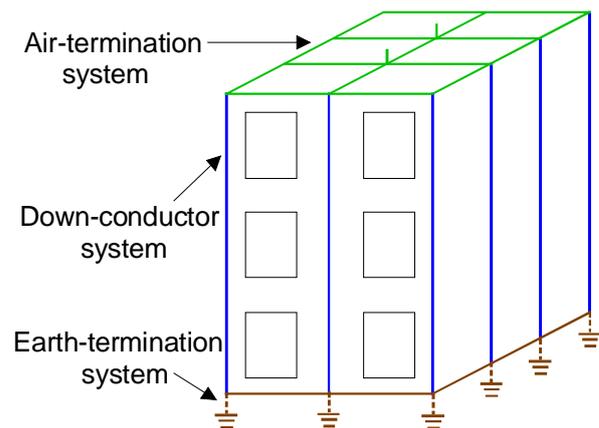


圖 1 外部避雷保護系統示意圖

目前避雷接地可分為兩種方式，一為利用建築物鋼筋架構作下導體連接至接地端系統，另一則是使用避雷導線作下導體連接至接地端系統；於 IEC 標準中，其所建議接地方式係屬前者(共同接地)，而後者卻為國內常見之接地方式(單獨接地)。一般而言，常見建築物之接地方式可分五種類型(如圖 2 所示)，其中型式 a 為 IEC 標準推薦使用，而目前國內建築物接地方式大多以型式 e 來呈現。為瞭解國內建築物接地方式與 IEC 標準所推薦使用方式之差異，故本文僅針對圖 2 中之型式 a 與型式 e 兩種接地方式進行分析，吾

人將使用 CDEGS 軟體來模擬分析高樓層建築物遭受直接雷擊時，採單獨接地系統及等電位共同接地系統對於疏散雷擊突波電流差異性，並以頻域及時域兩方面探討接地系統之特性。除此之外，亦依 IEEE Std. 80, 2000 版計算於發生雷擊時，不同土壤電阻率對 50 公斤與 70 公斤人體重量之建築物接地網所能容許接觸電壓與步間電壓，以評估其接地系統安全性。

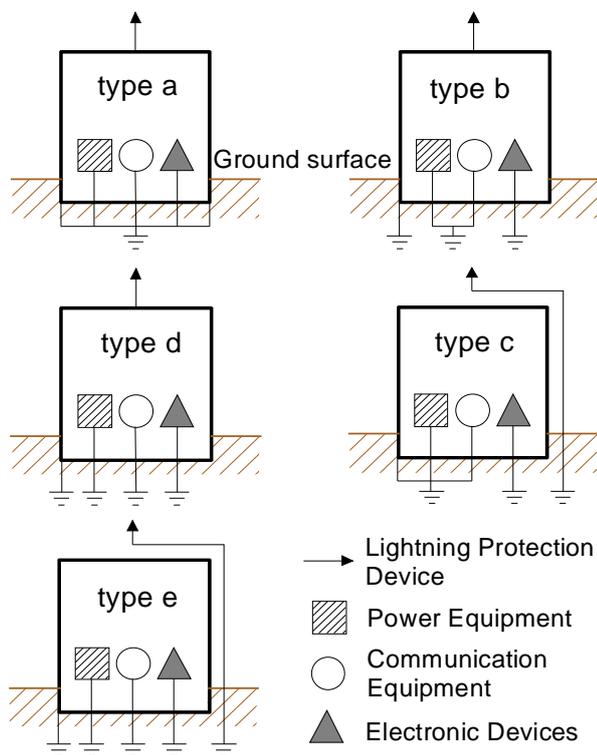


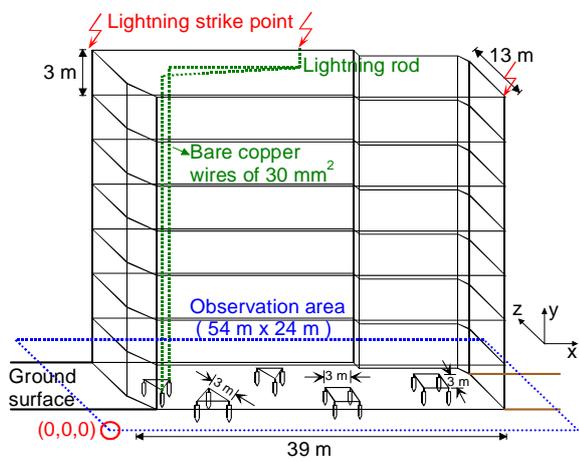
圖 2 建築物各種接地方式示意圖

## 貳、模型架構之建立

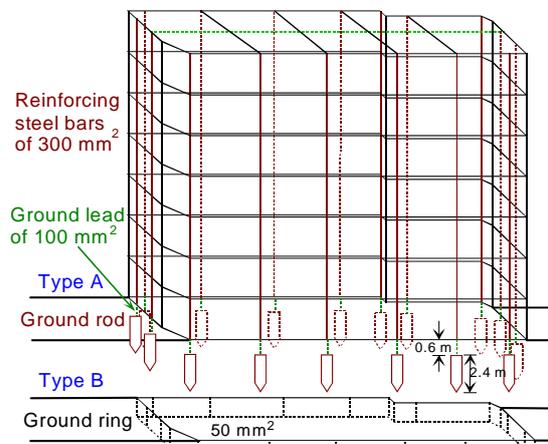
本文模擬之建築物係參考某商辦大樓尺寸所建構，其長、寬、高約為 39 m x 13 m x 21 m，建築物下方接地網係將所有須接地之設備採單獨接地方式保護，其接地示意架構如圖 2 中之型式 e 所示。在此為與 IEC 標準建議之等電位共同接地進行比較，另將原單獨接地架構改為使用建築物本身鋼筋結構作下導體之連接，並採 IEC 標準所提及型式 A 及型式 B 等兩種接地端系統，藉此分析於相同建築物架構經雷擊後單獨接地與等電位共同接地之差異性。

### 一、單獨接地系統

此系統之建立係使用原建築物接地架構，如圖 3(a)所示。避雷針僅架設一處於建築物屋頂中央，下導體數量及使用線徑係依建築技術規則建築設備編第 24~25 條規定敷設(下導體採用兩條導線且建築物高度 30 m 以下使用斷面積 30 mm<sup>2</sup> 以上銅導線)<sup>[6]</sup>，地面虛線部分為模擬時觀察之區域範圍(長、寬為 54 m x 24 m)，左下角座標(0,0,0)為模擬之基準點。另外，圖 3(a)所示之三角形接地網由左至右分別為避雷針、電話與電腦資訊系統，而方形則為兩組電力系統接地網。



(a)單獨接地系統

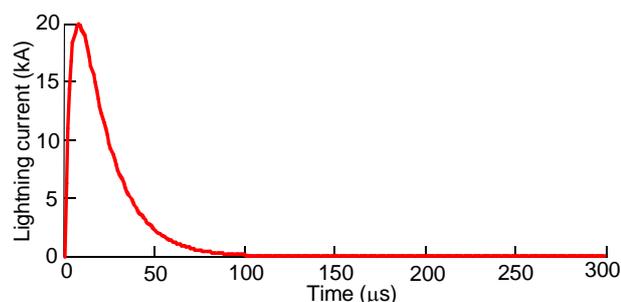


(b)建築物鋼筋架構搭接之等電位共同接地系統

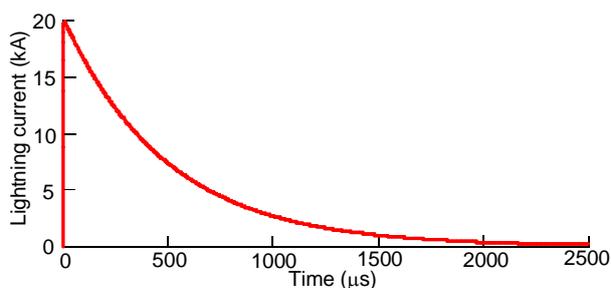
圖 3 建築物接地系統型式及相關尺寸示意圖

## 二、等電位共同接地系統

此系統之建立係參考 IEC 標準所建議之等電位接地方式，此架構並無使用避雷銅導線而另以建築物本身鋼筋結構作為下導體，如圖 3(b)所示。考量雷擊位置將影響建築物地面電位分佈，因此模擬時將雷擊突波電流分別經建築物屋頂左上角、中央及右下角等三處位置注入，以觀察大地電位升分佈情形。另外，圖 3(b)接地端系統係使用 IEC 標準建議之型式 A 與型式 B 等兩種，其中型式 A 垂直接地電極與型式 B 環狀接地電極皆經由接地引線與建築物本身金屬結構相連接。



(a)感應雷波前及波尾時間(8/20- $\mu$ s)波形



(b)直擊雷波前及波尾時間(10/350- $\mu$ s)波形

圖 4 雷擊突波電流為 20 kA 之感應雷及直擊雷波形

## 參、模型方法

本文所使用模擬程式係由加拿大 SES 公司開發之 CDEGS 軟體，其分析原理以電磁學理論為基礎，利用馬克斯威爾等電磁學方程式進行模擬求解，為一套功能強大軟體工具，用以精確分析電流分佈、電磁場、電磁干擾、接地及土壤結構等問題，此軟體套件主要功能包括：

- 一、土壤電阻率及土壤結構分析。
- 二、任意土壤結構、頻率及暫態下之接地分析。
- 三、架空線路及地下電纜導體結構參數計算。
- 四、正常負載、故障及暫態狀態之電流分佈分析。
- 五、電磁干擾分析及電磁場計算。
- 六、雷擊保護及暫態分析。

由上述介紹得知，該軟體套件功能相當強

## 三、雷擊突波電流

雷擊突波電流模擬時需考量之重點係為峰值之設定，因雷擊突波中最具破壞性之處莫過於其擁有峰值能量，由於雷擊係屬天然現象之一，要如何擇選適當值實為相當困難。因此，本文參考國內學者統計台灣歷年雷擊分佈特性，其中落雷強度累計以 20~30 kA 雷擊突波電流佔總落雷數之 28 % 為最多，且 IEC 標準中亦指出 20 kA 雷擊突波電流之落雷機率高達 80 %，據上述則假設模擬雷擊突波電流之峰值統為 20 kA。另雷擊突波之波前及波尾時間設定，亦參考 IEC 標準所述之感應雷 8/20- $\mu$ s 及直擊雷 10/350- $\mu$ s 時間參數，相關雷擊突波波形如圖 4 所示。

大，然於本文中僅使用接地、電流分佈、雷擊保護及暫態分析等功能以模擬頻域及時域兩方面接地系統特性，分述如下：

### 一、頻域方面

使用 IEC 標準所述之感應雷 8/20- $\mu$ s 時間參數且土壤電阻率為 200  $\Omega$ -m 時，模擬以下兩種不同狀況：

- (一) 固定雷擊突波電流注入點(建築物屋頂中央)，改變接地方式(單獨、型式 A 及型式 B) 並分別觀察於低頻 60 Hz 及高頻 1 MHz 時，接地方式之不同對大地電位升之影響。
- (二) 固定接地方式(型式 A)，改變雷擊突波電流注入點(建築物屋頂左上角及右下角)，亦觀

察於頻率 60 Hz 及 1 MHz 時，雷擊突波電流注入點之不同對大地電位升變化情形。

## 二、時域方面

時域模擬則依 IEC 標準所述之感應雷 8/20- $\mu$ s 及直擊雷 10/350- $\mu$ s 等兩種雷擊突波，並假設土壤電阻率分別為 200  $\Omega$ -m 及 1000  $\Omega$ -m 時，於同一雷擊突波電流注入點(建築物屋頂中央)，探討不同接地端系統(單獨、型式 A 及型式 B)對於疏散雷擊突波電流之能力。

## 肆、實例模擬

### 一、頻域方面

#### (一) 雷擊突波電流注入點於建築物屋頂中央且改變接地方式

使用 IEC 標準所述之感應雷 8/20- $\mu$ s 時間參數且土壤電阻率為 200  $\Omega$ -m 時，模擬三種接地方式(分別為單獨、型式 A 及型式 B)於低頻 60 Hz 及高頻 1 MHz 大地電位升分佈情形，其結果分別如圖 5~7 所示。由圖 5 得知，當雷擊突波電流為 20 kA 且頻率為 60 Hz 時，大地電位升高達 385.33 kV；而於高頻 1 MHz 時，大地電位升更高達 646.52 kV，故單獨接地系統限制雷擊突波電流疏

散管道，致使大量電流集中於一處地網內，進而產生大量地電位湧升，其影響程度將損壞設備及造成人員危害。

另採型式 A 接地端之等電位共同接地系統予以模擬，由圖 6 得知，因下導體數量增加與集膚效應影響，其雷擊突波電流主要分佈於四周柱子，因此每一柱子之電流將降低許多，建築物內各柱子之電流即降低 1/n(n 為柱子數，柱子越多則電流隨之減少)，分散後之電流透過建築物結構接地，使電流有相當好之疏散路徑，此時大樓內部各樓層形成等電位，可將電位差所造成傷害降至最低以減少大地電位湧升，因此於頻率 60 Hz 及 1 MHz 時，大地電位升最高值分別為 100.02 kV 及 250.80 kV，相較於單獨接地系統其值分別降低 285.31 kV 及 395.72 kV。改以型式 B 接地端之等電位共同接地系統，其頻率亦為 60 Hz 及 1MHz 時，大地電位升最高值分別為 88.80 kV 及 247.45 kV，如圖 7 所示，相較於單獨接地系統其值更可分別降低 296.53 kV 及 399.07 kV。由上述模擬結果得知，型式 B 接地方式之大地電位升分佈相較於單獨或型式 A 接地可獲得更佳之保護效果，此模擬結果亦驗證 IEC-62305-3 標準所推薦接地方式(型式 B 接地)<sup>[2]</sup>。

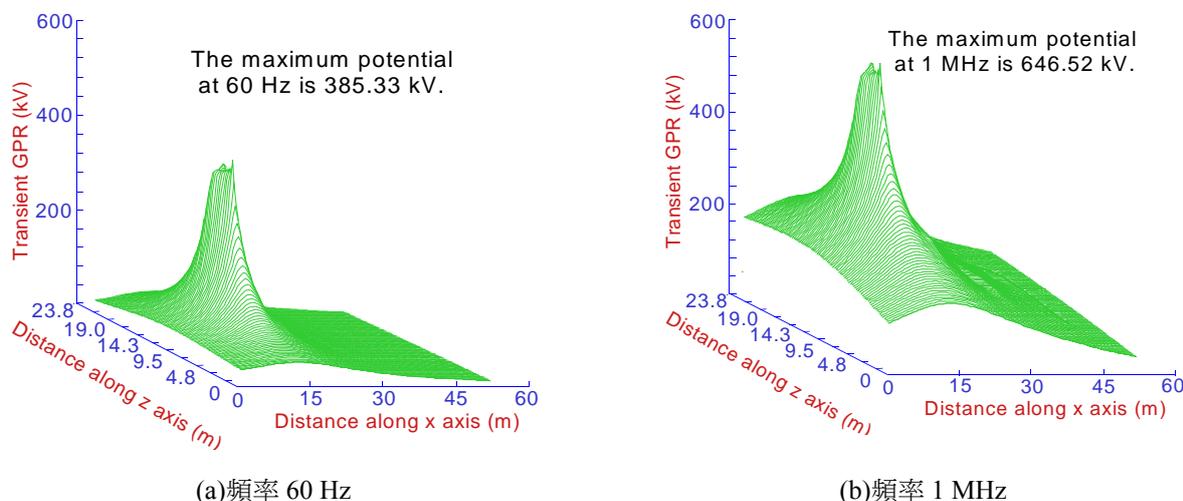


圖 5 單獨接地於 60 Hz 及 1 MHz 大地電位升分佈

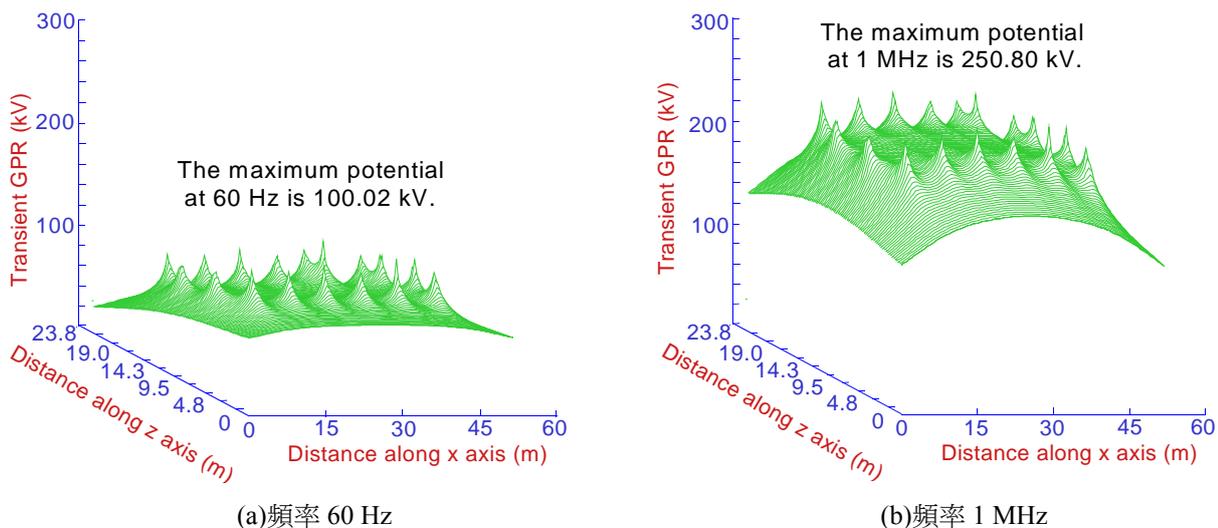


圖 6 型式 A 接地於 60 Hz 及 1 MHz 大地電位升分佈

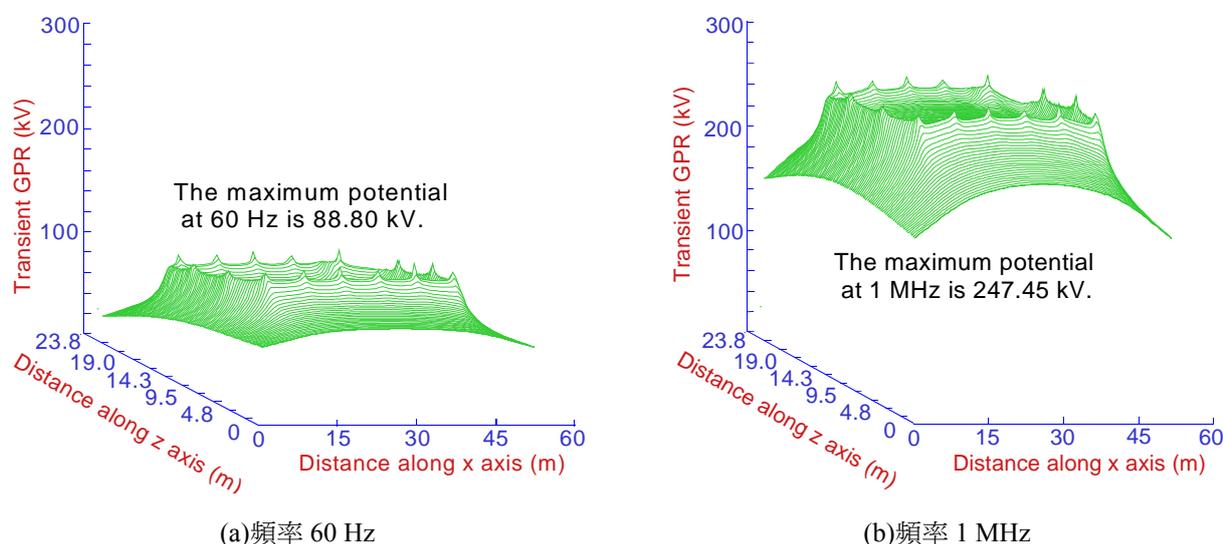


圖 7 型式 B 接地於 60 Hz 及 1 MHz 大地電位升分佈

表 1 不同接地方式大地電位升最高值之比較

接地方式	最高 GPR 值	
	60 Hz	1 MHz
單獨接地系統	385.33 kV	646.52 kV
型式 A 接地端 等電位共同接地系統	100.02 kV	250.80 kV
型式 B 接地端 等電位共同接地系統	88.80 kV	247.45 kV

表 1 所示為三種接地方式大地電位升最高值之比較，於相同接地系統下，高頻成分產生之大地電位升皆遠高於低頻，其主因為接地阻抗之存在，一般接地系統設計僅考量接地電阻之部分，這對於平常低頻電流而言是可被接受，但對於避

雷接地系統其主要功能是疏散具有高頻暫態成分雷擊突波電流，所以除需針對接地電阻要求外亦須另外考慮接地阻抗，避免發生雷擊時產生過高大地電位升。

(二) 固定接地方式(型式 A)且改變雷擊突波電流注入點

考量圖 6~7 等電位共同接地系統所呈現之大地電位升分佈相當相似，故在此僅選擇型式 A 接地端予以說明固定接地方式且改變雷擊突波電流注入點之模擬結果。由圖 8(a)、9(a)得知，由於低頻(60 Hz)低阻抗，無論雷擊突波電流注入點於建築物屋頂左上角或右下角，最後亦經由建築

物導體均勻分佈，其大地電位升模擬結果與圖 6(a)(即注入點於建築物屋頂中央)並無太大差異性，所以改變電流注入點位置相對於低頻條件下較無影響。

另由圖 8(b)、9(b)得知，於高頻 1 MHz 條件下，此時導體阻抗將增加致使大地電位升明顯上升，且呈現由雷擊突波電流注入端位置往反方向遞減，其模擬結果與文獻<sup>[7]</sup>述明雷擊突波電流注入位置之不同，將影響建築物內電流之分佈，且注入點方向之電流量為最多相符。值得注意的是由於注入點之不同將改變建築物內電流分佈，故

如使用此等電位共同接地系統時，建築物內設備裝設位置及實施屏蔽措施等亦須考量電流流經建築物金屬架構所產生之磁場，以預防對設備所造成之干擾及傷害。

表 2~3 分別為低頻 60 Hz 及高頻 1 MHz 時，雷擊突波電流注入點為建築物屋頂左上角之各樓層電流分佈情形，由該兩表得知電流量從接地棒編號 1~17 順序各樓層略呈現 U 型分佈，且編號 1 及 17 電流為最大值之主因係最靠近注入點位置，相關建築物各樓層與接地棒對應之編號如圖 10 所示。

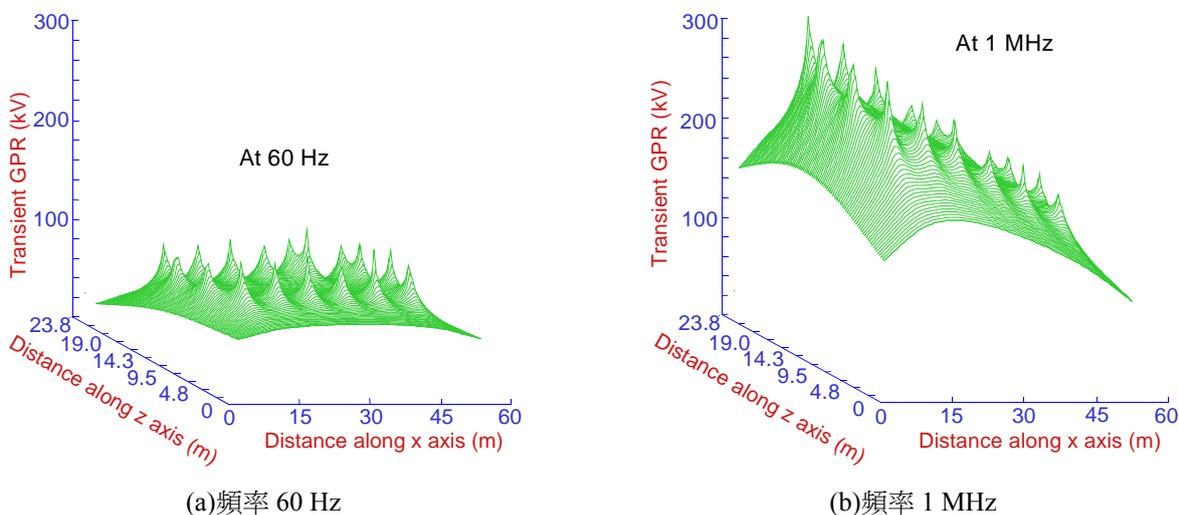


圖 8 型式 A 接地端且雷擊突波電流注入點為建築物屋頂左上角之大地電位升分佈

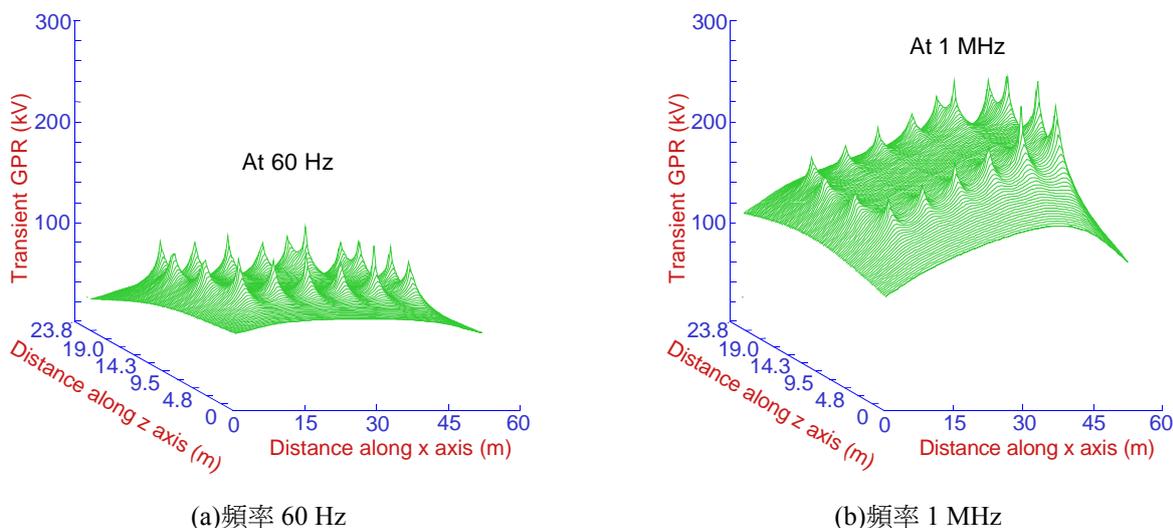


圖 9 型式 A 接地端且雷擊突波電流注入點為建築物屋頂右下角之大地電位升分佈

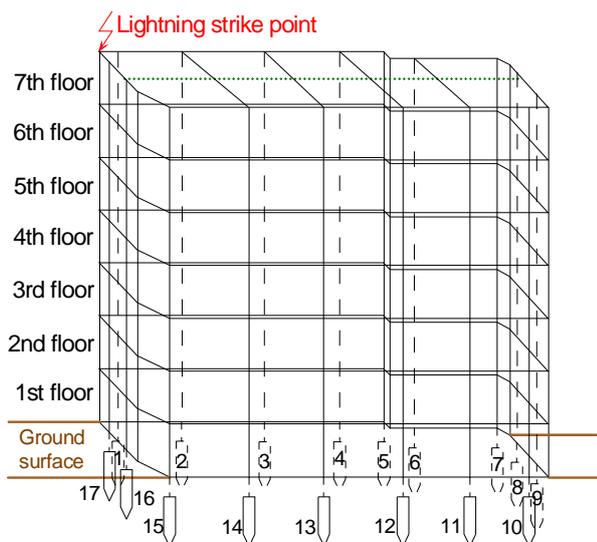


圖 10 建築物各樓層與接地棒編號示意圖

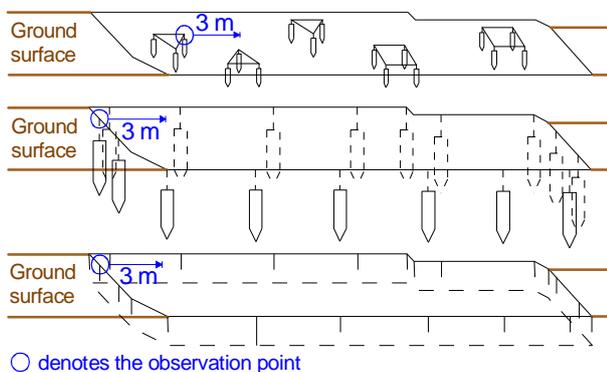


圖 11 不同接地方式各觀察點位置示意圖

表 2 低頻 60 Hz 建築物內各樓層電流之分佈

接地棒編號	各樓層電流分佈(A)							
	7F	6F	5F	4F	3F	2F	1F	地下室
1	2753.5	2259.0	1666.0	1279.6	1040.9	893.3	852.6	1022.1
2	738.4	950.3	943.6	879.8	817.7	787.5	851.0	1002.5
3	293.8	476.1	569.3	612.2	636.2	673.9	793.0	988.4
4	162.8	291.8	386.5	455.6	512.8	582.2	728.3	956.7
5	120.0	221.0	306.1	378.7	445.3	520.7	649.9	881.5
6	100.1	191.8	272.2	341.2	400.5	456.4	550.4	867.8
7	102.6	191.4	270.0	341.3	411.7	499.6	665.6	941.8
8	95.1	178.2	251.4	315.8	372.2	421.4	485.6	920.6
9	99.1	185.6	261.8	329.0	388.3	444.9	547.7	958.1
10	103.3	195.1	277.0	351.9	424.3	504.9	642.7	1009.4
11	113.8	213.6	300.2	376.2	449.8	542.4	719.9	988.8
12	139.4	257.5	352.8	428.9	496.2	579.1	744.0	987.0
13	189.0	339.9	447.7	520.2	573.4	636.0	777.2	993.7
14	277.6	477.5	595.7	654.0	681.1	712.4	819.8	1004.0
15	431.9	687.3	797.9	822.8	808.8	794.4	849.0	1022.2
16	602.4	848.3	904.6	879.4	822.9	755.4	708.7	999.9
17	1992.3	1798.8	1440.7	1172.0	985.3	855.8	815.5	999.9

表 3 高頻 1 MHz 建築物內各樓層電流之分佈

接地棒編號	各樓層電流分佈(A)							
	7F	6F	5F	4F	3F	2F	1F	地下室
1	2746.1	2491.6	2112.3	1874.3	1735.1	1663.4	1735.6	2278.9
2	941.9	1255.6	1332.6	1342.8	1342.9	1368.9	1509.2	1774.5
3	455.5	710.8	850.2	932.6	989.2	1049.1	1180.1	1371.7
4	294.6	476.2	592.3	673.9	736.3	797.3	907.1	1064.8
5	235.8	364.9	451.9	517.9	571.9	624.7	709.8	868.9
6	134.2	231.5	298.0	346.5	383.7	417.1	488.2	820.3
7	259.3	414.1	514.6	588.8	647.8	703.9	792.3	893.5
8	163.5	254.9	312.9	354.0	384.2	406.1	445.0	867.3
9	204.4	320.2	392.0	442.0	477.8	505.3	564.6	903.3
10	216.3	361.0	543.4	517.8	564.9	603.2	672.7	967.8
11	236.9	381.8	475.6	543.6	598.3	655.5	764.3	946.1
12	266.5	425.8	527.2	599.1	656.7	719.5	843.6	1048.0
13	337.0	537.4	660.2	742.5	805.4	874.7	1021.3	1272.3
14	466.6	739.0	894.8	990.2	1057.5	1131.8	1302.0	1606.0
15	769.2	1151.4	1355.3	1473.3	1549.0	1620.1	1771.6	2032.5
16	661.9	946.3	1064.8	1111.2	1130.7	1144.3	1227.2	2149.0
17	2039.2	2010.6	1821.6	1686.8	1602.8	1564.4	1662.7	2256.8

二、時域方面

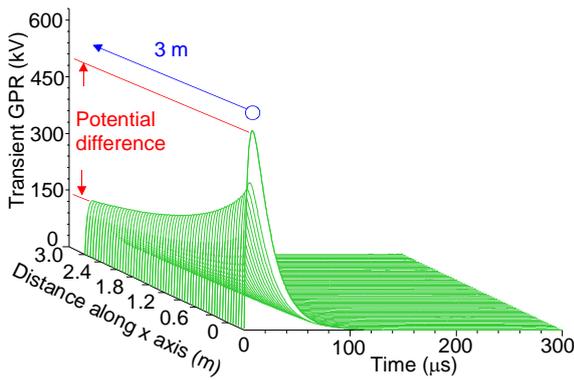
本節係依 IEC 標準所述之感應雷 8/20- $\mu$ s 及直擊雷 10/350- $\mu$ s 兩種雷擊突波，並假設土壤電阻率分別為 200  $\Omega$ -m 及 1000  $\Omega$ -m 等，於同一雷擊突波電流注入點(建築物屋頂中央)探討不同接地端系統(單獨、型式 A 及型式 B)對於疏散雷擊電流之能力，選定之觀察點如圖 11 所示，其觀察位置選擇於可能產生較高電位差之處，觀察方法沿箭頭所指方向 3 公尺處，每隔 5 公分為一觀察點，將電位、時間及距離三者間之變化以圖形表示，模擬結果如圖 12~23 所示。以單獨接地系統為例，由圖 12、15、18、21 得知無論何種雷擊突波於假設兩種土壤電阻率條件下，皆顯示出單靠一避雷接地系統仍不足以快速洩放雷擊突波電流，其產生之大地電位升將遠高於型式 A 及型式 B 接地端之等電位共同接地系統，如圖 13、16、19、22 及圖 14、17、20、23 所示。另由模擬結果得知，觀察到當雷擊突波傳導至地面時，大地電位升隨時間及距離之增加將逐漸趨於緩和，其中以等電位共同接地型式 B 接地端所產生之電位差為較小，故該型式之接地系統疏散雷擊突波電流能力最佳。注意：圖 11 中之單獨接地方式之觀察位置與型式 A 及型式 B 稍有差異，單

獨接地是在左邊之三角形接地網(原始設計是避雷針接地用)，而型式 A 及型式 B 則是分別在左邊之接地端與環狀接地電極，但觀察點皆是向右 3 公尺。

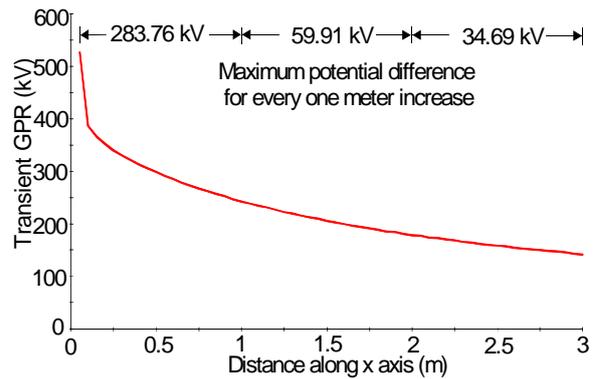
另外，再將圖 12~23 模擬結果以表格方式彙整兩種不同雷擊突波及土壤電阻率下產生之電位差，如表 4 所示。當土壤電阻率為 200 Ω-m 時，單獨接地系統產生之電位差皆高於 380 kV，另在土壤電阻率 1000 Ω-m 時電位差更高達至 1900 kV 以上，相較於等電位共同接地系統而言，於相同土壤電阻率 200 Ω-m 產生之電位差卻能有效限制於 100 kV 以下，而土壤電阻率 1000 Ω-m 時產生之電位差則能降至 500 kV 以下，由此三種接地方式比較得知以型式 B 接地端等電位共同

接地系統產生之電位差為最低。

表 5 所示為三種接地方式於不同雷擊突波及土壤電阻率之電壓降百分比，由表 5 得知，等電位共同接地型式 B 接地端為最低，若採單獨接地系統則各種設備、電纜線、訊號線、接地線等裝設位置，因離避雷接地導體之距離遠近不一，致使其遭受雷擊所產生磁場感應程度亦不同，而使各設備間造成極大電位差，再加上單獨接地系統之接地電阻相較於等電位共同接地還高，其大地電位升亦相對提高，此時電位差與大地電位升將造成設備損壞及產生人員危害，故建議使用建築物架構等電位共同接地並採型式 B 接地端將獲得較佳之保護效果。

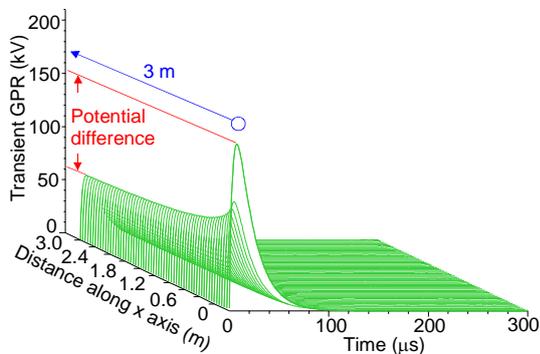


(a)大地電位升

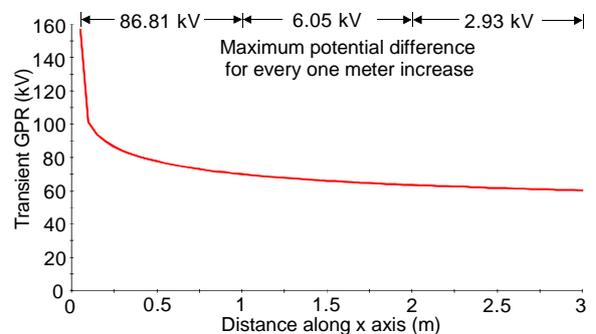


(b)每米間最大電位差

圖 12 單獨接地方式於雷擊突波感應雷 8/20-μs 且土壤電阻率 200 Ω-m 之大地電位升及最大電位差

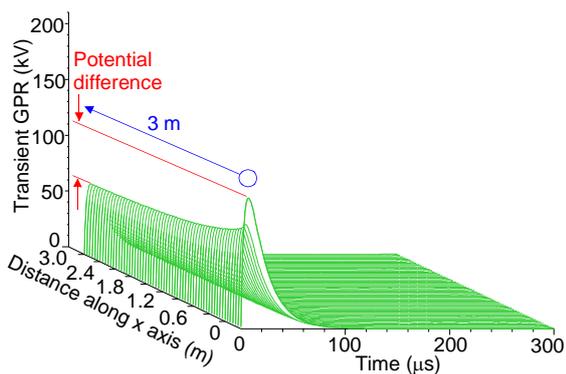


(a)大地電位升

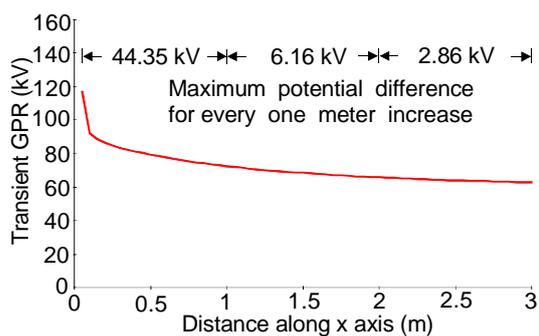


(b)每米間最大電位差

圖 13 型式 A 接地方式於雷擊突波感應雷 8/20-μs 且土壤電阻率 200 Ω-m 之大地電位升及最大電位差

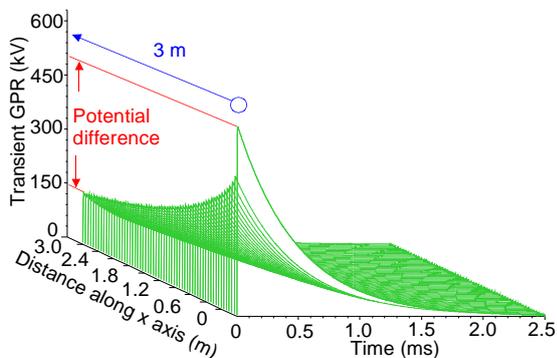


(a)大地電位升

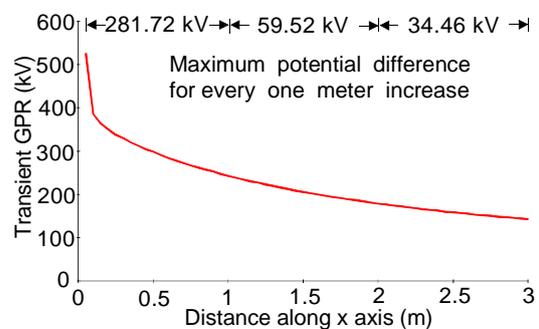


(b)每米間最大電位差

圖 14 型式 B 接地方式於雷擊突波感應雷 8/20- $\mu$ s 且土壤電阻率 200  $\Omega$ -m 之大地電位升及最大電位差

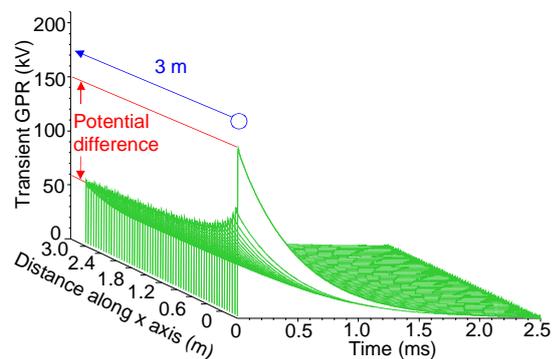


(a)大地電位升

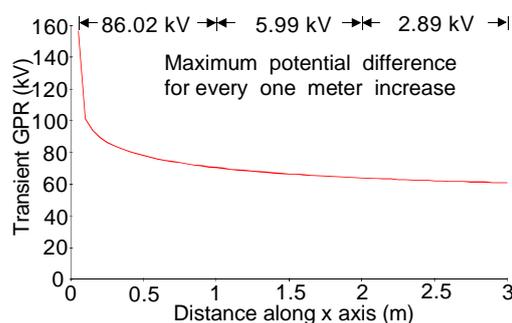


(b)每米間最大電位差

圖 15 單獨接地方式於雷擊突波感應雷 10/350- $\mu$ s 且土壤電阻率 200  $\Omega$ -m 之大地電位升及最大電位差

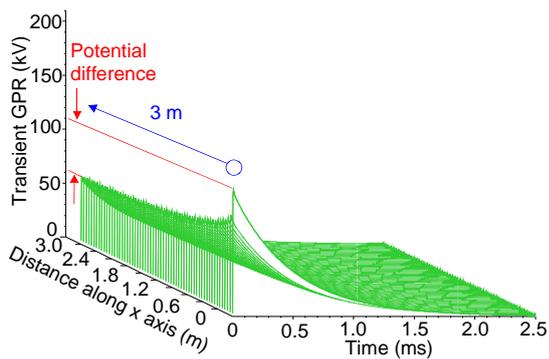


(a)大地電位升

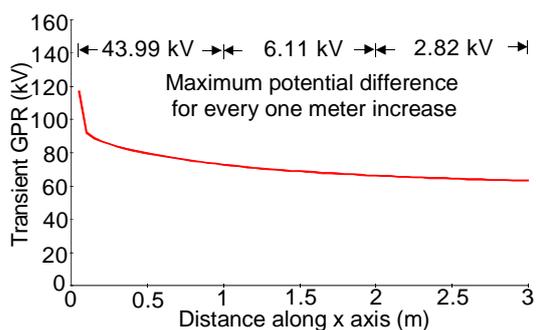


(b)每米間最大電位差

圖 16 型式 A 接地方式於雷擊突波感應雷 10/350- $\mu$ s 且土壤電阻率 200  $\Omega$ -m 之大地電位升及最大電位差

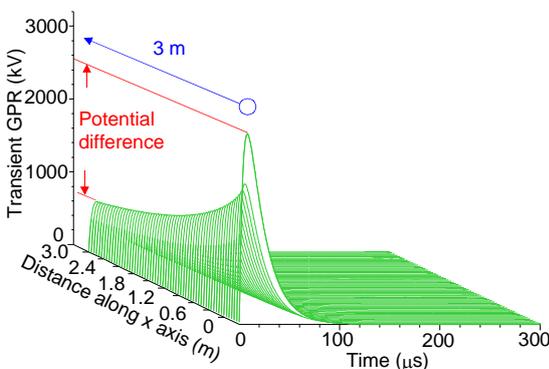


(a)大地電位升

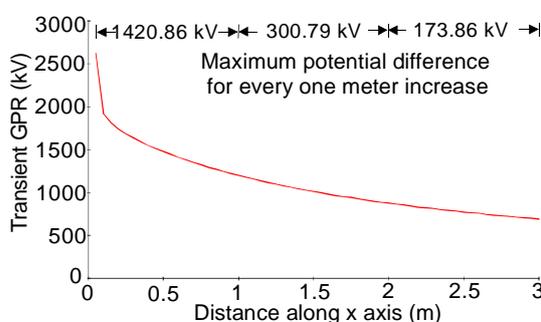


(b)每米間最大電位差

圖 17 型式 B 接地方式於雷擊突波感應雷 10/350- $\mu$ s 且土壤電阻率 200  $\Omega$ -m 之大地電位升及最大電位差

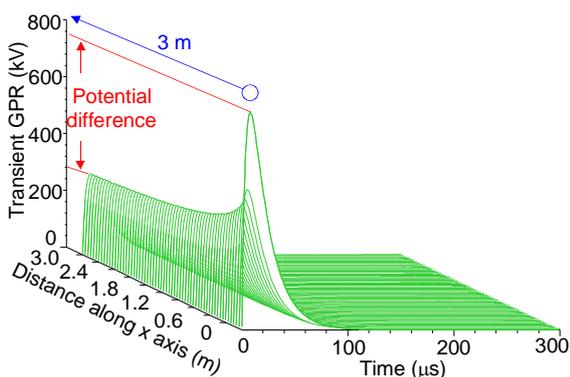


(a)大地電位升

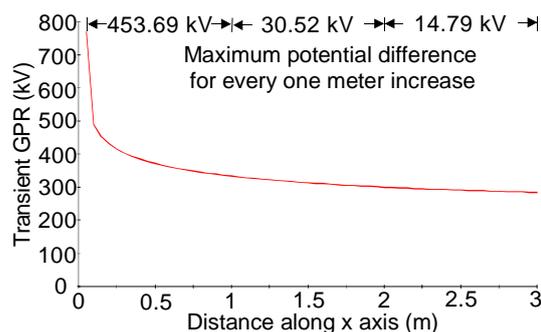


(b)每米間最大電位差

圖 18 單獨接地方式於雷擊突波感應雷 8/20- $\mu$ s 且土壤電阻率 1000  $\Omega$ -m 之大地電位升及最大電位差

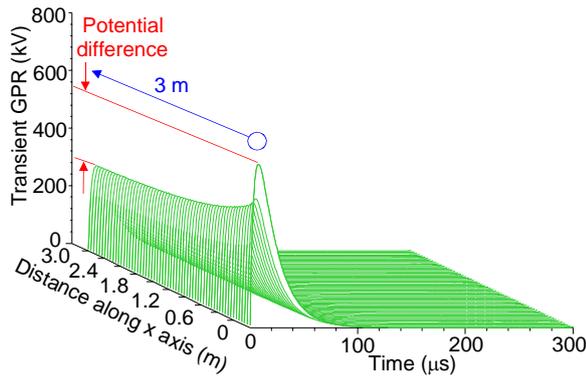


(a) 大地電位升

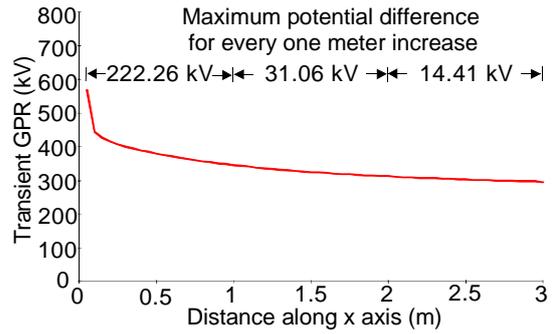


(b) 每米間最大電位差

圖 19 型式 A 接地方式於雷擊突波感應雷 8/20- $\mu$ s 且土壤電阻率 1000  $\Omega$ -m 之大地電位升及最大電位差

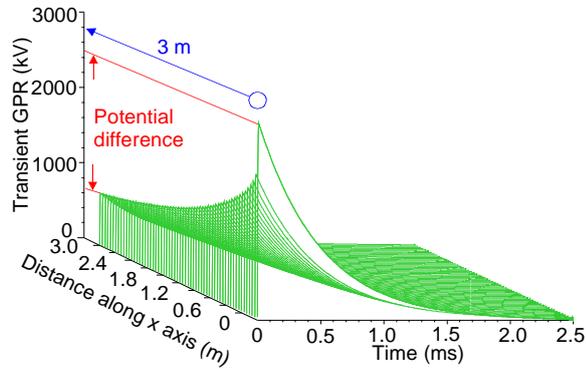


(a)大地電位升

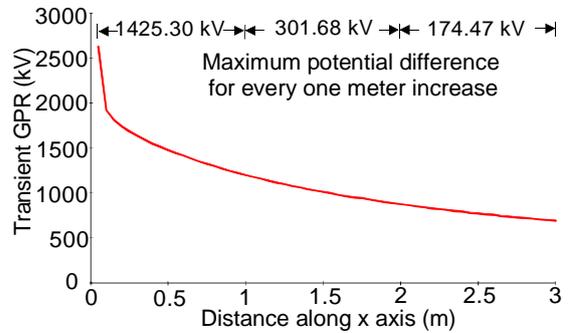


(b)每米間最大電位差

圖 20 型式 B 接地方式於雷擊突波感應雷 8/20- $\mu$ s 且土壤電阻率 1000  $\Omega$ -m 之大地電位升及最大電位差

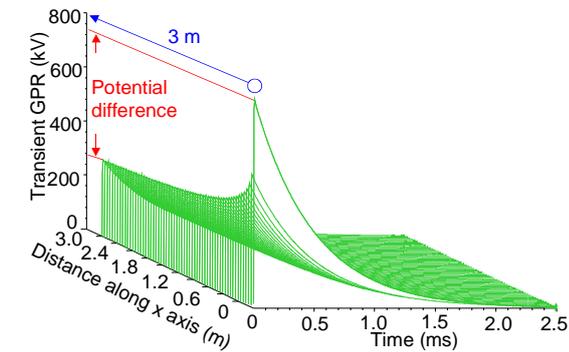


(a)大地電位升

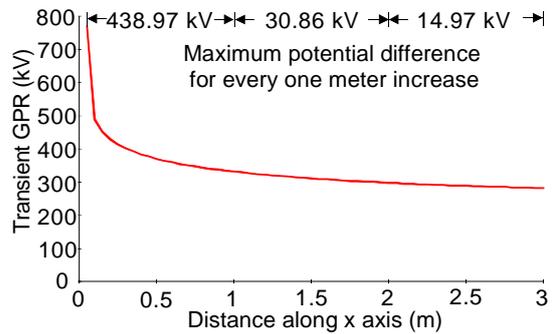


(b)每米間最大電位差

圖 21 單獨接地方式於雷擊突波感應雷 10/350- $\mu$ s 且土壤電阻 1000  $\Omega$ -m 之大地電位升及最大電位差

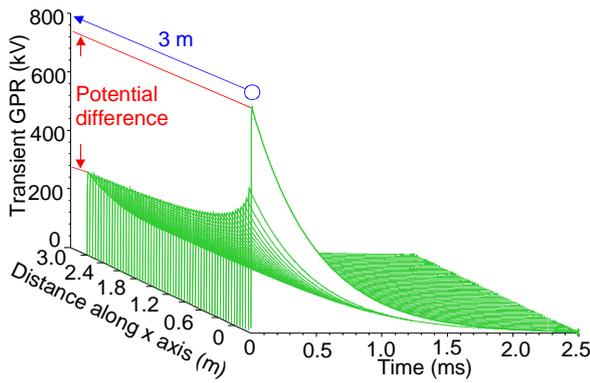


(a)大地電位升

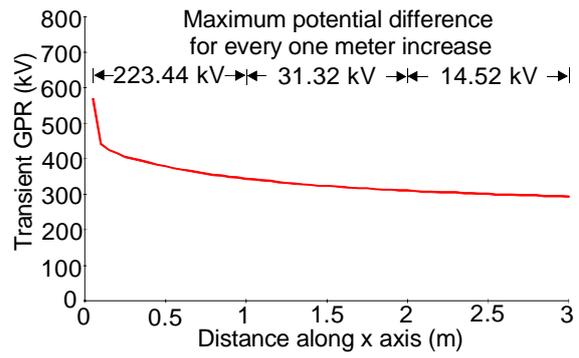


(b)每米間最大電位差

圖 22 型式 A 接地方式於雷擊突波感應雷 10/350- $\mu$ s 且土壤電阻 1000  $\Omega$ -m 之大地電位升及最大電位差



(a)大地電位升



(b)每米間最大電位差

圖 23 型式 B 接地方式於雷擊突波感應雷 10/350- $\mu$ s 且土壤電阻 1000  $\Omega$ -m 之大地電位升及最大電位差

一般人員所受到的感電事故主因肇於電位差，於高電壓下如何確保人員安全，故 IEEE Std. 80, 2000 版有規定人體 50 公斤及 70 公斤所能容許接觸電壓與步間電壓之計算<sup>[8]</sup>。以本文為例，假設大地土壤電阻率及地表層電阻率相同，以土壤電阻率 200  $\Omega$ -m 及 1000  $\Omega$ -m 進行計算，其人體 50 公斤及 70 公斤所能容許接觸電壓與步間電壓，如表 6 所示。對於電擊時間為 10  $\mu$ s 且土壤電阻率為 200  $\Omega$ -m 時，其人體 50 公斤及 70 公斤所能容許接觸電壓分別為 47.7 kV 及 64.5 kV，另相對於容許步間電壓分別為 80.7 kV 及 109.2 kV；此外，土壤電阻率為 1000  $\Omega$ -m 時，其人體 50 公斤及 70 公斤所能容許接觸電壓分別為 91.7 kV 及 124.1 kV，另相對於容許步間電壓分別為 256.8 kV 及 347.5 kV。另由表 6 得知，土壤電阻率愈高以及電擊時間愈短時，人體 50 公斤與 70 公斤之容許接觸電壓及步間電壓值將越高，意即人體所能承受電壓值亦愈高。

一般而言，雷擊突波電流動輒數千安培至數萬安培不等，加上高頻成份引起之電位升更是可觀，且雷擊突波無論於波前或波尾時間產生之大地電位升大部分皆遠高於人體所能容許之最高電壓值，所以遭受雷擊時造成人員傷亡與設備破壞時有所聞。一套良好避雷保護系統，除需有完善接地系統外，應於各防護區內加裝突波保護裝置以預防雷擊突波，並考慮等電位連接及共同接地

觀念，方能得到較低接地電阻值，相對其大地電位升亦較低，對於位處建築物內之設備及人員影響程度為最小。

表 4 不同接地方式於雷擊突波及土壤電阻率之大地電位升最大與最小值之差

雷擊突波	接地方式	大地電位升最大與最小值之差	
		土壤電阻率	
		200 $\Omega$ -m	1000 $\Omega$ -m
8/20- $\mu$ s	1	385.01 kV	1928.89 kV
	2	96.51 kV	484.57 kV
	3	54.08 kV	271.33 kV
10/350- $\mu$ s	1	382.29 kV	1934.86 kV
	2	95.60 kV	488.41 kV
	3	53.63 kV	272.91 kV

註：1：單獨接地系統；2：型式 A 接地端等電位共同接地系統；3：型式 B 接地端等電位共同接地系統

表 5 不同接地方式於雷擊突波及土壤電阻率之電壓降百分比

雷擊突波	接地方式	土壤電阻率					
		200 $\Omega$ -m			1000 $\Omega$ -m		
		0~1 m	1~2 m	2~3 m	0~1 m	1~2 m	2~3 m
8/20- $\mu$ s	1	53.84 %	25.07 %	19.63 %	54.23 %	25.55 %	20.10 %
	2	55.35 %	8.70 %	4.64 %	56.69 %	9.24 %	4.95 %
	3	37.97 %	8.57 %	4.35 %	39.17 %	9.06 %	4.64 %
10/350- $\mu$ s	1	53.68 %	24.93 %	19.47 %	54.29 %	25.61 %	20.17 %
	2	54.99 %	8.57 %	4.53 %	56.99 %	9.39 %	5.04 %
	3	37.65 %	8.45 %	4.27 %	39.41 %	9.18 %	4.71 %

註：1：單獨接地系統；2：型式 A 接地端等電位共同接地系統；3：型式 B 接地端等電位共同接地系統

表 6 高樓建築物接地對 IEEE Std. 80, 2000 版人體 50 公斤與 70 公斤之容許接觸電壓及步間電壓

電擊 時間 ( $\mu$ s)	土壤電阻率							
	200 $\Omega$ -m				1000 $\Omega$ -m			
	50 公斤人體		70 公斤人體		50 公斤人體		70 公斤人體	
容許 接觸 電壓 (kV)	容許 步間 電壓 (kV)	容許 接觸 電壓 (kV)	容許 步間 電壓 (kV)	容許 接觸 電壓 (kV)	容許 步間 電壓 (kV)	容許 接觸 電壓 (kV)	容許 步間 電壓 (kV)	
1	150.8	255.2	204.1	345.4	290.0	812.0	392.5	1099.0
10	47.7	80.7	64.5	109.2	91.7	256.8	124.1	347.5
100	15.1	25.5	20.4	34.5	29.0	81.2	39.3	109.9
1000	4.8	8.07	6.5	10.9	9.2	25.7	12.4	34.8

## 伍、結論

本文主要分析建築物不同接地方式並使用 CDEGS 軟體模擬頻域及時域等兩方面，以探討單獨接地及等電位共同接地系統於建築物遭受直接雷擊時之大地電位升，經由上述模擬結果可得到下列結論：

- 一、等電位共同接地並採型式 B 接地端系統於疏散雷擊突波電流方面，由於連接整體建築物鋼筋結構，使雷擊突波電流經由金屬架構分散至接地端系統，進而降低大量電流引起之大地電位升，有效達到等電位之成效並可減少電位差所造成之傷害。
- 二、單獨接地系統因接地面積之侷限，致使無法取得如共同接地般之低電阻特性，而使得雷擊發生時將產生大量大地電位升，並與附近地區形成高電位差，恐存有人員傷亡及設備破壞之疑慮。吾人建議倘使用單獨接地系統時，接地設施附近應設警告標語或作區域性隔離，以防人員接近而遭受傷害。
- 三、雷擊突波電流產生之大地電位升隨距離及時間增加逐漸趨於緩和。
- 四、避雷接地系統除須考量接地電阻外，亦須注意其接地阻抗之成份，預防高頻暫態條件下產生之大地電位升。
- 五、雷擊突波下產生之大地電位升，除應有良好接地裝置外亦須實施等電位連接，並於各防

護區內加裝突波保護裝置，以降低電位差所造成之傷害。

## 陸、參考文獻

- [1] IEC-62305-1 2006-01, "Protection against lightning -Part 1: General principles".
- [2] IEC-62305-3 2006-01, "Protection against lightning -Part 3: Physical damage to structures and life hazard".
- [3] IEC-61312-2 1999-08, "Protection against lightning electromagnetic impulse (LEMP) -Part 2: Shielding of structures, bonding inside structures and earthing".
- [4] IEC-60664-1 2002-06, "Insulation coordination for equipment within low-voltage systems -Part 1: Principles, requirements and tests".
- [5] IEC-61643-1 2005-03, "Low-voltage surge protective devices -Part 1: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems -Requirements and tests".
- [6] 內政部營建署，2014，建築技術規則建築設備編。
- [7] A. Sowa, 1991, "Surge current distribution in building during a direct lightning stroke," IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 103-105, 12-16, August.
- [8] ANSI / IEEE Std 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding," 2000.

# 輸電設備巡檢管理系統及地理圖資環域分析 系統之開發研究

Design and Implementation of Surveillance System and Geographic Information Buffer  
Analysis System for Transmission Facilities

林桐斌\*

Lin, Tung-Bin

蔡騰仕\*

Tsai, Teng-Shih

謝忠翰\*\*

Hsieh, Chung-Han

姚立德\*

Yao, Leeh-Ter

張榮吉\*\*\*

Chang, Rong-Chi

(102 年度委託研究計畫)

## 摘要

台灣電力公司輸電線路與設備遍佈全島，輸電設備的維護及檢查，對工程人員而言都是一項大工程，因此，在維護與管理上需要有一套完整的資訊管理系統，以提升輸電設備管理與維護的效益。台電供電處已於民國 102 年完成「輸電設備維護管理系統」之開發，各供電區營運處也已陸續將轄下之相關輸電設備建置於系統中，並將舊有之 TEMS 系統完成轉匯，以供各種相關資料之查詢及管理。本研究擬接續上述系統之原有功能之維護，並增加開發個人手持裝置平台之移動式巡檢系統，使巡檢作業流程更為便利，減少人工之傳輸運作，進而達成巡檢作業自動化之目的，提升維護與管理的效率。

此外，本研究亦開發環域分析功能，整合現有輸電鐵塔環評標準、災害地質圖、全台降雨量與地震震度，用以分析台電輸電系統受災狀況及作為日後採取改善措施及加強維護之根據。

## Abstract

The transmission lines of Taiwan Power Company (TPC) run across the entire island of Taiwan. The inspection and maintenance of transmission facilities is always a big challenge for the TPC's engineers. In order to improve the efficiency and effectiveness of transmission facility maintenance and management, a well-functioning information management system is in great demand. TPC completed the first stage development of Transmission Facility Maintenance and Management System (TFMMS) in 2013. Every district office of TPC's Power Supply Department started uploading database of transmission facilities within their controlled district into TFMMS and the data of the original TEMS has also been re-formatted and reloaded into TFMMS. In this project, a platform of hand-held mobile surveillance system will be developed in TFMMS to further improve surveillance efficiency. The mobile platform aims to achieve the goal of surveillance automation and greatly reduce human interference in

\*國立台北科技大學電機系

\*\*台灣電力公司綜合研究所

\*\*\*亞洲大學數位媒體設計學系

the data transmission process.

Moreover, a buffer analysis system for transmission line geographic information system (TLGIS) will be developed in this project. The TLGIS will be integrated with the environment impact assessment criteria for transmission tower, hazardous geological map, as well as rainfall and earthquake intensity in the entire Taiwan island to ensure the safety of TPC's transmission system after every natural disaster.

**關鍵詞(Key Words):** 智慧型電網(Smart Grid)、資產管理(Asset Management)、輸電設備(Transmission Facilities)、地理圖資系統(Geographic Information System)。

## 壹、前言

本研究主持人於民國 100 年 9 月至民國 102 年 2 月執行台電「輸電設備維護管理系統之研究」研究計畫，由計畫主持人為台電供電處設計一套「輸電設備維護管理系統」，並建置一套網路伺服器系統，將台電供電處六個供電區營運處之所有台帳設備及巡檢資料整合，供台電同仁查詢及上傳巡檢資料，並以此資料庫進行輸電設備維護排程及管理。此外，該計畫接收中央氣象局及地質調查所之 QPESUMS 雷達雨量、地震與災害地質資料，為全台各輸電鐵塔進行即時降雨量及芮氏震度分析，並結合地理資訊系統供台電同仁查詢各鐵塔附近之地質狀況，讓台電同仁做為參考並制定維護作業，進而降低重大事故發生，目前該系統已完成並提供各供電處之同仁普遍使用中。

在本研究中參考「輸電設備維護管理系統」之建置方式，依照供電處需求針對現有之地理資訊系統(Geographical Information System, GIS)開發環境分析功能，找出線路中弱點鐵塔，加強其巡檢及後續維護工作，以提高輸電線路設備供電之可靠度。其環境分析功能可分為下面兩點：

一、環境分析：結合供電單位現有塔基評鑑標準、內政部地質調查所提供之災害地質圖資，包括土石流、斷層、山崩潛勢等，分析鐵塔與各災害地質間之相互關係，例如：斷層範圍內之鐵塔名稱、鐵塔數量，或以鐵塔為中心，查詢其半徑內之斷層分布情形等，

並提供使用者統計分析功能，計算相關鐵塔數量，將相關鐵塔之分布情形顯示於圖資管理平台中，並讓使用者以圖查資方式快速了解此區域之鐵塔地質之狀況。

二、降雨量及地震分析：整合中央氣象局所提供之全台降雨量與芮氏地震震度資訊，統計分析各鐵塔所在位置之降雨情形及芮氏震度，同時結合企業級地理圖資管理系統顯示相關結果，使管理人員能夠分析受災狀況及作為採取改善措施及加強維護之依據。

另外當時建置之「輸電設備維護管理系統」系統已包含排程功能與巡檢功能。排程系統將原有 ACCESS 版本工作排程系統更改成 ASP.NET 版本，使區處人員可依照過去使用習慣以年計畫、月計畫之方式進行排程。而巡檢功能也將多數巡檢表格電子化，使傳統之紙本資料可輸入至伺服器中儲存，並且結合圖資系統可在地圖快速查詢鐵塔台帳與過去巡檢紀錄，讓人員進行管理作業。

原本輸電設備維護管理系統已有諸多功能可協助台電人員節省許多人力物力於各項輸電設備之查詢、統計、管理。但在巡檢排程功能中仍有兩個部份屬於可再加以改良以達到更高效益，其詳述如下：

一、雖將巡檢表格內容數位化，但在本期計畫之前巡檢系統只能由已連接至 Internet 之個人電腦進行輸入及上傳，而須巡檢之線路鐵塔大多位於無個人電腦及網路之地方。實際上

巡檢人員仍須攜帶巡檢表格紙本於現場紀錄後，再回到區處電腦輸入上傳至伺服器中，其實與傳統巡檢方式並無太大差別，還增加將紙本內容輸入到網頁巡檢功能中之動作，增加人員工作負擔。為改善此一問題，本期計畫中將開發行動巡檢輔助系統 (Mobile Surveillance Assistant System)，該系統以 Android 平台開發，並於智慧型手機或平板電腦上使用。該系統開發目的為將過去紙本表格確實轉換為電子表格，讓巡檢人員可在現場以手持式裝置上輸入巡檢結果，完全取代紙本手寫，最後再帶回區處直接上傳到資料庫中，省下將紙本內容填入到網頁之時間。並可下載離線版鐵塔台帳資料、過去巡檢紀錄、巡檢表格等內容，讓使用者可在現場巡檢同時查詢該鐵塔相關資料，掌握鐵塔最近維護情形。

二、巡檢功能與排程功能間並無連動機制，意即為當巡檢人員從排程功能中建立一筆鐵塔巡檢工作排程後，當巡檢人員輸入該鐵塔巡檢紀錄時，排程功能並不會跟著更新，使用者必須在巡檢功能輸入巡檢時間後再到排程功能輸入排程完成日期。因此當須巡檢之鐵塔項目眾多使人員在巡檢及排程功能兩邊輸入不一致時，就無法從排程功能中確實掌握巡檢實際完成情形，甚至造成鐵塔重複巡檢。這些問題皆是造成排程功能讓巡檢人員認為操作繁瑣及增加工作量之原因。為改善這個缺點本研究將變更整個排程與巡檢機制，將整個巡檢流程移至在排程功能之中，讓使用者從排程功能之中去執行該日一整天之巡檢作業，使兩個功能加以整合。

## 貳、文獻探討

台灣電力公司輸電線路設備種類繁雜，並且在維護管理時，必須耗費大量的人力及物力，因此輸電線設備維護管理系統之建立顯得相當重

要。文獻<sup>[1]-[4]</sup>提出輸電線路設備之相關管理方法，藉由此方法可歸類出一個可靠的管理系統基本需要下列四個因素：

- 一、確保系統之運作正常。
- 二、必須找出設備故障可能發生的原因。
- 三、優先處理重要的故障設備。
- 四、必須找出有效的防護辦法，並確保其方法之可行性。

然而輸電系統的維護，是確保輸電系統能穩定運作之關鍵因素，因此輸電設備的維護管理必須藉由一個合理且有效的防護法則來進行運作，其步驟如下：

- 一、持續性的巡視空中與地面之狀況，防止設備遭受侵蝕與植被入侵。
- 二、將巡視空中與地面之間隔進行最佳化。
- 三、定期測定系統區域之氣候環境。
- 四、利用全球衛星導航系統 (Global Positioning System, GPS) 測定設備相關位置並結合 GIS，以監測植被生長、土壤侵蝕等影響輸電設備之重要因素。

利用 SCADA 進行輸電線路之監測與控制也是國外輸電系統之發展方向，文獻<sup>[5]-[7]</sup>為設計一套可作用於鐵塔間之 SCADA 架構以及說明如何以合理之公式估計訊號傳輸間可能產生之誤差並加以修正。在<sup>[8]</sup>中為藉由 SCADA 所回傳之電力系統資料以分類樹法 (Classification Trees) 分析後，預測其可能出現之電力不穩定情況。

近年來，地理資訊系統已經廣泛應用於不同領域，包含地理學、量測學、製圖學、遙感探測、衛星定位系統、資訊系統、資料庫等，而文獻<sup>[9]</sup>為葡萄牙所建置之雷擊定位系統 (Lightning Location System, LLS) 搜集國內落雷資料並應用於圖資系統之中，藉此分析葡萄牙之落雷分佈情況及活動特徵，以利進行預防與監測，達到降低閃絡所造成之重大災害。為了有效的將地理資訊系統與各相關領域整合，已有許多相關應用之研究，如：透過 GIS 應用，可供旅客即時查詢地圖資訊與相關資訊分享，並建立線上旅客中心平

台，供旅客瞭解相關旅遊景點<sup>[10]-[13]</sup>。文獻<sup>[14]-[17]</sup>提出一個將高速鐵路管理系統建立於 Google Map 平台，並將巡視結果建制於 Google Map 上，規劃出警戒範圍，進而確保高速鐵路的運作安全。藉由上述之應用，可有效的將管理系統與 GIS 系統整合，供維護人員迅速且正確的找到維護地點，使管理者在排程維護工作上更有彈性。

輸電線系統是電力系統中最重要之樞紐，然而因地域環境的不同，使巡檢、維護及管理的工作十分複雜。每當天災發生時，由於無法得知即時之災情與掌握發生事故的區域，使管理人員無法有效的指派搶修任務。近年來地理資訊系統的發達與功能的提昇，各國紛紛將地理資訊系統與輸電線管理系統結合，文獻<sup>[17]-[18]</sup>透過相關資訊與設備數位化之整合，並結合空載雷達(Airborne Radar)技術與電網即時監控系統(Real-time Monitoring System for Power Grid, RTMSPG)，提供高精度度與高效率的量測，將輸入之資訊進行即時分析、顯示、儲存，並將資料建置成三維圖資，以偵測設備與周遭環境之變動<sup>[19]-[21]</sup>。透過 GIS 系統之整合，當災情發生時，亦可提供分析災害影響範圍，供第一線工作人員清楚獲得災害影響之相關資訊，掌握事故處理的時效。

## 參、地理圖資系統

### 一、環域分析功能

在地圖資訊系統中，環域分析為空間分析技



圖 1 環域分析應用於道路搜尋之示意圖

術中的重要功能之一，其主要目的為分析某一地理環境對其周圍地物的影響度，如：土石流區域對鐵塔的影響，並找出其影響範圍及應用範圍，目前環域分析技術已廣泛應用於道路、河流、環境污染源、居民點、輻射源等空間分析中，如圖 1 所示。

本研究結合目前各供電區營運處之塔基環評標準、內政部地質調查所提供之災害地質圖資，如：土石流、山崩潛勢、斷層等，分析鐵塔與各災害地質間之相互關係，並提供台電人員統計分析功能，計算相關鐵塔數量，將其分布情形顯示於圖資管理系統中，使台電人員快速了解該區域之鐵塔區域之地質狀況。

### (一) 鐵塔地形分析

本研究配合各供電區營運處之台電人員需求，結合內政部地質調查所提供之災害地質圖資，為全台灣之架空線路與鐵塔進行區域分析，使台電人員快速進行判斷，並即時對處於危險地質的輸電設備進行維護，或研判處理方式，使災害發生的機率降至最低。

圖 2 為以線路查詢各種災害地質之鐵塔地形分析畫面，此功能提供台電人員查詢欲查詢之線路或是該線路轄下的單一鐵塔，並點選欲查詢的警戒範圍，勾選欲查詢的災害地質，系統則會進入演算流程，自動計算出與該線路或是鐵塔在警戒範圍內的災害地質，最後將相關資訊呈現於地圖上。



圖 2 輸電線路進行鐵塔地形分析之畫面

(二) 區域統計功能

本研究將地理圖資資料庫與台電台帳資料庫進行整合，開發此區域統計功能，並運用 Google 地球企業版(Google Earth Enterprise, GEE)之應用程式介面(Application Programming Interface, API)功能，提供使用者於地圖上直接框選出想要查詢之台帳資料，系統將會自行運算出符合查詢條件之台帳資訊並顯示於地圖上，如圖 3 所示。另外亦將所有查詢之台帳資料匯出至 Excel 表單中讓使用者下載，如圖 4 所示。



圖 3 於地圖上顯示符合查詢條件之台帳資訊

	A	B	C	D	E	F	G
1	線路名稱	塔號	經度	緯度	電壓等級	線路代號	
2	核一~汐止白線	006	121.58794	25.26792	345	470E001	
3	核一~汐止白線	007	121.58856	25.26569	345	470E001	
4	核一~汐止白線	008	121.58931	25.26304	345	470E001	
5	核一~汐止白線	009	121.5899	25.2609	345	470E001	
6	核一~汐止白線	010	121.5907	25.25799	345	470E001	
7	核一~汐止白線	011	121.59127	25.25588	345	470E001	
8	核一~汐止白線	012	121.5928	25.25226	345	470E001	
9	核一~汐止白線	013	121.59368	25.25016	345	470E001	
10	核一~汐止白線	014	121.59454	25.2481	345	470E001	
11	核一~汐止白線	015	121.59586	25.24494	345	470E001	
12	核一~汐止白線	016	121.59671	25.24291	345	470E001	
13	核一~汐止白線	017	121.59755	25.24087	345	470E001	
14	核一~汐止白線	018	121.5988	25.23791	345	470E001	
15	核一~汐止白線	019	121.5998	25.23554	345	470E001	
16	核一~汐止白線	020	121.60126	25.23206	345	470E001	
17	核一~汐止白線	021	121.6018	25.23025	345	470E001	
18	核一~汐止白線	022	121.60362	25.22413	345	470E001	
19	核一~汐止白線	023	121.60383	25.22332	345	470E001	
20	核一~汐止白線	024	121.60491	25.21916	345	470E001	

圖 4 查詢之台帳資料匯出至 excel 表單

二、雨量監測功能

本研究長期與中央氣象局合作，整合多重觀測資料並結合地理資訊發展劇烈天氣監測系統 (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor, QPESUMS)，提供即時性劇烈天氣監測資訊以及過去 72 小時內高解析度之定量降水估計進行初步雨量分析，並以輸電鐵塔所在位置為研究區域，整合地面雨量站及 QPESUMS 系統，分別對 345kV、161kV 和 69kV 之輸電鐵塔進行災害評估分析，以做為維護人員之參考，進而降低災害發生之風險及降低災害之損失。

目前中央氣象局的QPESUMS系統網格範圍介於北緯 20°~27°，東經 118°~123.5°，其南北方向共有 561 個網格；東西方向共有 441 個網格，每個網格空間解析度為 1.25km × 1.25km，時間解析度為 10 分鐘。本研究團隊與中央氣象局進行資料介接，開發出完整之雨量監測警戒系統，為輸電設備進行雨量監測，並分析其災害評估，提供維護人員在最短時間內到達現場進行災害搶修及維護。

圖 5 為進行雨量資訊查詢後之結果顯示畫面，在雨量資訊查詢表單裡選擇某個單位在某一天或某一個月份，將所需資訊點選完畢後，即可查詢目前超過警戒降雨量之所有輸電線路，其中降雨量共分為五種累積方式，分別為一小時累積雨量、當前 24 小時累積雨量、最大 24 小時累積雨量、前 30 天累積雨量和月累積雨量，其中點選最大 24 小時累積雨量時，則可顯示每小時往前推算 24 小時累積雨量統計圖，由於雨量為每小時更新一次，因此該統計圖亦將每小時更動一次，並在圖上顯示 24 個小時之往前推算 24 小時累積降雨量，如圖 6 所示。



圖 5 進行雨量資料查詢後之結果顯示畫面



圖 6 每日 24 小時累積雨量統計分析圖

本系統亦提供每個輸電鐵塔的鄰近雨量站之雨量資訊做為維護人員的參考依據，由於輸電鐵塔長年暴露在外，本系統依據台電輸電設備維護標準做為警戒門檻值，如：日雨量 200 毫米 (mm)、月雨量 800 毫米(mm)。若有鐵塔降雨量超過警戒標準，則系統將會自動發佈警戒，並將目前警戒之線路段標記並整理歸納，提供維護人員在最短時間內查看該線路段及超過標準之輸電鐵塔，使人員能夠第一時間趕到現場進行維護及搶修，如圖 7 所示。本系統整合 GIS 圖資管理系統，供使用人員點選欲查詢之該塔號後，即可於 GIS 地圖上顯示目前警戒鐵塔的所在位置。



圖 7 系統自動發佈之氣象警戒資訊

### 三、地震監測功能

本研究長期與中央氣象局之地震中心合作，將所有地震測站第一時間所觀察到地震的地面尖峰加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)值回傳至控制中心進行計算整理，最後再以最短時間發佈到各個政府機關及研究單位，使相關單位進行搶修。本系統利用中央氣象局之強地動觀測站進行觀測，並利用內插法計算鄰近區域之 PGA 值，接著與鄰近測站之資訊修正 PGA 值，再經由演算法計算後，可精確計算出位於輸電鐵塔所在位置之目前 PGA 值並對照出其芮氏震度，再以台電所規定之最大警戒震度做為系統判斷警戒之標準門檻值，若有超過標準之輸電鐵塔，系統則會發出警戒訊息，提醒維護人員須到超標鐵塔所在位置進行維護及搶修。

本系統開發之地震監測警戒系統如圖所示，使用者將所需資訊點選完畢後，即可查詢該線路段旗下超過警戒震度之所有輸電鐵塔；由於輸電鐵塔長年暴露在外，本系統依據台電輸電設備維護標準做為警戒門檻值，如：地震警戒值為 5 級震度，若有鐵塔震度超過警戒標準，則系統將會自動發佈警戒，並將目前警戒之線路段標記並整理歸納，提供維護人員在最短時間內查看該

線路段及超過標準之輸電鐵塔，使人員能夠第一時間趕到現場進行維護及搶修。



圖 8 地震監測警戒系統之結果畫面

## 肆、行動巡檢輔助系統

### 一、系統架構

本研究為使巡檢人員於現場也能夠使用輸電設備維護管理系統之巡檢功能，因此開發行動巡檢輔助系統 (Mobile Surveillance Assistant System)，該系統以 Android 平台開發，並於智慧型手機或平板電腦上使用，其主要功能包含：

- (一) 巡檢系統功能：依據原系統之巡檢標準作業程序制定作業項目，進行相關巡檢作業，並且提供伺服器、個人電腦與手持裝置間之資料傳輸機制(含登入/下載認證、權限帳密)，使用者可用該裝置自動從伺服器下載巡檢表格、過去巡檢紀錄、台帳資料，以利巡檢人員清楚了解地形地物，迅速完成相關查報紀錄。
- (二) 資料紀錄功能：APP 軟體具設備資料登載、現場環境拍照能力。
- (三) 資料上傳功能：提供上傳機制，使用者可將巡檢所得之各項資料及現場紀錄亦透過資料傳輸功能傳輸至伺服器，並更新相關資料庫。

如圖 9 所示，行動巡檢輔助系統可分成伺服器系統與行動紀錄器系統兩部分。伺服器系統包含伺服器同步模組，行動紀錄器系統包含資料處理模組、巡檢輸入模組、紀錄查詢模組以及台帳查詢模組 4 個模組，其功能詳述如下：

- (一) 伺服器同步模組：主要為控制伺服器資料庫內部之儲存、排序等，且資料之下載與上傳需經過此模組之控管，以維護伺服器資料庫之安全性。
- (二) 資料處理模組：本系統之最主要模組，可管控於其下面所連結之資料相關模組，並將資料傳送至所需之動作模組，且所有資訊之判斷皆由此控制。
- (三) 巡檢輸入模組：此模組主要控管行動紀錄器資料庫之巡檢資料輸入，所有巡檢資料皆經由此模組儲存於行動紀錄器中之資料庫。此外，有關巡檢表格之讀取與顯示也由該模組負責處理。
- (四) 紀錄管理模組：負責管理行動紀錄器資料庫內之已輸入或過去巡檢紀錄，包含查詢、修改、刪除功能。
- (五) 台帳查詢模組：提供行動紀錄器資料庫內部台帳資料之查詢功能。

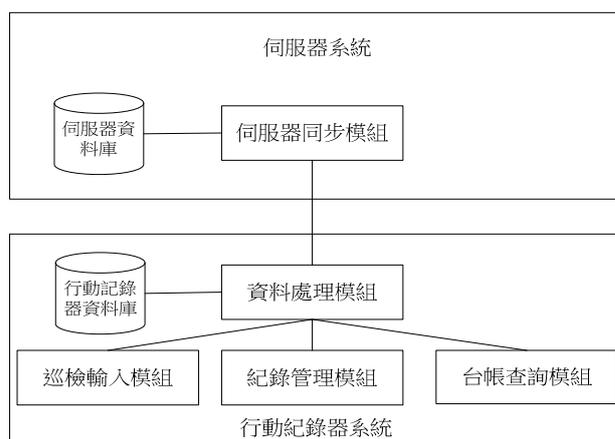


圖 9 行動巡檢輔助系統規劃圖

### 二、行動紀錄器巡檢流程規劃

台電人員在每次巡檢作業開始時，先以個人電腦下載該巡檢作業最新之鐵塔台帳、表格等資

料。巡檢人員輸入自己帳號、密碼登入行動記錄器巡檢程式後，便可開始巡檢作業。

當巡檢人員到達現場之後，即可以行動記錄器查詢該鐵塔之台帳、過去巡檢紀錄等資訊，並開啟對應之巡檢表格，行動記錄器會顯示巡檢表格內之巡檢項目，讓人員根據此表進行巡檢作業。當巡檢工作結束後，人員將行動記錄器帶回維護課同樣以個人電腦進行資料上傳，同步程式會自動將把巡檢結果傳回伺服器。其工作流程如圖 10 所示：

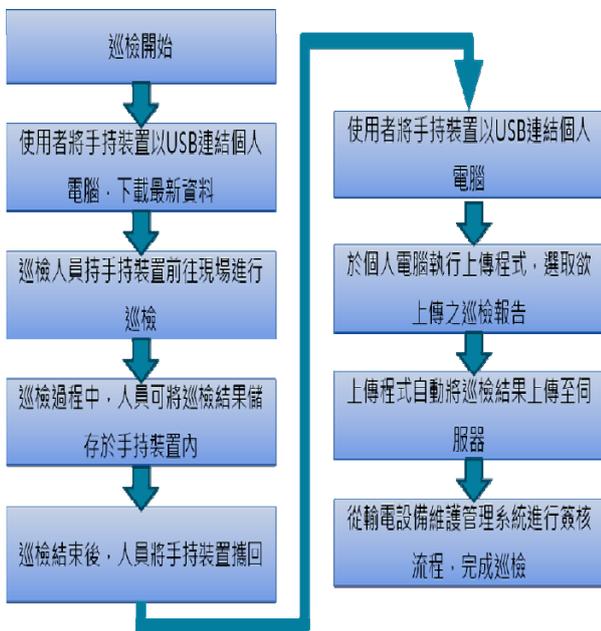


圖 10 巡檢流程圖

### 三、下載同步功能

本巡檢系統資料庫採用一表一塔的方式，代表一張巡檢表同時只會紀錄一隻鐵塔之巡檢結果，改善傳統紙本巡檢表不易查詢特定鐵塔巡檢紀錄之問題。在開始巡檢之前，人員需先以個人電腦登入輸電設備維護管理系統同步程式。同步程式下載畫面如圖 11 所示，系統會顯示該工作需要執行之線路鐵塔及表格資訊，使用者勾選欲下載項目後，系統會自動下載選擇之巡檢表格、台帳、過去巡檢紀錄於行動記錄器資料庫內。

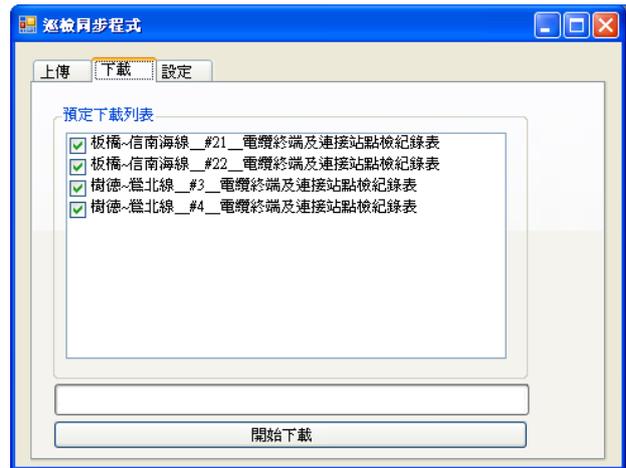


圖 11 巡檢同步程式下載功能畫面

### 四、巡檢輸入功能

圖 12 為巡檢輸入介面，巡檢人員以同步程式下載巡檢資料後，行動記錄器會在該界面中顯示所下載之鐵塔與表格讓使用者選擇。使用者直接從巡檢作業選項中選取欲輸入之巡檢表格、日期和天氣資訊後便可開始巡檢。巡檢項目預設正常功能可讓巡檢人員決定是否開啟，勾選後該巡檢表項目都會預設為無異常，如圖 13 所示，巡檢人員在選擇有異常之項目輸入異常狀況即可，若無異常則可直接結束巡檢，節省人員填寫時間。而當有異常狀況發生時，使用者可在下方備註欄位填入異常內容。

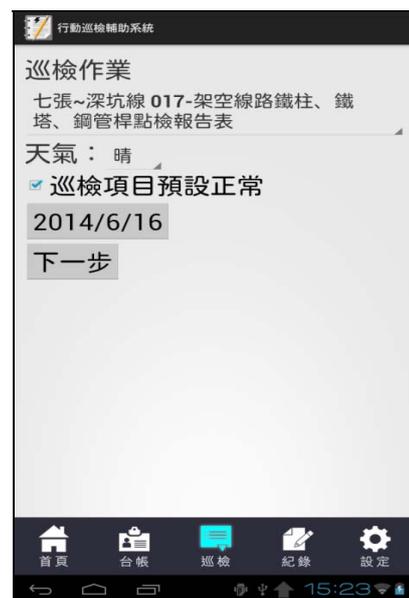


圖 12 巡檢輸入功能畫面(一)

巡檢表格項目分成大項和小項，一個大項內包含多個小項，例如在基礎這個大項中就有包含排水設施、接地線、既設保護設施等小項。而大多數項目皆以點選方式選取，例如圖中有異常、無異狀、無此項目三個選項，使用者按下選項後便可完成該項目巡檢。

系統也會依據巡檢表格項目內容改變輸入格式，如圖 14 所示，當該項目為輸入數值之項目時，系統會顯示數值填寫空格。右上角也提供儲存、拍攝功能，讓使用者可在巡檢過程中隨時儲存及拍照。

總體而言，在巡檢項目預設正常之狀況下，使用者只需在有異常之項目輸入異常狀況後儲存；而無異常之鐵塔則直接儲存後完成巡檢即可，並不須複雜之操作，因此在欲巡檢鐵塔眾多之狀況下，仍可以在不增加巡檢人員工作量快速完成巡檢。

### 五、巡檢紀錄查詢功能

從圖 14 下方之紀錄按鍵可開啟巡檢紀錄查詢功能，在該功能中可查詢已儲存在行動裝置內之巡檢紀錄，畫面如圖 15 所示。以條列式顯示已儲存之巡檢紀錄與巡檢時間，點擊後會出現新增、修改、刪除三個選項。點選刪除會出現確認視窗，點選確認後該筆巡檢已輸入之紀錄皆會刪除，使用者可在輸入巡檢功能中重新輸入。點選修改後則會進入修改紀錄界面，其功能與畫面與輸入巡檢功能之圖 13 相同。

在從伺服器下載時，系統也會檢查資料庫是否有該鐵塔過去相同之巡檢作業，並將最近一筆巡檢紀錄下載至行動紀錄器中。按下查詢過去巡檢紀錄或查詢按鍵後則會出現如圖 16 之畫面，系統同樣以條列之方式顯示該筆巡檢紀錄之內容，若有異常之項目則會以紅色字體來表示，若有拍攝照片則右上角也有相簿功能開啟屬於該筆紀錄之巡檢照片。

### 六、台帳查詢功能

執行下載時會一併將巡檢之鐵塔台帳資料下載至行動紀錄器資料庫中。為使人員能夠簡易操作，其台帳查詢功能畫面與巡檢紀錄功能畫面圖 15 相似，點選鐵塔後會出現如圖 17 所示之畫面，將台帳中每一項目以條列方式顯示，使巡檢人員即使在無網路之環境中同樣能透過行動紀錄器查詢台帳。



圖 13 巡檢輸入功能畫面(二)



圖 14 巡檢輸入功能畫面(三)



圖 15 巡檢紀錄查詢功能(一)



圖 16 巡檢紀錄查詢功能(二)



圖 17 台帳查詢功能

## 七、同步上傳功能

當巡檢結束後，與同步下載功能同樣由變電設備維護管理系統中開啟同步上傳功能。其畫面如圖 18 所示，當行動紀錄器與個人電腦連接時系統會借由 Mini-USB 檢查檢查行動紀錄器資料庫內是否有巡檢工作已經完成之紀錄並顯示於畫面中。使用者可以自由勾選欲上傳之項目上傳至資料庫中，完成整個巡檢作業流程。



圖 18 同步上傳功能

## 伍、工作排程系統

### 一、系統流程

原本之工作排程系統可分成工作樣本、年計畫排程、月計畫排程、月實績填報 4 大功能，使維護人員依年度、月份分別建立工作排程，以利

維護人員確實控管。而在本研究中為使巡檢系統能整合於排程系統之中，減少於巡檢功能與排程功能間之多餘操作，因此將結合巡檢後之排程系統流程更改為圖 19 所示。

當使用者第一次使用時，須要先為所屬之維護班建立該班之每年重複進行之功能建立排程樣本，建立完成後於每年年底時系統會依據該樣本自動計算次年需進行之排程工作並列入次年年計畫中，並於每月月底時建立次月之工作排程，上述之流程為原排程系統已有之功能。本研究主要修改部分為在月計畫實績功能中加入巡檢相關功能，例如將巡檢時所攜帶之行動紀錄器下載、上傳功能，以及巡檢結束後之簽核功能整合至巡檢排程之中，使主管可直接於排程功能之中得知各項工作之完成和簽核情形。

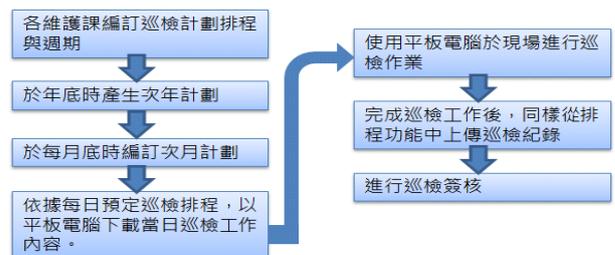


圖 19 功能排程系統流程

## 二、工作排程樣本編訂

圖 20 為工作排程樣本畫面，由於各維護班每年所須進行排程之工作項目眾多，其中大部分工作包含巡檢工作皆是有其周期性，可能每月或每年都會重複進行。因此設計工作排程樣本功能為讓每一維護班將這些有周期性之工作編訂各自之樣本，使其在建立年計畫時，系統可依據該樣本自動產生該年之工作排程。

本研究將工作分成需要手持行動紀錄器於現場之巡檢工作，以及一般工作兩種類型。在圖中分類欄位中可看到部分類別後方會加註★記號，代表該類別為巡檢工作，若無★記號則為一般工作。樣本中之每項工作皆有基準年及年週期欄位做為判斷該樣本為間格多少年進行一次及其開始年，若無填值則代表該樣本為每年皆會進行。

由於巡檢工作需要配合行動紀錄器決定下載及上傳之鐵塔與表格，因此在建立巡檢工作之樣本時須一併建立該工作包含之鐵塔與表格。如圖所示，巡檢工作排程須建立其巡檢計劃，巡檢計劃代表著會在同日一併進行巡檢之鐵塔，例如「345KV 核二~協和線#1~#20-普巡」這項工作排程中要將核二~協和線之#1~#20 號鐵塔選擇其巡檢表格後加入該排程之巡檢計劃。之後若巡檢人員欲下載「345KV 核二~協和線#1~#20-普巡」巡檢資料時，系統會將在工作樣本編訂功能所加入巡檢計畫之鐵塔下載置行動紀錄器中。

工作排程樣本 <span>排程樣本新增</span>				
分隊 第二分隊 台北二班		查詢類別 全部		查詢
分類	工作	基準年	年週期	月份
1-一般性作業	聚合礙子裝置調查表			1,2,7
1-一般性作業	TEST			1,2,3
2點檢維護作業★	TEST2			1,2,3

圖 20 工作樣本查詢畫面

巡檢計劃			
巡檢表格	架空線路巡視報告表		
線路	架空	核二~協和線	
塔(孔)號	<input checked="" type="checkbox"/> #0	<input checked="" type="checkbox"/> #11	<input type="checkbox"/> #22
	<input checked="" type="checkbox"/> #1	<input checked="" type="checkbox"/> #12	<input type="checkbox"/> #23
	<input checked="" type="checkbox"/> #2	<input checked="" type="checkbox"/> #13	<input type="checkbox"/> #24
	<input checked="" type="checkbox"/> #3	<input checked="" type="checkbox"/> #14	<input type="checkbox"/> #25
	<input checked="" type="checkbox"/> #4	<input checked="" type="checkbox"/> #15	<input type="checkbox"/> #26
工作計劃	核二~協和線_#0_ 架空線路巡視報告表		
	核二~協和線_#1_ 架空線路巡視報告表		
	核二~協和線_#2_ 架空線路巡視報告表		
	核二~協和線_#3_ 架空線路巡視報告表		
	<input type="button" value="刪除"/>	<input type="button" value="全部刪除"/>	
旬期	上旬	天數	1

圖 21 工作樣本編訂畫面

## 三、年計畫排程

圖 22 為年計畫排程畫面，從畫面上方之年計畫新增功能可建立所選擇年份之年計畫。該年計畫會由在工作排程樣本中所填之基準年及年週期欄為計算該年是否需要進行此排程，並從樣本月份欄位自動填入該排程進行之月份。在該功能中也可對已經建立之年計畫更改其排程執行月份或刪除排程，並可由右下方類別欄位確認該排程之類型是否為巡檢排程，若為巡檢工作則可從左下角之檢視功能中進一步查詢該工作之巡檢計畫，確認其工作需巡檢之鐵塔。

年計畫排程						
<input type="button" value="年計畫新增"/>						
年計畫查詢						
分隊	第二分隊 台北二班	年度	104	月份	全部	類別
關鍵字查詢						查詢
工作	一月	二月	三月	四月	五月	六月
另一個聚合礙子調查表	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
北一,北二,測試						類別: 1-一般性作業
巡檢作業A	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
巡檢	<input type="button" value="檢視"/>					類別: 2點檢維護作業★

圖 22 年計畫排程畫面

#### 四、月計畫排程

月計畫排程是以月為單位，系統依據年計畫排程中所排定之各項工作排程執行月份，讓使用者分別輸入 12 個月份之工作預定日期。意即為當每月開始時，台電人員會從該月之工作數量決定工作預定執行之月份。系統從年計畫中列出該月需要完成的排程工作，然後台電人員在填入每項排程工作的預定執行日期，完成月計畫編訂。

圖 23 為月計畫排程畫面，同樣系統會顯示每項工作之類型，若為巡檢類型之工作則會有檢視按鈕進一步確認該巡檢計畫，其中畫面紫色部分為年計畫排程勾選之旬期，上方紅色標示之日期為周六與周日。



圖 23 月計畫排程畫面

#### 五、月實績填報

圖 24 為月實績填報畫面，月計畫排程功能為決定各項工作預定執行日期，而月實績填報功能則是讓使用者依據各工作實際進行情況，填入實際完成日期。有關行動紀錄器之巡檢資料上傳與下載皆是在該功能中，若為不需下載巡檢資料之一般工作使用者依據實際工作進度直接勾選完成日期即可；若為巡檢工作則該工作左方就會出現上傳及下載功能，當巡檢人員從排程功能得知當日有排定巡檢工作時，可將行動紀錄器連接個人電腦並由下載按鈕自動開啟同步程式下載功能，可參考圖之畫面，同步程式自動讀取該排

程工作之巡檢計畫，列出所有在圖中所選取之鐵塔並讓使用者自行勾選欲下載之鐵塔項目。系統並紀錄最近下載時間顯示在工作名稱下方，提醒使用者該工作是否已有其它人員下載，避免重複執行。

在巡檢完成後，同樣可由左方上傳按鈕開啟同步程式上傳功能，該功能畫面說明可參見圖。上傳完成同時系統會依據在行動紀錄器輸入之巡檢日期填入實績完成日期中，如圖 24 中「巡檢作業 A」上方之 5、6、7 日之簽核按鈕，讓使用者知道該工作在 5、6、7 日已完成，從簽核按鈕可直接連結該巡檢之簽核系統。使用者也可由執行狀況右方之「查詢巡檢結果」功能連接至該工作實績表中，如圖 25 所示，該頁面會以條列式顯示每筆巡檢項目之完成日期，並由左方檢視按鈕開啟如圖 26 所示之巡檢結果表，讓使用者掌握工作執行進度。

整體而言，在月實績填報功能中便可完成巡檢之輸入、簽核，以及查詢已完成之巡檢紀錄等功能，無論是巡檢人員或是主管階層皆可從排程功能中確認當日之工作內容，而無須再從輸電設備維護管理系統之各個功能中切換，增加人員在操作系統時之便利性。

### 陸、結論與建議

近年來手持式平板電腦已成為十分普及之裝置，無論是個人或是各機關部門皆可見到行動裝置應用於其工作業務之中。因此在在本期研究中便針對巡檢功能開發行動版本。將原本數量眾多之巡檢表格及台帳資料轉換成電子檔案下載至行動紀錄器中，並以排程系統管理每日巡檢項目。預計該系統往後可協助巡檢人員管控巡檢工作進度，並讓供電處可隨時查詢及分析各區處巡檢資料。唯行動紀錄器與傳統巡檢作業方式有著大幅度變革，此一部份仍須台電公司大力推廣與對人員進行教育訓練及培育種子教師，使日後新進同仁皆可熟悉本系統各項功能操作。

### 月實績填報

分隊 第二分隊 台北二班    年度 104    月份 1    類別 全部    工作狀態 全部

關鍵字查詢

共4筆記錄

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14
下載	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
上傳					<input type="button" value="審核"/>	<input type="button" value="審核"/>	<input type="button" value="審核"/>							
改期	工作名稱			巡檢作業A			改期原因			改期至				
	單位			巡檢 <input type="button" value="檢視"/> 張三最近下載時間2015/3/4			執行狀況			<a href="#">查詢巡檢結果</a> 案件類型: 2點檢維護作業★				
更新	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
改期	工作名稱			聚合礙子裝置調查表2			改期原因			人手不足		改期至 104/2		
	單位			北一,北二			執行狀況			案件類型: 1一般性作業				

圖 24 月實績填報畫面

	電壓等級	線路名稱	塔號	人員帳號	天氣	巡檢時間	巡檢類別	表格
<input type="button" value="檢視"/>	161	陽明~蘭雅線	002	tyao	晴	2015/1/7	普通巡視	電纜終端及連接站點檢紀錄表
<input type="button" value="檢視"/>	161	深美~台北~臥龍線	012	tyao	晴	2015/1/6	普通巡視	地下電纜點檢紀錄表
<input type="button" value="檢視"/>	161	深美~台北~臥龍線	011	tyao	晴	2015/1/5	普通巡視	地下電纜點檢紀錄表

圖 25 巡檢計畫實績查詢畫面

電纜終端及連接站點檢紀錄表

維護部門: 第一分隊台北段    點檢日期: 104年1月7日    天氣: 晴  
 線路名稱: 陽明~蘭雅線    桿塔區間號碼: 002  
 巡視類別: 普通巡視

點檢項目	要求標準	結果
1.避雷器	外觀清潔無裂痕或破損	無異狀
	絕緣電阻、功率因數測定及噴氣孔檢查	無異狀
2.礙子	礙子連外觀清潔無破損	無異狀
	礙管清潔無破損	無異狀
3.電纜	引上電纜無滑脫	無異狀
	電纜外被加墊廢電纜皮	無異狀
	電纜外被清潔、無受傷或鼓脹	無異狀
	彎曲半徑為15D以上	無異狀
4.彈簧式固定座	良好	無異狀

圖 26 巡檢結果查詢畫面

本研究另一項主要功能為環域分析系統。除了現行之鐵塔警戒制度外，針對每一鐵塔計算之降雨量及地震強度，建議可發展大數據(Big Data)技術，計算各鐵塔雨量、降雨頻率、地震強度、地震頻率等，整合環域分析技術，評估各鐵塔可能倒塌之機率，進而預作強化措施。

另外，本系統最重要之核心為鐵塔人孔台帳資料，無論排程、巡檢、圖資系統皆是架構於台帳資料之上。若台帳更新不夠確實可能造成系統資料庫存放錯誤或過時資料。目前雖已將台電六大供電區營運處之設備資料全數上傳至資料庫中，但其完整性與正確性，尚需要台電各供電營運區處工作人員的檢核與維護，使得資訊化的管理系統可以為台灣輸電設備維護帶來更大的便利性與效益。

## 柒、參考文獻

- [1] M. E. Beehler, "Reliability Centered Maintenance for Transmission Systems," *IEEE Trans. Power Del.*, pp. 1023-1028, 1997.
- [2] J. Pohlman, "Sharing Information on Aging Transmission Lines is Essential," *Transmission and Distribution*, pp. 18-20, May 1991.
- [3] A. M. Smith, *Reliability Centered Maintenance*, McGraw-Hill, New York, 1993.
- [4] K. Stahlkopf, "Technology 's Strategic Role," *Public Utilities Fortnightly*, pp.33-36, 1995.
- [5] S. S. Mousavi-Seyedi, F. Aminifar, and S. Afsharnia, "Parameter Estimation of Multiterminal Transmission Lines Using Joint PMU and SCADA Data," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 30, no. 3, pp. 1077-1085, June 2015.
- [6] J. I. Escudero, J. Luque, and A. Carrasco, "Experimental study on the transmission of measurements by tolerance in SCADA systems," *IEEE Trans. Power Del.* vol. 19, no. 2, pp. 590-594, April 2015.
- [7] Euan M. Davidson, Stephen D. J. McArthur, James R. McDonald, Tom Cumming, and Ian Watt, "Applying Multi-Agent System Technology in Practice: Automated Management and Analysis of SCADA and Digital Fault Recorder Data," *IEEE Trans. Power Del.* vol. 21, no. 2, pp. 559-567, May 2006.
- [8] Patrick McNabb, Douglas Wilson, and Janusz Bialek, "Classification of Mode Damping and Amplitude in Power Systems Using Synchrophasor Measurements and Classification Trees," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 28, no. 2, pp. 1988-1996, May 2013.
- [9] R. B. Rodrigues, V. M. F. Mendes, and J. P. S. Catalao, "Lightning Data Observed With Lightning Location System in Portugal," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 2, pp.870-875, April 2010.
- [10] H. Fu, J. Zhao and M. Li, "To see our global geographic information services about challenges and responses from Google Maps," *Geography and Geographic Information Science*, vol. 22, no. 2, pp.1-3, 2006.
- [11] M. Xin and J. Xu, "Logistics management practices of Chinese and foreign famous enterprises," *Shaanxi Comprehensive Economic*, no. 5, pp.1-4, 2007.
- [12] J. Wang, "Recommender of Green Logistics Management for Chinese Enterprises," *Hebei University of Technology (Social Science Edition)*, vol. 7, 2007.
- [13] Q. Geng, L. Mv and Y. Duan, "Jianghua Li. Web Map Service System Research and Application based on the Google Maps API," *Chinese Journal of Water Resources and Hydropower Research*, vol. 7, no. 1, pp.55-60, 2009.
- [14] Y. Wang and W. Zhou, "Settlement Information Management System of Beijing-Shanghai High-Speed Railway Based On Google Map Service," *IEEE International, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 23-26, 2010.
- [15] H. Weisheng, W. Xincai and L. Xiuguo, "Study of Urban Land Subsidence Information Management and Prediction System Based on GIS," *Rock and Soil Mechanics*, no. 6, pp. 1689, 2008.
- [16] S. shiyu, "Design of Ajax Web application program, Beijing, *Publishing house of electronics industry*," pp. 177, 2008.

- [17] L. Qiang, M. Feng, and Z. Wensheng, "Study on the Grand Canal Conservation Geographic Information System," *Geomatics World*, no. 3, pp. 35, 2009.
- [18] J. E. Koop, "Advanced Technology for Transmission Line Modeling," *Transmission and Distribution World*, April 2002.
- [19] L. P. Xinan, and G. Seeber, "Meterage of secondary planet earth," *earthquake publishing company*, vol. 2, 1998.
- [20] J. N. Deng, "The Digital Earth and Its Application on Survey and Design of Electric Power," *Southwest Electric Power Design Institute*, Chengdu, China.
- [21] WangLili, AiXin, BaiWenguang, and WangQing, "Application and Development of the Visual Software for the Load Supply Capability Computation of Distribute Network," *Modern Electric Power*, vol. 23, April 2006.

### 台電工程月刊徵稿啟事

- \* 為使本刊物之內容更臻完善，歡迎有關火（水）力發電、核能發電、再生能源、輸變電、配電、電力系統、能源與環境、化學與材料、資訊與電腦、工程技術及其他等相關論著、技術經驗及譯者踴躍投稿，以饗讀者。
- \* 投稿相關事宜，若有任何疑問，請聯絡我們，謝謝您！

☎ (02)2360-1095    ✉ u117212@taipower.com.tw

# 台電公司溫室氣體減量與碳權經營模式規劃研究

Study of Taipower's Greenhouse Gas Emission Reduction and  
Carbon Credit Management Module

蔡顯修\*  
Tsai, Hsien-Shiow

林武煌\*\*  
Lin, Wu-Huang

溫桓正\*  
Wen, Huan-Cheng

林景庸\*  
Lin, Jing-Yong

吳政宏\*  
Wu, Cheng-Hung

楊忠憲\*  
Yang, Chung-Hsien

余志達\*\*  
Yu, Chih-Ta

(104 年度研究計畫論文)

## 摘要

因應全球氣候變遷及我國政府對於台電公司(以下簡稱本公司)所要求之減量目標，本委託研究計畫除了廣泛收集各先進國家在需求端面管理之相關措施並比較國內現行之作法，藉此提出有效之需求面節能措施以達到需求端減量外，另亦透過碳權經營模式之分析與研究，建構台電公司的碳權經營能力，其中在法令制度與碳權管理方面，旨在建構國營事業辦理碳權採購之最適模式、碳資產帳務處理與資訊管理系統，另外本案亦協助相關電廠推動溫室氣體減量先期專案並向行政院環境保護署提出先期專案減量額度申請。

## Abstract

The main objective of this project is to assist Taiwan Power Company (Taipower) with its efforts in addressing carbon emission reduction by means of research and analysis on demand-side electricity management and carbon credit/allowance management based on the relevant regulations and measures adopted worldwide. For the former, this project focuses mainly on the establishment of viable approaches to demand-side electricity conservation. As for the latter, it develops an optimal operation module of carbon credit management for a state-run enterprise, and sets up Taipower's Carbon Asset Accounting & Management Information System. In addition, the project is also assisting in implementation of the Early Action Project at certain power plants and preparing the application for carbon allowances.

**關鍵詞(Key Words)：**電力需求面(Demand-side Electricity Management)、碳權經營(Carbon Credit Management)、初級市場(Primary Carbon Credit)、次級市場(Secondary Carbon Credit)、碳會計(Accounting Handling)。

## 壹、前言

全球暖化及氣候變遷是全球各國共同矚目之重大環保議題，自聯合國通過「氣候變化綱要公約(UNFCCC)」以來，迄今已歷時 20 餘年，雖

\*台灣電力公司環境保護處

\*\*台灣電力公司電源開發處

\*\*\*環科工程顧問股份有限公司

然我國並非該公約之締約國，但身為地球村的一份子，我國政府已積極推動各項因應氣候變遷之管理作為，藉此落實地球公民的責任。行政院於民國 97 年通過「永續能源政策綱領」及民國 99 年核定「國家節能減碳總計畫」，明確揭示我國節能減碳目標，並希望透過「淨源、節流及立法」來達成「能源、環保與經濟」三贏之永續發展願景。

依據上述國家節能減碳政策目標，行政院環境保護署於審查本公司「大林發電廠更新改建計畫」之環境影響說明書的審查結論中，要求本公司所屬火力電廠之二氧化碳排放總量必須於 109 年(含)後不得超過 94 年的排放總量，於 114 年(含)後不得超過 89 年的排放總量。為此，本公司規劃研擬需求面、供應面及碳權經營等三大構面之節能減碳措施，並提出多項溫室氣體減量策略與行動方案，希望藉此有效達成溫室氣體減量目標。

在需求面管理方面，本研究計畫廣泛蒐集了日本、韓國、中國大陸及歐盟等國家及地區之電力需求面管理作法，並分析比較與我國現行管理措施之差異，希望藉此促請政府有關單位進一步推動需求端管理與節能措施，達成抑制用電成長的目的；在碳權採購法令方面，本計畫深入分析我國「政府採購法」之相關條文內涵，並透過專家諮詢會議，協助本公司建構溫室氣體減量額度採購之最適模式，其中包括初級市場碳權額度經營分析及次級市場碳權額度採購模式等；在碳資產管理方面，本計畫透過國外碳資產管理之會計帳務處理分析，協助建構本公司碳資產會計帳務制度；在資訊管理系統建置及溫室氣體減量先期專案方面，則持續更新維護本公司溫室氣體管理系統功能，並協助相關電廠推動減量專案爭取溫室氣體先期專案減量額度。

## 貳、研究方法

### 一、我國電力需求面管理措施檢討及因應對策研擬

所謂電力需求面管理 (Demand-Side Management, DSM)，包含了需量反映及節能措施等兩大工具，其成效可以提升用電效率、改變用電行為，進而抑低用電及移轉負載等，是達成溫室氣體減量非常重要的管理作為之一。

我國現階段推行的電力需求面管理措施之需量反應措施，包括時間電價、用戶配合減少用電優惠電價等，節約能源措施包括設節能標章及能源效率分級標示制度、節能家電補助、節能技術服務團等，皆已行之有年且各具成效，但受限於國內電價長期受到管制或財務誘因不足，難以激發用戶積極配合意願，加上智慧電表佈建進度尚處起步階段，致使整體負載移轉效果及節電效果未能進一步突破。

本研究參採各先進國家之經驗，歸納出各國需節約能源措施成功的關鍵，包括：

- (一) 管制單位與電業充分溝通，提供電業適度獎勵誘因。
- (二) 電價合理化：售電成本(含措施成本)可反映於電價。
- (三) 完善的基礎設施：智慧電表普及率高，用電資訊透明化。
- (四) 售電市場競爭性高：用戶有充分的選擇權。
- (五) 健全的節電成效評估 (Evaluation, measurement and verification, EM&V) 制度。

本研究參採據前述各國電力需求面管理措施的成功關鍵要素，針對我國電力市場現況，提出電力需求面管理精進措施之可行方向，惟考慮到電價合理化對可採行措施之影響甚大，且電價合理化議題事涉層面廣泛且利害關係者眾多，非短期一蹴可幾，故本研究以電價合理化前後作為分野，分別論述不同階段可採行之策略<sup>[1]</sup>。

#### (一) 電價合理化前

##### 1. 需量反應措施：

建議本公司有關單位通盤檢討現行減少用電措施，規劃朝「簡化整併方案、

放寬適用範圍、納入用戶基線、提高扣減標準」之方向修正，俾符合電力系統及市場需要，另亦積極研議需量競標 (Demand Bidding)、空調自動需量反應 (Auto Demand Response)、推動用戶群代表制度 (Aggregator) 等創新作法，以激發抑低潛能、擴大參與，並喚起民眾能源不足之意識。

## 2. 節約能源措施：

### (1) 待機電力管制計畫：

建議經濟部將用電器具待機電力瓦數納入「最低能源效率標準 (Minimum Energy Performance Standards, MEPS)」管制，並在用電器具供應端 (即生產廠商)，透過發予廠商節能標章之獎勵方式或訂定法規之強制手段進行規範，促使廠商生產銷售低待機電力瓦數之電器；在需求端 (即用電器具使用人)，持續擴大宣導隨手拔插頭之觀念，以敦促用戶降低家電產品之待機時數<sup>[2-3]</sup>。

### (2) 能源用戶訂定節約能源目標及執行計畫規定之滾動檢討：

建議擬定滾動檢討機制，以評估「能源用戶訂定節約能源目標及執行計畫規定」之施行成效，若執行成效佳，建議逐步擴大納管對象，使納管用電量占全國電力消費比例達 60%-80%；若執行成效不佳，宜檢討執行瓶頸，調整規定內容，如「年度節電率 1%」目標值或輔以其他配套措施。

### (3) 中小企業購置節能設備低利貸款與利息補貼：

建議持續沿用「中小企業購置節約能源設備優惠貸款及利息補貼要點」，調整延長補貼條件 (如補貼利率、補貼期程)，簡化申請流程與審查時間，以誘發企業積極申請，並輔以配合 MEPS 期程規劃，分期強化特定設備補貼條件，加

速設備滲透率<sup>[4-5]</sup>。

### (4) 獎勵電業推動用戶節電方案機制：

建議政府應加強與電業溝通，研擬制定「獎勵電業推動用戶節電方案機制」，對於電業推動用戶節電方案且執行成效優異者給予獎勵，並逐步發展「節能績效評估方法」，增進節能量評估之公正客觀性，據以有效達到省電節能，減少電源開發及用戶能源支出。

### (5) 家戶節能建築實證補助：

建議內政部建築研究所未來除持續對既有建築提供設備改善補助，亦針對擴建和改建建築採用高效率設備 (如空調、照明設備及冷藏設備等) 之家戶直接給予補助，促使家戶汰舊換新。另外，宜簡化申請流程與審查時間，以提高家戶積極申請意願<sup>[6-9]</sup>。

### (6) 擴大免費省電節能診斷/免費講師派遣服務：

建議可持續針對產業進行省電節能診斷，針對中小企業高階主管進行節能觀念或資訊進行宣導，並強化擴大社區宣導及節能診斷<sup>[10-11]</sup>。

## (二) 電價合理化後

### 1. 需量反應措施：

#### (1) 規劃新型需量反應方案：

結合智慧電網、能源資通訊技術 (Information and Communication Technology, ICT) 及能源管理系統 (Energy Management System, EMS)，可規劃新型需量反應方案，以系統自動化取代人工調控，提高需量反應運作彈性與即時性，提升電力系統整體運轉效益。

#### (2) 推廣用戶群代表 (Aggregator)：

推廣用戶群代表參與需量反應方案之商業運作模式，以集結個別用戶擴大參與程度，提升抑低負載績效。

### 2. 節約能源措施：

- (1) 併行行政管制、稅負優惠、獎勵補助及資訊宣導各面向措施：

導入多元價格工具，如能源稅、碳稅、能源公用事業負擔節能義務制度 (Energy Efficiency Obligation, EEO) 等反映電力外部成本及規範電業權利義務之作法。

- (2) 加強導入能源服務產業 (ESCOs) 商業化模式：

排除用戶節能資訊不足及資金缺乏等瓶頸，創造國家、電業、用戶、銀行及能源服務業等多贏局面。

## 二、台電公司碳權經營之最適模式及碳資產處理原則

依據「大林發電廠更新改建計畫」環境影響說明書審查結論，初估本公司在 109 至 111 年之溫室氣體減量缺口達數千萬噸以上。為此，本公司已提出「台電公司節能減碳總計畫」以為因應，其中有關「開發與交易碳權」之內涵，包括了「公司內減量計畫」及「公司外碳權經營」兩大方向。

有關「公司外碳權經營」的部分，本案除了深入調查國內外碳權額度之供需能力之外，並針對國內碳權市場的部分，依「初級市場」與「次級市場」進行市場調查及適法性分析，並藉由次級碳權額度之試行採購來試探市場及建立標準採購作業流程。

### (一) 國內外碳權額度之供需能力分析

本公司在碳權額度之需求，主要是來自於大林發電廠更新改建計畫之環評承諾。依本研究案評估，本公司 109-114 年所累計之排放缺口約達數億公噸，其中部分排放缺口可由本公司內部執行之減量計畫弭平，而不足之缺口，則需採購公司外部碳權額度來進行抵換；然而國內碳權額度供應量非常有限，未來仍必須藉由採購境外碳權額度方可彌平鉅額缺口<sup>[12-14]</sup>。考量今年 COP21 之國際減碳趨勢及各國之供需市場發展，評估目前國際

上最廣為流通之 CER 額度 (Certified Emission Reduction, CER)，預估在民國 109 年之全球供應量可能短缺達 7.45 億公噸；換言之，在國內外碳權額度供應量皆不足的情況下，未來本公司要購買足夠且價格較低的碳權額度將是一項艱鉅的任務。本研究依據國內外碳權額度之供需變化，模擬不同時間點進行採購碳權額度之成本，結果顯示，本公司若自民國 106 年開始逐年購買我國的碳權額度並分階段購買境外碳權額度之採購成本，將高於 104 年開始購買成本約 20-30%、高於 105 年開始購買之成本約 6-10%。

綜上所述，研究團隊建議本公司應及早擬定碳權額度採購計畫，並藉由成立或參與碳基金、銀行或經紀商成立合資企業等方式，直接或間接涉入碳權額度供給相關活動與管理，並積極介入碳交易市場，以具成本有效性之方式取得所需之碳權額度。

### (二) 國內初級碳權之潛力評估

有關初級碳權之取得，為確保有減量額度需求時，本公司能以最具效益之方式取得，本研究基於合法、公平、互利及共享等原則，評估公營事業從事初級碳權的可行性。惟因抵換專案在我國施行之程序繁瑣，減量成本與技術成熟度皆具有高度不確定性，因此本研究團隊調查評估 6 大產業、11 間廠商<sup>1</sup>與國營事業合作減量專案之可能性後，具初級碳權潛力之可能業者有 5 家，未來如果在政府採購法之架構下，可以與該些業者共同推動減量計畫，預估本公司可取得約 26 萬公噸 CO<sub>2</sub>e 的減量額度<sup>[15]</sup>。

### (三) 國內次級碳權之採購分析

在次級碳權採購方面，考量本公司具有國營事業身分，因此本研究必須先釐清在政府採購法架構下，購買碳權額度適法性。藉由召開專家諮詢會議、個別諮詢專家與顧問之意見並函詢行政院公共工程委員會後，已釐清次級碳權採購屬於

<sup>1</sup> 其中行業別包括鋼鐵業 1 家、科技業 3 家、人纖業 1 家、石化業 4 家、其他業 1 家、造紙業 1 家。

政府採購法中之財物採購行為，因此採購程序必須依政府採購法辦理。其次，考量我國尚無國營事業採公開招標採購次級碳權額度之前例，因此研究團隊規劃以小規模之「試行」採購方式，辦理碳權額度之公開招標，分別於 103 年 12 月 1 日及 103 年 12 月 19 日連續進行二次採購「環保署核發之先期專案減量額度或抵換專案減量額度」招標，藉由本次招標經驗，完成公司內、外之採購流程，並研擬完成採購作業標準流程，足可提供未來擴大規模採購之重要參考。且本次採購也具試探國內次級碳權供應市場之效果，經調查各碳權額度持有業者未參與投標之原因，分析如下：

1. 不熟悉政府採購法之作業流程，因此無從獲悉本次公開採購。
2. 評估參標成本高過本次試行採購之參標金額，而放棄投標。
3. 與業者本身已有環評需求，不願意讓售碳權額度。

#### (四) 碳資產會計帳務處理分析

有鑑於碳權額度交易相關會計議題對於真實反映企業經營績效具有顯著之影響，本研究團隊廣泛收集目前交易市場機制較為健全之國家或地區之企業所採行之碳額度會計處理方式，並考量我國相關會計法規提出下列看法與建議。

雖然國際上至今並未對碳額度的會計制度達成共識，然而實務上通用的會計方法如下：

1. 會計準則為排放權解釋公告(International Financial Reporting Interpretations Committee, IFRIC3)中的 IAS38 (International Accounting Standards38)「成本法」及「重估法」。
2. 美國聯邦能源管制委員會於 1993 年 4 月 7 日公布之「淨額法」。

依照 IAS 38 針對無形資產之定義，所謂「無形資產」係指「可辨認、非貨幣性且無實體存在」，故建議本公司所取得之碳權額度應類推適用 IAS 38 無形資產有關之規定；另參照 IAS37「負債準備」，認列碳權額度相關定義之會計處

理原則，且應依循國內現行證券發行人財務報告編製準則，採成本模式來衡量本公司所取得的碳權額度<sup>[16-17]</sup>。

### 三、溫室氣體先期專案減量額度之取得及管理資訊系統之維護與升級

為協助累積本公司內部減量之碳權額度，本案協助協和、台中、興達及大林等發電廠推動 89-100 年溫室氣體先期專案計畫，在歷經外部查證單位現場訪談、二次現場查證及環保署嚴格之審查後，本計畫成果合計取得先期專案減量額度約為 588 萬公噸 CO<sub>2</sub>e，先期專案減量額度彙整如下表 1：

表 1 各火力發電廠取得先期專案額度成果表

環保署審查年度	電廠名稱	先期專案年度	減量額度
102	協和	89~97	約 588 萬公噸
	台中	89~100	
	興達		
	大林	89~93、100	

考量台電公司溫室氣體排放量大且來源廣泛，數據建立與資料收集之工作量繁雜，因此自民國 95 年起即逐年建置各類管理資訊系統，以利有效管理溫室氣體之排放情形及碳權額度，其中包括「溫室氣體減量計畫資訊管理系統」、「溫室氣體資訊管理系統」、「六氟化硫盤查申報管理系統」等。本計畫除了維護前述資訊系統之功能外，更配合環保法規之「溫室氣體排放量申報管理辦法」的要求及外部查證單位之建議，新增了許多填報、彙整、統計及與國家溫室氣體申報管理平台連結之等功能，大幅提升管理效益並降低填報人員之工作負擔。

## 參、結論

綜合以上，本研究獲致成果及未來之建議事項臚列說明如下：

一、電力需求面管理措施：電價合理化前之策略

包括待機電力管制計畫、能源用戶訂定節約能源目標及執行計畫規定之滾動檢討、中小企業購置節能設備低利貸款與利息補貼、獎勵電業推動用戶節電方案機制、家戶節能建築實證補助、擴大免費省電節能診斷/免費講師派遣服務；電價合理化後，除持續進行前述策略外，可再精進之策略則包括規劃新型需量反應方案、規劃新型需量反應方案、併行行政管制、稅負優惠、獎勵補助及資訊宣導各面向措施以及加強導入能源服務產業 (ESCOs)商業化模式。

- 二、國內碳權額度之取得，已建立初級市場合作對象篩選步驟，以利後續與具有減量潛力之企業進行合作；完成環保署溫室氣體減量額度招標文件及次級碳權額度試行採購作業程序。
- 三、對根據國內外市場分析結果並考量本公司可能面臨境外碳權額度之需求時間，本計畫建議本公司應儘早編列預算採購境外碳額度。
- 四、完成碳資產帳務處理之會計準則分析，建議本公司參照 IAS 37 負債準備及 IAS 38 無形資產認列碳權額度相關交易之會計處理，並參照 IAS 38 無形資產規定，採成本模式衡量碳額度認列之無形資產。
- 五、更新及提升本公司溫室氣體相關資訊管理系統功能，並協助取得 588 萬公噸 CO<sub>2</sub>e 之先期專案減量額度。

## 肆、誌謝

本研究承蒙本公司業務處、材料處、會計處、發電處、財務處、綜合研究所、協和、台中、興達及大林發電廠之相關同仁協助與支持，得以順利完成，謹此致謝。

## 伍、參考文獻

[1] 經濟部能源局，「能源產業溫室氣體減量資訊

網」，2014 年，[http://verity.erl.itri.org.tw/EIGIC/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1&Itemid=3](http://verity.erl.itri.org.tw/EIGIC/index.php?option=com_content&view=article&id=1&Itemid=3).

- [2] Ministry of Knowledge Economy and Korea Energy Management Corporation, "Korea's Energy Standards & Labeling," Korea, 2013.
- [3] 經濟部能源局，「中華民國經濟部能源局官網」，2014 年。[http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/Law/Content.aspx?menu\\_id=653](http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/Law/Content.aspx?menu_id=653).
- [4] Department of Energy of Climate Change, "The Green Deal: A way for owners and tenants to pay for home," UK, 2014.
- [5] Department of Energy of Climate Change [DECC], "DECC Website," 2014. [Online]. Available: <https://gdcashback.decc.gov.uk/>
- [6] 經濟部商業司，「各行業節能減碳輔導與節能設備優惠貸款」，2012 年。
- [7] 內政部營建署，「中華民國內政部營建署官網」，2014 年，<http://www.cpami.gov.tw/chinese/index.php>
- [8] 內政部建築研究所，「中華民國內政部建築研究所官網」，2014 年。<http://www.abri.gov.tw/utcPageBox/CHIMAINHP.aspx?ddsPageID=CHIM>.
- [9] 財團法人台灣建築中心，「財團法人台灣建築中心官網」，2014 年，<http://www.tabc.org.tw/tw/>。
- [10] 財團法人日本節能中心 (The Energy Conservation Center, Japan, ECCJ)，「日本省能節電門戶網站官網」，2014 年，<http://www.shindan-net.jp/case/index.html>.
- [11] 經濟部產業省-資源能源廳，「經濟部產業省-資源能源廳官網」，2014 年，<http://www.enecho.meti.go.jp/>.
- [12] 行政院環境保護署，「中華民國第二版國家通訊」，2011 年。
- [13] 行政院原子能委員會核能研究所，「低碳核能於國家能源規劃與減量策略之角色」，2010 年。
- [14] 臺灣銀行，「工業、運輸、住宅及服務業部門能源服務需求長期預測」，2010 年。
- [15] 溫室氣體國家登錄平台，2014 年，<http://ghgregistry.epa.gov.tw/>.
- [16] Deloitte，「碳計量的會計挑戰：報告概述」，2010 年。
- [17] 陳巧芬，「總量管制交易之財務會計制度的建置與評估」，碩士論文，國立政治大學財政研究所，2012 年。

# 民營電廠氣候變遷風險評估案例研究

Case Study of Climate Change Risk Assessment for an Independent Power Producer

羅慧瑋\*  
Lo, Huei-Wei

徐玉杜\*  
Hsu, Yu-Du

## 摘要

從歷史統計數據得知氣候變遷導致極端氣候事件發生的重現期縮短或強度增加，造成的災害已嚴重影響能源供給設施的穩定與安全，因此世界各國愈來愈重視能源設施在氣候變遷下的調適能力。為瞭解國內能源產業氣候變遷風險，本團隊於 2011 年參考 ISO 31000 風險管理指引、UNFCCC 氣候風險評估程序及英國氣候變遷風險評估方法，採由下而上 (Bottom-up) 方式建立氣候變遷風險評估工具，並逐年輔導不同能源業者進行風險評估與調適能力強化等工作。本文為民營電廠和平電力公司之輔導案例，透過氣候風險辨識、危害度與脆弱度評估、以及風險評量等步驟，初步掌握關鍵氣候風險，可作為後續規劃氣候變遷調適措施之參考。另外，亦藉由本案例輔導過程精進 8 項氣候衝擊敏感度與危害度評估基準，使評估工具更具可操作性，以提供其他產業參考。

## Abstract

According to historical statistics, climate change has led to the increase in the intensity and frequency of extreme climate events and the disasters so caused have already seriously affected the stability and security of energy supply infrastructure. Countries around the world are gradually paying more and more attention to the adaptive capacity of energy facilities in response to climate change. In order to evaluate the climate change risk of domestic energy industry, we adopted a bottom-up approach to establish the evaluation tool of climate change risk in 2011, after referring to the climate change risk assessment method of the UK, the climate risk assessment process of UNFCCC and ISO 31000. Thereafter, we have rendered counselling support service to different energy companies in risk assessment and improvement on adaptive capacity of climate change for years. This article presents a counselling case of HPC Power Services Corp. By means of climate risk identification, hazard and vulnerability assessment, and risk evaluation, we were capable of realizing the decisive climate risks as a reference for planning the adaptation measures. In addition, we managed to enhance the eight criteria for climate impact sensitivity and hazard assessment through the process of this study, making the evaluation tool a more practical and adoptable reference for other industries.

**關鍵詞(Key Words)：**氣候變遷調適(Climate Change Adaptation)、危害度(Hazard)、脆弱度(Vulnerability)、風險評估(Risk Assessment)。

\*財團法人工業技術研究院綠能所

## 壹、前言

近年來，世界各地因氣候變遷或屢破紀錄的極端氣候事件而影響能源供給的案例比比皆是，例如美國加州連續 4 年遭逢乾旱並自 2015 年 4 月開始全州限水 25%；加拿大於 2015 年 8 月遭遇暴風雨侵襲，許多樹木被吹倒而壓垮電線杆，導致 50 萬戶停電；日本關東地區於 2015 年 9 月遭逢艾濤颱風侵襲，鬼怒川堤防被沖毀，多處河水氾濫，這也是日本 50 年來最大規模的洪災；反觀國內 2015 年面臨 67 年以來最嚴重的乾旱，部分縣市自 4 月開始實施第三階段限水，在高溫與乾旱雙重衝擊下，能源業者面臨發電效率下降、供電吃緊等嚴苛挑戰；而甫於 8 月登陸臺灣的中颱蘇迪勒亦在全臺造成史上最嚴重的颱風停電災情，累積停電戶數近 400 萬戶。

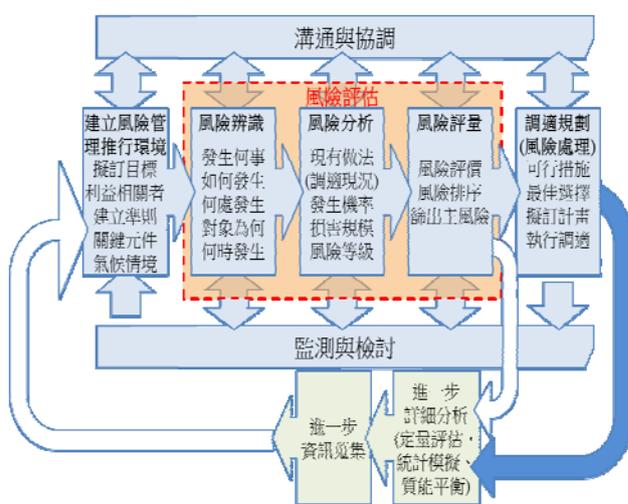
隨著全球暖化與氣候變遷漸漸變成顯學，各國政府也愈來愈重視能源供給設施是否足以因應未來強度更大或更頻繁發生的極端氣候型態。為因應氣候變遷衝擊，由行政院國發會(其前身為經建會)召集各部會與專家學者研擬之「國家氣候變遷調適政策綱領」已於 2012 年 6 月 25 日核定，其中經濟部能源局為「能源供給及產業領域」調適方案與行動計畫之推動與總彙整單位。經濟部能源局為通盤瞭解國內能源供給設施氣候變遷衝擊與風險，自 2010 年起委託工業技術研究院以 Bottom-up 方式進行氣候變遷風險評估方法與評估工具之先期研究，接著依北、中、南、東及離島等地理區位特性與能源類別，逐年輔導不同廠家進行氣候風險評估與調適能力強化，再藉由每年輔導案例回饋意見，持續精進各項評估工具，期望在未來氣候情境假設條件下，各能源業者得以強化能源供給設施之耐災力與回復力，進而降低氣候變遷的潛在衝擊。

本研究為 2014 年輔導和平電力公司氣候變遷風險評估之案例<sup>[1]</sup>，執行過程首先藉由蒐集分

析鄉鎮區位氣候衝擊指標與歷史監測數據，再以 Bottom-up 方式評估各項設施在氣候變遷下可能遭遇之風險。由於該公司位於臺灣東部地區，也是最容易遭遇颱風侵襲的區域，過去曾因氣候災害導致設施受損的紀錄包括：颱風吹毀煤倉屋頂、湧浪溢堤而使廠區臨海區域積水、強風吹斷鐵塔礙子導致二回路線路中斷、暴雨使山區鐵塔崩塌等事故。

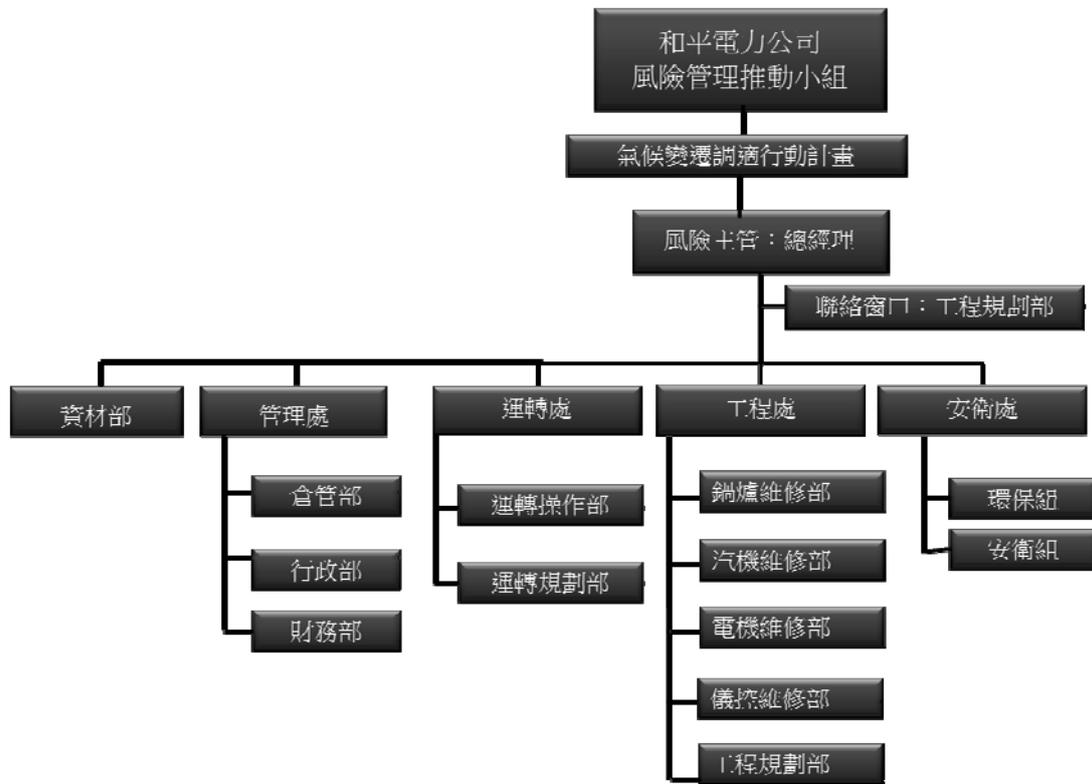
## 貳、研究方法

本研究參考 ISO 31000 風險管理指引及英國 HR Wallingford 之氣候變遷風險評估方法，據以建立國內能源產業氣候變遷風險評估架構(如圖 1)。而為順利推展風險評估工作，本研究協助和平電力公司在既有風險管理組織下納入氣候變遷調適推動小組(如圖 2)，再透過教育訓練使推動小組成員瞭解氣候變遷資訊與風險評估作法，接著依序進行氣候衝擊分析與災害潛勢評估、基礎資料建置、盤查設施之危害度與脆弱度評估、交叉風險分析等，以掌握各設施主要氣候變遷風險，作為未來規劃調適措施之參考，輔導流程如圖 3 所示。



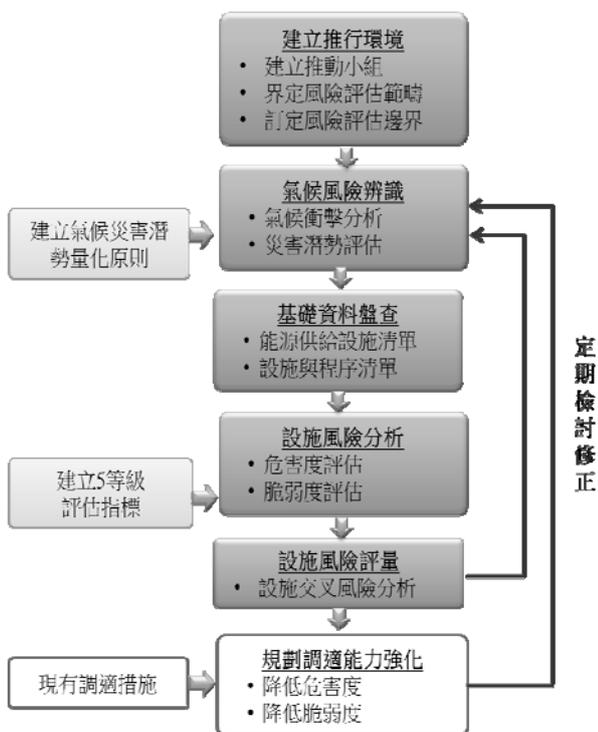
資料來源：本研究整合繪製，2012 年

圖 1 能源產業氣候變遷風險評估架構



資料來源：本研究繪製，2014年

圖 2 和平電力公司氣候變遷調適推動小組



資料來源：本研究繪製，2015

圖 3 能源產業氣候變遷風險評估流程

風險評估係參考國家災害防救科技中心(簡稱 NCDR)的方式，即風險(Risk)=危害度(Hazard)×脆弱度(Vulnerability)。NCDR 定義之危害度指造成物理性損壞之潛在事件、現象或人為活動，包括：供給能力損失、人員傷亡、財物損失、社會與經濟面之崩潰，或環境退化等<sup>[2]</sup>。而脆弱度指在面對危害發生時會增加易損程度的狀態，此狀態取決予物理性、社會性、經濟性與環境性的因素<sup>[2]</sup>。至於災害潛勢乃參考 NCDR 定義指在氣象、水文等的外在條件下，分析模擬區域內各處發生災害的機率或規模，劃分成不同等級，如高、中、低潛勢等，再利用地理空間方式呈現模擬地區的潛勢分布<sup>[3]</sup>。

整體風險評估作法如圖 4 所示，本研究先以各鄉鎮區位災害潛勢等級為基礎資料，接著進行各項設施的危害度、脆弱度評估，最後計算風險等級。



資料來源：本研究製作，2015 年

圖 4 能源產業氣候變遷風險評估作法

本研究氣候變遷衝擊項目依據行政院國發會(其前身為經建會)於 2010 年召集之國家氣候變遷調適政策綱領及調適行動方案顧問專家建議，涵蓋 IPCC AR4<sup>[4]</sup>列出之溫度上升、降雨量變化、極端氣候及海平面上升等 4 大類，再加上其他項共 5 大類，逐步建立氣候衝擊分析關連資料，至於臺灣較為頻繁發生的地震，因國際間對於地震與氣候變遷的關連性尚待驗證，因此暫不探討。

本研究氣候變遷風險評估量化原則乃參考 NCDR、水利署、地調所、氣象局等單位以過去氣象、淹水、溫度、風速、降雨量等歷史數據製作的風險地圖或統計資料為基礎，進行設施危害度評估，對於未來氣候變遷推估仍存在高度不確定性，且目前辨識的氣候衝擊因子在近未來(2020~2039 年)是否仍為關鍵的衝擊因子，尚須持續監測氣候變遷的影響與衝擊方能確定。因此，一旦未來國際或國內發布更詳細的推估資訊時，建議同步修正本案例之風險評估。

### 一、風險評估範疇

常見的風險評估範疇包括降低供給能力損失之規模或時間、資產毀損、效能下降及其他(如信譽損失、人員傷亡、經濟損失、法律訴訟等)。本研究氣候風險評估範疇乃個別針對降低供給能力損失與資產毀損兩項進行評估，未來可依需求再納入經濟損失、民生衝擊或人員傷亡等項目之權重。

### 二、風險評估邊界

和平電力公司由台泥(60%)與香港 One Energy 有限公司(40%)合資成立，於 2002 年商轉，能源供給係利用兩部 660 MW 燃煤機組發電經升壓至 345 kV 後，經和平-冬山紅白線(123 座鐵塔)輸送至冬山 E/S。

基於輸電鐵塔面臨山區坡地災害(降雨促崩)的風險極高，加上這些鐵塔均屬於和平電力公司的資產，因此本研究邊界涵蓋 27 公頃的發電廠與和平-冬山紅白線等，地理區位包括花蓮秀林鄉、宜蘭南澳鄉、宜蘭蘇澳鎮、宜蘭冬山鄉及宜蘭大同鄉等。

### 三、氣候風險評估基準

本研究整合 NCDR、水利署、氣象局、交通部運研所及台電公司等政府部會或組織公開的鄉鎮區位災害潛勢指標或研究資訊，以 5 分級法直接引用或加值運用。

本研究所稱危害度係指設施因氣候變遷衝擊造成危害事件發生的相對可能性，而影響危害度的因子包括設備因子：材質、強度提高或前處理工法等；管理因子：定期更換重要元件、維護保養頻率等措施。至於脆弱度乃依設施恢復供給能力的時間與金額區分 5 等級，影響脆弱度的條件包括設備因子：設備本身發生異常時，恢復供給能力所需時間或金額；管理因子：透過備品調度、人員訓練等加速復原。各等級對照表如表 1 與表 2 所示。

表 1 災害潛勢、危害度評估等級對照表

等級	1	2	3	4	5
機率	≤10%	10%~33%	33%~67%	67%~90%	>90%
重現期(年)	>100	100~25	25~10	10~5	≤5
敘述	絕少	偶而	可能	經常	幾乎確定
	非常低	低	中	高	非常高
	Very Low	Low	Moderate	High	Very High
代號	VL	L	M	H	VH

資料來源：本研究整合製作，2011 年

表 2 脆弱度評估等級對照表

脆弱度等級	1	2	3	4	5
恢復供應能力時間 <sup>[5]</sup>	1 小時以下	1~3 小時	3~12 小時	12 小時~3 天	3 天以上
資產毀損*(萬元)	≤1	1~20	20~250	250~2,500	>2,500

\*：以和平電力公司財務影響程度指數調整為 5 等級。

資料來源：本研究整合製作，2014 年

為使氣候變遷風險評估更具可操作性，本研究特別針對 8 項氣候衝擊精進災害潛勢、敏感度及危害度評估方式，摘要說明如下。

(一) 平均氣溫上升結合鹽害造成設備短路或設備腐蝕

依據 CNS 13401 氯鹽腐蝕環境等級分類<sup>[6]</sup>分成 5 分級法，另外，輸電線路因鹽害造成短路另一評估基準係參考台電公司架空線路維護訂定週期原則所列之距海岸距離 5 等級方式，進而訂

定災害潛勢等級，而影響鹽害短路的敏感因子包含保養週期與清洗週期，如表 3 所示。

至於鹽害造成設備腐蝕部分，亦參考 CNS 13401 金屬材料大氣腐蝕環境分類-依金屬腐蝕速率<sup>[6]</sup>分成 5 分級法訂定災害潛勢等級，而敏感因子主要參考無塵室粉塵微粒移除率或簡化為放置環境、設備耐用/保護年限、保養週期、點檢處理週期等因子所建立，參見表 4。

表 3 平均氣溫上升結合鹽害造成設備短路之評估基準

分級	災害潛勢			敏感度			危害度
	1-1 氯鹽沈積速率 (mg/m <sup>2</sup> /day)	1-2 架空線路距海岸 (km)	積分	1-1 保養週期 (年)	1-2 清洗週期 (月)	積分	積分
1	≤3	>30	1	≤0.5	≤6	0.2	<2
2	3~60	10~30	3	0.5~1	6~12	0.4	2-4
3	60~300	3~10	5	1~5	12~24	0.6	4-6
4	300~1500	1~3	7	5~10	24~36	0.8	6-8
5	>1500	≤1	9	>10	>36	1	>8

危害度=災害潛勢積分 x 敏感度積分

資料來源：本研究整合製作，2015 年

表 4 平均氣溫上升結合鹽害造成設備腐蝕之評估基準

分級	災害潛勢					敏感度					危害度	
	碳鋼腐蝕速率 (μm/yr)	鋅腐蝕速率 (μm/yr)	銅腐蝕速率 (μm/yr)	鋁腐蝕速率 (μm/yr)	積分	1-1移除率 (%)	1-2環境	2-設備耐用/保護年限 (年)	3-1保養週期 (年)	3-2點檢處理週期 (年)	積分	積分
1	<=1.3	<=0.1	<=0.1	可忽視	1	>90	-	>20	<=0.5	<=0.5	0.2	<2
2	1.3~25	0.1~0.7	0.1~0.6	<=0.6	3	67~90	-	15~20	0.5~1	0.5~1	0.4	2-4
3	25~50	0.7~2.1	0.6~1.3	0.6~2	5	33~67	設施位於室內有空調	10~15	1~5	1~2	0.6	4-6
4	50~80	2.1~4.2	1.3~2.8	2~5	7	10~33	設施位於室內無空調	5~10	5~10	2~3	0.8	6-8
5	80~200	4.2~8.4	2.8~5.6	5~10	9	<=10	設施位於室外	<=5	>10	>3	1	>8

危害度=災害潛勢積分 x 敏感度 1 積分 x 敏感度 2 積分 x 敏感度 3 積分  
 資料來源：本研究整合製作，2015 年

(二) 暴雨沖毀

本項衝擊災害潛勢係參考 NCDR 製作之全國鄉鎮市區氣象風險指數圖，而在敏感度方面，本研究先以水利建造物檢查及安全評估技術規範-防水、洩水建造物篇之表格<sup>[7]</sup>所列內容，擬定適合之敏感度因子後，再經和平電力公司專家討論訂定之，詳如表 5。

(三) 坡地災害(降雨促崩)

本研究於取得經濟部中央地質調查所 200 年重現期 1 日累積雨量降雨促崩潛勢之原始資料後，整合繪製全臺降雨促崩潛勢圖資並分成 5 等級作為災害潛勢評估基礎，另外藉由和平電力公司專家討論訂定敏感度因子如表 6 所示。

表 5 暴雨沖毀之評估基準

分級	災害潛勢	敏感度						危害度
	NCDR 氣象指標積分	1-鄰近崩塌距離 (m)	外在環境敏感度積分	2-1鐵塔垂直度變化	2-2塔基結構損壞	2-3鐵塔結構損壞	自身結構敏感度積分	積分
1	1	>60	0.2	低	低	低	1	<2
2	3	45~60	0.4					2-4
3	5	30~45	0.6	中	中	中	1.5	4-6
4	7	15~30	0.8	高	高	高	2	6-8
5	9	<=15	1					>8

危害度=災害潛勢積分 x 敏感度 1 積分 x 敏感度 2 積分平均

資料來源：本研究整合製作，2015 年

表 6 坡地災害(降雨促崩)之評估基準

分級	災害潛勢		敏感度			危害度
	地調所200年24小時降雨促崩等級	積分	1-坡度	2-高度	積分	積分
1	-	1 (平地)	低	低	0.3	<2
2	藍	3 (坡地)				2-4
3	綠	5	中	中	0.6	4-6
4	黃	7	高	高	0.9	6-8
5	紅	9				>8

危害度=災害潛勢積分 x 敏感度積分平均

資料來源：與和平電力公司專家討論後訂定，本研究整合製作，2015 年

(四) 暴雨淹水

本項衝擊災害潛勢乃參考 NCDR 於極端降雨 600 mm/日下模擬各鄉鎮市淹水深度，依淹水深度分成 5 等級所製作的淹水現況指數<sup>[8]</sup>，另外，經查詢得到該區位雨量站年平均降雨量，帶入水土保持技術規範降雨強度計算公式<sup>[9]</sup>如下：

$$\frac{I_t^T}{I_{60}^{25}} = (G + H \log T) \frac{A}{(t + B)^C}$$

$$I_{60}^{25} = \left( \frac{P}{25.29 + 0.094P} \right)^2$$

$$A = \left( \frac{P}{-189.96 + 0.31P} \right)^2$$

B=55

$$C = \left( \frac{P}{-381.71 + 1.45P} \right)^2$$

$$G = \left( \frac{P}{42.89 + 1.33P} \right)^2$$

$$H = \left( \frac{P}{-65.33 - 1.836P} \right)^2$$

其中

T：重現期距(年)

t：降雨延時或集流時間(分)

$I_t^T$ ：重現期距 T 年，降雨延時 t 分鐘之降雨強度 (mm/小時)

$I_{60}^{25}$ ：重現期距 25 年，降雨延時 60 分鐘之降雨強度(mm/小時)

P：年平均降雨量(mm)

A、B、C、G、H：係數

依上述公式得到不同重現期雨量，並以廠區排水設計對照重現期評估敏感度，而其他敏感度因子尚考量防洪設計、防淹水設施等，如表 7 所示。

(五) 強風吹毀或強風結合樹林效應

參考中央氣象局颱風等級與 10 分鐘平均風速資料<sup>[10]</sup>，建立災害潛勢 5 分級，再依各設施耐風設計值對應敏感度因子進行評估，相關資訊如表 8 所列。

表 7 暴雨淹水之評估基準

等級	災害潛勢	敏感度			危害度	
	NCDR淹水現況 風險積分	1-廠內排水設 計值(年)	2-防洪設計-設備 離地高度(m)	3-防淹水 設計	積分	積分
1	1	>100	>2	防水匣 門、抽水 機等。	0.2	<2
2	3	25~100	1.5~2		0.4	2~4
3	5	10~25	1~1.5		0.6	4~6
4	7	5~10	0.5~1		0.8	6~8
5	9	<=5	0~0.5	無	1	>8

危害度=災害潛勢積分 x 敏感度 1 積分 x 敏感度 2 積分 x 敏感度 3 積分

資料來源：本研究整合製作，2015 年

表 8 強風吹毀/強風結合樹林效應之評估基準

颱風強度	災害潛勢		敏感度				危害度	
	10分鐘平均 風速(m/s)	強風結合樹林效應(m/s) 10分鐘平均風速÷3	分級	積分	分級	積分	分級	積分
熱帶性低氣壓	<=17.1	<=5.7	1	1	5	1	1	<2
輕度颱風	17.1~32.6	5.7~10.9	2	3	4	0.8	2	2-4
中度颱風	32.6~50.9	10.9~17.0	3	5	3	0.6	3	4-6
強烈颱風	50.9~70	17.0~23.3	4	7	2	0.4	4	6-8
	>70	>23.3	5	9	1	0.2	5	>8

危害度=災害潛勢積分 x 敏感度積分

資料來源：本研究整合製作，2015 年

### (六) 閃電雷擊

本項衝擊以台電公司 1989 年至 2011 年對地落雷資料為基礎，再參考各鄉鎮區位面積計算對地落雷密度後換算重現期，對照表 1 得到潛勢等級。而發電廠雷擊危害度評估乃參考雷擊保護標準之公式<sup>[11]</sup>，以廠區面積、最高建築物高度計算有效截面積，再依相對位置修正係數與避雷設施保護率計算，公式如下所示：

$$N_D = N_g \times A_d \times C_d \times 10^{-6}$$

$N_g$ ：對地落雷密度(次/km<sup>2</sup>/年)

$$A_d = \text{有效截面積}(m^2) = LW + 6H(L+W) + 9\pi H^2$$

$C_d$ ：相對位置修正係數

L：建築物長度(m)

W：建築物寬度(m)

H：最高建築物高度(m)

至於輸電線路雷擊風險計算乃參考 IEEE-Std. 1243-1997 提高輸電線路雷擊保護指引之公式<sup>[12]</sup>，於求得輸電鐵塔雷擊次數  $N_D$ (次/年)後，再依避雷設施保護率計算其危害度，計算公

式如下：

輸電鐵塔雷擊次數(次/百公里/年)：

$$N_s = N_g \times (28 \times h^{0.6} + b) \times 10^{-1}$$

$N_g$ ：對地落雷密度(次/km<sup>2</sup>/年)

h：鐵塔高度(m)

b：架空地線分開距離(m)

輸電鐵塔雷擊次數(次/年)：

$$N_D = N_s \times L_d \times C_d \times 10^{-2}$$

$N_s$ ：雷擊機率(次/百公里/年)

$L_d$ ：線路長度(km)

$C_d$ ：相對位置修正係數

### 四、風險等級

本研究由危害度×脆弱度並以 5×5 二維矩陣方式呈現風險等級，而風險等級乃參考台電風險評估方法<sup>[13]</sup>分為低度風險到極高風險，另針對最高脆弱度與最高危害度保留提升風險等級的彈性，如圖 5 所示。



資料來源：台灣電力公司，2011 年

圖 5 風險等級說明

## 參、研究結果

### 一、氣候風險辨識

依據本研究建立之氣候衝擊與複合因子關連，蒐集分析國內外氣候變遷相關研究、花蓮縣與宜蘭縣之氣候災害潛勢資料、和平電力公司歷

史災害事件與影響範圍等，從 20 項氣候衝擊項目中篩選為 8 項，再參考各部會公開之風險地圖或統計觀測資料，依所建立之氣候風險評估基準，進行各區位氣候衝擊分析與災害潛勢評估，評估結果如表 9 所示。

表 9 氣候衝擊分析與災害潛勢評估結果

氣候衝擊項目	鄉鎮區位災害潛勢等級					參考或引用資料
	花蓮 秀林鄉	宜蘭 南澳鄉	宜蘭 蘇澳鎮	宜蘭 冬山鄉	宜蘭 大同鄉	
平均氣溫上升結合鹽害造成設備短路	5	5	5	3	2	• 台電架空線路維護週期原則。
平均氣溫上升結合鹽害造成設備腐蝕	5	-	-	-	-	• 僅發電廠納入本項衝擊。 • 交通部運研所港研中心碳鋼腐蝕速率。
暴雨沖毀	5	5	5	4	4	• NCDR 全國鄉鎮市區氣象風險指數。
坡地災害(降雨促崩)	1	5	5	4	2	• 經濟部中央地調所和平溪流域 200 年重現期 1 日累積雨量降雨促崩潛勢。
暴雨淹水	1	-	-	-	-	• 僅發電廠納入本項衝擊。 • NCDR 全國淹水現況指標。
強風吹毀	4	3	3	3	3	• 氣象局各等級颱風強度 10 分鐘平均風速。
強風吹毀結合樹林效應(風速降為 1/3)	5	5	5	5	5	• 氣象局各等級颱風 10 分鐘平均風速除以 3。
閃電雷擊	1	1	1	1	2	• 台電 1989 年~2011 年對地落雷次數除以各鄉鎮市區面積換算落雷密度。

資料來源：本研究繪製，2014 年

## 二、設施基礎資料盤查

發電廠的設施主要包括飼水系統、汽輪機系統、冷凝系統、進水口系統、水廠、室內煤倉、室內煤倉堆取煤機、輸送系統、燃料系統、空氣系統、蒸汽系統、環保設施、廠用高低壓開關設備、主變壓器、燃油緊急發電機、345KV 開關場、相關儀控設施及上下游設施、週邊設施等共 30 項。

而輸電線路的設施清單包括和平-冬山紅白線架空線路的 123 座鐵塔，以區位分類共 10 項設施，另外，本研究亦同步蒐集各區位架空線路之鐵塔座標、回線長度、鐵塔高度、架空地線分開距離、各鐵塔距海岸距離等資訊，作為後續評估危害度之參考。

## 三、設施風險分析與風險評量

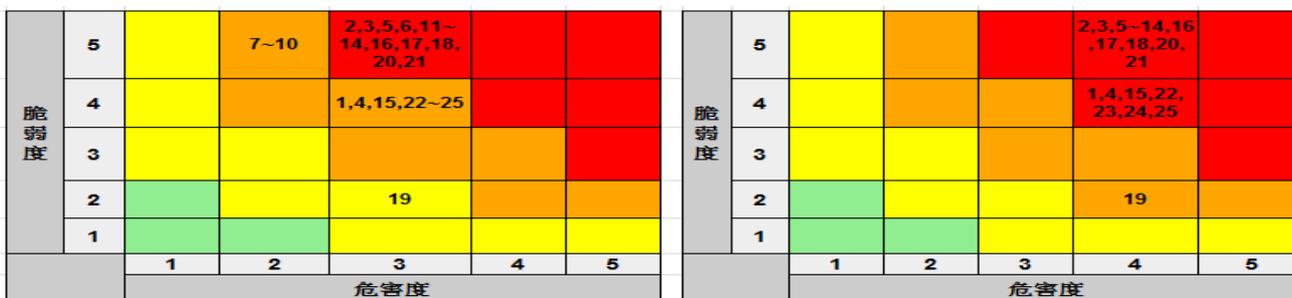
本研究針對盤查之各項設施，透過氣候變遷調適推動小組與相關權責人員之歷史經驗、設施維護保養狀況及設計規範等資訊，依風險評估基準，利用與和平電力公司專家討論方式進行不同氣候衝擊對應各項設施之危害度與脆弱度評估，接著進行交叉風險分析。設施潛在風險係為各區位氣候衝擊災害潛勢等級乘以各設施脆弱度等級，而現況風險則指在現有調適措施下設施危害度等級乘以設施脆弱度等級之結果，風險矩陣之數字為設施編號。從風險辨識的 8 項氣候衝擊經過風險評量後，設施現況風險中列為高度風險以上的關鍵氣候衝擊包括平均氣溫上升結合鹽害造成設備腐蝕、強風吹毀、暴雨沖毀、坡地災害(降雨促崩)等 4 項，交叉風險分析結果如圖 6~圖 9 所示。

發電廠降低供給能力損失風險-平均氣溫上升結合鹽害造成設備腐蝕  
設施現況風險 設施潛在風險



圖例說明：極高風險 高度風險 中度風險 低度風險

發電廠降低供給能力損失風險-強風吹毀  
設施現況風險 設施潛在風險

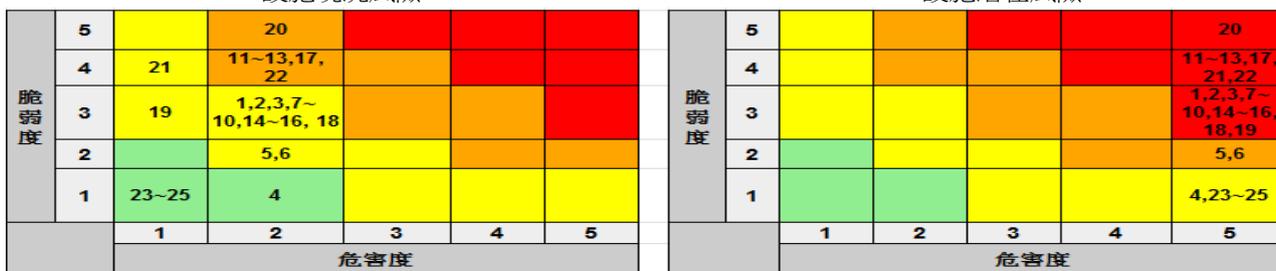


圖例說明：極高風險 高度風險 中度風險 低度風險

備註：數字為盤查設施編號／資料來源：本研究繪製，2014 年

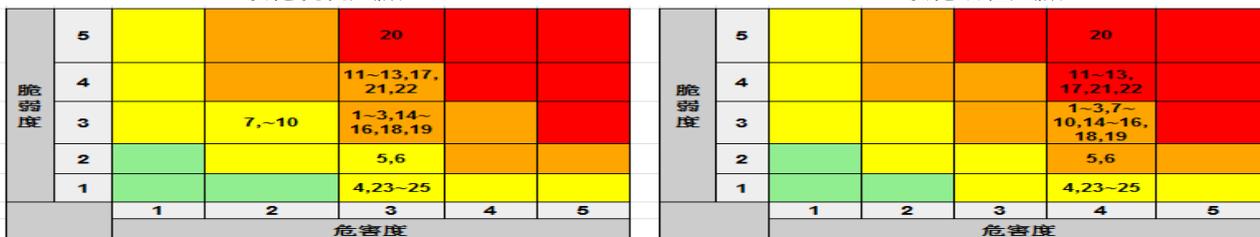
圖 6 發電廠因關鍵氣候衝擊導致供給能力損失之交叉風險分析

發電廠資產毀損風險-平均氣溫上升結合鹽害造成設備腐蝕  
設施現況風險 設施潛在風險



圖例說明：極高風險 高度風險 中度風險 低度風險

發電廠資產毀損風險-強風吹毀  
設施現況風險 設施潛在風險



圖例說明：極高風險 高度風險 中度風險 低度風險

備註：數字為盤查設施編號／資料來源：本研究繪製，2014 年

圖 7 發電廠關鍵氣候衝擊導致資產毀損之交叉風險分析

輸電線路降低供給能力損失風險-暴雨沖毀

設施現況風險

脆弱度	5	5,6		3,4		
	4					
	3					
	2					
	1					
		1	2	3	4	5
		危害度				

設施潛在風險

脆弱度	5					3-6
	4					
	3					
	2					
	1					
		1	2	3	4	5
		危害度				

圖例說明：極高風險 高度風險 中度風險 低度風險

輸電線路降低供給能力損失風險-坡地災害(降雨促崩)

設施現況風險

脆弱度	5	1,2,9,10	5,6,7,8	3,4		
	4					
	3					
	2					
	1					
		1	2	3	4	5
		危害度				

設施潛在風險

脆弱度	5	1,2	9,10		7,8	3,4,5,6
	4					
	3					
	2					
	1					
		1	2	3	4	5
		危害度				

圖例說明：極高風險 高度風險 中度風險 低度風險

輸電線路降低供給能力損失風險-強風吹毀

設施現況風險

脆弱度	5					
	4		3,4,5,6,7,8,9,10	1,2		
	3					
	2					
	1					
		1	2	3	4	5
		危害度				

設施潛在風險

脆弱度	5					
	4			3,4,5,6,7,8,9,10	1,2	
	3					
	2					
	1					
		1	2	3	4	5
		危害度				

圖例說明：極高風險 高度風險 中度風險 低度風險

備註：數字為盤查設施編號

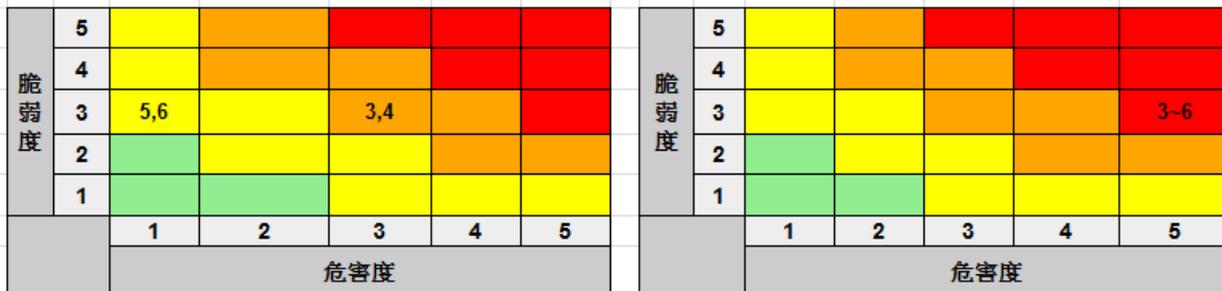
資料來源：本研究繪製，2014年

圖 8 輸電線路因關鍵氣候衝擊導致供給能力損失之交叉風險分析

輸電線路資產毀損風險-暴雨沖毀

設施現況風險

設施潛在風險

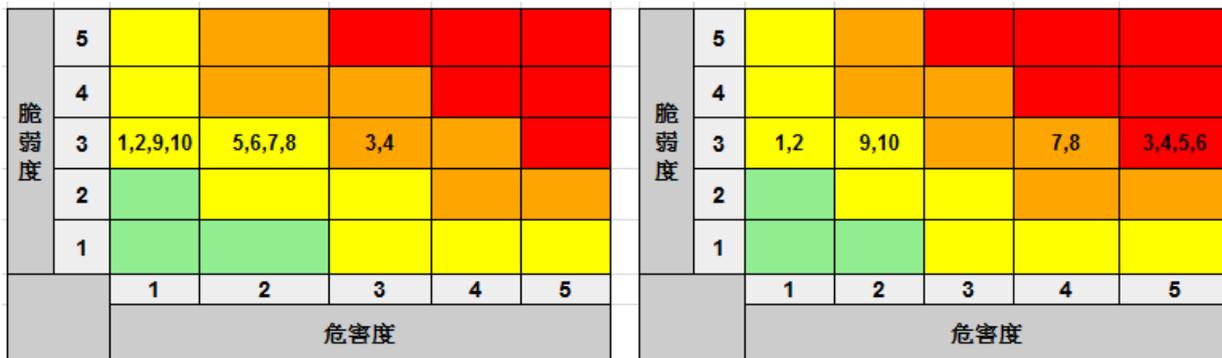


圖例說明： 極高風險 高度風險 中度風險 低度風險

輸電線路資產毀損風險-坡地災害(降雨促崩)

設施現況風險

設施潛在風險

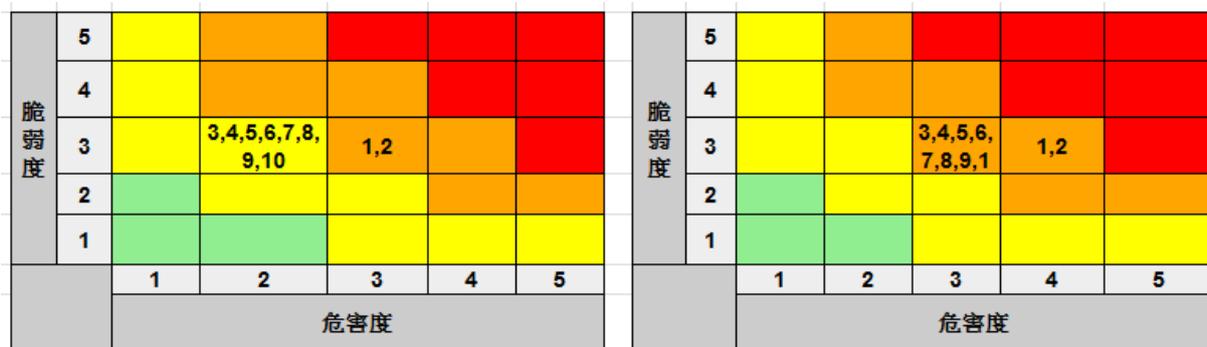


圖例說明： 極高風險 高度風險 中度風險 低度風險

輸電線路資產毀損風險-強風吹毀

設施現況風險

設施潛在風險



圖例說明： 極高風險 高度風險 中度風險 低度風險

備註：數字為盤查設施編號

資料來源：本研究繪製，2014 年

圖 9 輸電線路關鍵氣候衝擊導致資產毀損之交叉風險分析

## 肆、結論與建議

本研究從大範圍的鄉鎮區位氣候衝擊分析與災害潛勢評估快速篩選後，再縮小至各項設施的危害度與脆弱度評估，初步掌握發電廠與和平-冬山紅白線的關鍵氣候變遷風險。對於發電廠設施而言，主要氣候風險包括：平均氣溫上升結合鹽害造成設備腐蝕、強風吹毀等 2 項；而輸電線路主要氣候風險則為暴雨沖毀、坡地災害(降雨促崩)、強風吹毀等 3 項。

有關平均氣溫上升結合鹽害造成設備腐蝕，若以一般化學反應速率估算，溫度每增加 1.4 °C，腐蝕速率約增加 10%，發電廠規劃運轉至 2037 年，在氣候變遷下，建議留意設施保養週期、點檢處理週期之頻率是否應縮短；而強風吹毀部分，依據臺灣氣候變遷科學報告<sup>[14]</sup>統計 1950~2009 年的風速變化，在颱風影響下，花蓮地區強風每 10 年增量 0.07m/s，而宜蘭地區每 10 年增量 0.10m/s，因此發電廠設施與鐵塔線路之耐風設計值是否足以因應至 2037 年運轉期間，或設施因鹽害腐蝕造成耐風強度變低等，都是需要持續關切的重點；至於暴雨沖毀與坡地災害(降雨促崩)，隨著全球氣溫持續上升導致降雨重現期縮短或強度增加，都可能使土石沖刷引發河川潰堤或降雨促崩變得更加頻繁，建議持續留意未來的風險變化，並強化調適能力。

至於上下游與週邊設施的定性評估方面，目前和平港碼頭並無中潛勢以上的衝擊項目，且廠方建置 3 座煤倉足以供應約 30 天；至於下游設施冬山 E/S 經套疊地質常用 WMS 服務圖資<sup>[15]</sup>發現圍牆周圍有岩屑崩滑的中潛勢，由於冬山 E/S 為發電廠全黑時仰賴的外電來源之一，建議持續注意此超高壓變電所面臨的氣候衝擊。

而為使氣候風險評估更具可操作性，本研究於 2014 年特別針對 8 項氣候衝擊，精進災害潛勢與敏感度量化方式，以及危害度評估基準等，並首創國內能源產業之先例，針對發電與輸電線

路等各項設施進行資產毀損風險評估，未來如與專家學者討論修正時，建議重新檢討評估結果。

隨著臺灣氣候變遷推估與資訊平台計畫(簡稱 TCCIP)針對 IPCC AR5 模擬結果，已於 2015 年建立臺灣極端降雨、極端高溫等不同情境推估資料，而溫室氣體減量及管理法亦於 2015 年 7 月 1 日發布，待日後氣候變遷調適研究資料更為完整時，建議本案例定期檢討修正風險評估報告，並對近未來(2020 年~2039 年)或世紀末的氣候變遷風險予以更細緻的評估，以掌握極端氣候事件可能帶來的潛在衝擊，並作為氣候變遷調適措施規劃之參考。

## 伍、誌謝

本研究承蒙經濟部能源局之經費補助(計畫編號：103-A0205)，謹致謝忱，並感謝和平電力公司氣候變遷調適推動小組成員的鼎力協助與支持。

## 陸、參考文獻

- [1] 經濟部能源局，能源產業因應氣候變遷調適輔導計畫執行報告，2014 年，附件三，第 38-62 頁。
- [2] 陳禹銘、蘇昭郎、黃詩倩，「災害風險評估研究之探討」，災害防救電子報第 48 期，2009 年，第 2 頁。
- [3] 謝龍生、陳聯光、蘇昭郎、葉森海，「災害潛勢資料」，科學發展月刊第 410 期，2007 年，第 16 頁。
- [4] IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, 2007.
- [5] World Bank, "Climate Vulnerability Assessment," Final Report No. 53331-ALB, 2009.
- [6] 交通部運研所港研中心，2012 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查資料年報，2013 年。
- [7] 經濟部水利署，水利建造物檢查及安全評估技術規範-防水、洩水建造物篇-表格彙總，2011 年。
- [8] 盧鏡臣、陳永明、張志新、郭彥廉，「台灣在氣

- 候及環境變遷下之淹水風險評估—鄉鎮層級的評估」，國家災害防救科技中心，2010 年。
- [9] 行政院農委會水保局，水土保持技術規範，2012 年。
- [10] 中央氣象局網站，2014 年，[http://www.cwb.gov.tw/V7/hottopic/typhoon\\_type.pdf](http://www.cwb.gov.tw/V7/hottopic/typhoon_type.pdf)。
- [11] Lightning Protection, IEC EN 62305 Standard, 2011.
- [12] 洪得峻，「架空輸電線路之防雷策略及其接地系統之雷擊特性研究」碩士論文，中原大學，2004 年，第 19 頁。
- [13] 台灣電力公司，風險管理實施方案修訂 2 版，2011 年。
- [14] 臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫，臺灣氣候變遷科學報告 2011，國科會，2011 年。
- [15] 經濟部中央地質調查所，地質常用 WMS 服務 2013，2014 年，<http://gwh.moeacgs.gov.tw/mp/Portal/wms.cfm>。

### 台電工程月刊徵稿啟事

- \* 為使本刊物之內容更臻完善，歡迎有關火（水）力發電、核能發電、再生能源、輸變電、配電、電力系統、能源與環境、化學與材料、資訊與電腦、工程技術及其他等相關論著、技術經驗及譯者踴躍投稿，以饗讀者。
- \* 投稿相關事宜，若有任何疑問，請聯絡我們，謝謝您！

☎ (02)2360-1095    ✉ [u117212@taipower.com.tw](mailto:u117212@taipower.com.tw)

# 台電系統負載模型參數量測與驗證 (二)：動態負載模型參數識別及統計分析程式 LM\_ID 開發與應用

Parameter Measurements and Verifications of Dynamical Load Model in Taipower System (2) :  
Development and Application of Load Model Parameters Identification  
and Analysis Program LM\_ID

李盛輝*	朱家齊**	林堉仁***	徐書敏**
Lee, Sheng-Huei	Chu, Chia-Chi	Lin, Yu-Jen	Hsu, Shu-Min
林群峰****	蒲冠志****	廖清榮****	楊金石****
Lin, Chun-Feng	Pu, Guan-Chih	Liao, Ching-Jung	Yang, Jin-Shyr

## 摘要

現今電力公司進行電力系統模擬分析多以參考 IEEE 負載模型文獻，採用靜態負載模型進行系統穩定度模擬；而實際系統存在著多種不同型式的負載類型，並影響著系統模擬結果。因此若能透過實測與調查，並以數值分析方式，將能更貼近且符合不同區域之負載型式，進而使系統模擬結果更加貼近實際狀況，有助於瞭解全系統運轉時變化情形，加強電網分析之可靠與準確度。現有以監錄量測法作負載模型參數識別程式中較知名的是美國電力協會 EPRI 所開發的負載模型資料處理與參數識別程式(Load Model Data Processing and Parameter Derivation, LMDPPD)<sup>[1]</sup>，但 LMDPPD 僅對感應電動機+ZIP 負載模型之模型作參數識別，應用機會有限。為考量文獻上現有之各種負載模型，本研究團隊自行開發一套負載模型參數識別程式 LM\_ID，可用以識別多種靜態負載模型及動態負載模型，本文詳細介紹該負載模型參數識別程式使用的演算法及操作方法，並與 LMDPPD 程式之功能作比較。

## Abstract

Traditionally, the load is usually simulated as a static model in dynamic power system stability assessment. However, these static load models are not inaccurate enough to reflect the real mechanisms as observed by operators, especially in severe disturbances of the system. The purpose of this paper is to develop a more realistic dynamic load modelling tool for stability assessment. Currently, Load Model Data Processing and Parameter Derivation (LMDPPD) is the most well-known commercial software for automating the derivation of load model parameters using the measurement-based approach which was developed by Electric Power Research Institute (EPRI). However, the LMDPPD is specially designed to identify the model parameters of the loads composed of induction motors and conventional ZIP loads. Its applications, however, are rather limited in the practice of the power industry. To this end, we

\*健行科技大學電機工程系

\*\*國立清華大學電機系

\*\*\*義守大學工程系

\*\*\*\*台灣電力公司綜合研究所

have developed a novel load model parameter identification program LM\_ID. The LM\_ID can be utilized to identify the parameters of 5 static load models and 12 dynamic load models. This paper describes numerical algorithms, source code developments, and operational steps of this program. LM\_ID is a novel load model parameter identification program, which is developed by the research team members of the Taipower's research project "Load Model Parameter Identification and Verification for Taipower System". This paper introduces the details of the algorithms and the operational procedures of this program and makes a comparison between LMDPPD and LM\_ID.

**關鍵詞(Key Words)：**負載模型 (Load Models)、模型參數識別(Model Parameter Identification)、監錄為基礎的方法(Measurement-based Method)、萊文貝格-馬夸特最佳化演算法(Levenberg-Marquardt Optimization Algorithm)、線性化最小平方誤差演算法(Linear Least Square Error Algorithm)。

### 壹、前言

負載模型參數識別 (Load Model Parameters Identification, LM\_ID) 程式係依台灣電力股份有限公司 104 年度研究計畫「台電系統負載模型參數量測與驗證」之需求，由研究團隊自行開發之

程式。其執行畫面如圖 1，可直接讀取台電重要變電所之監錄設備所記錄之監錄記錄檔，經程式將所記錄之事件發生前後各匯流排三相電壓及主變壓器電流瞬時值轉換為電壓相量、頻率及三相有效功率與無效功率後，進行負載模型參數之識別與驗證。LM\_ID 程式的特點包括：

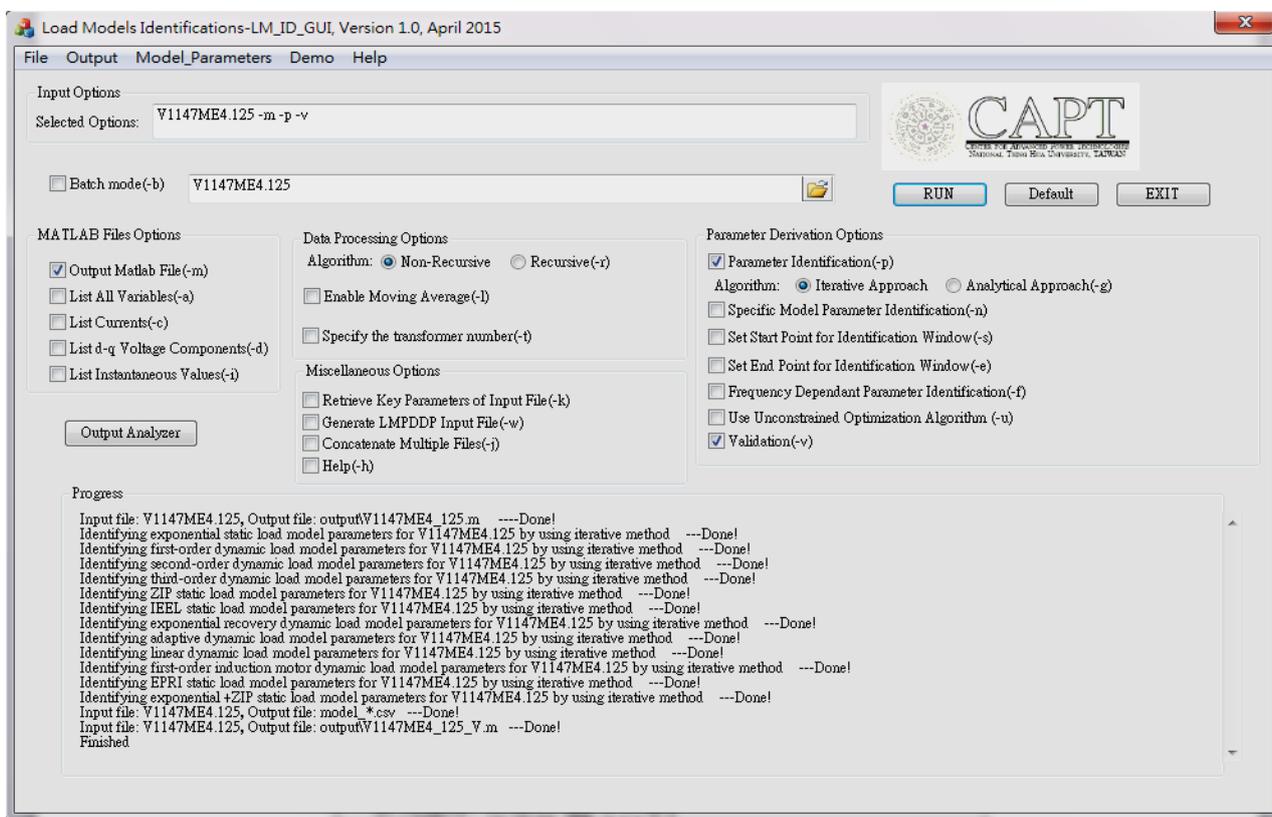


圖 1 負載模型參數識別程式 LM\_ID 執行畫面

- 一、可直接讀取台電重點變電所監錄設備所記錄之監錄記錄檔。
- 二、可輸出具圖形繪製功能之 MATLAB 格式輸出檔。
- 三、可選擇遞迴或非遞迴演算法計算相量。
- 四、可啟用輸入資料之移動平均濾波。
- 五、可啟用批次模式，對資料夾內之所有監錄記錄檔作整批之負載模型參數識別與驗證。
- 六、可指定負載模型參數識別所使用之資料視窗範圍。
- 七、可選擇對變電所之所有變壓器負載總和作模型參數識別，或對特定變壓器負載作模型參數識別與驗證。
- 八、可選擇使用解析法或迭代法作負載模型參數識別與驗證。
- 九、可識別及驗證 5 種靜態負載模型及 7 種動態負載模型之模型參數。
- 十、提供將台電重點變電所之監錄記錄檔轉換為符合 EPRI 之 LMDPPD 輸入格式之 csv 檔之功能。

LM\_ID 與監錄設備及 MATLAB 之關係如圖

2，說明如下：

監錄設備安裝在重點變電所即時偵測電力系統的狀態，當偵測到系統有異常發生時，自動將之三相匯流排電壓及饋線電流值儲存在監錄記錄檔中。

LM\_ID 程式可讀取監錄記錄檔內所記錄的三相電壓、電流瞬時值的資料，先轉換為相量型式，並計算頻率及負載功率，再根據負載功率對電壓、頻率的變化關係來識別負載模型參數，並產生可顯示圖形結果的 MATLAB script。識別出之負載模型參數儲存成逗點分隔值(CSV)文件檔，可用 EXCEL 程式檢視內容；MATLAB script 可用 MATLAB 或 GNU Octave 執行。

MATLAB 或 GNU Octave 用以執行 LM\_ID 所產生的顯示圖形結果之 MATLAB script，除了可繪製相關電壓、電流、負載功率波形變化之外，

亦提供負載功率測量值及負載模型之功率模擬值波形變化比較圖以及負載模型參數的統計圖。該 MATLAB script 除了可在 MATLAB 環境下執行之外，亦相容於 GNU Octave，因此在未購買 MATLAB 程式的情況下，安裝免費的 GNU Octave 亦可執行 LM\_ID 所生成 MATLAB Script 以顯示圖形結果。

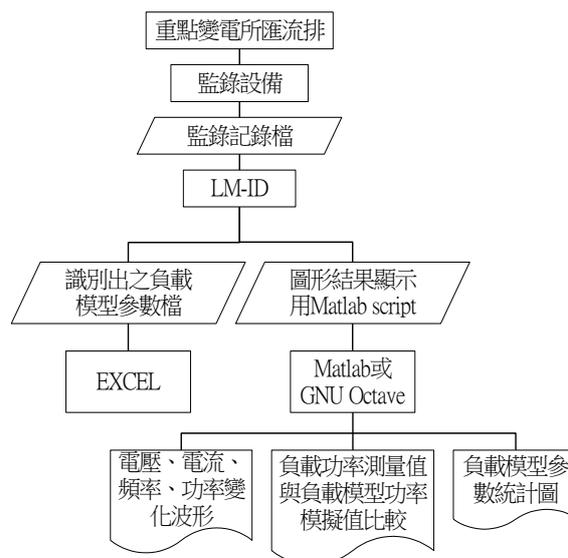


圖 2 LM\_ID 與監錄設備及 MATLAB 之關係

## 貳、LMDPPD 與 LM\_ID 之比較

LMDPPD 是由 EPRI 於西元 2009 年所開發的軟體，用來建立負載模型(Load Model, LM)之數據資料處理(Data Processing, DP)，與參數推導(Parameter Derivation, PD)<sup>[1]</sup>。其包括 3 個可執行程式檔案：FindSbase.exe 及 timetorms.exe 負責數據資料處理，LMPD.exe 負責參數推導。其中 FindSbase.exe 從量測資料裡，計算出適當的容量基準值。timetorms.exe 將量測得到的電壓、電流、有效功率、無效功率瞬間值，轉換成正相序、標么值。LMPD.exe 則使用最佳化演算法，計算出負載模型的參數。LMDPPD 專門用來識別感應電動機+ZIP 負載模型之參數。LMDPPD 所需之輸入檔案為逗點分隔符號格式檔案，儲存之資料為

一組三相電壓之瞬時值及一組三相電流之瞬時值，且取樣頻率限制為 7680Hz。

LM\_ID 之數據資料處理、參數推導及模型驗證功能整合在單一程式中，LM\_ID 可用於識別多種靜態及動態負載模型，包括：靜態指數模型<sup>[6, 7]</sup>、靜態 PSS@ E IEEL 模型<sup>[6, 8]</sup>、靜態 ZIP 模型<sup>[6, 8]</sup>、靜態 EPRI 模型<sup>[6]</sup>、靜態 ZIP-指數模型<sup>[6]</sup>、動態一階轉移函數模型<sup>[4]</sup>、動態二階轉移函數模型<sup>[4]</sup>、動態三階轉移函數模型<sup>[4]</sup>、動態指數恢復模型<sup>[5]</sup>、動態適應負載模型<sup>[5]</sup>、動態線性負載模型<sup>[5]</sup>及動態一階感應電動機負載模型<sup>[5, 7, 8]</sup>。

LM\_ID 所需之輸入檔案為台電監錄設備所記錄之二進位格式檔案，並支援批次處理功能，可將同一資料夾內之所有監錄記錄檔作負載模型參數識別。監錄記錄檔所儲存的資料可包括多組三相電壓之瞬時值及多組三相電流之瞬時值，連接相同負載匯流排之多組主變壓器電流可自動加總，取樣頻率為 3840Hz。

## 參、研究方法

使用監錄量測法作負載模型識別與驗證流程如圖 3。首先需取得台電重要變電所監錄設備所捕捉到的監錄記錄檔，其記錄了觸發監錄設備動作之事件發生前後的變電所匯流排電壓及各變壓器負載側的三相電流瞬時值；接著批次地將監錄記錄檔中所記錄的瞬時值轉換為電壓相量、頻率及三相有效功率與無效功率，並依據事件發生前後的電壓、頻率及功率變化量來判斷事件的類型，將不適合作負載模型參數識別的監錄記錄檔濾除。通過篩選的監錄記錄檔所轉換電壓、頻率、有效功率與無效功率可用於負載模型參數識別；將識別得到的負載模型模擬在指定電壓與頻率變化下的有效功率與無效功率之變化，並與測量值作比較，以進行匯流排層級之負載模型驗證；統計多筆監錄記錄檔所識別出之負載模型參數可得到變電所最佳之負載模型；將變電所最佳之負載模型加入 PSS@ E 動態模擬，比較模擬之系

統響應與實際系統響應即可作系統層級之負載模型驗證。

LM\_ID 負載模型參數識別程式的核心功能係以 C++ 程式語言撰寫，並以微軟之 MFC 桌面應用程式製作使用者界面<sup>[2]</sup>，以單一程式實現了圖 3 中下列步驟所要求的功能：

- 一、批次分析監錄記錄檔；
- 二、濾除不適合負載模型參數識別之事件；
- 三、對監錄記錄檔作負載模型參數識別；
- 四、匯流排層級之負載模型驗證；
- 五、統計分析各變電所被識別之負載模型參數。

以下介紹實現 LM\_ID 程式所用的用到的方法：

### 一、批次分析監錄記錄檔

批次分析監錄記錄檔流程如圖 4，詳細說明如下：

#### (一) 電壓、電流瞬時值之擷取

本計畫目前進行分析之監錄資料為台電綜合研究所所提供台電重點變電所共 11 站 P/S 及 D/S 所監錄之監錄記錄檔，該等監錄記錄檔係由歐華科技 ADX 3000 系列之電力多功能故障錄波儀所錄製，其可高速監錄三相電壓、電流等原始數據，並將被設定條件觸發前後特定期間的監錄資料存成監錄記錄檔。台電監錄設備通常設定的取樣頻率為 3840Hz，相當於每週波取樣 64 點。監錄記錄檔所記錄的時間通常設定為觸發前 1 秒至觸發後 2 秒。各站監錄設備觸發條件設定值如下，任一觸發條件成立即啟動故障錄波儀紀錄三相電壓及電流等數據：

1. 三相電壓突變量：8%；
2. 零序電壓突變量：5%；
3. 正序電壓上限：110%；
4. 正序電壓下限：90%；
5. 負序電壓上限：5%；
6. 零序電壓上限：3%；
7. 頻率上限：60.5Hz；
8. 頻率下限：59.5Hz；

9. 頻率變化上限: 0.1Hz/s。

歐華科技 ADX 3000 系列監錄設備所儲存的每一筆監錄記錄檔中均包括監錄設備的觸發條件設定值, 以及該筆記錄所觸發的條件。LM\_ID 由該監錄記錄檔中讀取該觸發條件設定值及被觸發的條件, 可據以濾除不合適作為負載模型參數識別之監錄記錄檔。由於 LM\_ID 程式能自行讀取該觸發條件的設定值, 當監錄設備設定的觸發條件改變時, LM\_ID 程式執行參數並不需要改變。

(二) 原始資料平滑化

LM\_ID 程式可選擇將原始資料套用(1)式之移動平均(Moving Average)做平滑化, 其具有低通濾波器的效果。由於台電使用之監錄設備所記錄之波形並未見明顯的高頻雜訊信號, 在 LM\_ID 程式中預設為略過原始資料平滑化步驟。

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i-j] \quad (1)$$

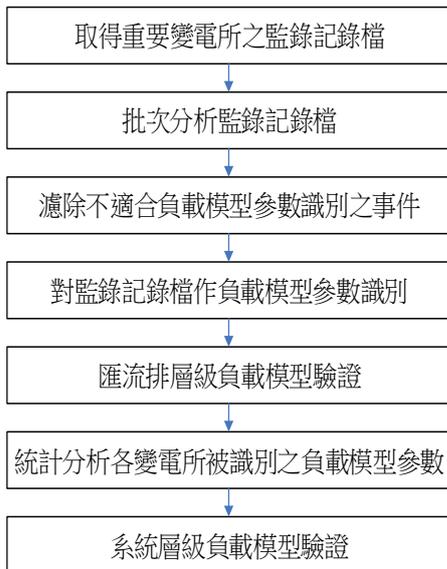


圖 3 監錄量測法負載模型識別與驗證流程



圖 4 批次分析監錄記錄檔流程

(三) 電壓與電流相量計算

LM\_ID 程式可以選擇 DFT 非遞迴演算法 (Non-recursive Method) 將三相瞬時值轉換為相量, 或選擇之遞迴演算法 (Recursive Method) 轉換為相量。

非遞迴演算法直接利用(2)之累加公式計算第 k 點之餘弦轉換  $X_c^{(k)}$  及正弦轉換  $X_s^{(k)}$ 。

$$\begin{aligned} \bar{X}^{(k)} &= X_c^{(k)} + jX_s^{(k)} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \left\{ \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

遞迴演算法先使用(3)式計算第一點之餘弦轉換  $X_c^{(1)}$  及正弦轉換  $X_s^{(1)}$ , 接著使用(4)-(5)式利用第 k-1 點之餘弦轉換  $X_c^{(k-1)}$  及正弦轉換  $X_s^{(k-1)}$  計算第 k 點之餘弦轉換  $X_c^{(k)}$  及正弦轉換  $X_s^{(k)}$ 。

$$\begin{aligned} \bar{X}^{(1)} &= X_c^{(1)} + jX_s^{(1)} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \left\{ \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} X_c^{(k)} &= X_c^{(k-1)} \\ &+ \frac{2}{N} (x_{k+N} - x_k) \cos\left[\frac{2\pi}{N} + (k-1)\right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$X_s^{(k)} = X_s^{(k-1)} + \frac{2}{N}(x_{k+N} - x_k) \sin \left[ \frac{2\pi}{N} + (k-1) \right] \quad (5)$$

將各點的餘弦轉換及正弦轉換代入

$$X(k) = \sqrt{(X_c^{(k)})^2 + (X_s^{(k)})^2} \quad (6)$$

$$\phi(k) = \tan^{-1}(X_s^{(k)}/X_c^{(k)}) \quad (7)$$

雖然 DFT 之遞迴演算法具有節省計算時間及記憶體使用量之優點，但在非標稱頻率 (Off-Nominal Frequency) 情況下，會有累積誤差的問題，因此 LM\_ID 程式預設選用非遞迴法作相量估測。

(四) 頻率估測

LM\_ID 程式之頻率計算可選用二次式估測或線性估測，當選擇二次式估測時，將解(8)式所得到之係數 $a_1$ ，代入(10)式可得到頻率之估測值；當選擇線性估測時，則將解(9)式所得到之係數 $a_1$ ，代入(10)式可得到頻率之估測值。

$$\begin{bmatrix} \phi^{(0)} \\ \phi^{(1)} \\ \phi^{(2)} \\ \vdots \\ \phi^{(N-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & \Delta t & \Delta t^2 \\ 1 & 2\Delta t & 2^2\Delta t^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & (N-1)\Delta t & (N-1)^2\Delta t^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \phi^{(0)} \\ \phi^{(1)} \\ \phi^{(2)} \\ \vdots \\ \phi^{(N-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & \Delta t \\ 1 & 2\Delta t \\ \vdots & \vdots \\ 1 & (N-1)\Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$f = 60 + \frac{\Delta\omega}{2\pi} = 60 + \frac{a_1}{2\pi} \quad (10)$$

其中 $\phi$ 為相角。

(五) 對稱分量計算

依對稱分量之定義，使用(11)、(12)式可得到電壓、電流之對稱分量。

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{a1} \\ \bar{U}_{b2} \\ \bar{U}_{c0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{a1} \\ \bar{I}_{a2} \\ \bar{I}_{a0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中 $\bar{U}_{a1}$ 、 $\bar{U}_{a2}$ 、 $\bar{U}_{a0}$ 分別為電壓之對稱分量， $\bar{I}_{a1}$ 、 $\bar{I}_{a2}$ 、 $\bar{I}_{a0}$ 分別為三相電流之對稱分量。

(六) 有效功率與無效功率計算

LM\_ID 程式使用對稱分量法 (Sequence Method) 計算複功率，依據定義，三相複功率可表示為：

$$P_T + jQ_T = [\bar{U}_{a1}\bar{I}_{a1}^* + \bar{U}_{a2}\bar{I}_{a2}^* + \bar{U}_{a0}\bar{I}_{a0}^*] \quad (13)$$

其中 $P_T$ 、 $Q_T$ 分別為三相有效功率與無效功率。

二、濾除不適合負載模型參數識別之事件記錄

暫時性故障所產生的小擾動適合作為負載模型參數識別，依據小擾動情況下所得的監錄記錄檔計算正序電壓、頻率、有效功率與無效功率之變化，可以識別出負載模型參數。若為停電事故、停電後復閉、故障前後之有效功率劇烈變化、故障前後之無效功率劇烈變化、故障前後之匯流排電壓劇烈變化、不對稱故障所產生之監錄記錄檔等，顯示電網結構發生變化，均不適合作為負載模型參數識別，應予濾除。而開關突波造成之電壓變動因電流變動有限，目前也暫不考慮。

三、負載模型參數識別

LM\_ID 程式可選擇使用線性化最小平方誤差法之解析法或使用非線最佳化之迭代法作負載模型參數識別。

使用線性化最小平方誤差法之解析法作負載模型參數計算的流程如圖 5 所示。首先將負載模型之 DAE (Differential Algebraic Equation) 作線性化，轉換為連續時間之狀態空間表示法，接著

將連續時間之狀態空間表示離散化為離散時間狀態空間表示，以得到差分方程式；並整理為超定線性聯立方程式組(Overdetermined Linear Equations)，以線性最小平方誤差法求解即可得到離散時間之負載模型參數；最後再將離散時間之負載模型參數轉換為連續時間之負載模型參數。

解析法具有求解速度快的優點，但將 DAE 作線性化為連續時間狀態空間表示及離散化為離散時間之狀態空間表示的過程往往十分繁複，而差分方程式也不一定可以整理成線性聯立方程式；且離散時間負載模型參數換算成連續時間負載模型參數的解不一定存在，解也不一定唯一，也無法考量模型參數的限制條件。因此解析法在應用上有很大的限制，僅適用於不考慮參數限制條件之簡單負載模型。LM\_ID 程式現階段已實現了以解析法識別靜態指數負載模型、動態一至三階轉移函數模型等參數。

使用非線性最佳化之迭代法作負載模型參數計算的流程如圖 6 所示。迭代法係將負載模型參數識別的問題描述為非線性最佳化的問題，LM\_ID 程式採用 Levenberg-Marquardt 演算法解非線性最佳化問題<sup>[3]</sup>。此演算法能藉由執行時修改參數達到結合高斯-牛頓演算法以及梯度下降法的優點，並可改善高斯-牛頓演算法之反矩陣不存在或是初始值離局部極小值太遠的問題。迭代法無需狀態空間及離散化等繁複轉換，且直接識別出連續時間之負載模型參數，更能將參數的限制條件納入考量。

LM\_ID 程式現階段已實現了以迭代法識別靜態指數負載模型、動態一至三階轉移函數模型、靜態 IEEL 模型、靜態 ZIP 模型、靜態 EPRI 模型、靜態 ZIP-指數模型、動態指數恢復模型、動態適應負載模型、動態線性負載模型及動態一階感應電動機負載模型等參數。

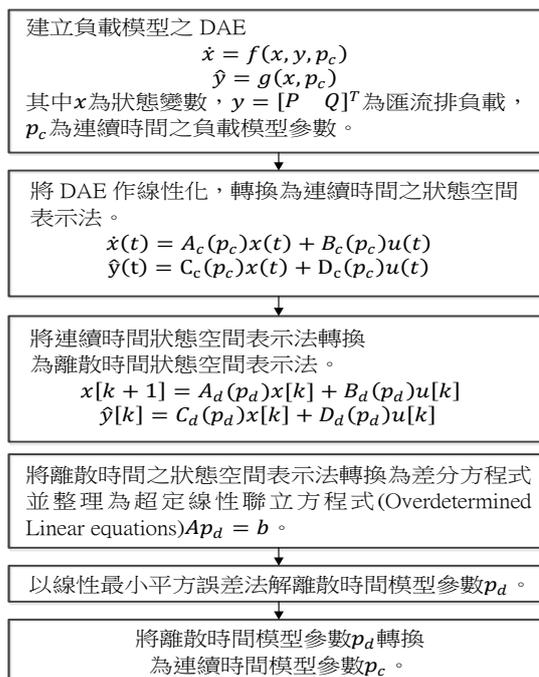


圖 5 以解析法作負載模型參數計算流程

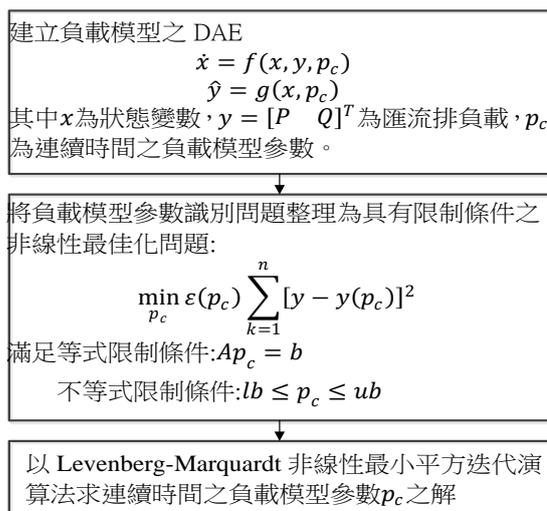


圖 6 以迭代法作負載模型參數計算

## 肆、LM\_ID 圖形使用者介面

LM\_ID 圖形使用者介面提供主功能表、監錄記錄檔(資料夾)選擇、程式功能選項設定、執行 LM\_ID 主程式、執行輸出結果分析程式(Output Analyzer)等功能，如圖 1。主功能表提供：檔案(File)、輸出(Output)、模型參數(Model Parameters)、展示(Demo)、幫助(Help)等選單，如圖 7~圖 11。

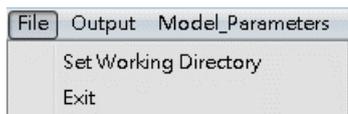


圖 7 File 選單

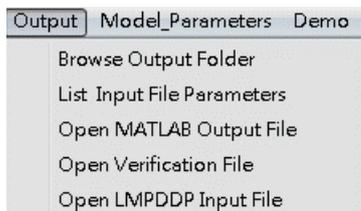


圖 8 Output 選單

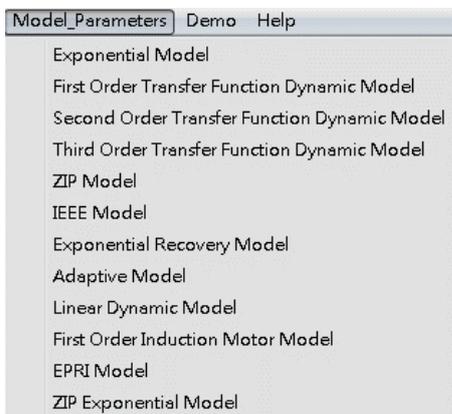


圖 9 Model Parameters 選單

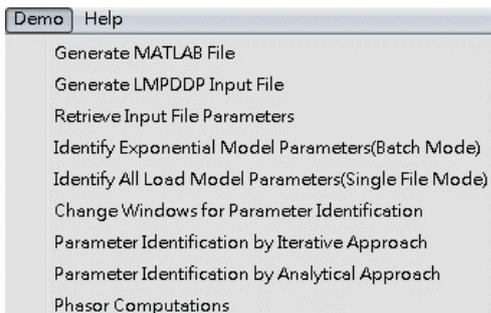


圖 10 Demo 選單

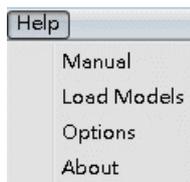


圖 11 Help 選單

一、檔案(File)選單：提供的功能包括：

- (一) Set Working Directory：設定工作目錄。
- (二) Exit：結束 LM\_ID\_GUI 程式。

二、輸出(Output)選單：提供的功能包括：

- (一) Browse Output Folder：瀏覽 output 輸出資料夾之內容。
- (二) List Input File Parameters：自 output 輸出資料夾中開啟-k 功能選項所產生之監錄記錄檔內之基本資料檔 parameters.csv。
- (三) Open MATLAB Output File：自 output 輸出資料夾中開啟-m 功能選項所產生之 MATLAB 輸出檔。
- (四) Open Verification File：自 output 輸出資料夾中開啟-v 功能選項所產生負載模型參數驗證用之 MATLAB 輸出檔。
- (五) Open LMDPPD Input File：自 output 輸出資料夾中開啟-w 功能選項所產生 LMDPPD 程式用之輸入檔。

三、模型參數(Model Parameters)選單：提供的功能包括：

- (一) Exponential Model：自 output 輸出資料夾中開啟-p 功能選項所產生靜態指數負載模型參數識別結果 model\_exponential.csv 檔。
- (二) First Order Transfer Function Dynamic Model：自 output 輸出資料夾中開啟-p 功能選項所產生動態一階轉移函數負載模型參數識別結果 model\_first\_order.csv 檔。
- (三) Second Order Transfer Function Dynamic Model：自 output 輸出資料夾中開啟-p 功能選項所產生動態二階轉移函數負載模型參數識別結果 model\_second\_order.csv 檔。

- (四) Third Order Transfer Function Dynamic Model：自 output 輸出資料夾中開啟 -p 功能選項所產生動態三階轉移函數負載模型參數識別結果 model\_third\_order.csv 檔。
- (五) ZIP Model：自 output 輸出資料夾中開啟 -p 功能選項所產生靜態 ZIP 負載模型參數識別結果 model\_zip.csv 檔。
- (六) IEEE Model：自 output 輸出資料夾中開啟 -p 功能選項所產生靜態 IEEE 負載模型參數識別結果 model\_ieee.csv 檔。
- (七) Exponential Recovery Model：自 output 輸出資料夾中開啟 -p 功能選項所產生動態指數恢復負載模型參數識別結果 model\_erlm.csv 檔。
- (八) Adaptive Model：自 output 輸出資料夾中開啟 -p 功能選項所產生動態適應負載模型參數識別結果 model\_adaptive.csv 檔。
- (九) Linear Dynamic Model：自 output 輸出資料夾中開啟 -p 功能選項所產生動態線性負載模型參數識別結果 model\_gnld.csv 檔。
- (十) First Order Induction Motor Model：自 output 輸出資料夾中開啟 -p 功能選項所產生動態一階感應電動機負載模型參數識別結果 model\_foimlm.csv 檔。
- (十一) EPRI Model：自 output 輸出資料夾中開啟 -p 功能選項所產生靜態 EPRI 負載模型參數識別結果 model\_epri.csv 檔。
- (十二) ZIP Exponential Model：自 output 輸出資料夾中開啟 -p 功能選項所產生靜態 ZIP+ 指數負載模型參數識別結果 model\_zip\_exp.csv 檔。

四、展示(Demo)選單：提供 LM\_ID 各種功能的展示，包括：

- (一) Generate MATLAB File：展示 -m 選項產生 MATLAB 輸出檔的功能。
- (二) Generate LMDPPD Input File：展示 -w 選項產生 LMDPPD 輸入檔的功能。
- (三) Retrieve Input File Parameters：展示 -k 選項讀取監錄記錄檔基本參數的功能。
- (四) Identify Exponential Model Parameters (Batch Mode)：展示 -b 選項批次執行模式、-p -n 選項執行特定負載模型參數識別、-v 選項產生負載模型參數驗證用之 MATLAB 輸出檔的功能。
- (五) Identify All Load Model Parameters (Single File Mode)：展示 -p 選項執行所有負載模型參數識別、-v 選項產生負載模型參數驗證用之 MATLAB 輸出檔的功能。
- (六) Change Windows for Parameter Identification：展示 -s 選項指定計算負載模型參數之資料視窗起始點、-e 選項指定計算負載模型參數之資料視窗最末點、-p 選項執行所有負載模型參數識別、-v 選項產生負載模型參數驗證用之 MATLAB 輸出檔的功能。
- (七) Parameter Identification by Iterative Approach：展示研究計畫之完成報告中以迭代法作負載模型參數識別之案例。
- (八) Parameter Identification by Analytical Approach：展示研究計畫之完成報告中以解析法作負載模型參數識別之案例。
- (九) Phasor Computations：展示研究計畫之完成報告中相量計算之案例。

五、幫助(Help)選單，提供的功能包括：

- (一) Manual：開啟負載模型參數識別程式 LM\_ID 操作說明。

- (二) Load Models：開啟負載模型彙整說明。
- (三) Options：開啟 LM\_ID 功能選項說明。
- (四) About：開啟研究計畫及研發人員資訊。

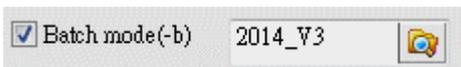
### 六、功能選項

LM\_ID 指令執行格式如下：

LM\_ID [輸入檔案名稱] [-選項][參數]

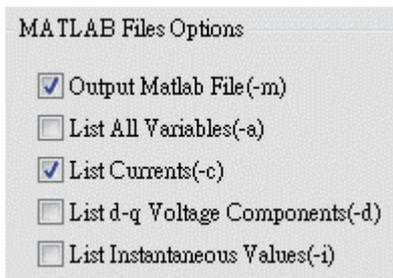
其中輸入檔案名稱是指監錄設備所記錄之監錄記錄檔案名稱，輸出檔案名稱會依輸入檔案名稱自動命名，或採用系統預設之檔名。LM\_ID 程式所提供之功能選項及其對應的參數說明如下：

- (一) -a: 在 MATLAB 輸出檔列出所有變數，包括選項 -m 及選項 -c, -i 所產生之變數，及產生繪製相關波形之指令。
- (二) -bdir: 啟用批次執行模式，其中 dir 為資料夾名稱。以 GUI 介面啟用批次執行模式並選擇資料夾如下：



執行 LM\_ID 所產生之輸出檔會自動命名，並儲存於 output 資料夾中。

- (三) -c: 在 MATLAB 輸出檔增列電流相量值，及產生繪製相關波形之指令。以 GUI 介面啟用輸出檔增列電流相量值如下：



在 MATLAB 輸出檔中會增列電流相量之矩陣，排列順序為：各變壓器總和正序電流，各變

壓器總和均方根電流，一號變壓器正序電流，一號變壓器均方根電流，二號變壓器正序電流，二號變壓器均方根電流，...，依序排列，並且產生繪製正序電流(圖 12)，及均方根電流(圖 13)之 MATLAB 指令。

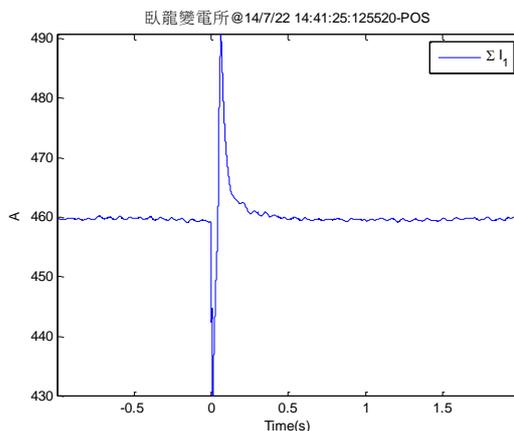


圖 12 各變壓器總和正序電流

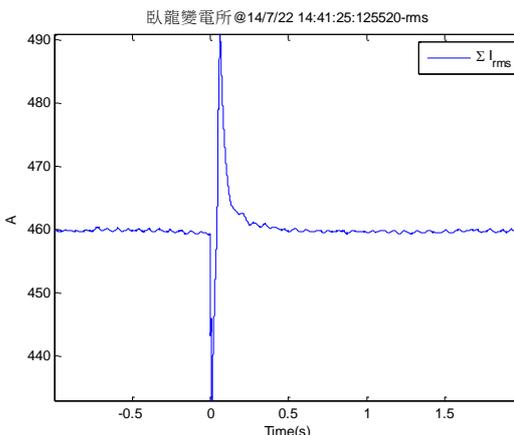
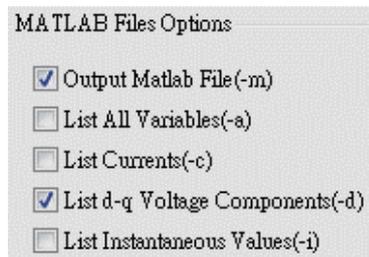


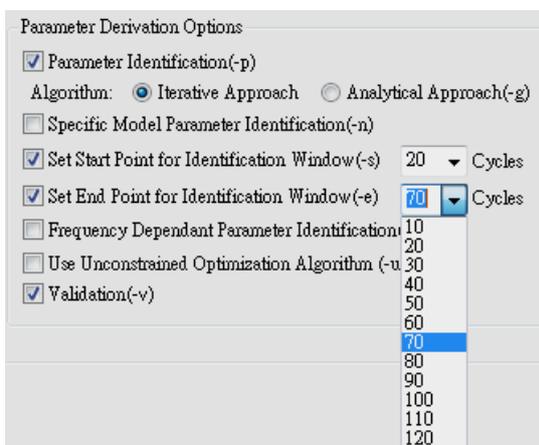
圖 13 各變壓器總和均方根電流

- (四) -d: 在 MATLAB 輸出檔增列各匯流排電壓之 dq 軸分量。以 GUI 介面啟用輸出檔增列各匯流排電壓之 dq 軸分量如下：

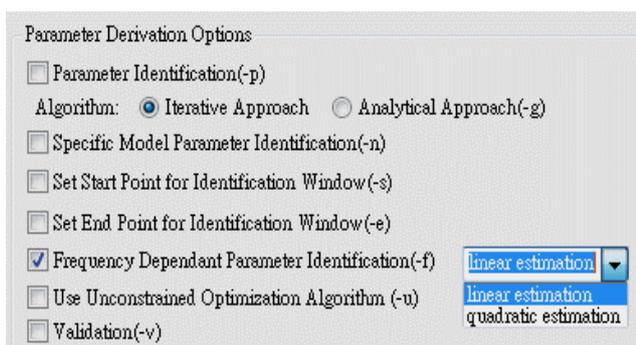


在 MATLAB 輸出檔中會增列電壓 dq0 軸分量之矩陣，排列順序為：d 軸電壓，q 軸負序電壓，0 軸電壓。

(五) -ecycles：計算負載模型參數之資料視窗最末點，其中 cycles 為在觸發點(0 秒)後之週波數，預設值為 90 週波(1.5 秒)。以 GUI 介面選擇計算負載模型參數之資料視窗最末點如下：



(六) -festi：考慮頻率相依之負載模型參數，其中 esti=0 代表頻率線性估測，esti=1 代表頻率二次式估測。選擇頻率之估測方法之 GUI 介面如下：



MATLAB 輸出檔中會產生繪製頻率變化(圖 14)之指令。

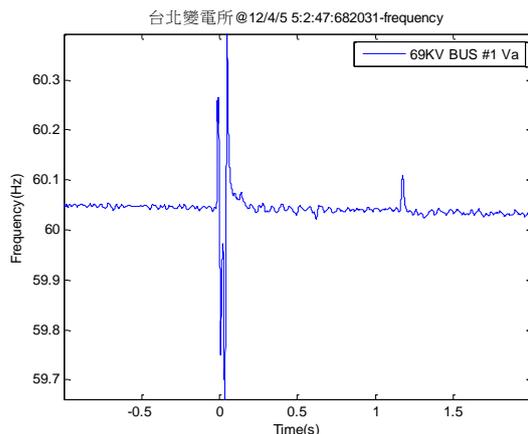
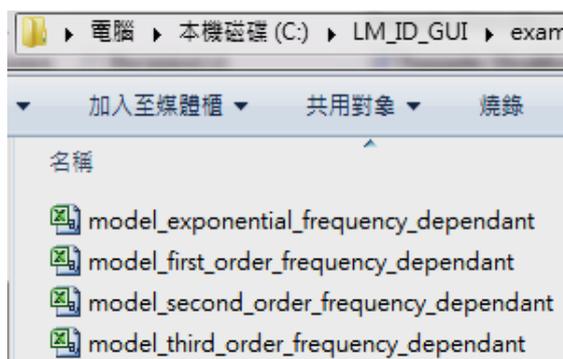
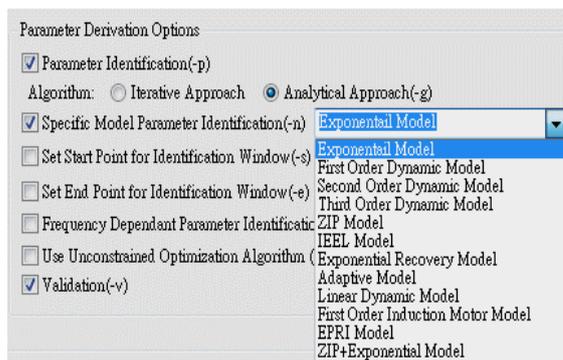


圖 14 匯流排頻率變化

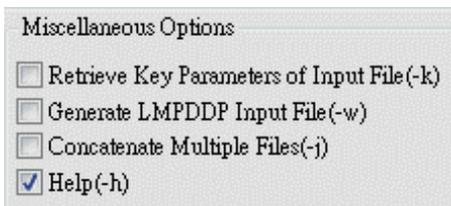
頻率相依之負載模型參數估測結果會以程式預設的名稱儲存為逗點分隔格式(CSV)檔案如下。



(七) -g：使用解析法作負載模型參數識別，未設定此選項時，使用迭代法作負載模型參數識別，解析法僅限於識別靜態指數模型及動態一階至三階轉移函數模型參數。以 GUI 介面選擇負載模型參數識別的方法如下：

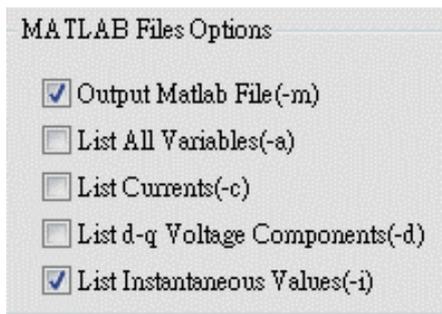


(八) -h：列出指令說明。以 GUI 介面選擇列出指令說明如下：



點選 RUN 執行後，指令說明會顯示於 Progress 視窗中。

(九) -i：在 MATLAB 輸出檔增列三相瞬時電壓和電流值，及產生繪製相關波形之指令。以 GUI 介面啟用增列三相瞬時電壓和電流值如下：



MATLAB 輸出檔中會產生繪製三相電壓瞬時值(圖 15)、三相電流瞬時值(圖 16)之指令。

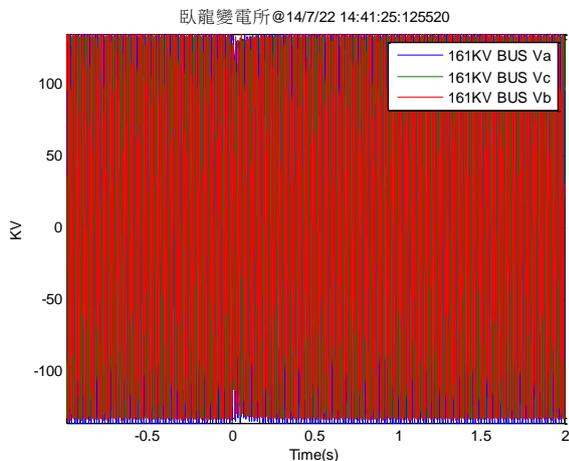


圖 15 匯流排三相電壓瞬時值

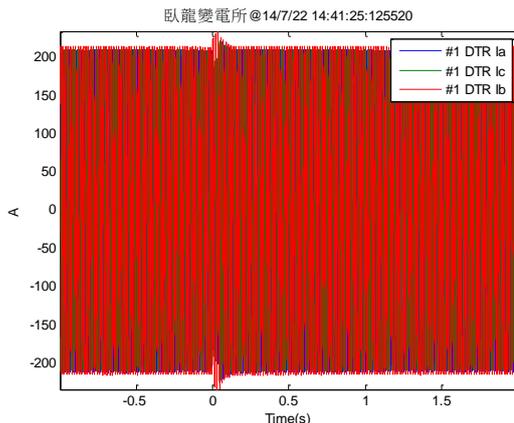
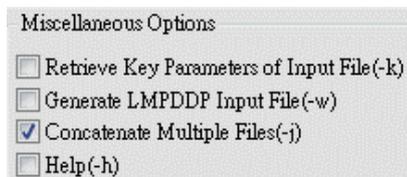


圖 16 變壓器三相電流瞬時值

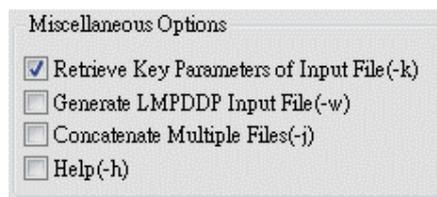
(十) -j：在批次執行模式下，串接 dir 資料夾內之所有監錄記錄檔。以 GUI 介面啟用多檔串接功能如下：



監錄記錄檔串接後轉換之 MATLAB 輸出檔以及負載模型參數識別後之驗證檔以程式預設之檔名儲存如下：



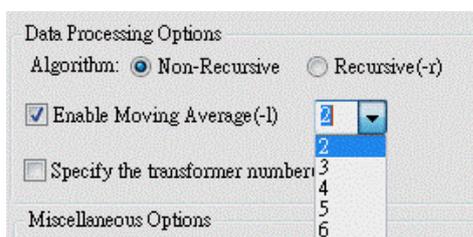
(十一)-k：列出監錄記錄檔內之基本資料。以 GUI 介面啟用列出監錄記錄檔內之基本資料如下：



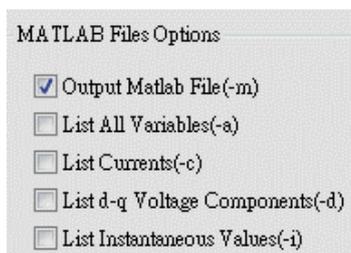
監錄記錄檔內之基本資料儲存於 output 資料夾之 parameters.csv 檔內。parameters.csv 檔內容

包括：站名(Site)、監錄記錄檔名(FILENAME)、觸發時間(Timestamp)、觸發類型(Trigger Type)、各相電壓突變量(Uabc(%))、零序電壓突變量(dU0(%))、電壓上限(UH\_th(%))、電壓下限(UL\_th(%))、負序電壓上限(U2\_th(%))、零序電壓上限(U0\_th(%))、頻率上限(fH(Hz))、頻率下限(fL(Hz))、頻率每秒突變量(df(Hz/s))、觸發值(tri\_val)、事件發生前有效功率穩態值(P\_initial)、事件發生後有效功率穩態值(P\_final)、事件發生前無效功率穩態值(Q\_initial)、事件發生後無效功率穩態值(Q\_final)、事件發生前電壓穩態值(V\_initial)、事件發生後電壓穩態值(V\_final)。

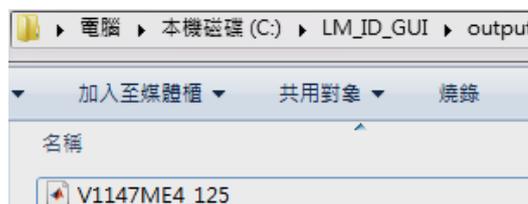
(十二)-Inum: 套用移動平均濾波器作原始資料平滑化，其中 num 為執行移動平均所取的點數，預設為未套用移動平均濾波器。以 GUI 介面啟用移動平均濾波器作原始資料平滑化如下：



(十三)-m: 將由監錄記錄檔計算得到之電壓相量、有效功率與無效功率轉換為 MATLAB 格式，並產生繪製相關波形之指令。其中電壓相量包括變電所各匯流排之正序電壓與均方根電壓。有效功率與無效功率部分包括：各變壓器二次側之正序與三相功率之總和及每一變壓器二次側之正序與三相功率。以 GUI 介面啟用產生 MATLAB 輸出檔如下：



MATLAB 輸出檔之依據輸入檔檔名命名，儲存於 output 資料夾



由 MATLAB 輸出檔可用以繪製匯流排之正序電壓 $V_{pos}$ (圖 17)、均方根電壓 $V_{rms}$ (圖 18)、各變壓器正序有效功率總和 $\sum P_{pos}$ (圖 19)、三相有效功率總和 $\sum P_{3\phi}$ (圖 20)、正序無效功率總和 $\sum Q_{pos}$ (圖 21)、三相無效功率總和 $\sum Q_{3\phi}$ (圖 22)、正序有效功率 $P_{pos}$ (圖 23)、三相有效功率 $P_{3\phi}$ (圖 24)、正序無效功率 $Q_{pos}$ (圖 25)、三相無效功率 $Q_{3\phi}$ (圖 26)等。

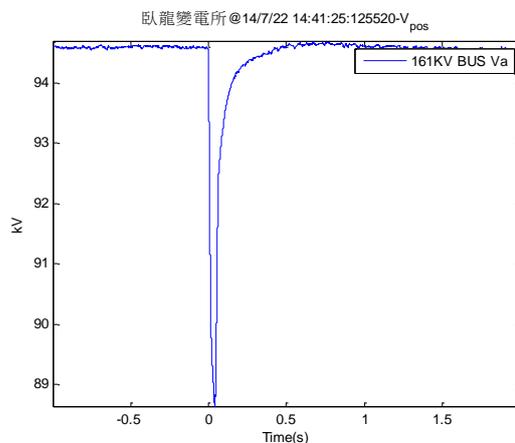


圖 17 匯流排正序電壓

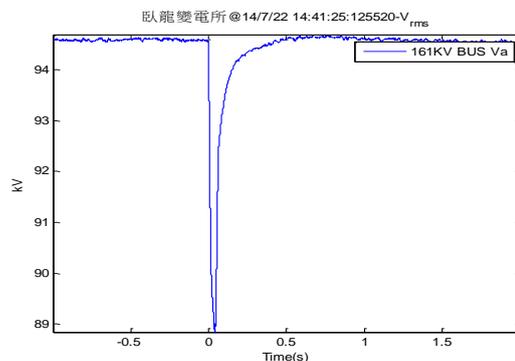


圖 18 匯流排均方根電壓

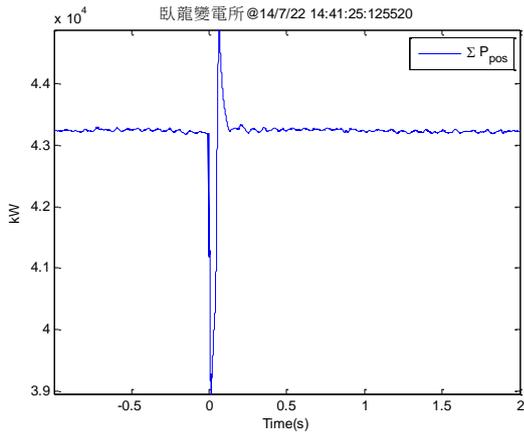


圖 19 各變壓器正序有效功率總和

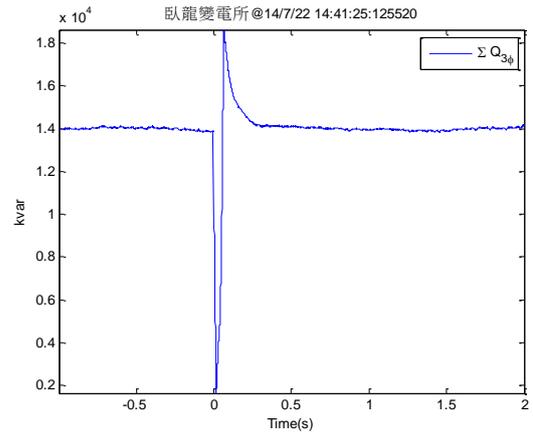


圖 22 各變壓器三相無效功率總和

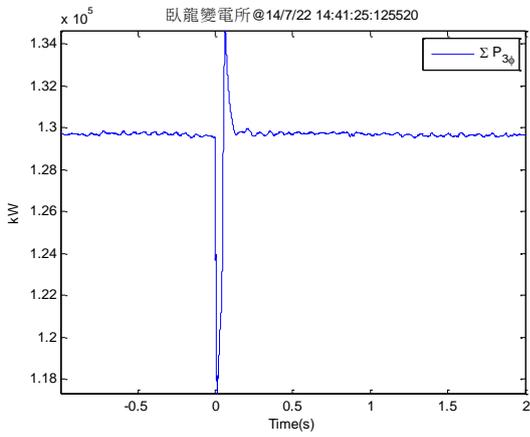


圖 20 各變壓器三相有效功率總和

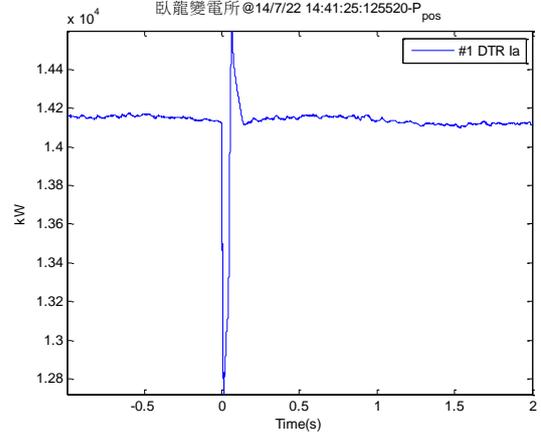


圖 23 各變壓器正序有效功率

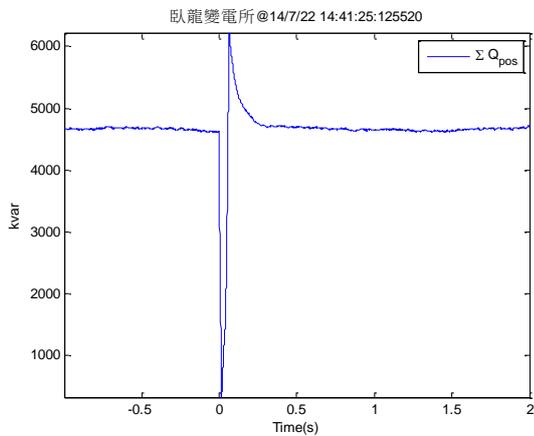


圖 21 各變壓器正序無效功率總和

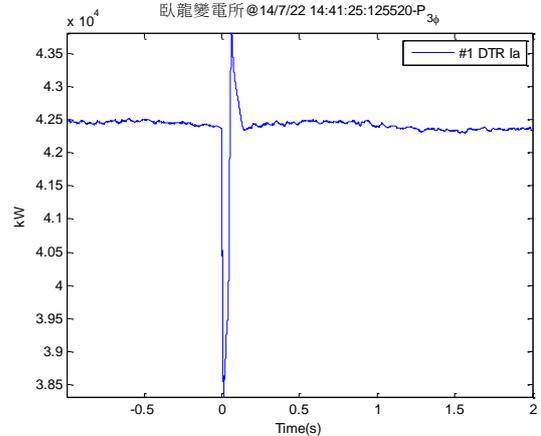


圖 24 各變壓器三相有效功率

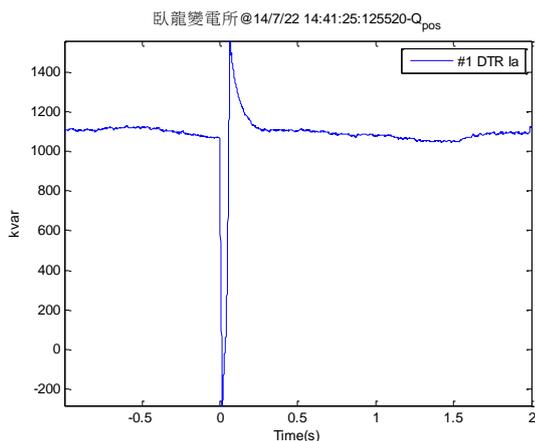


圖 25 各變壓器正序無效功率

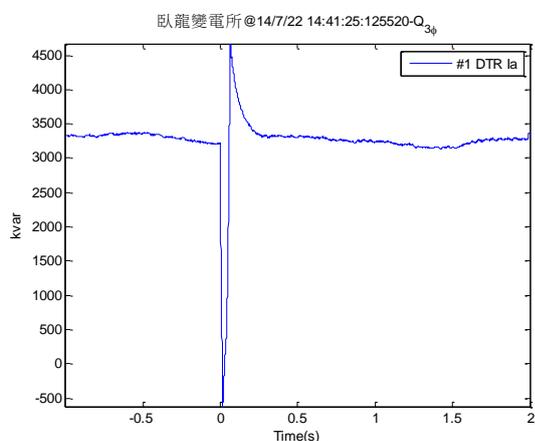
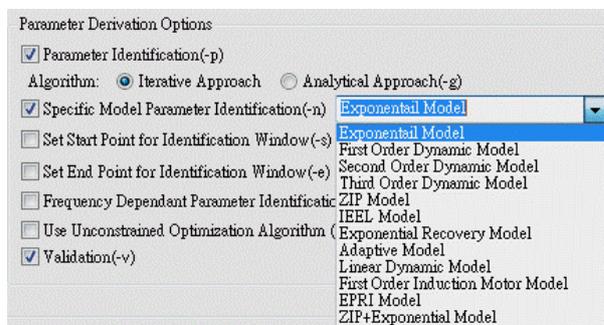


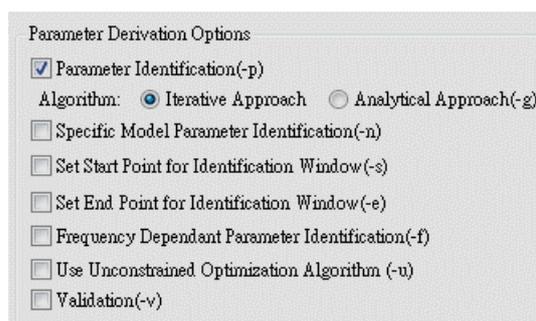
圖 26 各變壓器三相無效功率

- 10：靜態 EPRI 負載模型。
- 11：靜態 ZIP+指數負載模型。

以 GUI 介面選擇特定負載模型如下：



- (十五)-p：執行負載模型參數識別。以 GUI 介面啟用負載模型參數識別如下：

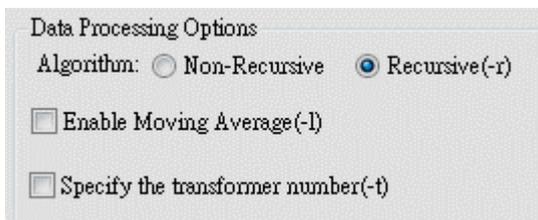


(十四)-nmod：執行特定負載模型之參數識別與驗證，其中 mod 為模型參數編號。各模型參數編號對應之負載模型如下：

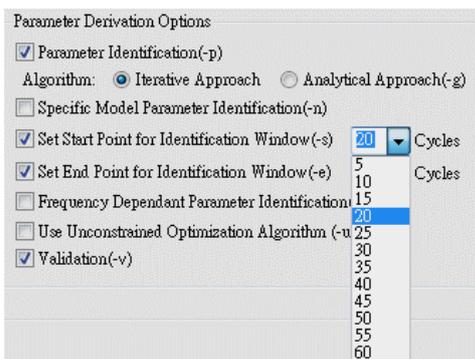
- 0：靜態指數負載模型。
- 1：動態一階轉移函數負載模型。
- 2：動態二階轉移函數負載模型。
- 3：動態三階轉移函數負載模型。
- 4：靜態 ZIP 負載模型。
- 5：靜態 IEEL 負載模型。
- 6：動態指數恢復負載模型。
- 7：動態適應負載模型。
- 8：動態線性負載模型。
- 9：動態一階感應電動機負載模型。

識別出之模型參數儲存檔名分別為：model\_exponential.csv(靜態指數負載模型)、model\_first\_order.csv(動態一階轉移函數負載模型)、model\_second\_order.csv(動態二階轉移函數負載模型)、model\_third\_order.csv(動態三階轉移函數負載模型)、model\_zip.csv(靜態 ZIP 負載模型)、model\_ieee.csv(靜態 IEEL 負載模型)、model\_erlm.csv(動態指數恢復負載模型)、model\_adaptive.csv(動態適應負載模型)、model\_gnld.csv(動態線性負載模型)、model\_foimlm.csv(動態一階感應電動機負載模型)、model\_epri.csv(靜態 EPRI 負載模型)、model\_zip\_exp.csv(靜態 ZIP+指數負載模型)。識別出模型參數儲存於 output 資料夾。

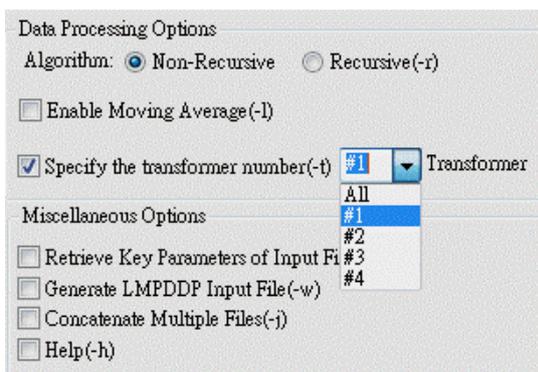
(十六)-r：使用遞迴法計算相量，未設定本參數時，採用預設之非遞迴法計算相量。以 GUI 介面啟用遞迴法計算相量如下：



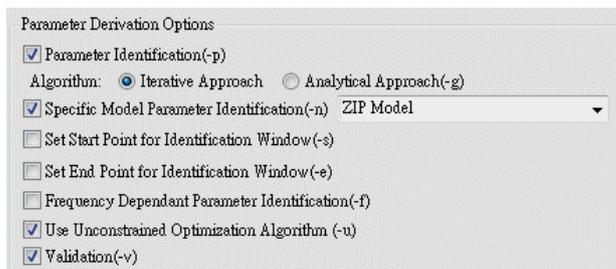
(十七)-scycles：計算負載模型參數之資料視窗起始點，其中 cycles 為觸發點(0 秒)前之週波數，預設值為 30 週波(0.5 秒)。以 GUI 介面選擇計算負載模型參數之資料視窗起始點如下：



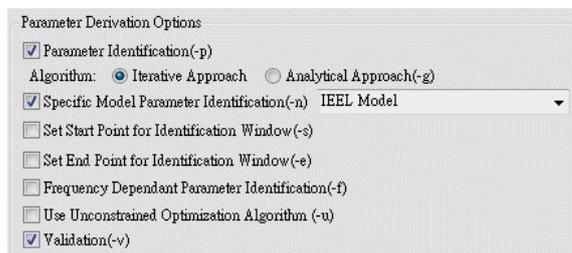
(十八)-ttransformer：識別特定變壓器之負載模型參數，其中 transformer 為變壓器之編號，若 transformer=0 代表識別所有變壓器負載總和之模型參數，預設值為 transformer=0。以 GUI 介面選擇欲進行負載模型參數識別之特定變壓器如下：



(十九)-u：以非線性最佳化演算法作負載模型參數識別時，不考慮參數限制條件。未設定本參數時，作負載模型參數識別會考慮參數限制條件。以 GUI 介面啟用不考慮參數限制條件之最佳化演算法如下：



(二十)-v：產生負載模型驗證用之 MATLAB 程式檔。以 GUI 介面啟用負載模型驗證功能如下：



產生驗證用之 MATLAB 輸出檔可繪製負載有效功率、無效功率測量值與各負載模型有效功率、無效功率模擬值之比較圖(圖 27)。

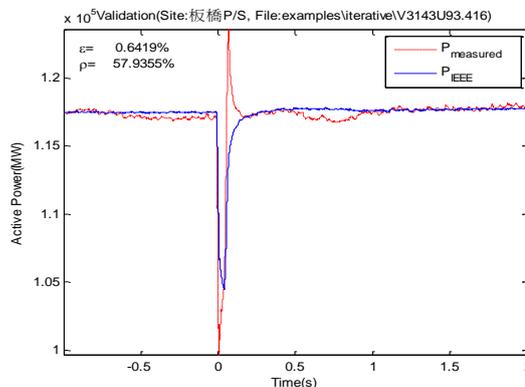
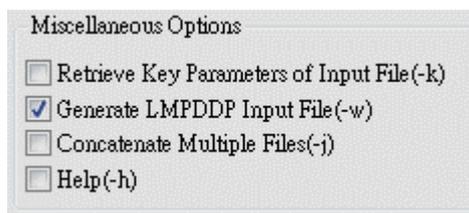


圖 27 有效功率測量值與負載模型模擬值比較

LM\_ID 以比較負載功率之測量值及負載模型之功率模擬值的差異來驗證負載模型參數的正確性，並以相對誤差  $\epsilon$  及信賴區間  $\rho$  作為評估之指標。至於合理性部份則與研究文獻中所提出的典型值作比較，由於並非所有監錄記錄檔所記錄的資料都適合作為負載模型參數識別使用，由監錄記錄檔中的資料所識別所得的負載模型參數與典型值作比較，濾除差異過大者，以確認負載模型參數的合理性。

(二十一)-w：產生 LMDPPD 程式用之輸入檔。以 GUI 介面啟用產生 LMDPPD 程式用之輸入檔之功能如下：



產生 LMDPPD 程式用之輸入檔依監錄記錄檔檔名命名，儲存於 output 資料夾。所產生之檔案內容包括：時間(A 欄)、三相匯流排電壓瞬時值(B-D 欄)，以及變電所各變壓器二次側三相電流瞬時值之總和(E-G 欄)。

A	B	C	D	E	F	G
-0.5	-57128.9	27246.09	30175.78	-1628.91	867.19	738.28
-0.49987	-56982.4	24755.86	32373.05	-1625	787.11	818.36
-0.49974	-56835.9	22265.63	34570.31	-1621.09	707.03	898.44
-0.49961	-56396.5	19775.39	36767.58	-1615.23	625	972.66
-0.49948	-55957	17285.16	38964.84	-1609.38	542.97	1046.88
-0.49935	-55078.1	14501.95	40722.66	-1595.7	464.84	1109.38

## 伍、負載模型參數統計分析

台電重點變電所監錄設備所捕捉之監錄記錄檔不是全部都適合作為負載模型參數識別使用，較佳之事件應為暫時性故障所產生的小擾動。若為停電事故、停電後復閉、故障前後之有效功率或無效功率、故障前後之匯流排電壓劇烈變化、不對稱故障等，顯示電網結構發生變化，所觸發

的監錄記錄檔均不適合作為負載模型參數識別，應予濾除。

LM\_ID 程式提供負載模型參數統計分析功能，可自 LM\_ID 識別出負載模型參數檔中，先將不適合作為負載模型參數識別之記錄濾除，然後進行統計分析，以獲得變電所之最佳負載模型參數。

負載模型參數統計分析功能可由點選 LM\_ID 使用者介面之功能按鈕(Output Analyzer)來開啟，如圖。負載模型參數統計分析功能之使用者介面如圖 28。

負載模型參數統計分析功能的使用者介面說明如下：

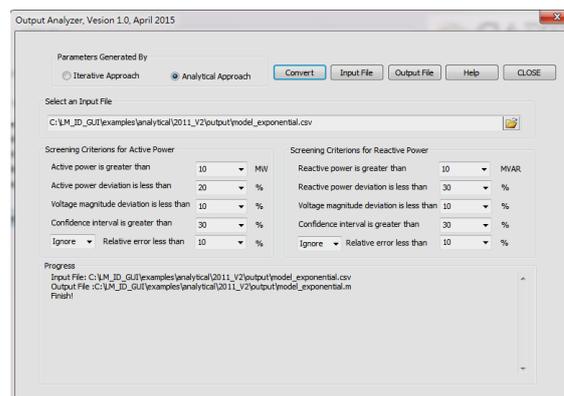
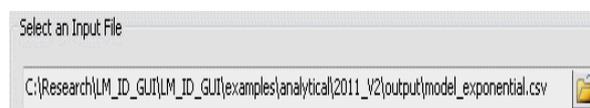


圖 28 負載模型參數統計分析程式執行畫面

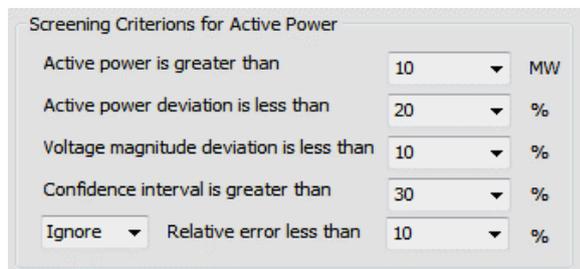
一、Parameters Generated By 選項群組：選擇負載模型參數檔是由迭代法(Iterative Approach)或解析法(Analytical Approach)所產生。其 GUI 介面如下：



二、Select an Input File 檔案編輯瀏覽對話框：選擇欲分析之負載模型參數檔。其 GUI 介面如下：



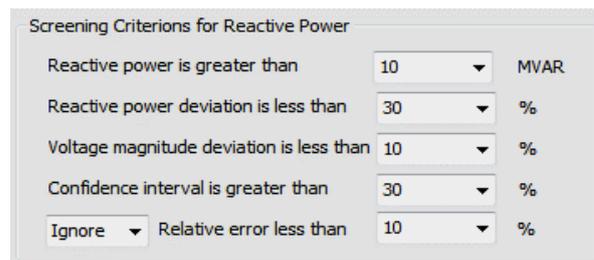
三、Screening Criteria for Active Power 下拉式清單群組：選擇有效功率負載模型參數篩選準則。其 GUI 介面如下：



有效功率負載模型參數篩選準則包括：

- (一) Active power is greater than 條件：設定有效功率的臨界值，可將有效功率過低的記錄濾除。
- (二) Active power deviation is less than 條件：設定有效功率變化量的臨界值，可將有效功率大幅變化的記錄濾除。
- (三) Voltage magnitude deviation is less than 條件：設定電壓變化量的臨界值，可將電壓大幅變化的記錄濾除。
- (四) Confidence interval is greater than 條件：設定信賴區間的臨界值，可將識別所得負載模型參數之信賴區間過低的記錄濾除。
- (五) Relative error less than 條件：設定相對誤差的臨界值，可將識別所得負載模型參數之相對誤差過高的記錄濾除。
- (六) 邏輯條件：設定 Confidence interval is greater than 條件及 Relative error less than 條件的組合方式，可為 AND、OR 或只考慮 Confidence interval is greater than 條件而忽略 Relative error less than 條件。

四、Screening Criteria for Reactive Power 下拉式清單群組：選擇無效功率負載模型參數篩選準則。其 GUI 介面如下：



其篩選準則與有效功率類似，因此不再贅述。

五、Progress 文字框：顯示程式執行訊息。

六、Convert 按鈕：產生可統計分析通過篩選之負載模型參數之 MATLAB 輸出檔。

負載模型參數統計分析程式產生之 MATLAB 輸出檔經執行後可以繪製有效功率分布圖及其平均值 $\mu$ 與標準差 $\sigma$  (圖 29)、有效功率指數負載模型之電壓相依參數分布圖及其平均值 $\mu$ 與標準差 $\sigma$  (圖 30)、無效功率分布圖及其平均值 $\mu$ 與標準差 $\sigma$  (圖 31)、無效功率指數負載模型之電壓相依參數分布圖及其平均值 $\mu$ 與標準差 $\sigma$  (圖 32)。

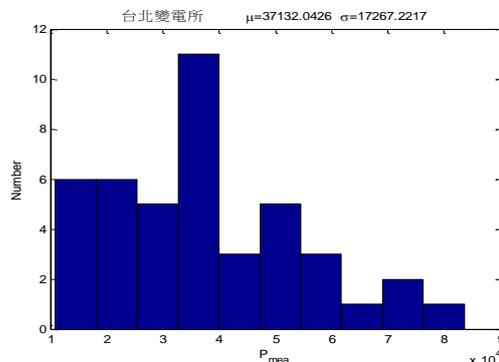


圖 29 有效功率分布圖

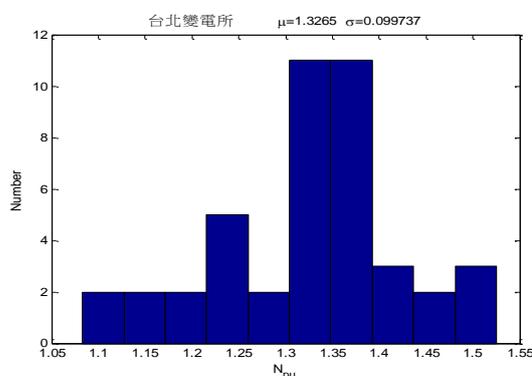


圖 30 有效功率指數負載模型之電壓相依參數分布圖

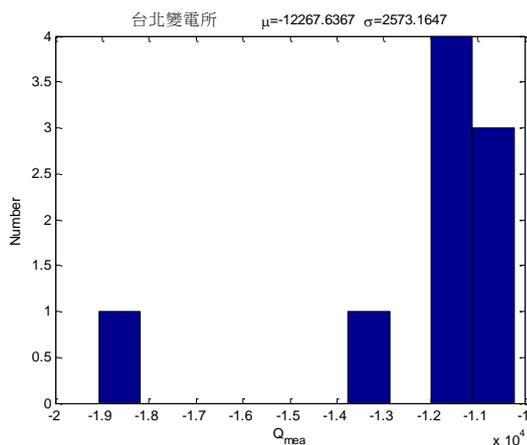


圖 31 無效功率分布圖

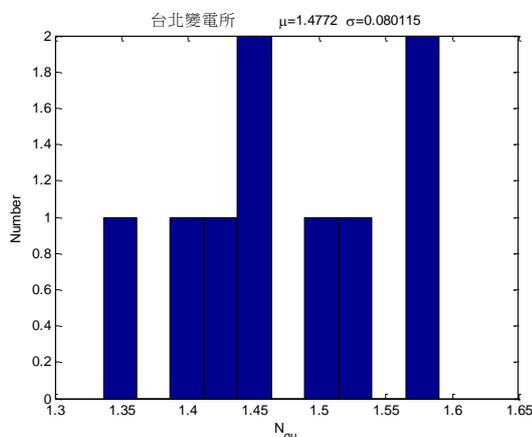


圖 32 無效功率指數負載模型之電壓相依參數分布圖

- 七、Input File 按鈕：開啟由 LM\_ID 所建立之負載模型參數檔。
- 八、Output File 按鈕：開啟可統計分析負載模型參數之 MATLAB 輸出檔。
- 九、Help 按鈕：開啟負載模型參數統計分析程式使用說明。
- 十、Close 按鈕：關閉負載模型參數統計分析程式。

## 陸、結論

本計畫研究團隊所自行開發之負載模型參數識別程式，可直接讀取台電重點變電所即有監錄設備所記錄的監錄記錄檔，以 C++ 程式開發具

有執行速度快與擴充性佳的優勢，很適合繼續開發與台電系統既有之 PMU 結合，作即時負載動態模型參數識別。再者，該負載模型參數識別程式支援多種靜態與動態負載模型之參數識別，更有利於為不同負載特性的變電所找到其合適的負載模型與參數。

## 柒、誌謝

本研究感謝台灣電力公司，研究計畫(編號：546-2101-0202)之經費補助。系規處莊政宏先生、吳蒼堯先生及調度處等諸位台電專業人員協助，在 PMU 實測資料與相關技術諮詢，特此致謝。

## 捌、參考文獻

- [1] Electric Power Research Institute, Load Model Data Processing and Parameter Derivation User's Manual, August 2009.
- [2] 位元文化，精通 MFC 視窗程式設計：Visual Studio 2012 版，台北市：松崗科技股份有限公司，民國 102 年 1 月。
- [3] C. Kanzow, N. Yamashita and M. Fukushima, "Levenberg-Marquardt methods for constrained nonlinear equations with strong local convergence properties," Journal of Computational and Applied Mathematics, vol. 172, pp. 375-397, 2004.
- [4] Chia-Jen Lin, Yung-Tien Chen, Chiew-Yann Chiou, Hsiao-Dong Chiang, Jin-Cheng Wang and Lazhar Fekih-Ahmed, "Dynamic Load Models in Power Systems Using the Measurement Approach," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 8, no. 1, pp. 309-315, February 1993.
- [5] Byoung-Kon Choi, Hsiao-Dong Chiang, Yinhong Li, Hua Li, Yung-Tien Chen, Der-Hua Huang, and Mark G. Lauby, "Measurement-Based Dynamic Load Models : Derivation, Comparison, and Validation," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 21, no. 3, pp. 1276-1283, August 2006.

- [6] Y. Li, H.-D. Chiang, B.-K. Choi, Y.-T. Chen, D.-H. Huang and M.G. Lauby, "Representative static load models for transient stability analysis : development and examination," IET Gener. Transm. Distrib. , vol. 1, no. 3, pp. 422-431, 2007.
- [7] Yinhong Li, Hsiao-Dong Chiang, Byoung-Kon Choi, Yung-Tien Chen, Der-Hua Huang, and Mark G. Lauby, "Load models for modeling dynamic behaviors of reactive loads : Evaluation and comparison," Electrical Power and Energy Systems, pp. 497-503, 2008.
- [8] B.-K. Choi, and H.-D. Chiang, "Multiple Solutions and Plateau Phenomenon in Measurement-Based Load Model Development : Issues and Suggestions," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 24, no. 2, pp. 824-831, May 2009.

### 台電工程月刊徵稿啟事

- \* 為使本刊物之內容更臻完善，歡迎有關火（水）力發電、核能發電、再生能源、輸變電、配電、電力系統、能源與環境、化學與材料、資訊與電腦、工程技術及其他等相關論著、技術經驗及譯者踴躍投稿，以饗讀者。
- \* 投稿相關事宜，若有任何疑問，請聯絡我們，謝謝您！



(02)2360-



u117212@taipower.co

# 筒式煤倉安全監測系統之規劃

The Configuration of Safety Detection and Monitoring System for a Coal Storage Silo

黃伯璘\*

Huang, Bur-Lin

## 摘要

近年來，大型筒式煤倉由於具有單位面積儲煤量高、無煤塵污染、操作自動化程度高及儲煤管理佳等特點，逐漸被廣泛應用於國內外發電廠新建燃煤發電機組上，以替代傳統的露天煤場。但筒式煤倉因屬密閉空間，倉內長期儲煤會發生自燃、產生有毒氣體甚至發生氣爆等危險問題，為促使這些危險因素於剛產生時即被偵測出來，進而加以作適當處置，避免產生嚴重問題而造成煤倉設備損壞或維護保養人員之傷害，因此筒式煤倉有必要規劃設置一有效的安全監測系統。

## Abstract

In recent years, the big coal storage silos have been gradually and widely adopted in the new coal-fired units of foreign and domestic power plants instead of conventional open coal yards due to their advantages of high storage per unit area, no dust pollution, high automation in operation and better inventory management etc. Nevertheless, as the coal silo is a type of closed storage space, spontaneous combustion of the coal stockpile long time stored may probably occur inside the silo, producing toxic gas and even gas explosion problems. To detect and properly eliminate the dangerous causes of the mentioned problems when they are initiated, so as to prevent the more serious problems and damages incurred to the equipment and harms to maintenance personnel, it is necessary to plan for the configuration and set-up of an effective safety detection and monitoring system.

**關鍵詞(Key Words)：**筒式煤倉(Coal Storage Silo)、安全監測設備(Safety Detection Equipment)、氣體濃度偵測器(Gas Concentration Detector)、安全監視警報系統(Safety Monitoring Alarm System)、CCTV 監視系統(Closed Circuit Television Monitoring System)、煤倉料位監控系統(Coal Silo Level Monitoring and Control System)。

## 壹、前言

近年來大型筒式煤倉(Coal Storage Silo，儲量 7~10 萬噸) 逐漸被應用於國內外發電廠所興建燃煤發電機組以替代傳統式露天煤場，如日本

J-Power 公司的橘灣火力發電廠(Tachibana-wan Thermal Power Station，參見圖 1) 與關西電力公司的舞鶴火力發電廠、國內台電公司大林(參見圖 2)與林口電廠目前正在興建的燃煤發電機組等皆採用前述大型筒式煤倉以先進先出方式儲存所需要煤燃料。由於筒式煤倉為一密閉型煤倉，長

\*吉興工程顧問股份有限公司

期儲煤會有自燃、產生有毒氣體及氣爆等危險問題，因此本文將探討上述危險因素之特性，並針對此等危險因素提出所需設置之安全監測系統之規劃及排除危險因素的對策，以期確保煤倉設備長期運轉之安全。



圖 1 日本橘灣火力發電廠筒式煤倉



圖 2 台電大林電廠正在興建之筒式煤倉

## 貳、筒式煤倉安全監測系統規劃

當燃煤長期堆置時會緩慢釋放  $\text{CH}_4$  (甲烷) 及  $\text{CO}$  (一氧化碳) 有毒氣體，且會引起自燃的情況發生，由工研院工業安全衛生技術發展中心所提供的「物質安全資料表」<sup>[1]</sup>顯示， $\text{CH}_4$  及  $\text{CO}$  在濃度昇高至一定程度後不但會造成人體傷害且會與空氣形成爆炸性混合物，尤其在密閉空間更有可能發生爆炸危險的情況。

當煤倉內儲煤開始發生自燃時， $\text{CO}$  濃度會逐漸升高，而  $\text{O}_2$  (氧氣) 濃度反而會減少，藉由對

$\text{CO}$  濃度變化的偵測，可以作為判斷煤倉內儲煤是否產生過度氧化、溫度升高、爛燒、發火等情形之有效參考。而  $\text{O}_2$  濃度之偵測則有助於判斷煤倉內的煤發生自燃的可能性，及操作人員是否可以進入煤倉進行維修保養的依據。因此整個氣體的監測應包含  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$  及  $\text{O}_2$  等濃度偵測器。

此外，燃煤在氧化、自燃過程中將釋放大量的熱而使煤堆局部溫度上升。當溫度達  $80^\circ\text{C}$  時，燃煤表面開始進行較激烈的氧化。當達到  $200^\circ\text{C}$  以上時，開始發生較深層的碳分解，產生發火燃燒。因此藉由煤倉內不同儲煤位置溫度的偵測，同時配合前述煤倉內  $\text{CO}$  的偵測值互相比較，可有效的協助於早期掌握儲煤是否有自燃或發火的情形發生。

另於煤倉內可設置 CCTV (閉路電視) 監視攝影機，將所獲得的畫面經由網路傳送至煤場控制室，可使煤場控制室的操作人員隨時掌握煤倉內各種的變化，並配合上述氣體濃度偵測器的訊號，針對煤倉內儲煤是否發生自燃冒煙的情況進行有效的監視。

## 參、煤倉安全監測設備設置之規劃

煤倉內危險氣體最可能蓄積的地方，可分為頂部機械設備層、設備層下方儲煤區空氣層以及煤倉底部犁式供料機(Rotary Plow Feeder)連接隧道與輸煤皮帶機附近區域。因此為防止煤倉儲煤自燃、氣爆之情形發生，安全監測設備應設置於上述三部份區域內，各相關安全監測設備安裝示意位置參見圖 3a 及 3b<sup>[2]</sup>。

有關煤倉內相關安全監測設備設置規劃敘述如下：

### 一、氣體監測設備

前述會蓄積危險氣體之煤倉頂部機械設備層、機械設備層下方儲煤區空氣層及煤倉底部犁式供料機連接隧道輸煤皮帶機附近區域等，可採用固定式氣體偵測器進行個別氣體  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$  及

O<sub>2</sub> 濃度監測，並於現場適當位置內設置一套現場氣體監視站接收前述煤倉各區域氣體偵測器所傳來之信號，以集中監視所有煤倉內各區域所產生之各種氣體濃度。此外，亦可經由此現場氣體監視站，將所收集之所有煤倉內各區域氣體濃度相關資訊，藉由網路傳送至設置於煤場控制室(或電廠中央控制室)內煤運控制系統人機介面以執行遠方監視。

每一筒式煤倉內應設置下列氣體監測設備：

#### (一) CH<sub>4</sub> 濃度偵測器

##### 1. 裝設位置

煤倉頂部機械設備層：監視煤倉進煤入口 CH<sub>4</sub> 濃度。

頂部機械設備層下方儲煤區空氣層：監視煤倉內所蓄積的 CH<sub>4</sub> 濃度。

底部犁式供料機連接隧道輸煤皮帶機附近區域：監視煤倉出煤口附近所產生之 CH<sub>4</sub> 濃度。

##### 2. 設定值

CH<sub>4</sub> 濃度的警報(Alarm)設定值可設定在 1000 ppm<sup>[1]</sup>，濃度高於此設定值即發出警報並與通風換氣系統作聯鎖控制。

##### 3. 型式

採用觸媒燃燒式，應具防爆功能。

#### (二) CO 濃度偵測器

##### 1. 裝設位置

煤倉頂部機械設備層：偵測煤倉燃煤進料口 CO 濃度。

頂部機械設備層下方儲煤區空氣層：偵測煤倉內儲煤所蓄積之 CO 濃度。

底部犁式供料機連接隧道輸煤皮帶機附近區域：偵測煤倉燃煤出料口附近 CO 濃度。

##### 2. 設定值

CO 濃度的警報設定值可設定在 50 ppm<sup>[1]</sup>，濃度高於此設定值即發出警報並與通風換氣系統作聯鎖控制。

##### 3. 型式

採用電化學式，應具防爆功能。

#### (三) O<sub>2</sub> 濃度偵測器

##### 1. 裝設位置同 CO 濃度偵測器。

##### 2. 設定值

正常空氣中氧氣濃度不可低於 18 Vol%<sup>[1]</sup>，否則將對人體造成嚴重危害。因此，其警報設定值可設定在 18 Vol %，濃度低於此設定值即發出警報並與通風換氣系統作聯鎖控制。

##### 3. 型式

採用電化學式，應具防爆功能。

(四) 除上述現場固定設置的氣體偵測器外，亦可提供手持攜帶式氣體偵測器，此配備係提供維修人員於進入煤倉頂部機械設備層或底部隧道輸煤皮帶機區域時，能即時偵測包括 CH<sub>4</sub>、CO 與 O<sub>2</sub> 等氣體當時之濃度，以作為判斷是否允許人員進入煤倉內部之依據，並提供數據作為異常狀況處理之依據。

## 二、溫度監測設備

溫度偵測器裝設於頂部機械設備層下方儲煤區空氣層，以及底部各煤倉出料斗，用以監視煤倉內儲煤空氣層的溫度及煤倉出料斗底部燃煤的溫度。

## 三、CCTV 監視系統

於煤倉內設置 CCTV 彩色攝影機監視，並配合前述氣體濃度及溫度偵測的訊號，使煤場控制室操作人員針對煤倉儲煤是否發生自燃冒煙的情況作最佳的判斷與處置，並藉由遙控監視提供即時訊息供控制室操作員應變參考。

CCTV 彩色攝影機可配備水箱、雨刷及噴水器供清洗鏡頭視窗之用並可被遙控啟停。攝影機須為防塵爆型，裝設在人員可到達進行維修保養且監視角度可擴及整個煤倉內堆煤之位置，另外可提供防塵爆照明設備，以提供 CCTV 彩色攝影機監視所需之光源。

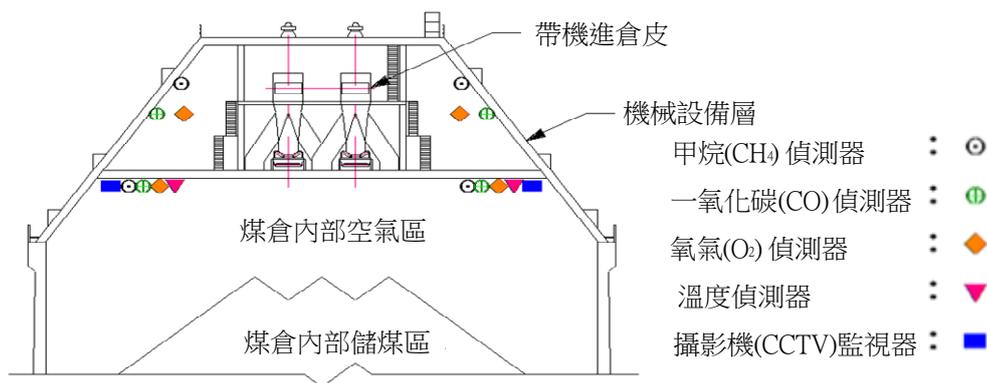


圖 3a 煤倉機械層與儲煤層安全監測設備安裝示意圖

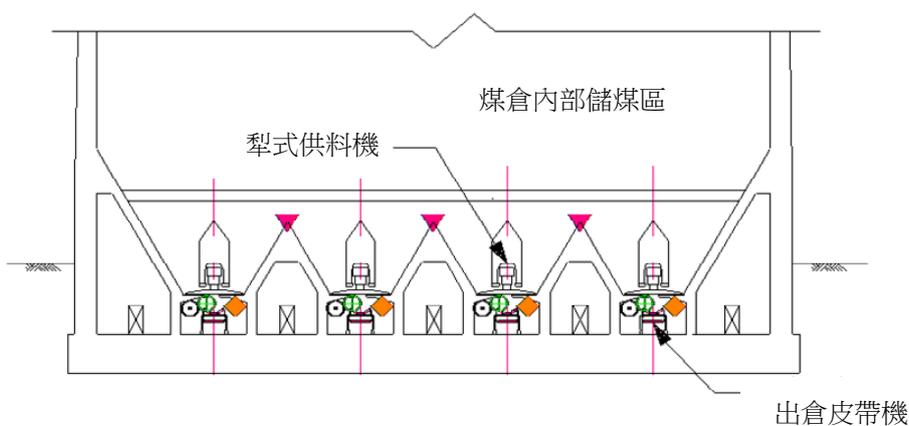


圖 3b 煤倉底部層安全監測設備安裝示意圖

#### 四、安全監視警報系統

安全監視警報系統可依據煤倉內部與底部出料機附近所設置之  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$  與  $\text{O}_2$  等氣體及溫度偵測器所量測出氣體濃度與溫度的變化，判斷煤倉內部是否達到危險標準而啟動系統發出警報訊息，同時採取必要的防護措施包括自動啟動通風設備或執行熱煤再循環系統作降溫處理。警報系統至少須包括前述現場偵測器（ $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$  與  $\text{O}_2$  等氣體濃度及溫度偵測器）、現場警報器/警示燈及控制室警報監視系統等。

煤倉頂部機械設備層及底部犁式供料機附近應裝置警報器及警示燈，當煤倉內部發生異常狀況時，警報器發出警報聲響及警示燈閃爍通知現場人員疏散，同時中控室警報監視系統亦發出警報通知操作員即時進行處理。

#### 五、火警警報系統

煤倉內頂部機械層應設置火警偵測器及自動水霧噴灑系統，當火警發生時立刻產生警報告知現場維修人員即時撤退，以策安全，同時自動啟動水霧噴灑系統進行滅火。此火警警報系統納入整體煤倉火警消防系統內運作。

#### 六、煤倉料位監控系統

煤倉料位監控亦可視為安全監視系統重要之一環，當煤倉處於低料位時，可啟動相關進煤皮帶機設備執行進煤堆煤，此時煤塵收集系統亦應同時啟動以防止煤塵蓄積於倉內，如此可將煤塵暴發生的可能性降至最低。當煤倉料位超過高設定值時，系統即發出警報並自動停止相關進煤設備之運轉，以避免煤位持續升高最後產生嚴重

堵料之情況。煤倉料位偵測可採用雷達型料位計(參見圖 4)<sup>[3]</sup>，此種雷達型料位計能發射能量很低的極短微波脈衝通過所內建天線系統以極快速之光速進行發射接收，能於極短時間內得到穩定及極精確之量測值(如一煤倉料位量測範圍設定為 0-70 米，其量測精確度為 $\pm 15\text{mm}$ )，並具有避免因受煤倉進煤所產生煤塵之干擾而影響量測精確度之特點。



圖 4 雷達型料位計

#### 肆、煤倉發生異常狀況處置對策

一、當煤倉頂部機械層偵測到  $\text{CH}_4$  及  $\text{CO}$  濃度過高或  $\text{O}_2$  濃度過低時，監測系統應自動啟動設置於機械層的通風換氣系統(Ventilation System)設備，將濃度過高的  $\text{CH}_4$  及  $\text{CO}$  排出煤倉外，並引進煤倉外的空氣以提高倉內  $\text{O}_2$  濃度。當此機械層內處於正常狀態時，通風換氣系統亦應置於自動模式下並依“Time Program”固定間隔時間(此間隔時間可視需要調整設定)方式啟停運轉，以保持良好的通風環境。

當煤倉儲煤區偵測到  $\text{CH}_4$  及  $\text{CO}$  濃度過高或  $\text{O}_2$  濃度過低時，除了啟動機械層的通風換氣系統設備外，同時亦可結合啟動所設

置的集塵系統，將濃度過高的  $\text{CH}_4$  及  $\text{CO}$  強力排出煤倉外，並引進煤倉外的空氣以提高倉內  $\text{O}_2$  濃度。

- 二、當煤倉內儲煤溫度偵測值過高時，宜優先使用該煤倉的儲煤，操作員可以手動方式將底部的煤以犁式供料機鏟送至鍋爐煤倉(Coal Bunker)使用，或執行熱煤再循環系統(Hot Coal Recycling System)程序，將煤倉內過熱部分的儲煤選擇所對應的犁式供料機依所設置的熱煤再循環系統皮帶機路徑將熱煤輸送出循環後再送回原來的煤倉，如此藉由輸送期間與大氣接觸將原來的熱煤加以冷卻，避免熱煤繼續存在煤倉內產生燻燒的情形。
- 三、當煤倉內產生嚴重儲煤燻燒、冒煙甚至發火的情況，此情況操作員可依當時所偵測的  $\text{CO}$  與溫度值並參考圖 5 所示  $\text{CO}$  對應溫度之參考曲線<sup>[4]</sup>，以及 CCTV 所顯示的影像作判斷，而此情況已無法由前述第二項措施進行有效處理時，此時操作員就應考慮以手動方式啟動煤倉內儲煤區所設置的水霧噴灑系統針對發生冒煙甚至發火的儲煤部分進行消煙與滅火。

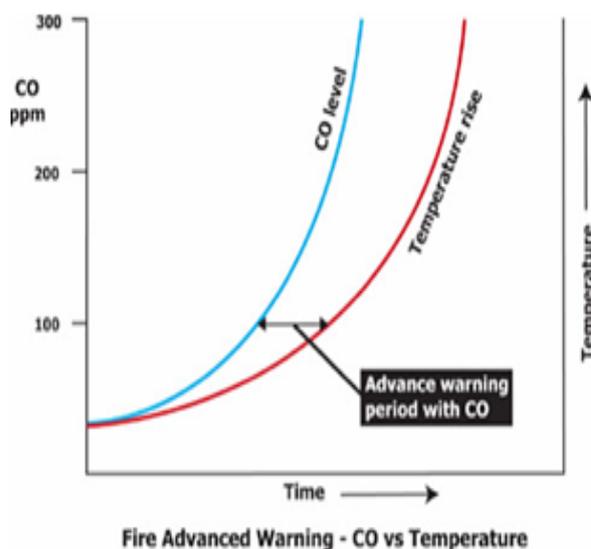


圖 5 儲煤發火預警  $\text{CO}$  對應溫度參考曲線

## 伍、結語

筒式煤倉比較於其他類型煤倉如棚式煤倉 (Coal Shed) 與圓頂煤倉 (Coal Dome)，具有佔地面積小且單位面積儲煤量最高、全密閉式無煤塵污染、操作自動化程度高、儲煤管理佳等特點，因此逐漸被廣泛採用，惟因係全密閉式，因此必須建立一套健全有效的煤倉安全監測系統，用以防患未然確保設備正常運轉及保護維修人員生命之安全。

## 陸、參考文獻

[1] 工研院工業安全衛生技術發展中心，物質安全

資料表，2015 年 5 月，[Online]Available:  
<http://www.ctgas.com.tw/image/userfiles/Methane.pdf>.

<http://www.ctgas.com.tw/image/userfiles/Carbon%20Monoxide.pdf>.

[2] 吉興公司之「儲煤及輸煤設備之安全監測規劃研究」，吉興工程顧問公司，台北，2012 年。

[3] 百度百科，雷達料位計，2015 年 5 月，<http://www.baik.baidu.com/view/1130268.htm>

[4] CONSPEC Controls, Monitoring CO and CH<sub>4</sub> Early Fire Detection in Coal-handling Facilities, Conspec Controls, Inc., May, 2015, [Online] Available:

<http://conspec-controls.com/resources/presentation-monitoring-carbon-monoxide-and-methane.asp>.

### 台電工程月刊徵稿啟事

\* 為使本刊物之內容更臻完善，歡迎有關火（水）力發電、核能發電、再生能源、輸變電、配電、電力系統、能源與環境、化學與材料、資訊與電腦、工程技術及其他等相關論著、技術經驗及譯者踴躍投稿，以饗讀者。

\* 投稿相關事宜，若有任何疑問，請聯絡我們，謝謝您！

☎ (02)2360-1095    ✉ u117212@taipower.com.tw

## 徵稿簡則

- 一、本刊歡迎電力工程相關之論述、譯述、經驗談及特約稿等。
- 二、來稿需簡潔明瞭、字數以不超過2萬字為原則（含圖、表；惟圖表篇幅以不超過全文20%為原則），並請附書面稿件乙份及微軟Word建檔之光碟片乙份。
- 三、來稿格式及章節編號等請依照所附之「稿件撰寫範例」撰寫。
- 四、文責自負；作者應簽署「台電工程月刊申請投稿暨著作財產權讓與聲明書」；譯稿請附原文及著作權人書面同意書。
- 五、文章一經採用著作財產權即屬本刊所屬之台灣電力股份有限公司所有，文章發表後酌致稿酬。
- 六、除另有聲明外，本刊對來稿有刪改權；無論刊登與否，恕不退稿。

## 稿件撰寫範例

### 促進台電公司學習型組織與網路化教學推廣導入之研究

A Study of Improvement of Learning Culture and Promotion of E-Learning in Taipower

楊世雄 \*  
Yang, Shyh-Shyong

楊中旗 \*\*  
Yang, George

蘇文華 \*\*\*  
Su, Wally

( 年度研究計畫論文 )

#### 摘要

|| ..... (300 字以內扼要說明目的、方法、結果與結論) ..... ||

#### Abstract

|| ..... ||

\* 台灣電力公司綜合研究所

\*\* 育基數位科技公司

\*\*\* 勝典科技公司

**關鍵詞(Key Words)：** (3~7個)學習型組織(Learning Organization)、數位學習(E-Learning)、網路學習平台(E-Learning Platform)、學習內容管理系統(Learning Content Management System)、學習元件(Learning Object)。

#### 壹、前言

#### 貳、(章節請按下列順序編排)

- 一、.....
  - 二、.....
    - (一).....
      - 1.....
        - (1).....
          - A.....
            - (A).....
              - a.....
                - (a).....
- 參、.....
- 肆、.....

#### 伍、誌謝

#### 陸、參考文獻

- 圖書：請依作者姓名、書名、版次、出版地、出版者、出版年、起訖頁數順序書寫。
- 期刊：請依作者姓名、論文篇名、期刊名稱、卷或期號、起訖頁數、出版年順序書寫。
- 註1：數字用語：請依「公文書橫式書寫數字使用原則」，具一般數字意義者以阿拉伯數字表示。
- 註2：請提供稿費收款人及聯絡人姓名、通訊地址、電話號碼。
- 註3：請於文中適當位置，標註相關參考文獻編號並以[ ]上標表示。
- 註4：附圖、表之文字說明均請以中文打字。
- 台電內部網頁：<http://10.52.200.200/w/>本所刊物/台電工程月刊
- 台電外部網頁：<http://www.taipower.com.tw/>電力生活館/台電圖書/台電工程月刊

# MONTHLY JOURNAL OF TAIPOWER'S ENGINEERING

Vol.812 April 2016

---

---

## **RENEWABLE ENERGY :**

- Research on the Maximum Amount of PV Integration in Island Distribution  
Systems Considering Voltage Variation and Three-Phase Unbalance.....Wu, Yuan-Kang et al.....(1)
- ATP Models for Photovoltaic Cells and Modules.....Wang, Yaw-Juen et al.....(23)

## **NUCLEAR POWER GENERATION :**

- Fracture Risk Assessment for the Pressurized Water Reactor Pressure Vessels  
under Pressurized Thermal Shock.....Huang, Chin-Cheng et al.....(33)

## **TRANSMISSION AND TRANSFORMATION :**

- Analysis of Ground Potential Rises in a High-Rise Building during  
a Direct Lightning Stroke under Different Grounding Schemes.....Lee, Chien-Hsing et al.....(48)
- Design and Implementation of Surveillance System and Geographic  
Information Buffer Analysis System for Transmission Facilities.....Lin, Tung-Bin et al.....(62)

## **ENERGY AND ENVIRONMENT :**

- Study of Taipower's Greenhouse Gas Emission Reduction  
and Carbon Credit Management Module.....Tsai, Hsien-Shiow et al.....(77)
- Case Study of Climate Change Risk Assessment for an Independent Power  
Producer.....Lo, Huei-Wei et al.....(83)

## **INFORMATION AND COMPUTER :**

- Parameter Measurements and Verifications of Dynamical Load Model  
in Taipower System (2) : Development and Application of Load  
Model Parameters Identification and Analysis Program LM\_ID.....Lee, Sheng-Huei et al.....(97)

## **OTHERS :**

- The Configuration of Safety Detection and Monitoring System for  
a Coal Storage Silo.....Huang, Bur-Lin.....(117)
- 
-