



台電工程月刊

MONTHLY JOURNAL OF TAIPOWER'S ENGINEERING

第810期 105年2月號

Vol.810 February 2016

再生能源：

未來再生能源大幅增加對台灣輸電系統影響及因應策略研究.....吳元康 等.....(1)

水力發電：

南溪壩址河川生態研究及魚類保育計畫第三階段研究.....謝國正 等.....(21)

火力發電：

高壓蒸氣套管式熱交換器性能計算程式.....廖世平 等.....(33)

輸變電：

輸變電投資計畫編擬新作法.....張忠良 等.....(39)

斷路器動作時間線上監測應用實例與研究.....陳邦封 等.....(45)

輸電級地下電纜線路部分放電遠端診斷系統.....陳建富 等.....(50)

能源與環境：

大環境變化主導第三核能發電廠附近海域水文與水質化學.....陳鎮東 等.....(64)

化學與材料：

線性SVM診斷法於變壓器故障診斷實務.....林明鐘 等.....(72)

資訊與電腦：

台電系統負載模型參數量測與驗證(一)：動態負載模型之建立與

參數辨識.....林培仁 等.....(79)

工程技術：

地下電纜及附屬機電QR-code設備維護排程管理系統.....尤子瑋 等.....(98)

低壓貫穿式比流器之廠商製程中間檢查作業概述.....郭士慶 等.....(106)

誠信

關懷

創新

服務

Integrity

Caring

Innovation

Service



台灣電力公司編印



台電工程月刊

第 810 期
中華民國 37 年 9 月創刊
中華民國 105 年 2 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

【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 朱濟群 呂天泰

沈宗華 吳瑞賢 何錦洪 林蒼喬 涂秀錦 侯明亮 洪紹平

范振理 陳慶守 曾重富 楊金石 蒲冠志 廖鴻徹 蔡世育

劉建勳 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

未來再生能源大幅增加對台灣輸電系統影響及因應策略研究

Study on the Impact of Substantial Growth in Renewable Energy on Taiwan Transmission System in the Future and Coping Strategies

吳元康*
Wu, Yuan-Kang

李清吟**
Lee, Ching- Yin

張文恭*
Chang, Wun-Gong

汪以仁**
Wang, Yi-Jen

蔡少宏***
Tsai, Shao-Hong

周湘滢****
Zhou, Hsiang-Ying

蒲冠志****
Pu, Guan-Zhi

廖偉民*
Liao, Wei-Min

許文華*
Xu, Wen-Hua

張立佐*
Zhang, Li-Zuo

張育銘**
Zhang, Yu-Ming

(103~104 年度研究計畫論文)

摘要

本計畫的主旨為研究國外再生能源併網對系統影響以及有關再生能源之併網規範，並針對國內相關現行規定提出具體的修正建議，且針對我國未來再生能源大幅增加對系統可能產生的影響提出可行的因應策略。本計畫的具體內容涵蓋以下幾點：蒐集各國最新再生能源併網相關規範，對國內現行併網規範提出具體的修正建議。蒐集國外對於離岸風力發電加入系統之審查標準與程序。蒐集先進國家應用於輸電等級再生能源以幫助提升系統穩定度的各種補償設備或調度策略之實例，並分析各項應用的投資成本與其效益。最後進行台灣中部地區大量風場併網後之系統衝擊分析(如電力潮流、故障電流、暫態穩定度、電壓變動率等)，並針對未來再生能源大幅增加對台電系統可能造成的衝擊提出可行的因應策略、調度策略及改善方案建議。

Abstract

The main objective of this project is to study the effect of integrating renewable energy into the power system, and the grid interconnection codes of renewable energy in foreign countries, and propose suggestions to modify Taiwan's existing regulations. Additionally, this study proposes practical strategies to solve the possible problems caused by a substantial increase of renewable energy in the future. The specific contents of the project are comprised of several major topics, namely, surveying the up-to-date interconnection standards/rules for renewable energy and proposing feasible suggestions to modify Taiwan's existing corresponding rules, collecting the review criteria and process for integrating offshore wind farms into grids in foreign countries, collecting examples of various compensation equipment or dispatch strategy for improving system stability in developed countries, and analyzing the investment cost and benefits for various applications. Finally, this study develops a simulation

*國立中正大學

**東南科技大學

***華夏科技大學

****台灣電力公司綜合研究所

code which implements the system impact analyses when a large quantity of wind farms in central Taiwan is integrated into the the power system. These analyses include power flow, fault current, transient frequency stability, and voltage variation. Additionally, according to the simulation results, this study proposes practical coping strategy, dispatch strategy, and suggestions for improving system stability to solve possible problems when a large amount of renewable energy is integrated into the Taiwan power system.

關鍵詞(Key Words)：再生能源併網規範(Grid Interconnection Code Of Renewable Energy)、調度策略(Study Of Dispatch Strategy)、暫態穩定度模擬(Simulation Of Transient Stability)、暫態頻率穩定度分析(Analysis Of Transient Frequency Stability)、改善策略(Improvement Strategy)。

壹、緒論

政府近年來積極推動再生能源政策，能源局更提出「千架風機，百萬屋頂」的願景，希望至 119 年再生能源(主要為風力發電及太陽光電)裝置容量能達到 12.5GW，約佔台灣電力系統裝置容量的 16.1%。尤其在風力發電之發展上，能源局更於 101 年 7 月 3 日公告「風力發電離岸系統示範」獎勵辦法，預計於民國 104 年前設置 6 架離岸示範風機，並於 109 年前完成裝置容量 600MW 以上之離岸風機裝置(我國國內離岸風力發電可開發容量約為 3GW)，因此在未來台灣再生能源設備大幅增加的情況下，勢必會對台電系統帶來強烈的衝擊且亦會對系統穩定度造成影響。

台灣為海島地形，每年盛行東北季風約可達半年以上，沿海、近海及離島許多地區之年平均風速可超過每秒 4 公尺，故台灣之風能潛力相當優越，而根據工業研究院資料調查顯示，台灣全年平均風速大於每秒 4 公尺的區域，其總面積約有 2000 平方公里，如台灣中北部山區、西部沿海及離島等均有豐富的風力資源，非常適合開發風力發電，估計可開發之總裝置容量至少 2.2GW 以上。這些風力資源若能充分開發使用，將有助於彌補國內自產能源不足之問題，近年來不論電力公司或民間業者已於台灣各地及離島設置許多風力發電場。由此可見，未來台灣再生能源的占比有可能大幅增加，因此相對應的因應策略必

須提前設計。本研究為台電公司委託的研究計畫，其研究主要的目的如下：

- 一、為了解國外再生能源併網對系統影響及電力品質之併網規範，並與國內現行規定比較，提出具體的修正建議。
- 二、並藉由系統模擬分析，針對我國未來再生能源大幅增加對系統可能產生的影響提出可行的因應策略。

本研究主要透過國外現行再生能源併網規範之蒐集，除深入瞭解全球再生能源發展趨勢外，並可作為我國現行併網規範之增修參考；另外透過國外各項補償設備應用於再生能源之策略探討，配合我國再生能源併網後之系統衝擊模擬分析，在成本效益考量下對台電系統可能會遭受到的衝擊提出具體可行的因應策略建議。本研究計畫預期成效為大幅增加我國再生能源的占比，並保持系統的可靠運轉。

貳、世界各國最新太陽光電併網規範

本研究針對國內外太陽光電系統併入配電系統的相關標準進行研究，各規範內容主要包含一般原則、電力品質要求、功率控制和電壓調節能力、系統異常時的回應特性、安全與保護、通用技術條件、以及通訊與系統測試等。本研究除了研究國際共通標準外(如 IEEE 與 IEC 相關標準)，亦搜集並分析各地區的併聯標準，包括德國、西班牙、英國、加拿大、美國加州與德州、澳洲、台灣、中國、韓國、以及日本等地區。

一、一般要求

(一) 最大允許發電量

大部分規範對於太陽光電系統的併網容量要求，大多是規定在 10kVA 以下，且併聯於低壓配電系統，如 IEC 61727、IEEE 929-2000、中國標準 GB/T 20046-2006 及我國標準 CNS15382。德國標準 VDE-AR-N 4105 對於最大併聯容量的限制最為特殊，其規定對於同一個連接點同一個導體的單相發電系統，其併網最大容量為 4.6kVA，因此，以單相連接分配給三個導體，最大為 13.8kVA，一旦超出上述極限值，任何展延應是直接以 3 相方式連接到三相系統。

(二) 功率因數

對於太陽光電併網之功率因數要求，大多數的規範都在 0.9 以上，無論是超前或滯後，只有 IEC61727、我國 CNS 15382 及中國 GB/T20046 標準是限定於滯後的功率因數，且在太陽光電系統的輸出大於 50%的變流器額定輸出功率時的條件下。日本 JEAC 9701-2012 規範明定不論在低壓或高壓配電線，原則上在併接點處其功率因數必須高於 0.85(不論是否有逆送電力)。

(三) 電壓偏差與電壓波動限制

一般標準要求分散式電源併入電網後，其所造成的併接點電壓波動不可超過某一個範圍，大致介於 3%~5%之間。例如德國 VDE-AR-N 4105 標準規定必須小於 3%。而英國 ER G83/1-1 與韓國分別在分散式電源的額定電流 $\leq 16A$ 以及低壓配電線路瞬間變動條件下，電壓變動不得超過 4%。而 IEEE Std 1547、美國加州 Rule 21、西班牙皇家法令 1663/2000 與 Order 5/9/1985 則規定電壓波動不得超過 $\pm 5\%$ 。此外，某些標準亦規定太陽光電或分散式系統必須在 88~110%的系統運轉電壓範圍內持續對電網提供功率，不得解聯。

(四) 頻率允許偏差與波動

IEC 61727 標準規範了正常穩態頻率變動範圍為系統標稱頻率 $\pm 1Hz$ ，若超出規定的範圍，則太陽光電系統應於 0.2s 內切離系統，與其相同頻率變動範圍的還有西班牙 RD 1663 規範。亦有標準規定系統的穩態頻率變動範圍為系統標稱頻率的 $\pm 1\%$ ，例如加拿大 CAN/CSA C22.3.9 與中國 GB/T 19939、GB/Z19964、GB/T 20046 等標準。德國標準 VDE-AR-N 4105 均規定在小的系統擾動情況下，系統允許的頻率變動在 47.5Hz~50.2Hz。IEEE 1547、美國加州 Rule21 及加拿大 CAN/CSA-C22.2 No. 257-06 標準在過頻部分，允許的變動範圍為 $+0.5Hz$ 。

二、電力品質要求

(一) 電壓閃爍

IEEE 1547 規範指出，分散式電源與區域電力系統併聯時，不應在併接點造成電壓波動超過區域電網現行電壓的 $\pm 5\%$ 。德國 VDE-AR-N 4105 標準是以電壓閃爍的強度為限制條件，必須分別符合 DIN EN61000-3-3(或 DIN EN61000-3-11)及 IEC61000 - 3-3(或 IEC61000-3-11)的限制值。

(二) 諧波電流畸變限值

大部分的太陽光電併聯規範將奇次諧波電流失真的限制區分成 5 個階段，並要求偶次諧波電流失真限值需在相同階段的奇次諧波電流失真限值的 25%，但在 IEC 61727、中國 GB 標準、我國 CNS 標準及澳洲 AS 4777 標準，對於第 5 階段，也就是 34 次以上的諧波則未給予規定，同時對於偶次諧波電流失真的限制只區分成 2 個階段。德國 VDE-AR-N 4105 規範除了規定諧波限值與電網短路功率成反比之外，所有的偶次諧波及第 25 次以上的奇次諧波，其各次諧波限值皆與各自次別相關。

對於諧波電流失真限制，上述各國標

準多是以變流器或發電系統額定輸出為基準電流，惟有 IEEE 1547、加拿大 CAN/CSA C22.3.9 及美國加州 Rule 21 是以配電系統之最大負載電流平均需求(15 或 30 分鐘)或發電設施額定電流二者取較大者為基準電流。此外各國標準對於 5%的總諧波電流失真限制，區分為總諧波失真(Total Harmonic Distortion, THD)與總需量失真(Total Demand Distortion, TDD)二類。

(三) 直流分量限制

當太陽光電系統經變流器與電網連接(未設置隔離變壓器)時，有可能會將直流電流注入電網。注入直流電流可能會對變壓器和其他網路設備造成不良的影響。加拿大 CAN/CSA C22.3.9、韓國電力公司分散型電源配電系統連接技術準則、以及美國加州 Rule 21 的標準皆是與 IEEE 1547 相同，亦即不大於系統額定輸出電流的 0.5%。英國 ER G83 建議自分散式電源注入之直流電流不得大於 20mA。澳洲標準 AS 4777.2 除了具有與 IEEE 1547 相同的規定外(不超過變流器額定輸出電流的 0.5%)，同時也增加一個限定的定值 5mA，並要求對於所注入直流的限值，取其二者中較大者。

(四) 電壓不平衡率

在各國太陽光電相關的併網規範中，要求電壓不平衡率限制條件的規範較少，僅有德國、澳大利亞及中國等三個國家的相關標準。在德國規範 VDE-AR-N 4105 中，特別規定當同一個網路連接點上有多個單相發電系統連接時，供電至三相系統的三條導線上之最大功率差不應超過 4.6 kVA，且對於三相不平衡電壓的最大允許值為 2%。該規範並將具有大型單相或兩相負載的電壓不平衡率放寬為 3%。在加拿大標準 CSA C22.3.9 中，無論是單相或三相分散式電源，皆是依據系統線路操作者規定辦理，典型值是在 3%以下，但在某些地區可允許較高的不平衡率。中國標準 GB/T

19939 及 GB/Z 19964，同樣都是要求不超過 GB/T 15543 所規定的 2%。

三、保護與控制要求

(一) 防孤島效應

大部分的國際併聯規範都會規定當系統發生故障而導致孤島運轉時，孤島系統內的太陽光電系統應能在指定時間內檢測出孤島現象並停止繼續供電至電網；且當電網的電壓與頻率逐漸恢復至正常操作範圍後，太陽光電系統仍須等待電網維持穩定並在指定的時間範圍之上，方能重新送電至電網。對於反孤島保護的操作時間(自發生孤島效應後，太陽光電系統檢測出孤島運轉開始到停止送電至配電系統的時間)，大多數的規範都要求在 2 秒以下，只有德國標準 VDE-AR-N 4105 規定 5 秒以下。

(二) 防雷和接地

在防止雷擊、突波及接地保護方面，IEEE 929 標準並未有所著墨，但提到太陽光電系統和介面設備應按照適用法規辦理接地。國際標準 IEEE 1547 在接地方面的要求，是不造成過電壓(亦即不超過併聯於區域電網的設備電壓額定值)，並且不得破壞區域電網接地故障保護的協調；而在承受電壓與電流突波部份，要求應遵照在 IEEE Std C62.41.2 或 IEEE STD C37.90.1 所定義的適用環境。

(三) 短路保護

各國有關太陽光電或其他分散式電源併聯的規範中並非都會對過電流、短路保護功能有所規定。國際標準 IEC 61727 明訂太陽光電系統應依照 IEC 60364-7-712 的要求，在交流端供應線路應設計短路保護或於連接交流主電源處安裝過電流保護裝置。國際標準 IEEE Std 1547 雖未提及短路電流的相關規定，但對於互連系統要求需具備承受突波電壓與電流的能力。德國標準 DIN V VDE V 0126-1-1，特別針對太

陽光電設施的故障電流有特別的要求，其將故障電流區分為三個階段，當故障電流愈大，則切斷裝置的反應時間需要愈快速。日本 JEAC 9701-2012 規範要求，對於分散式電源的併聯系統，若此分散式電源可能會增加系統的啟斷容量或造成線路瞬時電流增加的疑慮時，分散式電源的設置者需要加裝限流電抗器以限制短路電流。

(四) 隔離和開關

各國併聯規範對於在太陽光電或分散式電源與配電系統之間裝設隔離開關的要求，主要是可手動隔離、可鎖定在開路位置、隔離完成之視覺驗證、以及應設置於方便檢查、維護、操作之位置等四項。國際標準 IEC 61727、大陸標準 GB/T 20046、以及我國標準 CNS15382，對隔離與開關的要求是併聯系統應符合 IEC 60364-7-712 的規定，然而 IEC 60364-7-712 僅要求在太陽光電變流器的直流側應提供一個隔離開關，並未有前述四項要求。

(五) 恢復併網

各國標準在恢復併網(送電)延遲時間的要求上，主要區分成二種：一為在電網的電壓和頻率恢復至正常範圍後，發電系統在限定的時間內不得併網或送電，如 IEEE 1547、IEC 61727、加拿大 CSA-C22.2 No. 257-06、中國 GB/T 19939、GB/T 20046 以及我國 CNS15382，其共通點是最大延遲時間為 5 分鐘並且未規定延遲時間由哪一方指定；另一種為在電網的電壓和頻率恢復至正常範圍，並維持穩定至少一段時間以後，發電系統方可併網或送電，如 IEEE 929 等。德國標準 VDE-AR-N 4105、美國 Rule 21 及澳洲 AS 4777.3，三者所要求的延遲時間相同，皆為 60 秒以上。

(六) 電網同步

目前只有與分散式電源有關的規範對於同步有所限制。IEEE 1547 標準將分散式電源以系統額定容量分成三個區段，分別為 500 kVA 以下、500~1500kVA、以及

1500~10000kVA，而各有其要求。基本上發電容量愈大，同步差異的容許值愈小。與 IEEE 1547 相同要求的另有美國加州 Rule 21、加拿大 CSA C22.3.9 及韓國電力公司分散型電源配電系統連接技術準則。德國 VDE-AR-N 4105 標準對於連接同步發電機至電網，要求應提供同步裝置並與網路運營商協調設定值，同時還列出常見的同步最大限制值供參考。

(七) 避免 EMI 電磁干擾

國際上大多數併聯規範僅指出太陽光電併聯系統應當有能力承受電磁干擾的環境，或是建議參閱其他 EMI 相關規範來實施。只有國際標準 IEEE 1547 及加拿大標準 CSA C22.3.9-2008 明訂應遵守 IEEE C37.90.2 或 CSA-CEI/IEC 61000-4-3 之規定。

(八) 異常電壓保護跳脫

當在併接點檢測出異常電壓時，太陽光電系統應在指定時間內停止對電力系統供電或從電網隔離。關於太陽光電系統異常電壓響應時間的要求。基本上異常電壓區分為 4 個階段，而每個規範對於 4 個階段的電壓範圍，幾乎是大同小異。德國 VDE-AR-N 4105 及 DIN V VDE V 0126-1-1、西班牙 RD 1663/2000 及 Order 5/9/1985、英國 ER G83、澳洲 AS 4777.3 以及我國台灣電力股份有限公司再生能源發電系統併聯技術要點都只將電壓保護設定為 2 個區段。

(九) 異常頻率保護跳脫

當系統頻率偏離過多超出限制時，太陽光電系統應停止供電。如果在指定的跳脫時間內，系統頻率回復到正常的連續運轉狀態，則太陽光電系統不需停止對系統供電。允許偏差範圍和時間延遲的目的，是允許對短期擾動繼續操作，避免在公共網路系統的微幅擾動過多時產生過多的誤動作。不論是太陽光電或其他分散式電源系統，凡發電容量在 30kVA 以下者，其最

大跳脫時間皆不超過 2 秒。德國標準 VDE-AR-N 4105 將過頻保護設定點提高為 51.5Hz，並在頻率為 50.2~51.5Hz 的區間中，依發電系統類型而有不同的保護對應方式。

四、我國再生能源併網規範之具體增修建議

綜覽以上規範，針對我國再生能源併網規範的增修有以下幾點建議：

- (一) 由於 PV 系統技術越趨成熟以及單位成本逐漸下降，以致 PV 系統的裝設案例愈來愈多，若規範自我限制於在某個電壓等級只能併入某個發電量，恐無法符合未來大規模建置再生能源的需求，所以應建議可以參考德國 VDE-AR-N 4105，以單相連接分配給三個導體，最大為 13.8kVA，若超出此限制值，則應以三相方式展延連接到三相系統，當然修正細節亦要參考國內電網的特性。
- (二) 有關直流電流注入的限制，共計 18 個規範有相關規定。主要是限制 PV 的輸出電流不超過額定電流的 1%、0.5%、或 0.25%。為了維持電網的電力品質且避免太過嚴苛的要求，或許可建議直流注入的限制值為不超過額定輸出電流的 0.5%。
- (三) 建議異常電壓範圍可以區分為 4 個階段，分別為小於 50%、50%以上且小於 88%、大於 110%且小於 120%以及 120%以上，至於最大允許跳脫時間，則建議分別為 0.1 秒、2 秒、2 秒和 0.16 秒。
- (四) 在異常頻率跳脫方面，大多數的規範要求在發電容量 30kVA 以下時，頻率差異限制範圍為 $\pm 0.5\text{Hz}$ ，而最大跳脫時間介於 0.1s~0.2s 之間，例如 IEEE 1547 要求的時間為 0.16s。因此建議採用上述參數，並以此修正我國併聯規範。而對於 30kVA 以上的 PV 系統，建議當系統頻率介於標稱頻率 $\pm 0.5\text{Hz}$ ，其跳脫時間可以選擇在 0.16s-180s 之間。
- (五) 在孤島效應的保護上，本研究中所討論的規範絕大多數都是要求必須在 2 秒內檢測出孤島現象並停止供電至電網。另外在恢復併網

要求部分，還是應該考慮所併接電網的負載特性，故建議應該與電網業者協商，在 20 秒至 5 分鐘之間擇定延遲的時間長度。此因 IEC 61727 和 IEEE 1547 都主張電力系統電壓、頻率恢復至允許範圍後，太陽光電或其他分散式電源系統必須在最長 5 分鐘內恢復送電或併網，所以建議採用 IEC 61727 之要求，恢復併網時間介於 20s 至 5min。

- (六) 本研究所探討的規範中，有關避免電磁干擾的要求，主要是應遵守 IEEE C37.90.2 或 IEC 61000-4-3 的規定，而上述 2 篇規範皆是由國際上廣泛被認可的機構所發布，故應可同列為避免電磁干擾的應遵守文件。
- (七) 隔離 PV 系統的相關規定，其概念不外乎手動操作、開關動作的驗證、安全以及便利，彼此不互相衝突，故建議應全數採納，亦即應在 PV 變流器的直流測裝設隔離開關，其具有可手動隔離、可鎖定於開路位置、可提供隔離完成之視覺驗證，以及設置於方便檢查、維護、操作之位置等四項特性。
- (八) 在防雷與接地部分，IEC 61727 要求應依照 IEC 60364-7-712 辦理，只是 IEC 60364-7-712 的規定較為簡略。例如 IEC 60364-7-712 第 712.54 條規定「保護等電位聯結導體安裝的地方，應與直流電纜和交流電纜及配件並聯，並盡可能緊密接觸」。然而 IEEE 1547 規範較為嚴謹，故建議應參照 IEEE 1547 的規定。
- (九) 裝設短路保護或過電流保護裝置是本研究中各個規範對於短路保護的普遍要求，只是若能明訂保護設備的相關設定，如電流限值、最大允許跳脫時間等則更佳。
- (十) 有關逆向功率的規範中，可分為發電系統逆送電力至直接併接點之電網與其次級電網二種，其相關限制條件為發電容量不得超過變壓器容量某一個百分比或逆向電流大於變流器額定輸出的限制值時，應將發電系統隔離等。但沒有規範同時針對上述 2 種情況作出規定，因此建議可同時考慮。

參、各國風力發電併網技術規範

目前已頒布風場併網準則的主要國家電網包括德國、英國、愛爾蘭、北歐電力市場、丹麥、比利時、加拿大、美國、西班牙、義大利、瑞典，以及紐西蘭等^{[1][11]}。在新修訂的電網準則中，強調風場併網之運行應貢獻電壓與頻率的控制，並且特別重視當電網發生事故時，風場所呈現的系統動態特性(如電壓降等)。因此，現行大部份的風力機組併接準則強調風機必須具備幾項重要特性：

- 一、延伸系統電壓與頻率變動範圍限制
- 二、實功調節與頻率控制的能力
- 三、虛功/功因控制與電壓調節的能力
- 四、低電壓穿越(LVRT)能力

上述風場併網準則之要求，主要目的在確保風場在正常運轉以及系統發生事故時，盡可能讓風場維持與系統併聯運轉提供輸出功率。其詳細規範說明如下：

一、電壓與頻率變動範圍限制

根據新的風場併網準則，風場必須能操作於系統所規定的電壓與頻率範圍之內，即使在某些非正常操作的情況下，也能夠維持正常的範圍內。而這些電壓與頻率操作範圍，又可被區分成下列操作區域：

- (一) 維持連續運轉：風場併接點(PCC)之電壓與頻率變動在此區域範圍內，風機必須持續與系統併聯運轉並且盡可能提供最大功率輸出。
- (二) 維持某一段時間內運轉：風場併接點之電壓與頻率變動在此區域範圍內，風機必須維持一段指定時間內運轉並可適當減少實功輸出以確保風機運轉安全，當超過指定時間電壓與頻率仍未回復至正常運轉範圍時，可透過自動保護系統將風機解聯。
- (三) 立即與系統解聯：當系統電壓與頻率過高或過低超出限制範圍時，為保護風機系統不受損壞，必須立即與系統解聯。

由於各國電網結構與天然條件不盡相同，例如歐洲大陸電網互聯性高屬於強電網；另外如英國、愛爾蘭以及台灣等為孤島系統，電網屬性為弱電網系統。對於電壓與頻率變動範圍之限制，必須有所不同。強電網系統，風場之貢獻較少，為維護風機機組電氣設備安全，一般採較窄之電壓與頻率範圍規範。相對地，在弱電網系統，風場必須盡可能擔負起更多的系統功率輸出，因此採用較寬之電壓與頻率範圍規範。圖 1 為各國電網準則在頻率變動範圍限制之比較，其中分為 50Hz 系統與 60Hz 系統。各國依據電網結構與天然條件各自設定符合系統穩定運轉之條件。

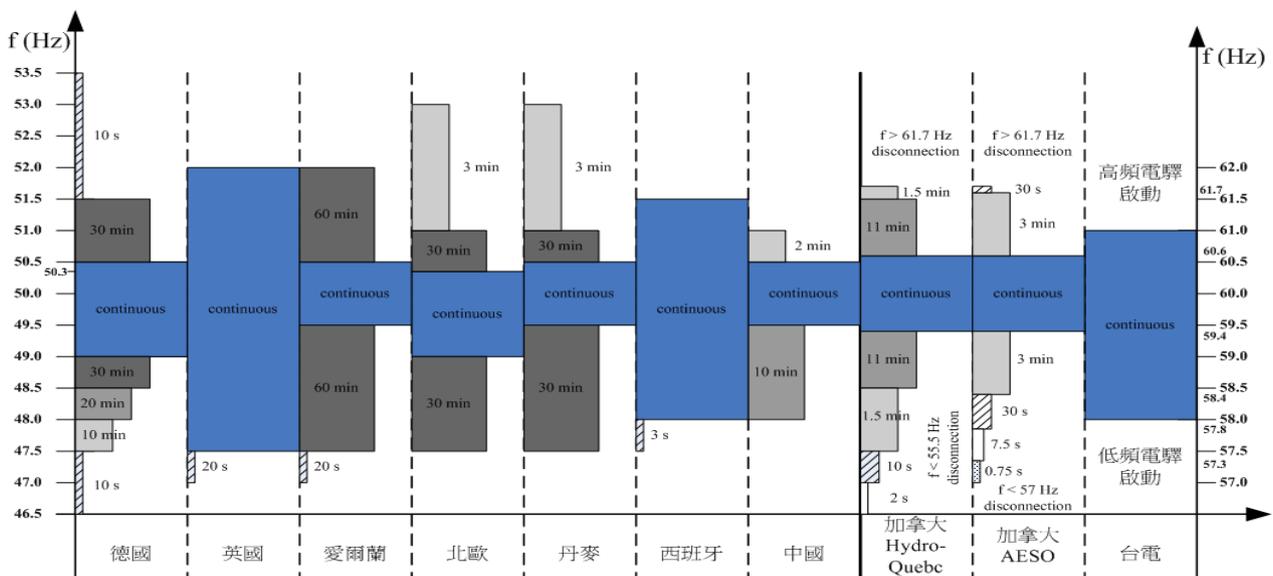


圖 1 各國電網準則對風場之頻率操作限制範圍比較

二、實功與頻率控制

在正常運轉之系統，有關實功控制準則之定義為：輸電系統營運者透過系統頻率變化能控制實功輸出之能力。依據此規範準則，一般風場必須要求它能夠參與系統之一次或二次頻率控制，進而能夠調節其輸出功率。因此，目前各國對於系統正常運轉時，風場之實功控制準則如下：

- (一) 德國要求風場必須具有每分鐘風場額定容量 10%的實功爬升速率(Ramp Rate)。
- (二) 愛爾蘭為每分鐘 1 至 30MW 的實功爬升速率。
- (三) 北歐市場為每分鐘額定功率 10%的爬升速率。
- (四) 丹麥為每分鐘額定功率 10-100%的爬升速率。

根據德國電網準則，當系統頻率超過 50.2Hz，風場必須以每 1Hz 降低 40%風機輸出實功之速率降低實功輸出，若是針對離岸風場，則要求更加嚴格：當系統頻率超過 50.1Hz，風場必須以每 1Hz 降低 98%風機輸出實功以及每 1 秒降低 25%風機輸出實功之速率降低實功輸出。英國電網準則要求風場必須具有頻率控制，包括主頻率控制、二次頻率控制，以及過頻率控制，並要求離岸風場須具備系統頻率量測的即時通訊能力。愛爾蘭電網準則要求風場必須依據“功率-頻率”響應曲線：當系統頻率維持在 49.7-50.3Hz 之間，則風場實功輸出為可發功率的 95%左右，假如系統頻率低於 49.7Hz，則風場輸出實功將逐步增加，相反地，若系統頻率高於 50.3Hz，則風場實功輸出將呈線性降低，一旦系統頻率超過 52Hz，則風場不可供應實功。此外，丹麥及加拿大 Hydro-Quebec 電網準則亦對風場的輸出實功及頻率控制有所要求，特別是針對 10MW 以上的大型風場，必須要求能具有頻率控制能力，以致於能降低短時間(小於 10 秒)內之較大頻率(大於 0.5Hz)變動狀況。總體而論，大部分風場併網準則均規定風場須具備提供頻率響應的能力，不過要特別注意的是，實功輸出上升速率必須與該系

統傳統機組的相對速率互相匹配。

三、虛功控制與電壓調節

電力系統電壓調節與虛功控制有緊密的關係，因此在併接準則中所強調的虛功控制能力主要是與系統電壓有直接的關係。實際上，虛功控制需求取決於電網的特性(包括短路容量與阻抗)。值得注意的是，並非每一種風機都有虛功控制的能力，而且風場常遠離負載中心，因此更突顯虛功控制的重要性。各國併接準則均規定在某些特定操作電壓下之功率因數限定值。此外，大部分的併接準則以 P-Q 曲線來呈現風場在特定功率因數下所需要的虛功供應能力，另外可依據風場地點以及所在電網強弱選擇不同 V-Q 操作限制範圍。

四、低電壓穿越能力

電力系統中發生短路故障時，會造成系統電壓降，當高占比風場發生故障時，風場必須具備有在某一段時間(約幾個周波，0.1~0.2 秒的時間)內耐受某一暫態電壓降(甚至到零電壓)的能力，確保此段時間內風場不能與系統解聯，並能持續供應系統所需的功率，而此維持低壓運轉之能力稱為低壓穿越能力(LVRT)。由表 1 與圖 2 中可歸納出，在德國、英國、北歐、丹麥、比利時、加拿大、瑞典、紐西蘭等國，即使發生故障導致電網電壓下降至 0V，風場在某一定時間內不可與系統解聯。

五、電壓降期間虛功電流供應要求

風場電壓規範除了電壓跌落之 LVRT 限制外，為了維持系統電壓穩定，部分併接準則要求在系統故障期間，風機必須支援系統虛功電流以及在故障清除後快速回復系統電壓之能力。德國 E.ON 要求風場必須在系統電壓跌落 5%以上時必須在 20 ms 時間內提供虛功電流。而西班牙併接準則要求當發生電壓降情形，風場必須在 100ms 以內停止自系統吸收虛功，且能夠在 150ms 內提供虛功。此外，在英國及愛爾蘭併接準則的要求上，亦規定當發生電壓降時，風場能夠具備提供最大虛功電流。

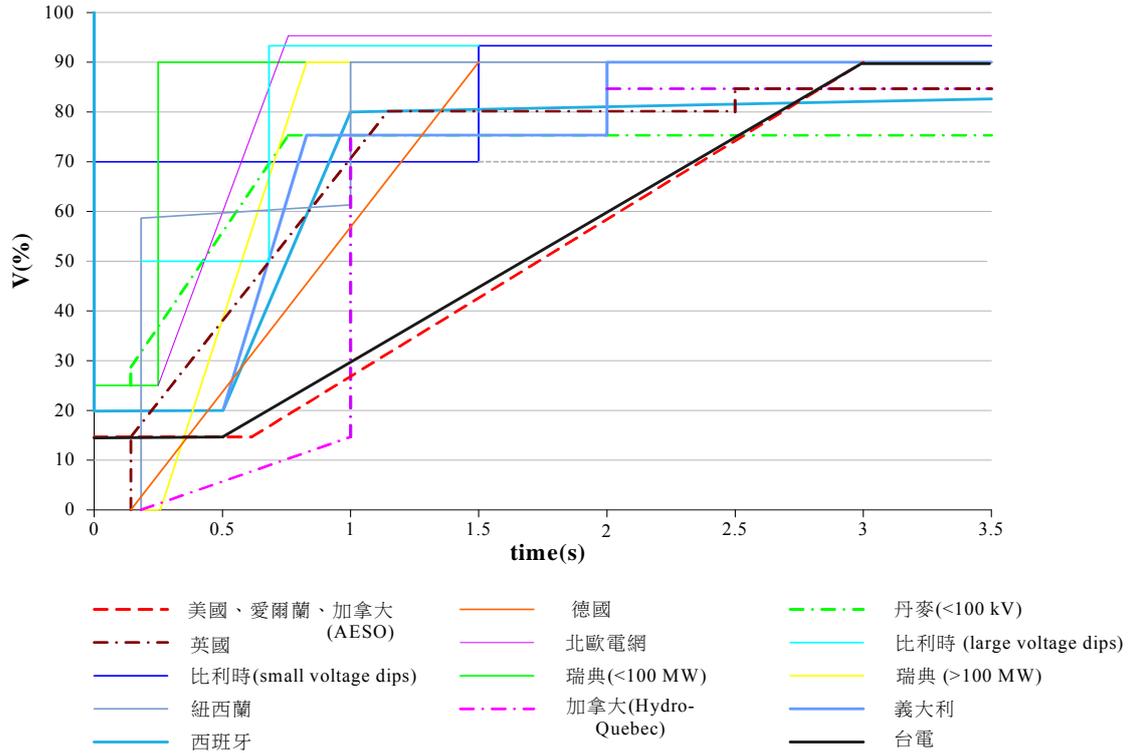


圖 2 各國電網準則對 LVRT 規範之比較

表 1 各國 Grid Code 低電壓穿越特性要求之比較

準則發行國家	故障允許時間(ms)	電壓跌落值 (% of 額定電壓)	電壓回復時間 (s)
德國 E.ON	150	0	1.5
英國	140	0	1.2
愛爾蘭	625	15	3
北歐電力市場	250	0	0.75
丹麥(小於 100KV)	140	25	0.75
丹麥(大於 100KV)	100	0	10
比利時(大電壓跌落)	200	0	0.7
比利時(小電壓跌落)	1500	70	1.5
加拿大(AESO)	625	15	3
加拿大(Hydro-Quebec)	150	0	1
美國	625	15	3
西班牙	500	20	1
義大利	500	20	0.8
瑞典(小於 100MW)	250	25	0.25
瑞典(大於 100MW)	250	0	0.8
紐西蘭	200	0	1
台電	500	15	3

肆、輸電等級再生能源利用補償設備或調度策略提升系統穩定度之實例

再生能源是否能大幅的推廣與應用與幾項重要技術息息相關，分別是預測技術、儲能技術、控制技術、發電技術、以及負載管理技術等。若能有效提升這些技術的能力，將可大量引進再生能源發電至電力系統之中。

一般儲能系統必須具備的基本重要特性包括具備較低的建置、操作、以及維護成本，且必須遠低於一般緊急備用發電機，如柴油或天然氣發電機。此外，能源回覆效率(Round-trip Efficiency)也是儲能系統重要的考量。而儲能系統若離負載中心愈近愈佳。以儲能的型式來區分，目前典型能源儲存的方式大約分成下列幾類型：電能(如超級電容器(Supercapacitor))、電化學能(如傳統鉛酸電池、Flow Cell、燃料電池)、動能(如飛輪(Flywheel))、位能(如空氣壓縮儲能系統(CAES)、抽蓄電廠(Pumped Hydro))、化學能(如氫儲能系統(Hydrogen-based))、磁能(如超導磁能儲存系統(SMES))、以及熱能及熱化學能。

若以響應時間區分，儲能系統可分為短期及長期儲能系統。短期儲能系統必須具有數微秒至數秒的反應時間，而長期儲能系統的響應時間則為數秒至數分鐘。典型短期儲能系統包括超級電容、飛輪系統、超導磁能儲存系統、以及傳統電池。長期儲能系統一般擁有較大的儲存容量，包括抽蓄水力以及空氣壓縮儲能系統，而其反應的時間亦較為緩慢。此外，近年液流電池(flow cell)及燃料電池(Fuel Cell)亦逐漸開發並增加其額定

容量，作為長期儲能系統所使用。

針對再生能源的發電特性，其相對應的儲能系統可建置長短期兩種儲能系統以作為互補，形成所謂多層級的儲存能力。長期儲能系統設計儲存大規模的能量，而短期儲能系統儲存較小量但可快速控制的能源。舉例而言，對於某些再生能源的間斷性發電，可搭配響應時間快，瞬間輸出功率高的飛輪系統或超導磁能儲存系統予以穩定輸出。而針對較長時間的電力短缺，可利用空氣壓縮儲能系統、抽蓄電廠、或電池予以補強。

伍、各種補償設備或調度策略的投資成本與其效益分析

為分析相關設備的投資成本與效益，本節將依設備之功能區分為兩部分來加以討論。一部分為改善系統運轉特性相關的無效功率補償設備，另一部分為維持再生能源系統穩定供應電力所需之儲能設備；我們將分別對此兩部分進行分析。

一、無效功率補償設備投資成本與效益分析

典型並聯型控制補償元件包含並聯電容或電抗補償器、靜態虛功補償器(SVC)、以及靜態同步補償器(STATCOM)。

表 2 為並聯補償設備之成本^[12]及其優缺點。STATCOM 與 SVC 相比，STATCOM 調節無效功率能力更佳、響應速度更快、運轉範圍更廣、補償電流諧波含量更少、使用的直流電容元件比 SVC 使用的交流電容元件體積更小，因此可大大減少設備的體積。

表 2 並聯補償設備之成本與優缺點

補償設備	成本(US \$)	功能	優點	缺點	
並聯電容組	8/ kVAR	1. 電壓調整 2. 無效功率調整 3. 功率因數改善	1. 成本低 2. 維護容易	1. 電壓控制為階段式 2. 功能較差	
SVC	40/ kVAR	1. 電壓調整 2. 無效功率調整 3. 功率因數改善 4. 諧波抑制	5. 提升暫態穩定度 6. 提升電壓穩定度 7. 抑制阻尼振盪	1. 能有效提供無效功率補償提升系統運轉特性。 2. 較 STATCOM 造價便宜	1. 造價高 2. 佔地面積大。
STATCOM	50/ kVAR	1. 電壓調整 2. 無效功率調整 3. 功率因數改善 4. 諧波抑制	5. 提升暫態穩定度 6. 提升電壓穩定度 7. 抑制阻尼振盪	1. 能有效提供無效功率補償提升系統運轉特性。 2. 體積較 SVC 小	1. 造價最高 2. 控制複雜

二、儲能設備投資成本與效益分析

一般儲能系統須具備幾項重要之特性，其中包括具備低建置、操作及維修成本，且須低於一般緊急備用發電機，如柴油及天然氣發電機等。此外，能源回覆效率亦是儲能系統重要考量因素之一。若儲能系統愈接近負載中心愈佳。以儲能型式區分，目前典型電力儲能方式約可分為下列幾項類型：

(一) 超級電容器(Supercapacitor)

在電力系統的應用部分，主要使用於電力品質的改善。目前商業化的超級電容器大部分低於 100kW 以及低於 10 秒的放電時間，因此常使用模組串聯來提高輸出電壓。超級電容器的優點在於充放電的速度遠快於傳統的化學電池(30 秒至 40 秒的時間內可充電至額定容量的 60% 至 80%)，且由於其成份沒有電解液，因此在相同儲存容量下的重量遠輕於一般電池。此外，它幾乎沒有充放電次數(高於一百萬次以上)以及最大放電量的限制，而且操作溫度範圍亦能下探至攝氏-25 度，它的平均壽命可高達 25 年以上。但是它的最大缺點是儲能密度低於一般的化學電池且放電時間很短。

(二) 電化學(Electrochemistry)儲能系統

一般電力系統所使用的較大型傳統電化學電池。它們的最大優點在於響應時間快、不受地形及地理位置所影響，但缺點為擁有較低的能源及功率密度，因此不易建置大型儲能系統。此種電池儲能須注意放電次數的限制、放電的最大容許量、充放電速率，能源效率，以及使用壽命等。

(三) 動能儲能系統

最典型的動能儲存系統為飛輪儲能系統(Flywheel)。此系統可視為一機械型式的電池：將能量以旋轉動能的型式儲存。它包含儲存能量的飛輪、電能與機械能間轉換用的電動機、用於支撐飛輪的磁懸浮系統、以及電力電子轉換與其控制系統等。

目前飛輪儲能系統一般分為兩大類：一為傳統的鋼製低速轉子(低於 10,000 rpm)、另一為複合材料製的高速轉子。飛輪系統的優點包括它的回覆效率可達 80%~85%，較一般的化學電池效率高出許多。同時它具有相當快速的充放電效率，且具有較長的使用壽命。它的儲能能力並不受周遭環境如溫度的影響。然而它的缺點是放電時間短，遠低於一般的化學電池，此外，它的成本也較化學電池高。一般大型的電力應用可搭配柴油電機以解決較長時間電力短缺之儲能供應。

(四) 位能儲能系統

一般典型的位能儲存系統包括抽蓄水力儲能(Pumped Hydro Storage)以及空氣壓縮儲能系統(Compressed Air Energy Storage, CAES)。目前世界上最廣泛使用的大型儲能系統即是抽蓄水力儲能。然而由於此種儲能系統相當受限於地理環境、且系統建置的時間較長、所需土地面積廣，因此並無法在任何地方都能發展。另一種較大型的儲能系統(單一機組大於 100MW)為空氣壓縮儲能系統，此系統利用離峰電力將空氣壓縮灌入人造地下高壓空氣儲存槽。當系統負載處於尖峰時再釋放此高壓空氣，並與燃料(一般為天然氣)混合燃燒產生蒸氣推動發電機發電。由於高壓空氣可節省約一般天然氣發電用量的三分之二，因此大幅降低發電成本。它的優點是儲能量大，且儲存高壓空氣的時間可長達一年，因此非常適合作為中長期的儲能系統。缺點是高壓空氣儲存槽受限於地理結構，並不是所有地質結構均可設計建造人工儲存槽。一般空氣壓縮儲能系統的回覆效率約為 85% 左右。

(五) 氫儲能系統(Hydrogen)

氫儲能系統近年來已愈來愈得到重視，特別是結合再生能源應用的場合。此系統主要包括電解裝置(Electrolyser)、氫氣儲存裝置、以及發電裝置。電解裝置用

來將再生能源所發的電力將水電解產生氫氣，而利用儲能裝置將氫氣壓縮並儲存，最後再利用發電裝置如燃料電池將氫氣經化學反應產生電力。

(六) 超導磁能儲能系統(SMES)

此系統為將交流電轉換至直流後，將此直流電流引入金屬超導電磁線圈(主要材質為 Nb-Ti 或 Nb₃Sn)，並以直流電流流經線圈產生磁能方式儲存能量。此線圈藉由冷凝系統保持低溫超導溫度(約攝氏 -269 度)以保持其超導特性，因此可近似為無電阻線圈，使能量損耗達到最小。其儲能容量取決於直流電流的大小以及線圈的長度。理論上一公尺直徑的線圈可在一秒鐘供應 1MW 的儲能，而 1000 公尺直徑之超導線圈可供應五小時 1000MW 的儲能。目前許多小型之超導磁能儲存系統(如 1MW-1 秒)已經成功開發。一般超導儲能系統的效率高達 98%以上，而充放電的速度可高達 17 毫秒，此外，它並沒有如電池儲能有充放電的次數限制，且其壽命與其充放電次數無關。

(七) 各型儲能系統之優缺點比較

各種儲能系統之優缺點的對照表如表 3 所示。

三、各型儲能系統之經濟性與技術性比較

針對各類型儲能系統，其經濟及技術層面的比較是需要的。經濟面包括系統建置成本(Capital Cost)、運行操作成本、維護成本，以及使用年限之置換成本。以技術層面來探討，儲能系統的響

應時間、可儲存之額定容量、可提供之瞬時功率、可持續釋放儲能之過度時間(Bridging Time)、以及可充放電的次數皆是儲能系統的重點特性。

(一) 經濟性探討

儲能系統建置成本包括能源相關成本、功率相關成本，以及周邊控制及配備成本，表 4 提供典型儲能系統的資本分析以及效率。

(二) 技術性探討

高功率高儲能的系統，典型如抽蓄水力、壓縮空氣儲能等，均適合應用於負載管理的儲能系統。而低儲能低功率的系統，包括超級電容以及低速飛輪系統，此類型儲能裝置主要應用於電力品質的改善。介於中間儲能能力的(中型儲能-功率系統)則包含超導儲能、鉛酸及燃料電池，以及高速飛輪系統，這些系統一般適合用於分散式電源的儲能系統。

大部分的儲能系統皆能在 1/4 cycle 內快速反應，而燃料電池的響應時間範圍較長，但仍較一般備用柴油引擎的上線速度快，近期已有反應快速的燃料電池商品化。此外，抽蓄水力及壓縮空氣儲能系統需要大於一分鐘的響應時間。此外，在單位儲能體積中，電池擁有相對較高的能量密度，適合較長期放電的儲能系統，而超級電容及超導儲能系統具有相對較高的功率密度，但相對的能量密偏低，因此適用於短時間高功率放電的儲能應用。

表 3 各類型儲能系統的優缺點比較

儲能種類	優點	缺點
超級電容	<ol style="list-style-type: none"> 1. 充放電速度快 2. 無充放電次數限制 3. 無最大放電量限制 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 初期花費高 2. 能量密度低
鉛酸電池	<ol style="list-style-type: none"> 1. 技術成熟 2. 初期花費低 3. 易維護 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 能量密度低 2. 操作溫度範圍相對狹隘 3. 使用週期短 4. 充放電次數限制
鎳鎘電池	<ol style="list-style-type: none"> 1. 能量密度較鉛酸電池高 2. 較高可靠度與低維護成本 3. 可充放電次數高於鉛酸電池 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 能源效率較低 2. 容量測試困難
鈉硫電池	<ol style="list-style-type: none"> 1. 能量密度高於鉛酸電池 2. 高能源效率 3. 高充放電次數 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 初期花費高 2. 製造商較少 3. 需要額外加熱系統
氯化鎳電池	<ol style="list-style-type: none"> 1. 較寬廣的操作溫度範圍 2. 可承受過度充放電 3. 較佳的安全特性 4. 較高的輸出電壓 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 能量密度低
鋰離子電池	<ol style="list-style-type: none"> 1. 能量密度高 2. 高充放電次數 3. 高能源效率 4. 操作溫度範圍相對寬廣 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 初期花費高 2. 需要平衡與充電控制電子儀器
全鈳電池	<ol style="list-style-type: none"> 1. 額定功率與能量是可獨立 2. 對大型系統有相對較高的能量 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 少數製造商 2. 有限的“鈳”來源
鋅溴電池	<ol style="list-style-type: none"> 1. 能量密度高 2. 穩定的電壓曲線 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 少數製造商 2. 機械部分需維護
燃料電池	<ol style="list-style-type: none"> 1. 低污染 2. 低噪音 3. 燃料來源多元化 4. 應用範圍廣 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 成本及初期花費高 2. 安全性要求高 3. 能量密度低 4. 響應速度慢
飛輪儲能	<ol style="list-style-type: none"> 1. 電流密度高 2. 回復效率高 3. 充放電速率高 4. 使用壽命長 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 初期花費高 2. 能量密度低
壓縮空氣儲能	<ol style="list-style-type: none"> 1. 技術成熟 2. 使用週期長 3. 對大型電力系統費用低 4. 能量是可獨立的 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 需要適當的場址地質 2. 有下降速率的限制 3. 需較大的投資金額與工程
抽蓄水力	<ol style="list-style-type: none"> 1. 技術成熟 2. 使用週期長 3. 對大型電力系統費用低 4. 能量是可獨立的 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 需要適當的場址 2. 需較大的投資金額與工程
氫儲能系統	<ol style="list-style-type: none"> 1. 能量密度高 2. 儲能範圍寬廣 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 初期花費高 2. 回復效率低

表 4 能量儲存應用特性(各儲能系統成本及效率分析)

技術選項	發展情況	能源容量 (MWh)	功率 (MW)	時間 (hrs)	%效率 (total cycles)	總成本 (\$/KW)	成本 (\$/KW-h)
大容量能量存儲，支持系統和再生能源完整運行							
抽蓄水力	成熟階段	1680-5300	280-530	6-10	80-82 (>13,000)	2500-4300	420-430
		5400-14,000	900-1400	6-10		1500-2700	250-270
CT-CAES (地下)	展示階段	1440-3600	180	8	>13,000)	960	120
				20		1150	60
壓縮空氣除能 CAES (地下)	商品化階段	1080	135	8	>13,000)	1000	125
		2700		20		1250	60
鈉硫電池	商品化階段	300	50	6	75 (4500)	3100-3300	520-550
先進鉛酸電池	商品化階段	200	50	4	85-90 (2200)	1700-1900	425-475
	商品化階段	250	20-50	5	85-90 (4500)	4600-4900	920-980
	展示階段	400	100	4	85-90 (4500)	2700	675
釩氧化還原電池	展示階段	250	50	5	65-75 (>10000)	3100-3700	620-740
鋅/溴氧化還原電池	展示階段	250	50	5	60 (>10000)	1450-1750	290-350
鐵/鉻氧化還原電池	研發階段	250	50	5	75 (>10000)	1800-1900	360-380
鋅/空氣氧化還原電池	研發階段	250	50	5	75 (>10000)	1440-1700	290-340
能量存儲供 ISO 快速頻率調節和維持再生能源完整運行							
飛輪	展示階段	5	20	0.25	85-87 (>10000)	1950-2200	7800-8800
鋰離子電池	展示階段	0.25-25	1-100	0.25-1	87-92 (>100,000)	1085-1550	4340-6200
先進鉛酸電池	展示階段	0.25-50	1-100	0.25-1	75-90 (>100,000)	95-1590	2770-3800

陸、台灣未來高占比再生能源之系統衝擊分析

一、台灣未來高占比再生能源系統介紹

台灣電力系統屬於長條型的輸電結構，可分為北、中、南三個區域；其中以 345kV 輸電線為主要傳送的電力媒介。本文主要以西元 2024 年台電系統為研究標的，尖峰系統總負載量為 41046.91MW；離峰系統總負載量為 21754.85 MW。其中系統於離峰時段，中部地區明潭與大觀抽蓄電廠(合計 10 台，總裝置容量約為 2500MW)

之機組，分別運轉於抽水馬達模式，而系統於尖峰時段，明潭與大觀抽蓄電廠則運轉於發電機模式。

本研究依照台電公司風場規劃藍圖規劃，如圖 3 所示(總裝置容量為 4244.1MW)。另外，也將太陽光電納入考量，依照台電公司太陽光電規劃，於西元 2024 年，太陽光電總裝置容量為 2582MW。因此再生能源總裝置為 6826.1MW，約占全台離峰負載量的 31.38%、尖峰負載量的 16.63%。另外，本研究亦考量在尖峰系統中，風力發電量為 1273.23MW(風力發電總裝置容量之 30%)，再生能源總裝置為 3855.23MW，約占全

台尖峰負載量的 9.39%。為因應風力發電占比提高，勢必將台灣系統原有傳統機組發電量降低，以達到供需平衡。本文提出三種不同降載方案如下所述。

案例一：無核四機組(台灣系統核能機組只有核三 2 號機組)，並依據燃料成本由高至低降低其於傳統機組發電量。

案例二：無核三、核四機組(台灣系統無核能機組)，並依據燃料成本由高至低降低其於傳統機組發電量。

案例三：依據燃料成本(台灣系統有核三 2 號機組、核四機組)由高至低降低傳統機組發電量。

此外，由於在夏季尖峰負載時，台灣的風力出力一般在 30%以下，因此本計畫增加一個情境分析，亦即在夏季尖峰負載且風力出力僅為裝置容量 30%的情境。

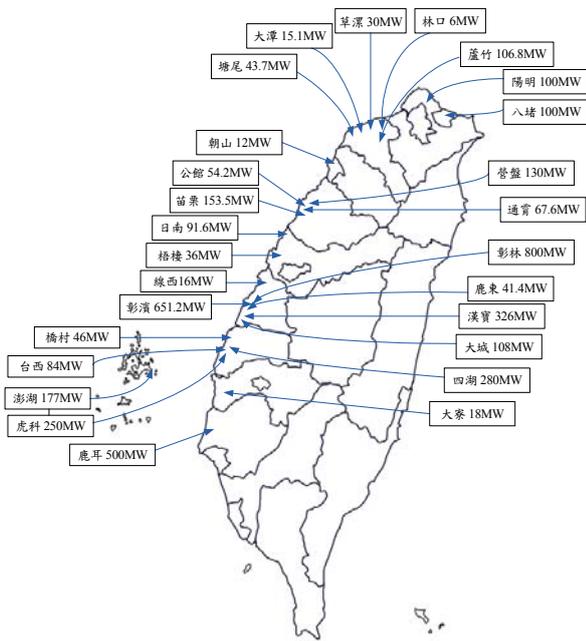


圖 3 台電系統商轉中、建置中與未來規劃的風力發電藍圖及位置圖

二、台灣未來高占比再生能源系統之穩態分析

穩態分析包含下述研究工作：各風場併入後於正常情況(N-0)及偶發事故下發生 N-1 線路跳脫時，系統是否符合「台電公司輸電系統規劃準

則」之要求；模擬裝置容量較大(50MW 以上)風場之三相短路故障電流，檢視系統變電所斷路器於各風場併入系統後，各責任分界點之短路電流值是否符合「台電公司輸電系統規劃準則」之最大短路電流限制。

(一) 台灣未來高占比再生能源系統之電力潮流分析

依台灣電力公司輸電系統規劃準則之規定，再生能源併網採用 N-0 準則，當 N-1 或 N-2 偶發事故時，如不符合準則規定，得提出包含特殊保護設備或過載保護電驛等因應措施，以維持供電安全。而經系統模擬分析後，得知當系統於正常情況下(即無發生任何 N-1 事故)，則再生能源總發電 6826.1MW 併入系統後，並不會造成線路的過載。然而當系統發生偶發事故 N-1 狀況下，則系統將會有多條線路過載，特別是 161kV 傳輸線路。經系統穩態潮流分析後，顯示 2024 年台灣系統尖峰時併入 6826.1MW 的再生能源後，統計三種情境下 345kV N-1 過載輸電線路，且依據嚴重程度排序：最嚴重的過載是線路(中寮南 E~霧龍寮南)發生故障時(傳輸線斷線)，在線路(中寮南 E~霧峨寮南)會發生過載且超載量達到 144.02%。由模擬結果可以發現尖峰 345kV N-1 事故造成的主要過載線路都集中在線路 (中寮南 E~霧峨寮南)、線路 (中寮南 E~霧龍寮南)、線路 (中港 E~霧港 B2)、線路 (中港 E~霧港 B1)等線路，均集中於中部地區。因此這些傳輸線路將可能需要重新評估增建的可能性。此外，在 345kV N-1 事故的案例中，若系統處於離峰狀態，經由模擬結果得知，將不會造成任何線路過載。

在 161kV 系統的潮流分析上，離峰負載下線路發生偶發 N-1 事故的模擬結果顯示，2024 年台灣系統離峰時併入 6826.1MW 的再生能源後，三種情境下 161kV N-1 過載輸電線路的統計。可以發現 N-1 事故發生過載的線路集中在線路 (南濱 H~鹿耳 H)、線路 (安南 H~南濱 H)、線路 (松樹 H~武陵 H)等線路，多集中於南部地區，因此在這些區域的線路可能需要重新規畫檢討。

若系統處於尖峰狀態，則發生 161kV N-1 事故後可能發生多條線路壅塞。值得注意地，若情

境分析是案例三：台灣系統核三#2、核四機組上線運轉，並由高至低降低傳統機組發電量，則發生 161kV N-1 事故的案例中將會造成系統中多條線路的過載。如表 5 所示為在案例三尖峰時所有 161kV N-1 事故中，過載線路最多之情境：其意義為當漢寶 H 至福興 H 線路跳脫時，將會造成其他四條線路的過載，其中過載最嚴重的饋線為福興 H 至草港福分，載流率達 142.09%；表 6 所示為在案例三尖峰時所有 161kV N-1 事故中，線路過載最嚴重之情境。換言之，當大潭乙 H 至觀音#1 發生 N-1 線路跳脫，則雙迴線之另一條線(大潭乙 H 至觀音#1)會發生嚴重的過載情形，載流率達到 177.36%。

表 5 案例三尖峰時所有 161kV N-1 事故中，過載線路最多之情境

過載饋線名稱			跳脫線路事件			載流率 (%)
From Bus	To Bus	ID	From Bus	To Bus	ID	
大潭乙 H	觀音#1	R	漢寶 H	福興 H	1	102.67
大潭乙 H	觀音#1	W	漢寶 H	福興 H	1	102.67
彰濱 H	草港福分	1	漢寶 H	福興 H	1	112.70
福興 H	草港福分	1	漢寶 H	福興 H	1	142.09

表 6 案例三尖峰時所有 161kV N-1 事故中，線路過載最嚴重之情境

過載饋線名稱			跳脫線路事件			載流率 (%)
From Bus	To Bus	ID	From Bus	To Bus	ID	
大潭乙 H	觀音#1	W	大潭乙 H	觀音#1	R	177.36
大潭乙 H	觀音#1	R	大潭乙 H	觀音#1	W	177.36

(二) 台灣高占比再生能源系統之短路電流分析

檢討故障電流的目的為檢視併聯引接點的斷路器額定短路啟斷容量是否有足夠能力可隔離故障，以確認風力機組加入系統後，併聯引接點所在之變電所匯流排出現的最大短路電流仍在斷路器額定短路啟斷能力內，避免短路電流超過斷路器額定短路啟斷能力，導致故障無法迅速清除而造成設備損壞。

在此選擇裝置容量大於 50MW 之風場模擬，由表 7 所示為風場併入台電系統前

後，於責任分界點之短路電流。由模擬結果可知，無論風場併入 161kV 或 69kV 系統，其故障電流皆能符合台電公司最大短路電流限制之規範，換言之，併入 6826.1MW 的再生能源後，並未對台灣電力系統中風場併接點的短路電流造成巨大的影響，因此既有的斷路器不需要因此而更換。

三、高占比再生能源併入後之暫態穩定度模擬

系統暫態穩定度研討時以臨界故障清除時間為指標，而系統穩定與否之判定則以系統內所有併用之發電機是否維持同步運轉為依據。電壓層級不同，滿足系統規劃之條件亦不同，茲對 161kV 及 345kV 系統之模擬方法說明如下：

(一) 臨界清除時間分析

161kV 系統模擬方法係考慮系統在 0 秒時 161kV 輸電線一回線在 161kV 匯流排出口處發生三相接地故障，該故障線路非故障端之斷路器 7 週波正常開啟，故障端斷路器啟斷失靈，事故持續到後衛保護電驛動作才清除。臨界故障清除時間係研算故障端最長可持續故障時間，而當故障清除後全系統機組仍可維持同步運轉。依現行輸電系統規劃準則，161kV 系統暫態穩定度之臨界故障清除時間須在 12 週波以上，若無法達到 12 週波以上，則至少應達到 8 週波以上，惟須配以兩套主保護電驛。

345kV 系統模擬係考慮南北超高壓幹線、超高壓變電所及核能電廠引出線考慮一回線停用，另一回線事故。一般水、火力電廠引出線及 IPP 電源線僅考慮一回線事故，345kV 系統模擬輸電線於匯流排出口處發生三相短路故障，非故障端之斷路器 7 週波開啟，計算故障端最長可持續之故障時間再清除故障(臨界清除時間)，仍可維持全系統機組同步運轉。依現行輸電系統規劃準則，345kV 系統暫態穩定度之臨界清除時間須大於 4.5 週波。

345kV 系統暫態穩定度模擬後之臨界清除時間，模擬結果皆可在系統規劃準則

規定範圍內。本研究亦模擬 161kV 系統暫態穩定度之臨界清除時間，模擬結果臨界

清除時間皆可在 8 週波以上，符合台電要求。

表 7 風場併入台電系統前後，於責任分界點之短路電流

責任分界點 故障電流	名稱	裝置容量 (MW)	併接點	風場併入前 故障電流(kA)	風場併入後 故障電流(kA)	風場提供之 短路電流(kA)
風場	彰化縣彰濱風場(XX)	55.2	彰濱 E/S 161kV(2301)	42.6104	42.9064	0.296
	彰工風場(線西、崙尾、II)	46	彰濱 E/S 161kV(2301)	42.6636	42.9064	0.2428
	苗栗縣通苑風場(XX)	58.6	通霄 P/S 69kV(635)	21.242	21.723	0.481
	雲林縣 XX 風力	84	台西 D/S 161kV(5941)	9.5781	9.9759	0.3978
	彰化離岸一期	108	大城 D/S 161kV(5841)	16.8857	17.3836	0.4979
	澎湖離岸風力	144	澎湖 P/S 161kV(5951)	4.5109	5.2152	0.7043
	彰化離岸二期	200	彰林 E/S161kV(2321)	25.9711	26.9187	0.9476
	彰化離岸三期	250	彰林 E/S161kV(2321)	25.7889	26.9187	1.1298
	彰化離岸四期	350	彰林 E/S161kV(2321)	25.3232	26.9187	1.5955
	彰化離岸五期	300	彰濱 E/S 161kV(2301)	41.515	42.9064	1.3914
	彰化離岸六期	250	彰濱 E/S 161kV(2301)	41.7765	42.9064	1.1299
	彰化縣芳苑鄉風場(XX)	63	漢寶 D/S 161kV(5817)	27.8306	28.1686	0.338
	XX 離岸風力	240	漢寶 D/S 161kV(5817)	27.074	28.1686	1.0946
	雲林離岸風力一期	250	虎科 D/S 161kV 匯流排(5983)	14.3509	15.4744	1.1235
	雲林離岸風力二期	250	四湖 D/S 161kV 匯流排(5943)	11.0752	12.1991	1.1239
	台南離岸風力一期	300	鹿耳 D/S 161kV 匯流排(6085)	15.6127	16.83	1.2173
	台南離岸風力二期	200	鹿耳 D/S 161kV 匯流排(6085)	16.0355	16.83	0.7945
	XX 離岸風力	130	營盤 D/S 161kV 匯流排(5013)	25.2728	25.9223	0.6495
	汐止區域	100	八堵 P/S 69kV 匯流排(3142)	24.3129	25.3998	1.0869
	仙渡區域	100	陽明 P/S 69kV 匯流排(3162)	19.6001	20.6904	1.0903
頂湖區域	100	蘆竹 P/S 69kV 匯流排(3292)	21.5752	22.6719	1.0967	
峨眉區域	100	苗栗 P/S 69kV 匯流排(3412)	21.3767	22.4644	1.0877	

(二) 暫態頻率穩定度分析

隨著風力發電發展迅速，風場建置容量規模亦逐漸提高，相對系統運轉上容易造成運轉穩定度問題，故須考慮大規模風力發電對於系統衝擊影響。然而當系統運轉無可避免會發生短路故障產生低電壓造

成風場保護電驛啟動而導致風場切離或因過風速導致風場切離。故在大量瞬間的發電量損失情況下，亦可能導致系統供電量與負載需求不平衡，造成系統電壓與頻率異常進而使系統不穩定。本小節模擬當台灣高占比再生能源系統發生局部風場跳機

後，對於系統頻率穩定度的影響。模擬條件分為兩個：(1)假設於尖、離峰系統中，中部的風場全部跳機(2.4875GW)或部分風場跳機(1.0052GW)。(2)假設於尖峰系統中，當風力發電量為總風力裝置容量之 30% 時，中部的風場全部機組跳機(746.25MW)。在上述二個情境下，觀察風場瞬間切離後對於系統之衝擊，並觀察系統頻率、搖擺匯流排上電壓及搖擺匯流排上發電機出力之響應。

1. 離峰系統下暫態頻率穩定度分析

本節模擬離峰系統下，中部風場(總裝置容量為 2.4875GW)於 1 秒時與系統切離，觀察系統頻率、搖擺匯流排上電壓、搖擺匯流排上發電機出力之響應。由模擬結果可知，當中部部分風場(1.0052GW)切離系統時，系統頻率並不會低於 59.5Hz，但是當中部全部風場(2.4875GW)切離系統時，系統頻率將會低於 59.5Hz，這將會使低頻卸載電驛動作，造成部分地區停電。

2. 尖峰系統下暫態頻率穩定度分析

本節模擬尖峰系統下，風場於 1 秒時與系統切離，觀察系統頻率、搖擺匯流排上電壓、搖擺匯流排上發電機出力之響應。由模擬結果可知，當中部部分風場(1.0052GW)切離系統時，系統頻率並不會低於 59.5Hz，但是當中部全部風場(2.4875GW)切離系統時，系統頻率將會低於 59.5Hz，這將會使低頻卸載電驛動作，造成部分地區停電。若當處於尖峰系統且風力發電出力為總風力裝置容量之 30% 時，當中部風場全部跳機(746.25MW)後，系統頻率並不會低於 59.5Hz。

3. 傳統機組 N-1 事故之系統暫態穩定度

本小節模擬當台灣高占比再生能源系統發生傳統機組 N-1 跳機後，觀察系統頻率、搖擺匯流排上電壓、搖擺匯流排上發電機出力之響應。本節模擬在各

個不同情境下，最大發電量之傳統機組跳機(案例一：核三#2 跳機、案例二：大潭新#1 跳機、案例三：龍門#1 跳機)，觀察事故對於系統暫態頻率穩定度之影響。模擬結果可發現，無論在尖、離峰的任何情境下，皆不會觸動低頻卸載電驛。

4. 系統暫態頻率穩定度分析小結

由上述模擬可知，假設在各個情境下台灣系統最大發電量之傳統機組發生跳機，系統頻率將不會低於 59.5Hz，又假設中部的風場全部跳機(總裝置容量為 2.4875GW)，則系統的暫態最低頻率將降至 58.61Hz，此頻率將觸動低頻卸載電驛，造成局部用戶停電。換言之，台灣併入 6826.1MW 的再生能源後，將可能對於系統暫態頻率穩定度造成極大的影響，因此，本研究將於下個章節探討幾種可能的改善措施，以提升系統暫態頻率穩定度。

柒、台灣高占比再生能源系統改善策略

根據上一章節的模擬分析得知，台灣併入 6826.1MW 的再生能源後，將可能對於系統暫態頻率穩定度造成極大的影響，因此，本研究將探討幾種可能的改善措施，以提升系統暫態頻率穩定度。

一、水力抽蓄電廠改善暫態頻率穩定度

本研究的模擬條件為當台電系統於 2024 年高占比再生能源的情境下，且為離峰負載狀況下，當中部風場全部跳機(2.4875GW)下，如何改善暫態穩定度，使其暫態頻率不低於台電所規定的卸載頻率 59.5Hz。此時系統的備轉容量在不同情境下為案例一(3938.941MW)、案例二(3938.941MW)、以及案例三(4149.541MW)。

由模擬結果可以發現無論在哪一種發電情境下，即使採用既有的水力抽蓄補償，仍無法將暫態低頻提升至 59.5Hz。暫態最低頻率大約在

59.14~59.16Hz 範圍內。因此仍會造成低頻卸載。而在暫態電壓部分，亦會產生電壓降現象，最低電壓大約為 0.93pu。因此，利用目前既有的水力抽蓄機組並無法完全改善系統暫態頻率穩定度。

二、大型儲能系統改善暫態頻率穩定度

第二種改善方式為假設系統併入大型儲能系統。在此假設併入的儲能系統量等同於中部離岸風場的併入量 1.891GW。由模擬結果可以發現若不計成本增加大型儲能系統(本案例中，儲能系統採用電池模組，增加的儲能系統容量為 1.891GW，併接儲能系統的地點在中部各地離岸風場併接點)，可將暫態低頻提升至 59.84Hz 左右。且亦會改善暫態電壓。

此外在各種發電情境下，一旦發生中部風場全數跳機的情形下，可以發現若不計成本增加大型儲能系統(本案例中，儲能系統採用電池模組，增加的儲能系統容量為 1.891GW，併接儲能系統的地點在中部各地離岸風場併接點)，可將暫態低頻提升至 59.87~59.89Hz 左右。且亦會改善暫態電壓。

三、提高火力機組的備轉容量以提升系統暫態頻率穩定度

本節探討若增加系統的備轉容量是否可提升暫態頻率穩定度。在各種發電情境下，當台電系統處於離峰負載狀況下，一旦發生中部風場全數跳機的情形下，可以發現無論在哪一種發電情境下，即使採用提高火力機組的備轉容量補償，仍無法將暫態低頻提升至 59.5Hz。因此仍會造成低頻卸載。而在暫態電壓部分，亦會產生電壓降現象，最低電壓大約為 0.928pu。

此外，當台電系統處於尖峰負載狀況下，在各種發電情境下，一旦發生中部風場全數跳機的情形下，提高火力機組的備轉容量(提高 1.6GW 備轉容量)(原系統總備轉容量在不同情境下為案例一(4064.881MW)、案例二 (4064.881MW)、案例三 (4081.681MW)，提高火力機組的備轉容量後之總備轉容量為案例一(5664.881MW)、案例二 (5664.881MW)、案例三 (5681.681MW)的暫態頻

率與電壓波形圖。可以發現無論在哪一種發電情境下，即使採用提高火力機組的備轉容量補償，仍無法將暫態低頻提升至 59.5Hz。因此仍會造成低頻卸載。

四、使用需量管理之低頻卸載機制以提升系統暫態頻率穩定度

本小節研究若使用適當的需量管理，在事故發生時切離某些特定的負載，以維持整體系統頻率穩定度的可行性。由模擬結果可以發現，當台電系統處於離峰負載狀況下，若使用卸載機制補償的情形下(本案例中，共卸載 1661.506MW)，可將暫態最低頻率維持至 59.5Hz 以上，且亦會改善暫態電壓。換言之，若系統發生中部風場全數跳機的情形下，系統至少需要準備 1661.506MW 的卸載量，使得暫態頻率能夠穩定，不至於影響重要負載的供電。

當台電系統處於尖峰負載狀況下，在各種發電情境下，一旦發生中部風場全數跳機的情形下，若使用卸載機制補償的情形下(本案例中，共卸載 2386.464MW)，可將暫態最低頻率維持至 59.5Hz 以上。且亦會改善暫態電壓。

捌、結論

本研究彙整並比較了現有適用於再生能源併聯的重要國際與代表性國家的標準法規，這些規範的制訂者涵蓋國際相關電工組織、德國、西班牙、英國、加拿大、美國加州與德州、澳洲、台灣、中國大陸，日本、以及南韓等重要國家的相關部門。由研究結果可知，雖然每個標準都制定了專門針對的應用領域與適用於當地電網特性的要求，但是它們也有某些共同的要求。本計畫研究結果可以提供國內相關的併聯標準提供有益的參考。此外，本計畫已蒐集各國對於離岸風力發電加入系統之審查標準與程序、先進國家應用於輸電等級再生能源以幫助提升系統穩定度的各種補償設備或調度策略之實例，並分析各項應用的投資與效益。

在系統衝擊分析的研究上，本研究以台電公

司提供之相關系統參數進行台灣地區大量風場以及太陽光電併網後之系統衝擊分析。衝擊分析項目包含穩態電力潮流、故障電流計算、臨界清除時間、以及頻率與電壓暫態穩定度等，並根據其分析結果，提出台灣 2024 年併入大容量再生能源後的瓶頸。依據模擬結果可知台灣 2024 年電力系統若併入 6826.1MW 的再生能源後，首先遇到的瓶頸便是 N-1 系統事故發生後，在 161kV 的傳輸線上會有多條線路發生壅塞，甚至 345kV 亦有 5~6 條輸線線路過載。而此高占比再生能源系統在電壓變動、故障電流、臨界清除時間上都可符合目前台電併聯準則的規定。然而在暫態頻率穩定的分析上，由模擬結果得知，當發生中部風場全部跳脫或是大型傳統機組跳機，其產生的暫態低頻現象將會觸動低頻卸載電驛，造成局部系統停電，甚至引發連鎖效應而導致大停電。因此高占比再生能源系統對於暫態頻率穩定度將帶來較為嚴峻的挑戰。

最後，本研究針對暫態頻率穩定度提出改善策略，改善的方式有許多可能的方案，本研究初步提出包含增加儲能系統、增加備轉容量、增加抽蓄水力機組、使用卸載機制的方式進行分析。研究結果顯示，需量管理與增加儲能系統是有效解決頻率穩定度問題的方法之一，但增加儲能系統所需要的成本亦非常高。依據本研究的模擬結果，我國為了達到高占比再生能源的目標，首先必須增加電網的建設，以滿足電網 N-1 事故下的傳輸容量要求。此外，為了改善暫態頻率穩定度，必須考量新建機組的出力速度，以搭配再生能源可能的瞬間大幅度波動。特別是考慮水力抽蓄機組以及燃氣複循環機組的興建。此外，亦建議台電公司必須加速研究需量反映的可行機制，在必要時切離部分合約負載，以維持重要負載供電的可靠度。

玖、參考文獻

[1] Requirements for Offshore Grid Connections in the Grid of TenneT TSO GmbH, Bayreuth, Germany, December 2012.

[2] "Grid code-high and extra high voltage," E.ON Netz GmbH, Bayreuth, Germany, April 2006.

[3] Grid connection of wind turbines to networks with voltages above 100 kV, Regulation TF 3.2.5, Eltra and Elkraft System.

[4] Grid connection of wind turbines to networks with voltages below 100 kV, Regulation TF 3.2.6, Eltra and Elkraft System.

[5] "New generation technologies and GB grid codes," Report on Change Proposals to the Grid Codes in England & Wales and in Scotland, Sinclair Knight Merz, 2004.

[6] The Grid Code, Issue 4, by National Grid Electricity Transmission plc, NGET, June 2009.

[7] Morales A., Robe X. Rodriguez-Amenedo J.L. Arnalte S., Zubiaur R., and Torbado Z., "Advanced grid requirements for the integration of wind farms into the Spanish transmission system," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 2, no. 1, pp. 47-59, 2007.

[8] Bernard S., Beaulieu D., and Trudel G., "Hydro-Quebec grid code for wind farm interconnection," *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, San Francisco, 2005.

[9] Zavadil R.M., and Charles Smith J., "Status of wind-related US national and regional grid code activities," *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, San Francisco, 2005.

[10] Revised national grid code, report no. WED-OR-C01-E-06 elaborated by CEPRI as part of the Sino-Danish Wind Energy Development Program (WED), July 2009.

[11] Grid Code, Ver.3.1.3, elaborated by The EirGrid April, 2008.

[12] Min, Liang, Investigation of Major Transmission System Projects Delay's Impacts on Electricity Supply Reliability and the Corresponding Countermeasures, EPRI Report, 2010.CH 12.

南溪壩址河川生態研究及魚類保育計畫第三階段研究

Phase III Study on River Ecology and Fish Conservation Plan at Nan-Chi Dam

謝國正*

Hsieh, Kuo-Cheng

楊朝敏*

Yang, Chau-Min

王鈺閔*

Wang, Yu-Min

蔡顯修**

Tsai, Hsien-Shiow

林武煌**

Lin, Wu-Huang

莊家春**

Juang, Jia-Chuan

周淑華**

Chou, Sue-Hua

摘要

本計畫係和平溪碧海水力發電計畫環境影響說明書承諾之環境保護對策之一，研究方法為辦理生態調查及環境控制因子評估，綜合研判既訂之河川生態基流量及棲地改善措施對和平南溪之保育效果，研提魚類保育計畫，為和平南溪河川生態保育及水資源永續經營奠定實施方案。研究成果顯示壩址下游河道常態化的流量大於河川生態基流量，魚類族群數量有穩定和增長的趨勢。下游河道於 103 年 12 月設置棲地改善之巨石群，魚類及水生昆蟲已利用巨石群，顯示棲地改善措施於短期內即能改善棲地環境及生物群聚。南溪壩魚類保育計畫未來將持續辦理釋放河川生態基準流量、定期排砂清除淤積物、巡視水域棲地及邊坡環境，維持保育成效。

Abstract

This goal of this study is to establish an action plan for sustainable management of water resources and river ecological restoration of Hoping Southern Stream(Nan Chi). This study evaluated the conservational effect of maintaining the ecological reference flow and taking measures for river habitat improvement, and also recommended relative river-ecosystem conservation and restoration programs. According to the survey result, the river discharge at downstream reach was more than ecological reference flow due to abundant river flow and the release discharge was more than the minimum requirement by operation rule. The implementation of habitat improvement measures has already achieved the expected function of improving the richness of biotic community and diversity of fish habitation. For further implementation of the fish conservation plan, the main measures will be continued, such as the discharge of river ecological basic flow, regularly sluicing for removing sludge and inspection of the habitat and environment, in order to maintain resilience for conservation measures.

關鍵詞(Key Words)：河川生態(River Ecology)、魚類保育(Fish Conservation)、河川生態基準流量(Ecological Reference Flow)、棲地改善(Habitat Improvement)。

壹、前言

台灣電力公司(以下簡稱台電公司)為因應東部地區用電日益迫切之需求，開發和平溪流域蘊藏豐富之水力資源，辦理「和平溪碧海水力發電

*中興工程顧問公司水利工程部

**台灣電力公司環保處

計畫」。

為避免本發電計畫開發對南溪壩址附近之河川生態及魚類造成顯著負面影響，台電公司擬訂「南溪壩址河川生態研究及魚類保育計畫」，期盼透過河川生態與魚類保育之研究、評估、改善等工作，為和平南溪河川生態保育及水資源永續經營奠定實施方案。「南溪壩址河川生態研究及魚類保育計畫」視實際開發工程進度，分施工前、施工中、運轉期間三階段實施。台電公司已於 104 年度辦理完成第三階段研究工作，確定南溪壩魚類保育計畫目標與實施方式，未來將持續辦理保育措施，如釋放河川生態基流量、定期排砂清除淤積物巡視水域棲地及邊坡環境，維持保育成效。

貳、研究範圍與研究方法

一、研究範圍

「和平溪碧海水力發電計畫」位於台灣東部和平流域，於宜蘭縣與花蓮縣交界之和平南溪河床標高約 545 公尺處設南溪壩，南溪壩集水面積約 158 平方公里，壩上游形成一調整池。調整池內可利用水量則由南溪壩右岸進水口引入，經一長約 6,549 公尺之壓力隧道至和平溪主流河床標高約 100 公尺處河道右岸山腹內新設地下電廠發電，發電尾水洩入和平溪主流。南溪壩及電廠位置如圖 1 所示。



圖 1 南溪壩與電廠位置圖

二、研究方法

南溪壩址河川生態研究及魚類保育計畫之目標乃係期盼透過南溪壩址附近河川生態與魚類保育之研究、改善及其評估等工作，而對和平南溪河川生態保育及資源永續利用有所助益。本計畫視實際開發工程進度，分施工前、施工中、運轉期間三階段實施，以執行各項棲地生態研究及改善評估等工作。

第一階段工作於施工前進行，將著重於蒐集並分析和平南溪之相關資料，包括河川物化環境與河川生物群集。初步歸納分析南溪壩址上下游河段之生態環境，以及現存魚類對於棲地不同水型利用之生態資料，並進一步綜合評析棲地改善措施之可行性。

第二階段工作於施工中進行，除繼續蒐集與調查南溪壩址上下游之河川生態與魚類族群動態外，將視實際開發工程進度與第一階段評估結果，擬定具體魚類生態保育措施及棲地改善方式與地點，追蹤調查施工期間各種改善情形之生態變化情形；據此，建立河川生態監測及魚類保育評估資料庫。

第三階段工作即本研究，於運轉期間進行，預定繼續前兩階段之河川環境、魚類棲地生態研究及其改善評估等工作。在工作目標上，希望將累積多年的和平南溪魚類生態相關資料彙整，同時進行河川生態監測及魚類保育效益評估，據以綜合評析本計畫所帶來之生態及其他多方面之效益。

本研究之工作流程如圖 2 所示。辦理以下研究事項：

- 一、調查南溪壩址上、下游之河川生態與魚類族群(族群分布、相對數量、體長組成)。以每季一次為原則，辦理 4 次。
- 二、分析南溪壩址上、下游魚類棲地生態之環境控制及其影響，包括流水型態、底石組成、潭瀨比率。
- 三、「河川生態監測及魚類保育評估資料庫」資料建檔。

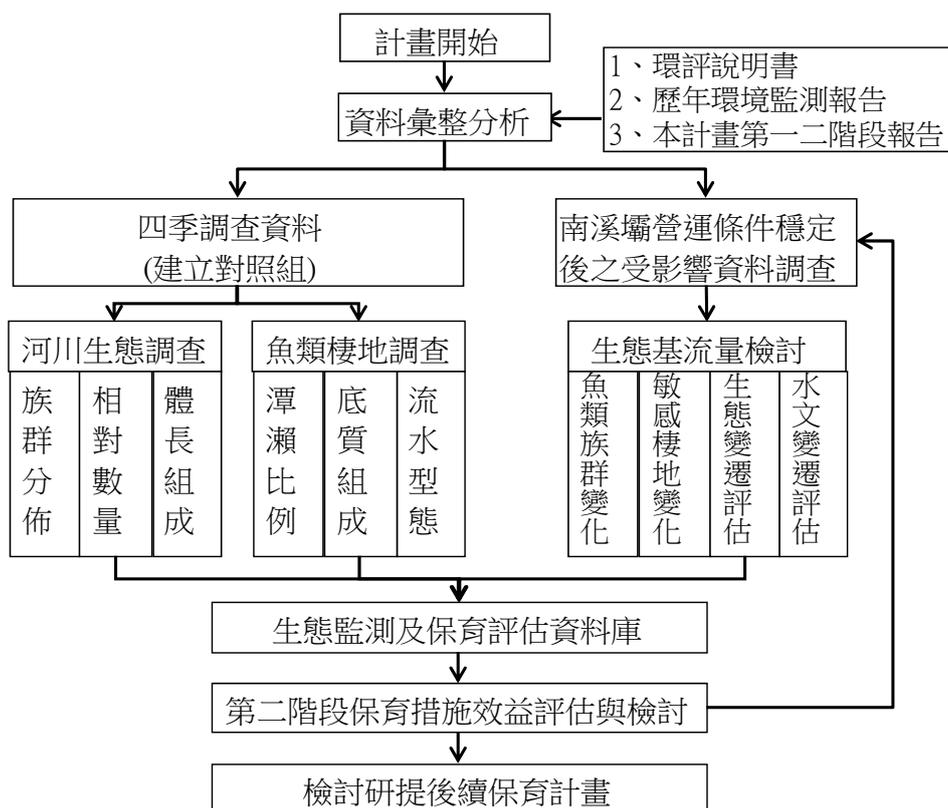


圖 2 工作計畫流程圖

四、調查河川生態基流量(0.474cms)之實際水文、生態資料、棲地變化及魚類族群變化，及比對壩址興建前後之水文、生態資料。調查時間應包含南溪壩蓄水(可控制下洩流量時)後豐、枯水期各一次。

五、第二階段之研究工作保育措施效益評估與檢討：綜合研判既訂之河川生態基準流量及棲地改善措施對和平南溪之保育效果，檢討研提應持續辦理或改進事項。

參、前期相關成果彙整分析

一、南溪壩址河川生態研究及魚類保育計畫

(一) 第一階段研究^[1]

第一階段研究工作目標為評析棲地改善措施之可行性。研究成果認為應藉下游棲地改善措施及適宜之生態維護放水量，保全其魚類生存環境與賴以為生之食物資源。至於棲息地之優劣並非全然取決於放水量多寡及水質狀況，增進魚類族群或其

它水生生物多樣性亦為考量重點。本案基地魚類資源雖相當貧乏，然水生昆蟲資源卻極為豐富，除可推斷河川水質相當優良外，豐富之水生昆蟲亦為其它水族重要食物資源，相對可提供更複雜之生物族群組成。為維護該資源之多樣性與豐沛性，下游河岸保護、底質塑造與水流型式之控制為棲地改善之重要工作目標。

(二) 第二階段研究^[2]

第二階段研究工作繼續蒐集與調查河川生態與魚類族群動態及棲地變化，亦擬訂具體魚類生態保育措施及棲地改善方式與地點，及建立「河川生態監測及魚類保育評估資料庫」。

該研究之結論如下：

1. 和平南溪屬山區河川，其自然環境對水生生物棲息及人為工程建設皆屬嚴苛，人為改善之程度實屬有限。
2. 河川生態調查結果顯示台灣鏟頰魚為南溪壩址附近和平南溪常見魚種，其他水生動物族群稀少。本地台灣鏟頰魚明顯的繁

殖期應為每年之元月份至 4 月份左右。

3. 建壩後，枯水期間流量銳減、流速降低，台灣鏟額魚可利用之棲地面積減少。枯水期間常流量減少亦可能導致前期洪水或排砂作業所遺留之細沉積砂土無法清除，細沉積砂土覆蓋河床則不利於魚類產卵棲地以及水生昆蟲棲地。
4. 魚類保育措施實施方案包含營運管理措施、河川棲地改善措施、河川生態環境監測計畫。營運管理措施包含排砂、排洪、放水、生態基準流量釋放等；河川棲地改善措施則建議於壩址下游設置河內構造物，創造常流時期之棲地多樣性；河川生態環境監測工作應持續辦理。
5. 評估南溪壩址下游 1.2 公里處山澗匯合口至匯合口上游 150 公尺間之河道為棲地改善溪段。棲地改善措施為設置巨石潛堰以及河心巨石，以增進常流時期之河川棲地多樣性。

二、施工階段及運轉階段環境監測

環境監測期間涵蓋施工階段(民國 91 年至民國 100 年)及運轉階段(民國 101 年起)。概述「和平溪碧海水力發電計畫運轉期間環境監測」102 年年報監測結果檢討與因應對策如後：

(一) 水文水質

102 年除南溪壩址附近(下游)測站第 1 季測值、南溪壩址至和平南北溪會合處之間測站第 1 季測值、開關場附近(下游)測站第 1、2、3 季測值外，其餘測站測值均符合乙類陸域地面水體水質標準。

(二) 生態調查成果

由歷年資料可得知在施工期間因棲地環境受工程擾動，水域生物物種及豐度波動較大。運轉期間雖棲地環境已無工程直接擾動，但因上游山區若降大雨而使下游溪水發生混濁現象，導致生物物種及豐度減少，但相較於施工期間，南溪壩址附近(下游)測站已有迴游性物種零星發現記錄，顯示水域生態有逐漸恢復跡象。102 年調查成果與歷年施工期間調查成果比較如下：

1. 浮游植物及附著藻類：南溪壩址附近(下游)測站於施工期間因施工而導致壩址下游之浮游植物物種與數量並不穩定。營運期間則因上游山區降雨影響，自壩址上游之水體均呈現水體混濁狀態，使浮游植物及附著藻類豐度與種類降低，推估上游地區應有天然崩塌區域所致。
2. 魚類：南溪壩址附近(下游)測站於施工期間因施工而導致壩址下游之魚類物種與數量並不穩定，但趨近於運轉期間則以臺灣鏟額魚族群數量較先穩定，且亦可零星發現日本瓢鰭鰕虎及大吻鰕虎等迴游性魚類上溯至壩址下游處，但若上游山區降雨而溪水有混濁現象發生時，南溪壩址附近(下游)測站魚類物種與數量常有減少之趨勢。
3. 底棲生物部份(蝦蟹類)：環境監測自 96 年開始將蝦蟹類納入調查工作中，其中 96、97 年於南溪壩址附近(下游)測站記錄到臺灣沼蝦。其後未發現任何蝦蟹類。目前所記錄之蝦類均屬迴游性物種。
4. 水生昆蟲：本年度南溪壩址附近(下游)測站主要是因為上游山區降雨而溪水有混濁現象發生，且棲地河床底質以大巨石及礫石所組成，大型的巨石無法翻動採樣，而小型的礫石易受水流帶動而不適合水生昆蟲棲息，因此於南溪壩址附近(下游)測站調查之水生昆蟲，其物種及數量較施工期間的歷年同季有減少。

(三) 異常狀況及因應對策

環保署於 101 年 8 月 21 日公告「和平溪水區及水體分類」，將和平溪之水體分類劃定為乙類水體，故自 101 年起以乙類陸域地面水體水質標準，作為評估各測站水質之基準。南溪壩址附近(下游)及南溪壩址至和平南北溪會合處之間之懸浮固體濃度偏高，主要是和平南溪上游集水區水體連續受到和平山區下雨使得水色十分混濁。碧海發電廠為水力發電廠，本電廠僅蓄水發電，並不影響水中懸浮固體、生化

需氧量、氨氮及總磷等測值，綜合環境監測與環保署之歷次監測結果，和平溪 102 年部份水質未符合標準應屬當地背景因素，非本發電計畫所影響。

肆、河川生態與魚類族群調查

一、調查樣站及實際調查時間

本研究調查樣站鎖定南溪壩影響範圍。經評估現地溪流地形與考量調查人員安全性，擬定調查測站分別位於壩址上游、壩址附近(壩址下游 800 公尺內，河道冲刷明顯段)、壩址下游(壩址下游 1.2 公里，野溪匯流口上下游)等 3 處，位置詳圖 3。實際調查時間為：

- (一) 南溪壩營運後背景資料調查：總計四次，分別於 102 年 6 月、9 月及 103 年 2 月、5 月各辦理一次。
- (二) 河川生態基準流量及保育措施興建前後調查：豐水期及枯水期各一次，於 103 年 7 月辦理豐水期調查，另配合 103 年 12 月所完成棲地改善措施，於 104 年 3 月枯水期辦理枯水期調查。

二、魚類調查成果

(一) 魚類種數

總計六次調查共記錄 2 科 3 種魚類，即臺灣鏟頰魚、日本瓢鰭鰕虎與大吻鰕虎。魚種數量以臺灣鏟頰魚總計 667 隻最多，日本瓢鰭鰕虎總計 40 隻，大吻鰕虎僅 1 隻。

(二) 魚類族群分析

總計六次調查記錄以臺灣鏟頰魚最多，故依據測站及季節繪製其數量分布如圖 4。按測站分析，則下游測站數量偏低，因當地棲地較不利魚類定棲；按年期分析，則 103 年 2 月前之數量偏低，係因 102 年洪流之影響。

各測站魚類族群分析如下：

1. 上游測站

上游測站因離壩址較遠，受到工程

及環境改變較小，主要魚種為臺灣鏟頰魚。各月份魚類族群數量受水文氣候影響，但整體而言族群數量已趨向穩定。各月份變化為：

102 年 6 月份，記錄最大量只有 14 尾，而在後續調查中族群數量減少很多；102 年 9 月份僅 5 尾記錄，可能因 6 月~9 月間颱風暴雨影響，部份水道改變，導致魚類族群有減少現象；



圖 3 調查測站位置

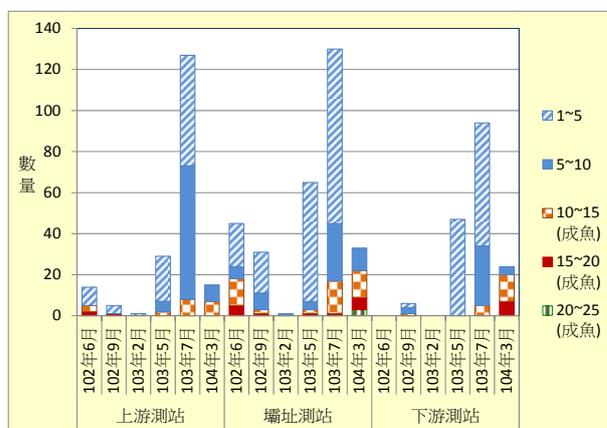


圖 4 臺灣鏟頰魚分布圖

103 年 2 月份僅 1 尾記錄，可能因流量的大幅增加及部份水道的改變，導致魚類族群的減少；

103 年 5 月份數量達到 29 尾，且在緩流處記錄到約 100 尾的魚苗，顯示族群數量已慢慢的趨向恢復及穩定；

103 年 7 月份數量達到 127 尾，可證明族群數量穩定；

104 年 3 月份僅記錄到 15 尾，但在

體型上都在 5 公分以上，推測是因夏季不穩定氣候，颱風暴雨急遽降雨，流量增大而造成族群數量下降。

2. 壩址測站

壩址測站魚類數量變遷趨勢與上游測站相似。壩址測站的臺灣鏟頰魚族群主要集中在小潭區，在底質以礫石為主且水流較湍急的瀨區，則甚少發現。

在 103 年而 7 月記錄到 130 尾臺灣鏟頰魚，且有記錄到 50 尾的新生魚苗，顯示族群數量有穩定和增長的趨勢。而在 104 年 3 月則記錄到 33 尾臺灣鏟頰魚，且有 150 尾的新生魚苗，顯示族群數量有穩定的趨勢。

3. 下游測站

臺灣鏟頰魚在下游測站的數量較其他兩測站少，主要也都是 10 公分以下的中小型個體居多。可能下游測站周圍多為垂直山壁，在暴雨時水流湍急，魚隻不易在此區定棲下來所致。

在最近的調查中，103 年 7 月與 104 年 3 月則有記錄到許多將近 10 公分與 10 公分以上的個體，顯示在族群數目與個體的增長上，已經逐漸地趨於穩定。

(三) 魚胃內含物分析

辦理魚胃內容物分析，以探討南溪壩上下游魚類攝食食物來源。三測站的魚胃內含物非常相似，環境中最常見的附著藻類在各測站的魚胃內含物也最普遍發現。

但下游測站魚胃內含物於二次調查(102 年 9 月、104 年 3 月)發現魚胃內容物在環境樣品中則較少，可見溪魚覓食之範圍應較我們調查之區域廣。

三、其他生物調查成果

(一) 蝦蟹類

六次調查成果皆無蝦蟹類記錄。

(二) 水生昆蟲

六次調查共計採得 8 目 30 科 59 種總計 2,806 隻各式水生昆蟲。這 8 目為蜻蛉

目、蜉蝣目、積翅目、半翅目、鞘翅目、毛翅目、鱗翅目以及雙翅目。

各測站之調查成果有差異，可以發現上游測站水生昆蟲數量及多樣性相對豐富，不像壩址測站或下游測站，容易因排洪或強降雨，導致河道微地形經常性改變，相對的水生昆蟲的採集數量與種類的變化就會很大。科級生物指標對應出的水質條件為極佳(Excellent)至一般(Fair)。以上特性皆屬一般山區河川可見情形。

然而，亦有南溪壩獨特的現象，即壩址測站於水溫升高後，到處都是大型的附著藻附著在石頭上，顯示有機質分解的養分應該還是含量豐盛。但藻類繁生後，水生昆蟲數量減少，可能是現實環境條件不適合水生昆蟲的棲息，但也許是原本在水域表層的大型藻類消耗水中溶氧或水體受氣溫影響，導致溫度較高，反而不適和許多性喜低溫高溶氧的水生昆蟲棲息。

(三) 附著性藻類

水域植物以附著性藻類為指標性植物。三測站之矽藻數量及種類皆高，矽藻群聚大同小異。各季資料相似。

四、生物群集調查成果評析

(一) 南溪壩歷年魚類調查成果以臺灣鏟頰魚為優勢物種，以及洄游性魚類如大吻鰕虎及日本瓢鰕虎。南溪壩址上下游皆有洄游性魚類日本瓢鰕虎記錄，南溪壩址還有大吻鰕虎的紀錄，初步可推測興建壩址後之環境於營運期間若達穩定，即可慢慢回復到原溪流狀態。

(二) 魚類族群之時空分布依然受環境條件影響，如洪水大小及發生次數、深潭數量及品質。

(三) 水生昆蟲以上游測站數量穩定及多樣性相對豐富，合理推測壩址測站或下游測站，容易因排洪或強降雨，導致河道微地形經常性改變，相對的水生昆蟲的採集數量與種類的變化就會很大。

- (四) 南溪壩蓄水範圍受山區降雨、逕流沖刷的影響，水面明顯有許多枯枝、落葉及死亡無脊椎與軟體動物等有機物質漂浮。南溪壩蓄水範圍淤積物(含有機物質)逐漸增加，隨河道放水道放流到下游河道，隨著氣溫的回升，壩址下游河道，很明顯長出許多藻類或許就說明水質是富含有機質的，容易因為水流速減弱而滋生大型藻類。
- (五) 根據調查成果，水域的大型藻類不能太優勢，從現場採集看到太多的藻類極可能會阻礙水生昆蟲的活動、棲息以及正常生理代謝。因為太多的藻類會改變生物組成，故未來水庫須配合洪水實施排砂操作，排除蓄水範圍及下游河道多餘的有機物。

伍、魚類棲地之環境控制因子

依據六次河川水型及水文調查、水質調查，分析南溪壩址上、下游魚類棲地生態之環境控制及其影響，包括流水型態、底石組成、潭瀨比率。

一、水文及棲地組成

上游測站流量大及棲地多樣性高，歷次調查之河道平均流速在 1.24m/s 至 1.80m/s 間，屬高流速。壩址以下各測站流量低於上游測站，但其最小流量有 1.47cms 仍高於河川生態基準流量 (0.474cms)。

本次各調查測站魚類棲地類型與第二階段相似，南溪壩址附近河段之魚類棲地為陡坡型之梯級潭類型。但因南溪壩正式營運後壩址下游流量變低，故下游二測站有顯現一些緩流型棲地^[3]，包括淺瀨、淺流。各測站之棲地比例如表 1。

二、水質

調查項目包括水溫、溶氧量、電導度、氫離子濃度指數(pH)、濁度、氨氮、總有機氮、懸浮固體及營養鹽濃度(磷酸鹽、硝酸鹽、亞硝酸鹽、矽酸鹽)等。整體水質 pH 為弱鹼性，各水質項目上下游差異不大，其中懸浮固體濃度變化率較高。

以月分別而論，僅 102 年 9 月份上游測站之濁度、懸浮濃度、氨氮、總有機氮相對來講較高，推測其原因為上游測站可能受到數日前降雨導致流量較大，上游將有機物質沖刷下來所致；溶氧量在 103 年 2 月較高，推測其原因是由於較低的水溫所致。

表 1 調查測站棲地比例推估表

樣站 棲地類型	壩址上游 測站	壩址 測站	壩址下游 測站
深潭	35%	20%	10%
淺瀨	25%	20%	20%
深流	35%	30%	30%
淺流	10%	20%	30%
岸邊緩流	5%	10%	10%
湍瀑瀨	二處	一處	二處
獨立梯狀潭	無	無	無

三、環境控制因子

大尺度棲地控制因子分析，需綜合評估水文、棲地及歷次生態調查成果。目前此區河川魚類棲地之環境控制因素以洪水為主，屬於短暫間歇性，魚類多會轉往較穩定的水體棲息，如壩址測站下游第一條支流小野溪匯入主流區域的小潭區，因此魚類族群仍可維持穩定，但未來若雨量、洪水流量過大，造成棲息地明顯改變，魚類族群仍可能劇烈下降。

針對中尺度棲地而言，陡坡類型棲地對魚類之棲息而言屬於條件較嚴苛，故僅有游泳能力強的台灣鏟頰魚為優勢魚種，以及溯游能力較強之日本瓢鰭鰕虎、大吻鰕虎能抵達壩址。和平南溪河道許多湍瀑瀨為魚類溯游的控制因素。

陸、河川生態基準流量對魚類與棲地之影響分析

河川生態基準流量設計原理^{[4][5]}，當以維護或改善魚類等河川生物之生長、生存與生育所需流量為條件，但亦需考量到環境控制因子、河川水型(棲地型態)、生物間互動因素等。流量並非

決定棲地及生物群集之惟一因素，必要時，應考慮搭配棲地改善措施，做整體的河川生態規劃。

本項工作辦理二次河川生態基準流量對魚類與棲地之影響調查，該二次亦反應棲地改善措施興建前後之影響。

一、調查原則

承第二階段之建議，調查河川生態基準流量(0.474cms)之環境生態資料。調查時間應包含南溪壩蓄水(可控制下洩流量時)後豐、枯水期各一次。

本研究歷次調查之流量皆大於河川生態基準流量(0.474cms)，源於和平南溪流量豐沛，以及南溪壩運轉皆以全日最低水位期間仍大於河川生態基準流量為原則，故下游河道流量常態化的大於河川生態基準流量。

由於原訂之生態基準流量情境實際上於近年並未發生，故河川生態基準流量調查重點在於南溪壩依據規定排放河川生態基準流量時之棲地改善措施興建前後之調查與比對。

二、豐水期調查成果(實施棲地改善措施前)

於 103 年 7 月辦理豐水期調查，為該季低流量時期。調查成果顯示壩址測站及下游測站之魚類數量皆為本研究六次調查之最高，應是自從 102 年颱風暴雨影響後，魚類族群數量已慢慢的趨向恢復及穩定。其他生物調查成果與前幾次亦無大差異。

針對棲地改善工程預定區域(依據第二階段建議範圍)調查之主要成果如下：

- (一) 水文條件為河道水流主要是沿左岸山壁區域流動，右側河床屬淺瀨、淺流區，故建議右側為棲地改善工程預定地點。
- (二) 棲地改善工程預定區域內因棲地為淺瀨、淺流，魚類較不易利用，故未記錄到魚類。

三、枯水期調查成果(實施棲地改善措施後)

103 年 12 月辦理完成棲地改善措施，本研究即於 104 年 3 月辦理枯水期調查。因為調查期間氣溫偏低，魚類族群數量低於豐水期，但在族群

數目與個體上，已經逐漸地趨於穩定。

針對棲地改善工程區域調查之主要成果如下：

- (一) 水文條件顯示棲地改善措施增進棲地多樣化。該地原為淺瀨、淺流區，棲地無明顯深淺及水流之變化。進行棲地改善措施後，棲地明顯由淺瀨轉變為深流及小深潭，兩巨石之間棲地較具有深淺及水流之變化，較深處約在 44 公分左右，巨石群迎水面水深較深。
- (二) 生態調查記錄到兩巨石後都各發現有 1 尾 10~15cm 的臺灣鏟頰魚，顯然魚隻會利用棲地改善之區域。由於棲地改善措施完成後迄今僅 3 個月，能活動前來定棲的水生生物不多。
- (三) 巨石群區內所觀察水生昆蟲的種類組成與壩址測站十分相像，猜測與棲地多樣可能有關係，但這部分仍需要更多調查數據證明。

四、棲地調查成果彙整

103 年 12 月辦理完成棲地工程，104 年 3 月生態調查得知原地淺流、淺瀨棲地增加了水深及促成流況變化，棲地出現深流及小深潭，增進棲地多樣化，魚類及水生昆蟲已利用巨石群。顯示棲地改善措施短期內即能改善棲地環境及生物群聚。然而，該地生態變遷到穩定須經歷一段週期(如一二年)的氣候、洪水等考驗，故棲地改善措施長期成效仍需要更多調查數據證明^[6]。

柒、第二階段研究工作保育措施效益評估與檢討

一、檢討第二階段棲地改善方式

本案依據環境監測及訪談林務局南澳工作站，顯示近年尚無影響環境之人為活動；水文、水質、岸邊植被等自然環境也無明顯變遷。然而，南溪壩營運後現場道路通達情形及下游河道棲地已與建壩前不同，影響原定棲地改善措施。

本案秉持棲地改善措施不能與大自然對抗、不能影響現場水文水質及生態、施工可行等

三大原則，檢討第二階段建議之河川棲地改善方式(拋石潛堰、河心巨石)可行性並酌於修正如下：

(一) 棲地改善措施設計條件檢討

1. 第二階段棲地改善措施設計原則(增加河心結構物增進棲地多樣化)不需調整。
2. 現況河床寬度狹隘，搬運工具操作不易，重型機具通行範圍內之棲地(深潭、石梁)有被破壞之虞。故建議取消由花蓮搬運巨石至和平南溪之構想。其優點為降低對重型機具之依賴、減低大型機具施工可能擾動河床而有破壞環境之虞及避免外來石塊與現地環境不一致。
3. 參考台灣其他河川棲地改善措施常在一場洪水後就破壞，評估棲地改善措施之拋石潛堰橫亘河道及阻水面積大，容易受暴雨洪流沖擊而流失^[6]，以及拋石潛堰施工時需動用大型機具及開挖範圍大，可能擾動河床而有破壞環境之虞。基於暴雨洪流影響、施工可行性低及避免影響現況環境，故建議取消棲地改善措施之拋石潛堰工法，僅保留巨石工法。

(二) 修正棲地改善措施及初步規劃

巨石工法可參考壩址上游測站有巨石長徑約 2.5 至 3 公尺、短徑約 2 公尺，形成良好深潭。但該石塊非人為力量能搬運，故建議以巨石群取代單一河心巨石，以增進工程可行性。

(三) 棲地改善施作時程

於枯水期施工以避免豐水期溪水過深問題。棲地改善措施辦理前須向林務局申請國有林地租用。

二、棲地改善措施介紹

南溪壩棲地改善措施已由東部發電廠編列經費施作，並於民國 103 年 12 月完成，實施棲地改善前後之河川環境照片如圖 5。



(a) 施工前為淺流棲地(如虛線框內)



(b) 巨石群工法(巨石堆疊完成，尚未連結鋼索)



(c) 巨石群工法完成後淺流便為深流及小深潭
(如虛線框內)

圖 5 棲地改善措施實施前後河川環境圖

說明其施作過程如下：

- (一) 施作棲地改善措施需履帶式開挖機等重型機具，所需搬運工具(吊車)可通達壩址，惟須注意工安。
- (二) 棲地改善地點為第二階段所建議河心巨石位置酌於往上游移動約 50 公尺，主要係考量通達道路透空(避免電線妨礙施工)以及施工不受湍瀑瀨影響。
- (三) 巨石工法之施工步驟如下：
 1. 於透空良好之道路垂吊施工機具挖土機

至下方河床。

2. 開挖常流量水域內之水岸淺流區做為未來巨石工法位置，開挖土方作為土堤圍堰。
3. 選取現地符合設計圖規定尺寸石塊，其材質需為細緻無明顯節理者。巨石鑽設灌漿錨筋(喜得釘)及加裝吊環螺母。
4. 搬運及吊放巨石至預定位置，以履帶式開挖機移動巨石或濬挖、整理底床，使巨石位置及高程就定位。
5. 各巨石就定位後，以鋼索穿過吊環螺母，連結成巨石群，組成底部長徑約 2.5 公尺的雙層巨石群。
6. 拆除土堤圍堰，使巨石群回歸水域。施工時河中土石擾動及土堤圍堰的拆除，應有防止造成水質污濁之措施。

三、棲地改善措施效益評估

- (一) 調查成果顯示棲地改善措施於短期內即能改善棲地環境及生物群聚。
- (二) 生態調查記錄到兩巨石後都有臺灣鏟額魚利用棲地。由於棲地改善措施完成後迄今僅 3 個月，能活動前來定棲的水生生物不多。
- (三) 觀察水生昆蟲的種類組成與壩址測站十分相像，猜測可能與棲地多樣化有關。歷次調查曾發現氣溫升高時於淺流處大型附著藻類叢生影響水生昆蟲，而棲地改善措施增加流速，可降低此類情形。
- (四) 棲地改善措施增進棲地多樣化，該地原為淺瀨、淺流區，轉變為深流及小深潭，兩巨石之間棲地較具有深淺及水流之變化，巨石群迎水面水深較深。
- (五) 生態變遷到穩定須經歷一段週期(如一二年)的氣候、洪水等考驗，故棲地改善措施長期成效仍需要更多調查數據證明。

四、研擬魚類保育計畫

本研究棲地改善措施效益評估成果，回饋至研提後續魚類保育計畫。建議僅需局部增修改第二階段研究所研擬之保育計畫，即可作為南溪壩

後續魚類保育計畫：

(一) 保育對象

除台灣鏟額魚外，近年鰕虎科魚類出現頻率穩定，也可檢視鰕虎科魚類之需求。

(二) 保育目標

除改善建壩後河道水量降低產生棲地單調化、有效棲地零散不連續之負面影響，並減少洪水對魚類之傷害以外。因集水區水質於 101 至 102 年似乎有受採礦影響，故後續可依據環境監測結果檢視降低水質濁度之必要性。

(三) 保育措施組成

保育措施首重擬訂營運管理措施，如釋放河川生態基準流量、定期排砂清除淤積物，再視河床變動而搭配必要之河川棲地改善。魚類保育計畫必須持續進行生態監測，以便研判保育措施之成效，作為修正保育措施之依據，維持保育措施彈性。

(四) 實施方案

1. 營運管理措施

- (1) 南溪壩常時排砂作業，於清除進水口前庭淤砂後，仍應維持常流量放水直到所排除之混濁含砂水流通過壩址下游 5.2 公里處。推估河道水流流速約 1m/s，需時 1.44 小時。
- (2) 各項排洪、放水作業前應實施警戒性放水。
- (3) 釋放河川生態基準流量應依據水門操作規定辦理，可以全日最低水位期間仍大於河川生態基準流量為環境友善措施。
- (4) 若有施作河川棲地改善措施，應於每年豐水期排洪作業結束後加以檢視及維護管理。

2. 河川棲地改善措施

- (1) 任何河川棲地改善措施應秉持棲地改善措施不能與大自然對抗、不能影響現場水文水質及生態、施工可行等三大原則。

(2) 現況河床寬度狹隘，搬運工具操作不易，若以重型機具通行有破壞棲地之虞。現地取材、小量體之巨石工法為可行方式，即使遭洪水衝擊流失亦不影響環境。

(3) 河川棲地改善措施施工前應取得當地主管機關許可，施工時河中土石擾動及臨時設施的拆除，應有防止造成水質污濁之措施。

3. 河川生態環境監測計畫

河川生態保育措施之棲地改善措施長期成效仍有賴未來定期生態環境監測，才具明確數據資料予以評估及辦理必要之改善。習見之棲地改善措施礙於國際間相關知識仍未臻成熟，加諸和平南溪水文條件嚴苛，未來應持續建立生態監測資料，持續探討保育設施成效，並據以修正長期維護管理計畫，才能達成生態保育目標。

捌、結論

一、南溪壩歷年魚類調查成果相似，記錄魚種以臺灣鏟頰魚為主，以及洄游性魚類之大吻鰕虎及日本瓢鰭鰕虎。南溪壩址上下游皆有洄游性魚類日本瓢鰭鰕虎，初步可推測興建壩址後之環境於營運期間若達穩定，即可慢慢回復到原溪流狀態。

二、和平南溪魚類棲地之環境控制因素以洪水為主，屬於短暫間歇性影響，魚類多會轉往較穩定的水體棲息，因此魚類族群仍可維持穩定。但未來若洪水流量過大，造成棲息地明顯改變，魚類族群仍可能劇烈下降。此外，和平南溪河道許多湍瀑瀨則為魚類溯游的控制因素。二年調查期間，僅 102 年間颱風暴雨影響，部份水道改變，導致魚類族群數量低，此後調查顯示族群數量已慢慢的趨向恢復及穩定。

三、本研究六次調查之流量皆大於河川生態基準流量(0.474cms)，源於和平南溪流量豐沛，

以及南溪壩運轉皆以全日最低水位期間仍大於河川生態基準流量為原則，故下游河道流量常態化的大於河川生態基準流量。顯示台電公司重視環境友善的經營理念。

四、下游測站為第二階段所建議之棲地改善河段，本次調查也顯示下游測站魚類數量較其他兩測站少，可能下游測站周圍多為垂直山壁，在暴雨時水流湍急，魚隻不易在此區定棲下來所致。另外，建壩後壩址下游流量變低，故壩址測站及下游測站有顯現一些緩流型棲地，包括淺瀨、淺流，棲地有多樣化而水深較低。

五、依據營運後現場道路通達情形及河川環境，秉持棲地改善措施不能與大自然對抗、不能影響現場水文水質及生態、施工可行等三大原則，檢討修正第二階段建議之河川棲地改善方式(拋石潛堰、河心巨石)改為巨石群。

六、河川棲地改善方式巨石群工法已經調查顯示能改善棲地環境及生物群聚。具體事證如將淺瀨、淺流區轉變為深流及小深潭，臺灣鏟頰魚利用該棲地，水生昆蟲的種類組成也較自然等等。

玖、誌謝

本計畫研究期間承蒙台電公司環保處、東部發電廠等單位協助，使得研究得以順利進行，謹此誌謝。本計畫之生態調查委託國立海洋生物博物館辦理，獲得翔實有用之基本資料，奠定本研究基礎，在此一併誌謝。

拾、參考文獻

- [1] 中興工程顧問公司，「西寶水力發電計畫河川魚類保育及生態研究計畫第一階段研究工作」，台電公司，2002 年。
- [2] 中興工程顧問公司，「和平溪碧海水力發電計畫南溪壩址河川生態研究及魚類保育計畫第二階段研究工作」，台灣電力公司，2004 年。
- [3] 汪靜明 1993，「大甲溪魚類棲地生態研究及改善計畫第三年研究報告」，台灣電力公司 81 年

- 度研究發展計畫，台灣電力公司，1993 年。
- [4] 中興工程顧問公司，「河川保留基流量評估技術研究計畫 2/3」，經濟部水資源局，2001 年。
- [5] 余燕妮，「台灣河川特有魚種之分區適合度曲線研訂」，碩士論文，中央大學，1996 年。
- [6] D. L., Rosgen, Applied river morphology, Wildland Hydrology, Pagosa Springs, Colorado, 1996.

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

高壓蒸氣套管式熱交換器性能計算程式

A Computer Codes to Calculate the Performance of Double Pipe Heat Exchangers

Powered by High Pressure Steam

廖世平*
Liaw, Shih-Pin

鍾承麟*
Chung, Chen-Lin

藍元伯*
Lan, Yuan-Bo

張書維**
Chang, Shu-Wei

摘要

本研究針對台電綜合研究所超臨界沖蝕試驗之熱交換器發展出一套熱流分析 VB 程式，藉由量得之溫度進行熱物理性質查詢，針對三組套管式熱交換器執行流場及熱傳係數計算，進而求得總熱括係數 U 值，結果與實驗量測比較。

本文在亞臨界及超臨界狀態下做了三組實驗，在低溫及高溫區總括熱傳係數實驗值與理論值誤差約 10%；至於在飽和或臨界溫度附近下誤差較大高達 50%，相同現象也出現在國外期刊。另外本研究針對管端及環端部分，分別與中國西安交通大學的相同實驗條件之期刊圖表相互比對，結果令人滿意。熱負荷是影響熱傳係數的主要效應之一，但是常用之理論公式均未包括此效應，將來應考慮此參數加以修正。

Abstract

In this study, a computer code written in Visual-Basic (VB) has been developed to analyze the thermal characteristics of double pipe heat exchangers during the erosion experiments executed by TPRI. While executing the code, the thermophysical properties are first inquired to be input in the program interface according to the temperatures measured at the inlet and exit of each heat exchanger. Through a series of calculations, the program returns the predicted overall heat transfer coefficient (OHTC) which can be compared with experimental result .

Three experiments have been conducted at subcritical and supercritical pressures to obtain the overall heat transfer coefficients. When the temperature falls in the low or high regime, the error between predicted and experimental OHTC is around 10%. However, the error increases up to 50% while the range of temperature includes either the saturation or pseudo-critical conditions. Many literatures reported the similar results. Furthermore, our predicted heat transfer coefficients are compared favorably with the experimental data obtained by Xi'an Jiaotong University in China in both tube and annular sides respectively, under the same experimental conditions. Finally, the applied heat flux, which is absent in the present theoretical model, may be included and expected to play an important role in the further thermal analysis.

關鍵詞(Key Words)：熱交換器(Heat Exchanger)、亞臨界(Subcritical)、超臨界(Supercritical)、擬臨界(Pseudo-critical)、總括熱傳係數(Overall Heat Transfer Coefficient)。

*國立台灣海洋大學機械系

**台灣電力公司綜合研究所

壹、前言

隨著人口的持續攀升、科技的飛快進步，地球上的資源正急速的消耗，能源有效使用的議題更為重要。發電技術的發展從早期德國而歐洲、美國、加拿大及日本，到現在中國、印度等國家，無不投入大量人力與技術，朝向高效率、低污染的方向發展。超臨界發電系統具有上述優勢，故已成為新建機組之主流，尤其在人口數量及密度高的國家，更有急迫的需要。

我國台灣電力公司林口與大林發電廠，於今年起將陸續完成 5 部超超臨界 800MW 機組更新。面對此新技術首先台電綜合研究所於 2011 年建立一套高溫高壓超臨界水沖蝕試驗設備，進行有關鍋爐管、材料、水質等使用壽命評估相關試驗。本文透過沖蝕試驗過程中量測各組熱交換器進出口溫度，發展出一套 VB 電腦程式以進行熱傳分析，探討超臨界流體在熱交換器系統中之熱傳效益。

貳、實驗設備與熱交換器

一、實驗設備介紹

本研究之設備設置於新北市樹林區台電綜合研究所。設備可應用在高溫度及高壓力下材料耐沖蝕試驗、熱交換器在超臨界狀態下之性能分析，系統最高工作壓力 40 MPa、溫度 760°C 及流量每小時 400 公升。主要組成元件包括：高壓加壓柱塞泵、大電流直流電阻加熱器、三組能量回收熱交換器及溫度壓力訊號監控量測系統。

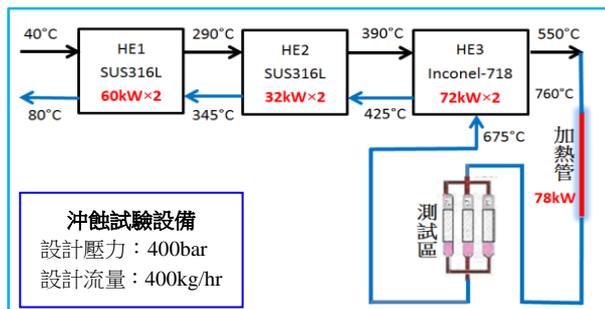


圖 1 超臨界水沖蝕試驗設備流程圖

圖 1 為實驗之設計操作參數流程圖。實驗過程工作液為純水，經由高壓柱塞泵增壓至設定壓力，工作液流經三組串聯之套管式熱交換器預熱後流入加熱管，加熱方式係以直流電源利用管壁為電阻方式直接加熱，出口到達設定溫度，進入測試區完成沖蝕試驗後，再流經三組熱交換器進行熱回收，最終由室外冷卻水塔降至室溫再進入加壓泵完成循環。

二、熱交換器介紹

現今較常使用之板式熱交換器無法在高溫高壓力下使用；至於廣泛使用於石化業之殼管式屬於大型的熱交換器，殼端管徑頗大，若使用在高壓力下安全管壁厚度將甚厚。因此本實驗選用套管式熱交換器。在高溫高壓狀態下，套管式具有小管徑安全管壁厚度較小的優勢。

本試驗高溫水走環側，較低溫水走管側；原因在於高溫水導熱度差，內管外壁表面可以加工成微鱗片狀增強熱傳，再者高溫下之密度小，因此需要走較大面積環管區，以免流速過大。

HE1 與 HE2 兩組熱交換器最高溫度不超過 450°C，因此採用低碳不鏽鋼 SUS316L 管材製成，至於 HE3 熱交換器及電阻加熱管部分材質則用耐高溫之鎳合金鋼 Inconel-718 材質。

本研究在 2012 年間執行三組實驗，系統壓力分別為亞臨界狀態 20MPa 與超臨界 30MPa。實驗數據經由研發完成之 VB 程式進行熱交換器性能額定(Rating)分析，結果與理論相互比較，並且與國外期刊圖示內容相驗證。

參、VB 實驗數據分析程式

熱傳計算程式以 Visual Basic 語言撰寫，結合 Microsoft Excel 資料庫系統，適用於一般個人電腦使用，對於複雜、冗長的計算問題，可藉著程式運算而快速的獲得即時結果，在執行實驗過程中發揮最大效益，再者也可以利用此程式來模擬實際運轉狀況。

本程式之架構，由內建資料庫、輸入參數頁、熱傳分析系統組成，其各別說明如下：

一、資料庫系統

資料庫係根據 IAPWS-IF97 工業用公式規範^[1]純水之熱物理性質，尤其著重在高壓力部分，由 Visual Basic 輸入介面頁連結 Excel 資料庫查詢以供查詢與計算之使用，依據功能分為三個子系統，如圖 2 左上方所示，查詢方式依序為單點查詢、定壓下溫度等間隔變化、定溫下壓力等間隔作變化。溫度範圍由 0 至 800℃，壓力由 0.1 至 100MPa。

圖 3 顯示 30MPa 下，五個溫度點的查詢結果，由於擬臨界溫度在 402℃，查詢範圍包括亞臨界及超臨界，內容有密度、比熱、黏度、導熱度、熱焓、普朗德數等熱物理性質，以 Excel 表格方式排列，利於後續計算之查詢；由圖 3 可看出在 400℃時，密度迅速的下降，而比熱與普朗德數則出現一高峯值奇特現象，如需要更精確的觀察這些現象，可使用較大間距數查詢得到。此外在圖 2 介面右側還設有利用壓力與焓值簡易查詢溫度功能，方便與常常以焓值代表溫度之文獻資料相比對。

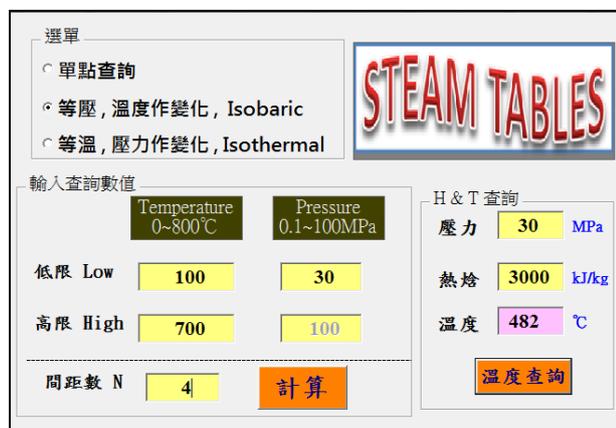


圖 2 性質查詢系統輸入頁

T 溫度 Temp.	P 壓力 Pressure	ρ 密度 Density	C _p 比熱 Specific Heat	μ 黏度 Viscosity	k 導熱度 Thermal Conductivity	H 熱焓 Enthalpy	普朗德數 Prandtl No.
°C	MPa	(kg/m ³)	(J/g·K)	(10 ⁻⁶ Pa·s)	(W/m·K)	(kJ/kg)	μ·C _p /k
100	30	971.8	4.15	289.6	693.8	441.7	1.734
250	30	825.8	4.60	113.3	647.6	1088.3	0.805
400	30	357.7	25.80	44.2	328.1	2152.4	3.475
550	30	98.3	3.56	33.5	108.2	3279.8	1.103
700	30	73.3	2.83	38.8	116.4	3744.2	0.945

圖 3 性質查詢系統-等壓 30MPa 查詢

二、輸入參數系統

主要輸入頁面如圖 4 所示，以 Case②為例，最上方為試驗壓力 P 及流量 M，由於本試驗設備為兩套熱交換器並聯，故程式之流量僅為總流量之半；其次輸入量得之各個熱交換器管側及環側的進出、口溫度 T 及溫變率 ΔT/Δt，由於要達到穩態需要相當長時間的連續運作，高溫高壓下對於設備耗損甚鉅，因此在近乎穩態之暫態下，必須考量整體熱交換器之熱容效應來做補償修正。因此配合熱交換器整體結構之內、外管及容納蒸氣之質量 m 乘以各別比熱 C_p 彙總得到總熱容，再利用冷熱側進出口焓值差 ΔH 能量平衡如下式

$$M \cdot \Delta H_c + \Sigma(m \cdot C_p) \cdot \Delta T / \Delta t = M \cdot \Delta H_h \quad (1)$$

進行暫態的能量平衡驗證，上式左右側計算結果及誤差顯示於頁面下方。並可以知悉暫態修正之效應。暫態計算過程需要用到之實驗設備中三組熱交換器之內管、外管之尺寸與長度以及使用材質物性，屬於固定參數，以另外頁面儲存。

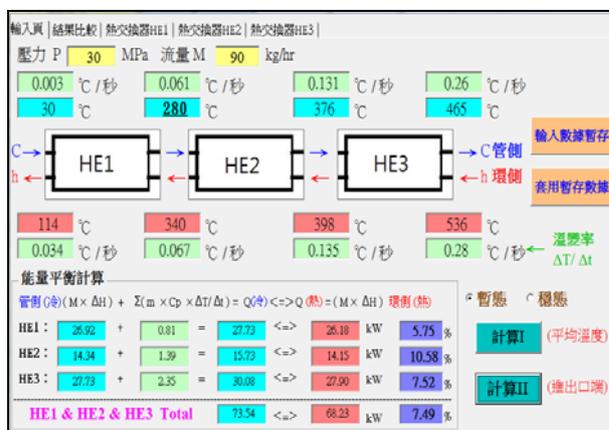


圖 4 量測溫度輸入介面(Case②)

三、執行系統

熱傳分析區分為實驗量測與理論預測兩部分，首先實驗部分由各個熱交換器進出口處量得之冷、熱溫度差值依下式計算出對數平均溫度差 LMTD (Log Mean Temperature Difference)

$$LMTD = \frac{\Delta T_{進口} - \Delta T_{出口}}{\ln[\Delta T_{進口} / \Delta T_{出口}]} \quad (2)$$

其次由溫度查詢熱物理性質，由於熱交換器內部溫度變化相當大，因此在管側及環側分別採進、出口及平均溫度三個欄位如圖 5 所顯示，再而計算出之含暫態效應冷熱側熱傳量 Q_c 與 Q_h 進行能量平衡，誤差在可接受範圍內方屬有效數據。最後以平均熱傳量除以內管管外總面積 A_o 及對數平均溫差求得各個熱交換器總括熱傳係數 U (Overall Heat Transfer Coefficient)之實驗值

$$U = \frac{(Q_c + Q_h) / 2}{A_o \times LMTD} \quad (3)$$

圖 5 管、環側之熱物理性質(Case②HE3)

在理論預測部分，應用圖 5 查詢之熱物理性質，分別計算出管側與環側之流體流速與雷諾數。其次依據雷諾數範圍判斷流場為層流或紊流，雷諾數小於 2,300 屬層流則代表熱傳係數之紐賽數公式選用 Gnielinski^[2]公式計算，如下式所示：

$$Nu = \left[3.66^3 + 1.61^3 \left(\frac{Pe \cdot d}{L} \right) \right]^{1/3} \quad (4)$$

其中 Pe 為 Péclet 數縮寫，等於雷諾數與普朗特數之乘積，末項 d 及 L 分別為傳熱管內徑與長度。雷諾數大於 10,000 流場屬於紊流，紐賽數計算選用較著名之學者 Gnielinski^[3]

$$Nu = \frac{(f/2) \times (Re - 1000) \times Pr}{1 + 12.7 \times (f/2)^{1/2} \times (Pr^{2/3} - 1)} \quad (5)$$

及 Dittus-Boelter^[4] 計算公式：

$$Nu = 0.0243 Pr^{0.4} Re^{0.8} \quad (6)$$

上兩式中 f 為摩擦係數， Pr 為普朗德數。當雷諾數介於 2,300 和 10,000 之間則落至過渡區，紐賽數的計算則採用層流與紊流公式之平均值。最後再將管端與環端之紐賽數換算成熱傳係數，並且求得總括熱傳係數，詳細計算過程如先前文獻^[5]。圖 6 為 Case②之 HE3 熱交換器範例，此頁面揭示管、環端分別以進口、平均與出口溫度，理論模式紊流採 (5)及(6)兩公式，最終以平均溫度計算出之 U 值與實驗結果相比較。

圖 6 熱傳計算介面(Case②HE3)

肆、實驗結果與討論

表 1 揭示三組實驗依欄位次序表列各熱交換器管、環側的進出口溫度、平均流速、雷諾數、紐賽數、公式(4)或(5)計算之熱傳係數、總括熱傳係數、最後與實驗值之差異。在等壓力下，隨著溫度的升高而密度下降，流速同時增大，但在定流量下兩者效應抵消；總之雷諾數僅與黏滯係數成反比，隨著溫度的升高，因黏滯係數下降而雷諾數變大，至於普朗特數則約維持定值，因此所有案例 HE2 之 U 值均高於 HE1。

水在 20MPa 下飽和溫度為 366°C，而在超臨界壓力 30MPa 之擬臨界溫度為 401°C，當 HE2 與 HE3 溫度範圍接近此溫度值時，比熱、導熱度及普朗特數均出現峰值，因此在理論公式計算上熱傳係數會提升相當多，可是實驗上並沒有觀察到相對程度的提升，尤其 HE2 誤差大，比理論值約小 50%左右，此區間理論預測模式與實驗值之差異現象，廣泛的出現在超臨界實驗中^[6,7]，譬如

圖 7 中國西安交大在 23MPa 熱實驗傳係數結果與多種理論模式之比較，在臨界溫度 Dittus-Boelter 理論計算值約為實驗值之三倍，因此圖中也繪出多種其他修正公式，本實驗各組熱交換器之實驗溫度範圍亦標示於圖中。當溫度高於飽和或擬臨界溫度越過峰值後，除了密度外幾乎所有熱物性都趨於定值，由圖 7 右側高溫區可看出實驗數據與理論相當接近，本實驗所有 HE3 之 U 值誤差也均降低至 10% 左右。至於同為超臨界狀態 Case③ 因流量之加大，流速與雷諾數均提高，熱傳的性能較 Case② 為佳；圖 7~10 中 G 為單位面積之質量流率。

表 1 三組實驗各熱交換器總括熱傳係數理論計算與實驗值比較：①：20MPa, 180kg/hr ②：30MPa, 180kg/hr ③：30MPa, 300kg/hr

Case	T (°C)	V (m/s)	Re	Nu	h	U _{cal}	U _{exp}	誤差%
①	管 34→240	0.828	23,328	58.59	6,357	841	427	49.2
	環 190→337	0.71	6,739	12.16	1,344			
①	管 240→344	1.354	60,838	135.7	13,982	2,241	928	68
	環 337→364	0.946	22,726	80.55	5,754			
①	管 344→374	1.487	96,517	276.9	15,035	1,791	1,604	10
	環 364→486	6.859	55,586	166.9	2,813			
②	管 30→280	0.837	27,061	60.7	6,639	894	978	9.4
	環 114→340	0.662	5,660	10.94	1,305			
②	管 280→376	1.437	68,160	152.33	14,596	2,268	1,277	43.7
	環 340→398	0.971	21,038	73.48	5,752			
②	管 376→465	4.075	156,418	511.06	14,865	1,971	2,139	8.6
	環 398→536	4.477	47,927	151.43	3,296			
③	管 30→200	1.348	33,008	83.09	9,078	1,151	1,255	9.0
	環 87→280	1.046	7,630	13.92	1,726			
③	管 200→380	2.204	97,758	190.28	20,374	2,729	3,004	10.1
	環 280→401	1.410	29,862	81.66	7,465			
③	管 380→452	6.227	243,575	793.61	26,934	2,765	3,014	9.0
	環 401→536	7.523	79,872	226.83	4,909			

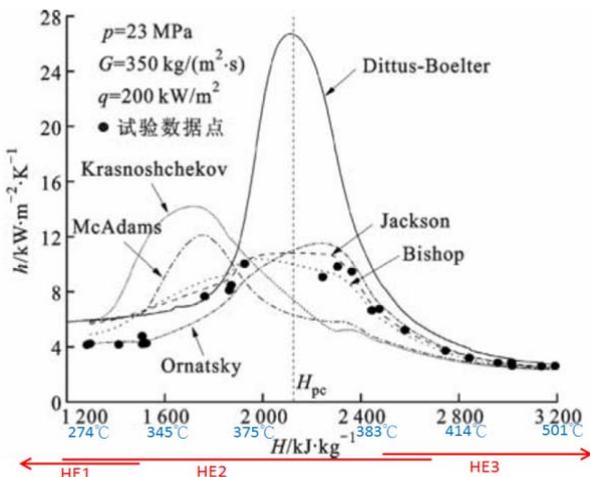


圖 7 中國西安交通大學熱傳係數實驗^[6]結果

總括熱傳係數 U 為管內外對流及管壁熱傳導三項熱阻之串聯組合，其中管壁熱傳導之計算較為簡易，主要問題在於管內及內外管間環狀區之熱傳係數準確預測。圖 8 為亞臨界狀態 20MPa 下為表 1 之 Case① 管內熱傳係數與西安交大沈植等^[8]在內徑 17mm 垂直光管流體向下流動之實驗數據比較，雖然流量跟熱傳量有些許差異，但在熱交換器工作溫度範圍與量測結果相近。

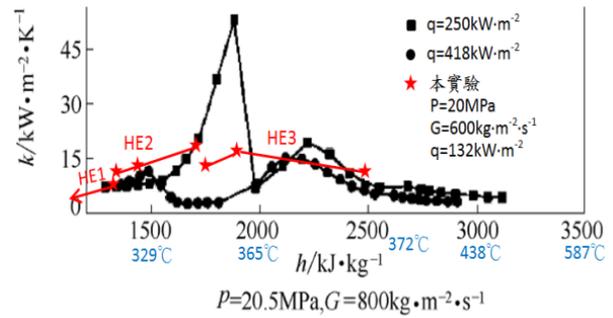


圖 8 亞臨界實驗 Case①與中國西安交大^[8]比較

於超臨界狀態下，本計算程式以目前實驗之熱負荷 204 kW/m²，對於壓力、單位面積之質量流率則與西安交大潘杰等^[9]內徑 19.4mm 四肋內螺紋管向上流動之實驗條件相同，比較結果繪製成熟傳係數曲線顯示於圖 9。圖中可看出曲線形狀與趨勢相同，隨著熱負荷的增大熱傳係數下降，此現象意味著將來在承受高負荷運轉下，即使傳熱管管壁在同樣溫度下，可能因為熱傳係數的下降導致鍋爐管過熱燒燬之危險。觀察目前既有的理論模式譬如上述(4~6) 式均只反應物理性質隨壓力與溫度變化之普朗特數以及單位面積之質量流率相關的雷諾數，沒有包括熱負荷的效應，因此將來理論經驗式應考慮加入熱負荷參數進行修正。

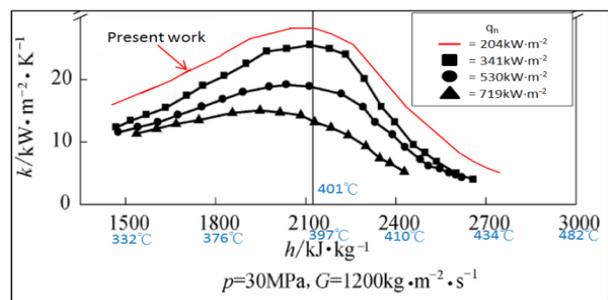


圖 9 本程式與西安交大超臨界內螺紋管實驗^[9]比較

環狀流動熱流分析主要應用在於模擬核能反應爐燃料棒加熱工作液，因此實驗裝置係以高壓力水流經環狀管，其內管則為產生熱負荷之實心棒體。王漢等人^[10]模擬 SCWR 核能發電實驗以 1.4m 長套管試件，令超臨界水流經環狀管通道，外管內徑 16mm，內管外徑 8mm，間隙 4mm。本計算程式利用相同壓力、相同流量之條件針對單位面積之質量流率 700 與 1000kg/m²·s 繪製熱傳係數曲線標示於該文獻圖中，如圖 10 所示。隨著質量流率增加，流速及雷諾數變大，熱傳係數提高。本文繪製出的曲線形狀及趨勢和原圖相似，程式計算出的熱傳係數最大值也與文獻相符，唯本文曲線明顯向右偏移，經與 IAPWS-IF97 規範^[1]對照，原圖之焓值臨界點(H_{pc})線明顯向左偏移，可能是造成該差異之主因。

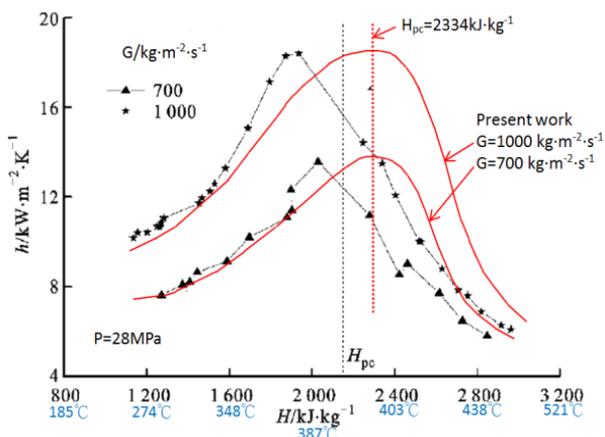


圖 10 本程式與環型通道超臨界熱傳實驗^[10]比較

伍、結語

本文研發之熱流分析程式，針對三組實驗之各組熱交換器進出口量得之溫度進行流場及熱傳計算，HE1 處於低溫度，流體特性近乎液態；而 HE3 溫度高，流體近似氣態，因此兩組熱交換器之總熱傳係數實驗值與理論值接近。至於 HE2 溫度範圍落在亞臨界飽和溫度或超臨界擬臨界溫度區，由於熱物理性質劇烈變化，因此與理論預測相差較大。綜觀現今之理論模式均未考慮熱負荷效應的影響，此點在未來實際電場運作相當重要，理論模式應加入此參數進行修正。

陸、參考文獻

- [1] W. Wagner and H. J. Kretzschmar, International Steam Tables - Properties of Water and Steam Based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97, 2nd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [2] V. Gnielinski, Forced Convection Ducts, in Heat Exchanger Design Handbook, Schlünder, E. U., Ed., Hemisphere, Washington, D.C., 2.5.1-2.5.3., 1983.
- [3] V. Gnielinski, "New Equations for Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow," *Int. Chem. Eng.*, vol.16, pp. 359-368, 1976.
- [4] F. W. Dittus and L. M. K. Boelter, "Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type," *University of California, Berkeley, publications in engineering*, vol. 2, pp. 443-461, 1930.
- [5] 廖世平、黃琮元、蔡兆傑、陳茂景、張書維，「超超臨界蒸氣套管式熱交換器設計程式」，台電工程月刊，第 773 期，第 1-9 頁，2013 年。
- [6] H. Wang, Q. C. Bi, Z. D. Yang, L. C. Wang, and G. Wu, "Heat Transfer Characteristics of Supercritical Water in Annular Flow Channel," *Journal of Xi' An Jiaotong University*, vol. 47, No. 9, Sep., 2013.
- [7] M. Sarah, F. Amjad, K. Krysten, G. Sahil, P. Igor, and K. Pavel, "Development of Supercritical Water Heat-Transfer Correlation for Vertical Bare Tube," *International Conference Nuclear Energy for new Europe 2009*, Bled, Slovenia, Sep., 2009.
- [8] 沈植，楊冬，陳功名，肖峰，「高溫高壓水在垂直下降管內的傳熱特性」，化工學報，第 64 卷，第 7 期，第 2389 頁，2013 年。
- [9] 潘杰，楊冬，朱探，董自春，華勤成，「超臨界壓力水在垂直上升內螺紋管中的傳熱特性」，化工學報，第 62 卷，第 2 期，第 311 頁，2011 年。
- [10] 王漢，華勤成，楊振東，王林川，吳剛，「環形通道內超臨界水的傳熱特性研究」，西安交通大學學報，第 47 卷，第 9 期，第 28-30 頁，2013 年。

輸變電投資計畫編擬新作法

The New Methodology of Network Investment in Taiwan Power System

張忠良*
Chang, Chung-Liang

莊政宏*
Chuang, Cheng-Hung

陳佳慶**
Chen, Chia-Ching

摘要

因應區域性電源開發、負載快速成長及強化電力系統傳輸能力，近期台電公司輸變電計畫已朝解裂原全包裹輸變電計畫方式推動，並朝向以滿足區域性需求方向進行相關計畫編擬作業，以落實投資效益及提升工程執行可行性。

為能降低輸變計畫投資成本，本文針對電網投資提出精進評估原則，利用運轉、擴建及新建等三階段投資評估作法，以在兼顧電網穩定供電前提下，提出必要電網工程投資項目，作為台電公司未來輸變電工程納編計畫評估原則。

Abstract

To satisfy the requirement of regional power development, fast growth of load demands, and enhance the power transmission capabilities of the system, the transmission and substation project (T&S Project) of TPC has been modified toward decomposing the original wrapped up T&S project toward decomposition into several plans. Through these adjustments, the company aims to avoid excessive investment and improve the efficiency of project implementation.

Furthermore, in order to cut down the power grid investment costs on the premise that the safe operation of power system and the stable supply of electricity should be ensured, this paper further proposes an advanced evaluation principle, by means of three-step investment evaluation, namely, operation, expansion, and new construction to evaluate the projects necessary for power grid.

關鍵詞(Key Words)：輸變電計畫 (Transmissions and Substations Project, T&S Project)、包裹式輸變電計畫(Wrap up T&S Project)、電力系統(Power Grid)。

壹、前言

電力建設向來為維繫國家經濟發展之重要基礎建設，台電公司已成立近 70 年，全體同仁為促進國家經濟發展與人人有電可用的使命，各單位盡心盡力於發、輸、配等各項相關工程之建設，促使台灣的經濟蓬勃發展，台電公司成為這

將近 70 年來台灣經濟成長的重要推手。

雖說電力是民生、工業最基本的重要需求元素，但自近來民風高漲及原物料急速上漲之雙重考驗下，在伴隨電價長期低於發電成本且未能合理反映的情況加劇下，台電公司自 92 年以來新增加的電源多數是以成本較高的天然氣來發電，使得供電成本大幅上升，導致今日台電公司累積虧損快速增加主因，以最新 103 年統計結

*台灣電力公司董事會檢核室

**台灣電力公司系統規劃處

果，其虧損已累積超過 2200 億，堪稱台電公司成立以來最為險峻一刻。

另台電公司所執行相關電網建設，諸如電廠開發、輸電線路興建、變電所興建等相關工程，因近來民眾自覺意識的提高及環保法規日益趨嚴，導致工程進度不易掌握，並有進度經常延宕之現象。

台電公司目前為台灣唯一綜合電業，因此依據民國 103 年 1 月 29 日最新電業法第 57 條（締約之強制）「電業在其營業區域內，對於請求供電者，非有正當理由，不得拒絕」之規定，台電公司自當為穩定供電投入所需電網建設。然受限於財務艱困及無法依據電業法第 60 條「電價之訂定，應以電業收入，抵償其必需成本，並獲得合理之利潤」之規定，讓台電公司可以訂定合理電價，以致於在這不對等的困難經營環境下，如何穩定供電、提高經營效率及避免過度投資，近年來已逐漸成為台電公司重要經營課題。

以往台電公司所執行輸變電計畫皆為固定時期內之單一計畫模式，亦即所謂全包裹式輸變電計畫。如 63 年所啟動第一輸變電計畫投資總額 116 億，至近期 99 年所啟動第七輸變電計畫投資總額 2,389 億等，皆採此種模式。也因屬單一計畫模式，內容包羅萬象，衍生計畫本身之效益目標有不易掌握之特性，再加上環保法規日益趨嚴，往往造成計畫內之工期不易掌握，造成工程延宕現象。因此有效精準各項輸變電工程規劃需求及兼顧工程可行性與投資效益，台電公司在未來輸變電計畫編擬作法上已計畫朝解列原全包裹式計畫方式推動，以因應未來大環境的變遷，詳細原輸變電計畫之裂解方式可參閱「台灣電網規劃新時代^[1]」內容之未來輸變電計畫編擬作法四項變革，以精準計畫編定目標與減少工程執行上與規劃間的落差。

為能到落實評估輸變計畫之投資效益及必要性，本文針對電網投資提出精進評估原則，利用運轉、擴建及新建等三階段投資評估作法，並以近期所評估區域電網供電需求作為介紹，以達精進電網投資目的。相關計畫編擬作業，仍須依據「中央政府總預算附屬單位預算共同項目編列

作業規範」^[2]、「台灣電力股份有限公司新興輸變電計畫之規劃設計施工及營運作業要點」^[3]等規定辦理。

貳、電網新擴建設備規定

為能兼顧電網投資效益及有效利用目前電網既有低使用率設備與變電所尚可利用空間，依據^[1]內容，原則需以滿足台電公司「輸電系統規劃準則」^[4]之第五章輸電線及主變壓器之新擴建規劃準則，才可納入辦理。依據^[1]內容，由於輸變電計畫已將朝解列全包裹式輸變電計畫方式推動，因此部分較具特色或特定目的工程項目另以獨立計畫方式辦理，例如：超高壓輸變電計畫、特高壓用戶線、電源線工程等。未來輸變電計畫將朝區域化推動，主要以配合區域負載用電需求之變電所及輸電線路新擴建工程、配合系統運轉及改善供電瓶頸所需輸電與變電(電抗器、電容器、變壓器)等工程。因此前述工程未來要納入計畫編列，將需符合下列規定，才可納入計畫投資：

一、345kV、161kV 及 69kV 輸電線之新擴建規劃規定：

- (一) 系統正常運轉時，輸電線路不得超載。事故時，依輸電系統規畫準則第六條至第九條規定檢討，並不得超過線路終端設備之額定電流。
- (二) 既有系統之正常額定電流，以運轉維護單位認定之資料為依據

二、變壓器之新擴建規劃依下列規定辦理：

- (一) 系統正常運轉時，超高壓變電所、一次變電所、一次配電變電所及二次變電所變壓器不超載。
- (二) 事故時，依輸電系統規畫準則第十條規定檢討。超高壓變電所變壓器超載額定值在 10% 以內，其餘各電壓等級變電所之變壓器超載在 25% 以內，經轉供或採取對策後，不得影響供電安全。

三、系統穩態電壓之規劃準則

(一) 系統正常運轉時電壓應保持在 0.95p.u. 至 1.03p.u. 之間；發生事故後，系統穩態電壓變動範圍應維持在 0.9p.u. 至 1.05p.u. 之間。

綜上所述，當供電系統區域之輸電線路 N-1 已不符合輸電系統規劃準則第六條至第九條規定、變電所內變壓器 N-1 已超載在 25% 以上、系統電壓正常及 N-1 事故已無法在規定範圍內時，則該區域即有新擴建輸變電設備需求。

參、變電所內變壓器 N-1 考量方式

目前台灣電力系統之變電所概略有四種模式，超高壓電變所(E/S)、一次變電所(P/S)、一次配電變電所(D/S)及二次變電所(S/S)等四種。惟其變電所內之變壓器引接結構方式並不相同，說明如下。並作為評斷該區域是否需擴建變電設備或新設變電所評估考量。

一、超高壓變電所及一次變電所

超高壓變電所之變壓器(一般稱為 ATR)主要擔任 345/161kV 電壓轉換功能，每台容量 500MVA。而超高壓變電所一般配置 2~4 台

ATR，其引接結構方式為所有 ATR 採併聯方式(亦即所有 ATR 一次側互連、二次側互連在一起)，如圖 1 為台電公司超高壓變電所單線圖。因此考量 ATR N-1 情況時可超載 10% 規定下，其主變最大利用率如公式(1)所示。例如 ATR 3 台時，其每台利用率可達 73.3%。

$$\text{主變最大利用率} = \frac{(N-1) \times 500 \times 1.1}{N \times 500} \times 100\% \quad (1)$$

N：ATR 主變台數

一次變電所之變壓器(一般稱為 MTR)主要擔任 161/69kV 電壓轉換功能，每台容量 200MVA，一般亦配置 2~4 台 MTR，引接結構方式與 ATR 相同，一次側互連、二次側互連在一起，如圖 1 所示。因此考量 MTR N-1 情況時可超載 25% 規定下，其主變最大利用率如公式(2)所示。例如 MTR 3 台時，其每台利用率可達 83.3%。

$$\text{主變最大利用率} = \frac{(N-1) \times 200 \times 1.25}{N \times 200} \times 100\% \quad (2)$$

N：MTR 台數

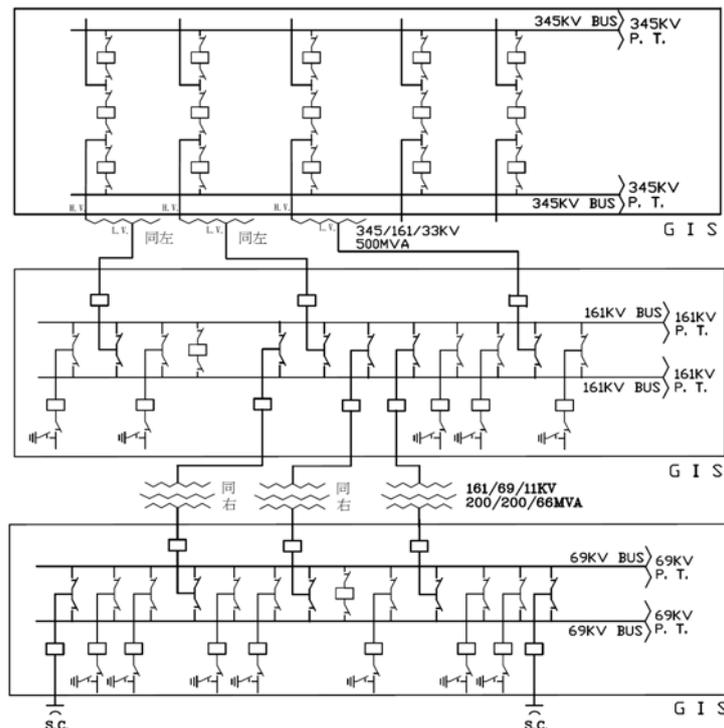


圖 1 超高壓及一次變電所單線圖

二、一次配電變電所及二次變電所

一次配電變電所(D/S)及二次變電所(S/S)之變壓器主要擔任 161/22.8kV 與 69/11.4kV 電壓轉換功能，一般 D/S 與 S/S 變壓器每台容量為 60MVA 與 25MVA。惟一般 D/S 或 S/S 二次側引接方式與 E/S 或 P/S 並不相同，變壓器 N-1 事故後，僅能由相鄰左、右兩台變壓器進行所內轉供。因此在二次側不併聯之變電所架構模式下，在所外聯絡饋線無法有效支援供電情況下，即須以所內變壓器轉供。

(一) 變電所二次側採環狀結構引接

以圖 2 一次配電變電所(D/S)有四台與三台變壓器為例，一般而言每台變壓器二次側並無併聯，並以斷路器進行分段各自獨立運行，主要無法併聯原因係二次側短路電流將超過斷路器啟斷容量 12kA。而圖 2 為變壓器二次側採環狀結構引接方式，因此當一台因事故跳脫時，僅能由相鄰左、右兩台變壓器進行所內轉供，因此在此架構下，不論變壓器為四台或三台，在變壓器利用率在 N-1 不能超載 25% 規定下，最大利用率僅能運轉在 83.3%。公式如(3)所示。

$$\text{主變最大利用率} = \frac{(N-1) \times 60 \times 1.25}{N \times 60} \times 100\% \quad (3)$$

N：因只能由相鄰二台變壓器轉供，因此變壓器為四台或三台時，其數值 N=3。

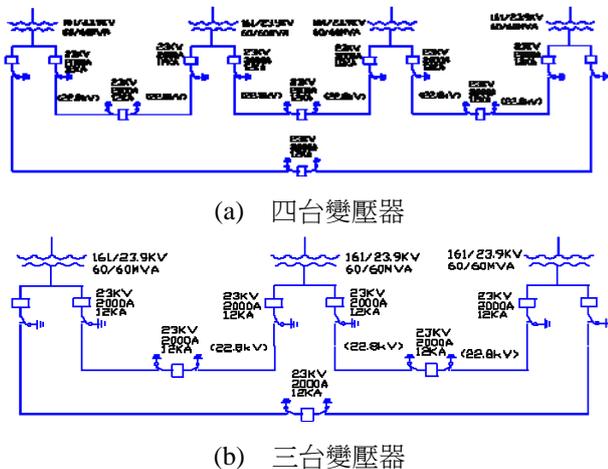


圖 2 一次配電變電所(D/S)採環狀引接結構方式(a)四台(b)三台變壓器

另當一次配電變電所(D/S)僅有二台變壓器時，如圖 3，則一台 N-1 事故跳脫後，僅能由另一台轉供，因此事故前變壓器利用率僅能在 62.5% 以下。

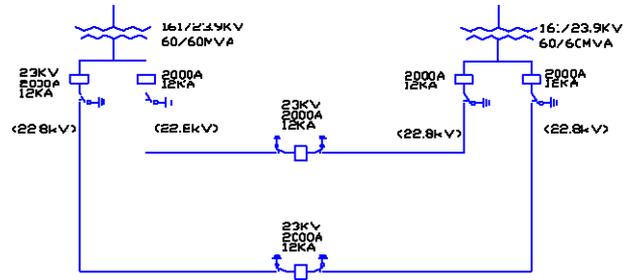


圖 3 僅有二台變壓器之引接結構圖

(二) 變電所二次側不採環狀結構引接

圖 4 為一次配電變電所(D/S)有四台、三台之不採環狀結構引接方式為例。

1. 在四台變壓器之結構中，由於位於最外側二台變壓器事故後，僅能由相鄰一台變壓器轉供，因此變壓器最大利用率僅能維持在 62.5%，而位於中間二台變壓器則可藉由相鄰兩側變壓器轉供，因此最大利用率可達到 83.3%。因此綜合考量，四台變壓器之架構下，其最大利用率為 72.9%。
2. 在三台變壓器之結構中，由於位於最外側二台變壓器事故後，僅能由相鄰一台變壓器轉供，因此變壓器最大利用率僅能維持在 62.5%，而位於中間一台變壓器則可藉由相鄰兩側變壓器轉供，因此最大利用率可達到 83.3%。因此綜合考量，三台變壓器之架構下，其最大利用率為 69.4%。

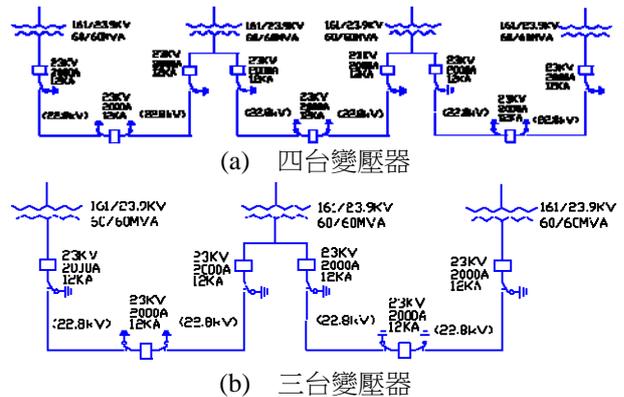


圖 4 一次配電變電所(D/S)不採環狀結構引接結構方式(a)四台(b)三台變壓器

肆、三階段電網評估策略

依據文獻[4]內容，已針對電網投資提出評估與投資原則，將搭配利用既有變電所轉供或改接、利用分散型電源或需量反應取代興建工程、採耐熱導體或利用庫存設備等方式降低輸電線路及輸變電設備投資，達到最佳投資計畫內容。

由於未來輸變電計畫已採區域性方式規劃，且計畫中主要工程項目及佔比將以新擴建變電所為主要投資內容，因此為能使電網投資到位，本文章將主要針對變電所新建工程納入輸變電投資計畫時，應具有之相關先前評估作業，並以符合前述電網新擴建設備規定下，以運轉評估、擴建評估及新建評估等三部分進行階段性分析，在能滿足供電需求前提下，以最適合之電網投資方式來達成。

目前台電公司依據地理位置及供電支援性將全國供電範圍細劃分為 123 個供電區域，如板橋土城地區、中永和地區、三重蘆洲地區等。因此當供電區內因縣市政府重劃區開發、新工業區開發或因應自然負載成長有用電需求時，台電公司區處單位通常會視該區供電情形，請用電開發單位預留變電所用地，以利未來新建變電所之用地需求。而當重劃開發明確，有真正負載需求可預見或產生時，台電公司區處單位即會依據區域供電情形提出新建變電所需求，以納入電網投資計畫中辦理。後續則依據其需求內容，評估其是否符合電網新擴建設備規定，若符合新擴建規定標準，才納入電網投資計畫草案中，並依據本文章所提三階段評估流程，進行最佳投資策略分析。主要評估流程如圖 5 所示，各評估流程分述如下。

一、運轉評估(亦即轉供評估)

需求單位於各供電區域內提出新擴建變電設備需求，且符合電網新擴建設備規定時，則須評估新擴建變電設備之最佳方案。由於各供電區域一般係由數個變電所組成，因此並非所有區域內變電所變壓器皆會達到 N-1 過載超過 25% 情形。故本運轉評估階段係考量鄰近周圍變電所是

否可採轉供方式，以暫緩該新擴建變電設備投資，主要目的仍在於活用既有電網設備，提升設備利用率，達到節省投資。

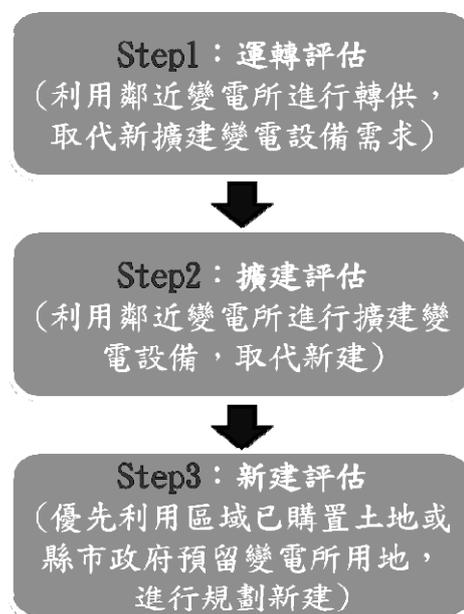


圖 5 新擴建變電所納入投資計畫之評估流程

二、擴建評估

本階段為當鄰近周圍變電所無法以運轉方式進行轉供時，先考量由既設變電所擴建之可行性。諸如：利用變電所閒置空間、拆除既有利用率低的電容器組騰出空間、利用變電所預留裝置電抗器空間改以設置變壓器，亦即電抗器與單繞組變壓器(161/22.8kV)先前規劃時係採共同基礎方式興建。該擴建評估方式除可利用既有變電所空間外，亦可減少新建變電所之需求，降低對外在環境之衝擊。

三、新建評估

本階段為歷經前述兩項評估後，若仍無法有效以運轉及擴建方式辦理時，則需以新建變電所方式辦理。惟新建變電所土地部分通常具有重要變數因子，因此為能使變電所新建順利，土地選擇方式以台電公司自有土地為優先考量，尤以都會地區為是，通常在都會地區新建一次配電變電所，所需花費土地投資預算高達數十億，因此當以鄰近地區台電公司自有土地為優先辦理。

其次以縣市政府所預留變電所用地進行規

劃新建，此乃由於縣市政府進行都市重劃、更新開發時，台電公司各區處單位會視地區負載成長需求，要求縣市政府預留變電所用地，以利未來供電所需，因此當有新建變電所需求時，以考量變電所預定用地為主。最後，若皆無土地可優先選用時，需以公開徵求方式辦理，惟該方式通常較易受外在環境抗爭影響，變電所興建困難且能否順利完成充滿不確定性。

伍、分析案例說明

以下案例分析係以近期台電公司內部進行需求性檢討過程中，所應用到三階段電網評估策略。

一、運轉評估(亦即轉供評估)

若可以用運轉轉供來取代新、擴建工程之需求時，則為評估時最優先採用之改善措施。原有規畫新建 69kV 松樹～平鎮二回線，以解除既有 69kV 梅湖環路系統供電瓶頸，經檢討、可先利用鄰近之中豐 D/S 及聖亭 D/S 加強取供電瓶頸環路中平鎮 S/S 配電負載，降低環路系統重載壓力以紓解供電瓶頸，亦可節省投資該輸電線路之預算。

二、擴建評估

若需求之工程無法應用前述「一、運轉評估」來以取代時，則進一步檢討可否以擴建工程替代新建工程，以節省工程費用；例如：鄰近變電所擴建主變、未架線鐵塔架線...等。原提出新建需求之新業 D/S，經檢討、可先以臨近之新崙 D/S、新豐 D/S 各擴充一台配電變壓器，以因應新竹工業區成長之負載。

三、新建評估

若所提出需求工程既無法以前述「一、運轉評估」，又無法以「二、擴建評估」因應，則僅剩餘新建工程可以分攤逐漸成長的負載量對系統造成之壓力，故需評估以尋求最經濟之投資方式，例如：以單繞組變壓器為主、減少備用開關設備檔位、減少變電所建築面積、利用既有土地

或連絡線、利用既有庫存設備...等措施。如原提出中埔、遠信 D/S，原變電所採標準規模為 2D2S2R10LT，現改採 1D3S1R8LT 規模，除可減少一台大項器材(變壓器或電抗器)空間，又可減少雙繞組變壓器使用(雙繞組變壓器之寬度約為單繞組變壓器之兩倍)，亦同步減少備用斷路器組數；另 69kV 花蓮～北埔二回線，利用原七輪修正計畫緩辦 69kV 花蓮～北埔～立霧二回線已完成之部分閒置鐵塔，以大幅減少工程費用。

陸、結論

有效且必須的電力系統輸變電設備投資，對於目前台電公司所面臨 2200 億的虧損經營環境下，如何做到“錢花在必要刀口上”已是現今所必須面臨重要經營課題。然依現行台電公司仍為台灣唯一綜合電業公司，仍有擔負提供用戶用電及維護電力系統穩定責任，因此如何在電網投資及供電穩定兩者間尋求平衡作法，可預期將是台電公司未來所必須持續面對課題。

本文主要在輸變電投資計畫編擬作法過程中，導入運轉(轉供方式)、擴建、新建等三階段電網評估策略，以在能滿足供電需求下，以此三階段電網評估進行輸變電設備投資規劃，以期在兼顧整體計畫有效投資前提下，達到穩定供電雙贏目標。

柒、參考文獻

- [1] 張忠良、莊政宏，「台灣電網規劃新時代」，台電工程月刊，2014 年 4 月。
- [2] 「中央政府總預算附屬單位預算共同項目編列作業規範」，行政院主計總處，<http://www.dgbas.gov.tw>。
- [3] 「台灣電力股份有限公司新興輸變電計畫之規劃設計施工及營運作業要點」，台電公司，2013 年 10 月 18 日，<http://www.taipower.com.tw>。
- [4] 「台灣電力股份有限公司輸電系統規劃準則」，台電公司，2013 年 4 月，<http://www.taipower.com.tw>。

斷路器動作時間線上監測應用實例與研究

On-line Monitoring Application Examples and Research of Circuit Breaker Operating Time

陳邦封*
Chen, Pang-Feng

盧璟照*
Lu, Jiing-Jaw

賴佳伸*
Lai, Chia-Shen

李偉宏*
Li, Wei-Hung

陳慶守*
Chen, Ching-Shou

馬偉富**
Ma, Wei-Fu

石吉亮*
Shih, Chi-Liang

李河樟*
Lee, Her-Jang

摘 要

本研究係運用變電所既有末端資訊設備(Remote Terminal Unit, RTU)內之主閉合/主跳脫(Main/Close, M/C、Main/Trip, M/T)電驛動作及斷路器(Circuit Breaker, CB)動作完成回傳之時間訊息，透過開發的分析程式計算而得 CB 動作時間，再由區域調度中心(Area Dispatch Control Center, ADCC) e 化伺服器的事件順序(Sequence of Event, SOE)紀錄擷取訊息，並將該資訊置入資料庫後顯示視於網頁中。

維護人員可透過該網頁資訊，獲得 CB 最新動作時間，並藉以分析 CB 之操作機構動作情形，及早發現啟閉時間過長之異狀，使維護人員更能針對異常點施以維護，降低 CB 運轉風險，提高電力系統穩定度。

Abstract

This study makes use of the time message based on the activated time of Main/Close and/or Main/Trip at the existing Remote Terminal Unit (RTU M/C, M/T) to calculate the operating time of Circuit Breakers (CB), and then retrieve the data from the Sequence of Event (SOE) message of the server at Area Dispatch Control Center (ADCC). Finally the data will be migrated into database and displayed on the website.

Maintenance personnel can get the latest CB operating time form the website and thus understand action circumstances of operating mechanism so as to perceive irregular time message and put more emphasis on the maintenance of abnormal parts to reduce the CB operation risks and improve stability of power system.

關鍵詞(Key Words)：末端資訊設備(Remote Terminal Unit, RTU)、斷路器(Circuit Breaker, CB)、區域調度中心(Area Dispatch Control Center, ADCC)、事件順序(Sequence of Event, SOE)、電力變壓器(Transformer, TR)、保護電驛(Relay)。

壹、前言

隨著工商業之發展，電力需求遽增，除了有充足的供電裕度外，對於供電品質及穩定也是

日趨嚴謹，特別是科技產業，常因不預警停電造成重大影響，其損失更是難以估算。在電力系統中，擔任電力供應與調配的樞紐為各類高低壓電力設備，而該電力設備主要由電力變壓器(Power Transformer, TR)、高/低壓斷路器(CB)、保護電驛

*台灣電力公司供電處

**台灣電力公司新桃供電區營運處

$$T = aV^2 + bV + c \quad (1)$$

二、收集 ADCC e 化伺服器的 SOE 訊息系統

目前供電系統各 ADCC e 化伺服器的 SOE 訊息(含 CB 投入/啟斷的時間)皆已設定每日傳送至資訊處的資料倉儲系統，詳如圖 2。

選擇日期	開始時間	結束時間	系統名稱	事件群組	相關設備
2014-03-20	07:59:48	917	松崗PS	20-3月-2014 07:59:48 917 R-1 松崗PS RTU Master By SOE CLOSE Field	
2014-03-20	07:59:46	911	松崗PS	20-3月-2014 07:59:46 911 A-1 松崗PS 1640東社自備) CB SOE OPEN Field	
2014-03-20	07:59:47	902	松崗PS	20-3月-2014 07:59:47 902 A-1 松崗PS RTU Master By SOE OPEN Field	
2014-03-20	09:37:10	213	松崗PS	20-3月-2014 09:37:10 213 R-1 松崗PS RTU Master By SOE CLOSE Field	
2014-03-20	09:37:10	244	松崗PS	20-3月-2014 09:37:10 244 A-1 松崗PS 1640東社自備) CB SOE OPEN Field	
2014-03-20	09:37:10	606	松崗PS	20-3月-2014 09:37:10 606 A-1 松崗PS RTU Master By SOE OPEN Field	
2014-03-20	10:10:06	384	松崗PS	20-3月-2014 10:10:06 384 A-1 松崗PS 1640東社自備) CB SOE CLOSE Field	
2014-03-20	10:10:31	607	松崗PS	20-3月-2014 10:10:31 607 A-1 松崗PS 1640東社自備) CB SOE OPEN Field	
2014-03-20	10:11:04	233	松崗PS	20-3月-2014 10:11:04 233 R-1 松崗PS 1640東社自備) CB SOE CLOSE Field	
2014-03-20	10:42:18	136	松崗PS	20-3月-2014 10:42:18 136 A-1 松崗PS 1640東社自備) CB SOE OPEN Field	
2014-03-20	11:52:49	369	松崗PS	20-3月-2014 11:52:49 369 A-1 松崗PS RTU Master By SOE CLOSE Field	
2014-03-20	11:52:48	606	松崗PS	20-3月-2014 11:52:48 606 A-1 松崗PS RTU Master By SOE OPEN Field	
2014-03-20	17:19:01	244	松崗PS	20-3月-2014 17:19:01 244 R-1 松崗PS RTU Master By SOE CLOSE Field	
2014-03-20	17:19:01	239	松崗PS	20-3月-2014 17:19:01 239 R-1 松崗PS RTU Master By SOE OPEN Field	
2014-03-20	17:19:01	184	松崗PS	20-3月-2014 17:19:01 184 R-1 松崗PS 1640東社自備) CB SOE CLOSE Field	
2014-03-20	17:19:01	374	松崗PS	20-3月-2014 17:19:01 374 A-1 松崗PS RTU Master By SOE OPEN Field	
2014-03-20	17:19:01	374	松崗PS	20-3月-2014 17:19:01 374 A-1 松崗PS 1640東社自備) CB SOE OPEN Field	
2014-03-20	23:11:00	413	松崗PS	20-3月-2014 23:11:00 413 R-1 松崗PS RTU Master By SOE CLOSE Field	
2014-03-20	23:11:00	430	松崗PS	20-3月-2014 23:11:00 430 R-1 松崗PS 1640東社自備) CB SOE CLOSE Field	

圖 2 資料倉儲系統之 SOE 紀錄查詢畫面

三、斷路器動作時間計算及動作時間偏差值設定

(一) 動作時間計算

$$T(\text{duration}) = T_2 - T_1$$

T(duration)：CB 動作時間

T1：RTU M/C，M/T 接點動作 SOE 時間--

即操作訊號送至 CB 的 SOE 時間

T2：CB 投入/啟斷的 SOE 時間

$$T(\text{bias}) = T(\text{duration}) - T(\text{base})$$

T(bias)：CB 動作時間之偏差值

T(base)：CB 動作時間之基準值(最近一次 CB 點檢維護所量測之動作時間資料來源--供電處「變電設備維護管理系統」資料庫)

(二) 偏差值時間設定之合理性

CB 動作歷程涵蓋電能、磁能與機械能，雖然目前尚無法以數學式精準表示出控制電壓(V)與啟斷時間(T)之關係，但經由以下方式，可以提供實務上可接受誤差範圍之計算方式。

1. 以廠試報告實測之 DC70V、DC125V、DC140V 對應之啟斷時間，共三組數據，依照公式(1)多項式找出曲線方程式：

解聯立方程式後可得 a、b、c，便可以推算出其他電壓值之啟斷時間。

採用公式(1)多項式之說明如下：

電磁閥軸心動作時間與速度成正比，速度與磁力成正比，磁力與磁通平方成正比，磁通與電壓或電流成正比，因此 T 與 V^2 有一接近正比關係。

2. 為確認誤差值是否在可接受之範圍，於現有設備(中興製 161kV 50kA GIS 液壓型)依 DC 70~140V，每間隔 5V 之方式實測，結果如表 1，取得之 T-V 曲線如圖 3，此曲線亦符合公式(1)之多項式；誤差曲線如圖 4。

3. 經由上述之驗證，CB 動作與電壓變化之關聯性，實測與計算間最大誤差約 6.5%，而較大誤差值與計算值通常出現於 100V 以下之控制電壓，而目前供電系統變電所控制電壓均控制於 120~130V 範圍內，其動作時間與計算值誤差甚小，故本文設定之誤差值於啟斷(Open)15ms 及投入(Close)50ms 認定為異常，應屬合理範圍。

表 1 每間隔 5V 之 CB 動作時間的實測值與計算值

項次	V.DC	實測值 T(ms)	計算值 T(ms)	誤差值 T(ms)	誤差%
	操作電壓	開啟時間	開啟時間	(計-實)	
1	70	47.8	47.8	-	0.0%
2	75	43.6	45.6	2.0	4.6%
3	80	41.7	43.5	1.8	4.4%
4	85	39.3	41.6	2.3	5.8%
5	90	37.4	39.7	2.3	6.2%
6	95	35.7	38.0	2.3	6.5%
7	100	34.4	36.4	2.0	5.9%
8	105	33.3	34.9	1.6	4.9%
9	110	32.4	33.6	1.2	3.6%
10	115	31.4	32.3	0.9	3.0%
11	120	30.3	31.2	0.9	3.0%
12	125	30.2	30.2	-	0.0%
13	130	29.5	29.3	-	-0.6%
14	135	28.7	28.5	-	-0.5%
15	140	27.9	27.9	-	0.0%

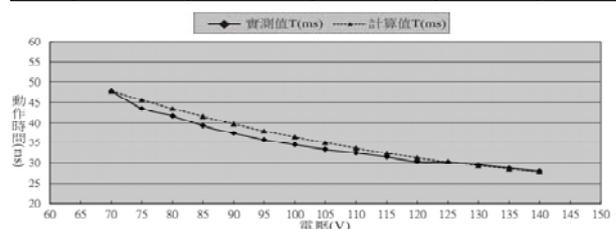


圖 3 T-V 曲線

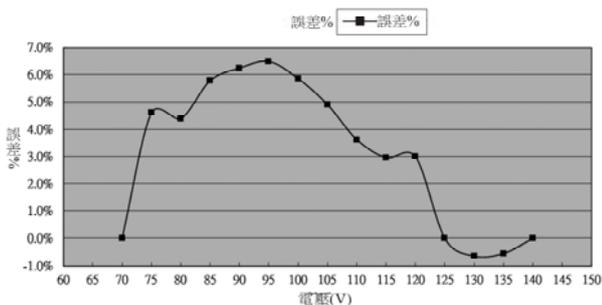


圖 4 誤差曲線(V-誤差%)

四、查詢系統

CB 動作時間線上查詢系統如圖 5；可依：時間/供電區/變電所/設備等進行篩選查詢，各欄位亦有排序的功能，另系統會自動列出偏差值超出 $\pm 50\text{ms}$ (Close)或 $\pm 15\text{ms}$ (Open)的訊息供參考。

圖 5 斷路器動作時間線上查詢系統

參、事故案例與應用實例

一、事故案例

103 年 6 月○○一次變電所(P/S)輸電線路因雷害事故引起#1510 差流(87L)及測距(21N)電驛動作，但因該 CB 電磁閥之引導閥及跳脫掛鉤緊澀延遲 505ms(正常標準 $\leq 33\text{ms}$)跳脫，導致相關輸電線路之臨近所○○E/S #1520、#1610、○○P/S #1520 及本所#1500 跳脫才隔離故障點。

103 年 9 月○○超高壓變電所(E/S)因民眾施放彩帶碰觸輸電線路導致保護電驛動作，亦因該 E/S #1310 GCB 於跳脫時發生延遲，致使該所 #1310 CB 失靈保護電驛(BF Ry)動作，造成 161kV #1 BUS 側相關 CB 全數跳脫，擴大大事故範圍。

上述兩案例，所幸電驛設定得當且後衛 CB

跳脫正確，未進一步造成更大之事故停電範圍，由此可知 CB 動作延遲之嚴重性。本斷路器動作時間線上查詢系統確可提早發現 CB 動作異常現象並加以處理，有效杜絕上述案例再發，對於本系統貢獻良多。

二、應用實例

經本處初步調查彙整 103 年 12 月份各供電區營運處利用「斷路器動作時間線上查詢系統」診斷發現 CB 延遲跳脫之異狀並有效處理之案例已有 21 例，本文僅列舉 2 例分述如下：松樹 P/S #1580 延遲跳脫時間--處理前：131ms、處理後：37ms 動作紀錄詳表 2 及#1590 延遲跳脫時間--處理前：565ms、處理後：36ms 動作紀錄詳表 3。經查以上案例均因跳脫機構異常所造成。

雖目前國際上亦有許多儀器公司針對 CB 第一次動作時間特別開發量測儀器，例如○○公司出品之 PROFILE P3(如圖 6)，係利用 CT 感應原理測出主回路啟閉時間，對分析 CB 第一次動作時間是一大利器，其量測結果除動作時間外，更包含動作線圈曲線、主回路動作曲線等，對於分析可更加精準，但所費不貲，每具將近 40 萬元，若以供電系統 69kV 以上電壓等級 CB 4,763 具全部裝設，則約需 19 億元，而本文所提之「斷路器動作時間線上查詢系統」，6 個供電區營運處建置成本不到 10 萬元。該系統雖是簡易型式，但於裝設完成後已成功發掘 21 起異常現象，並適時安排停電處理，已達預防性防止因跳脫延遲所造成之事故。

表 2 松樹 P/S #1580 動作紀錄

日期/時間	單位	變電所/設備	設備型號	設備類別	OPEN/CLOSE	動作時間(ms)	標準值(ms)	偏差值(ms)
2014/12/17 15:48:12.158	新桃區	松樹P/S	1580	GCB	CLOSE	131	125.1	5.9
2014/12/17 15:47:15.019	新桃區	松樹P/S	1580	GCB	OPEN	37	28.3	8.7
2014/12/17 15:47:06.298	新桃區	松樹P/S	1580	GCB	CLOSE	131	125.1	5.9
2014/12/17 08:24:03.044	新桃區	松樹P/S	1580	GCB	OPEN	131	28.3	102.7

表 3 松樹 P/S #1590 動作紀錄

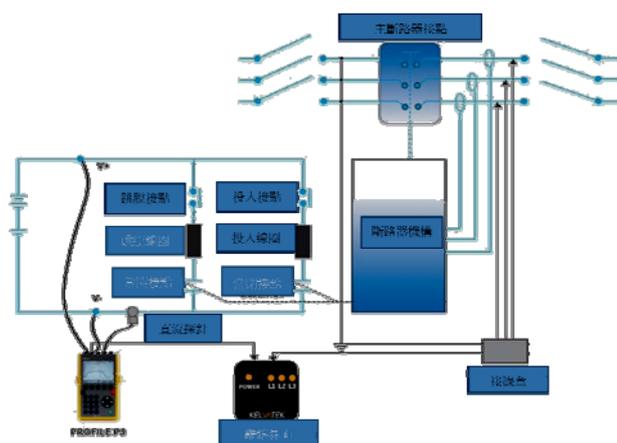
日期/時間	單位	變電所/設備	設備型號	設備類別	OPEN/CLOSE	動作時間(ms)	標準值(ms)	偏差值(ms)
2014/12/16 18:09:02.236	新桃區	松樹P/S	1590	GCB	CLOSE	150	139	11
2014/12/16 18:04:21.272	新桃區	松樹P/S	1590	GCB	OPEN	36	32.2	3.8
2014/12/16 18:04:13.222	新桃區	松樹P/S	1590	GCB	CLOSE	154	139	15
2014/12/16 08:44:36.795	新桃區	松樹P/S	1590	GCB	OPEN	565	32.2	532.8

肆、結論

量測 CB 的動作時間是研判 CB 操作機構是否有潛在弱點的重要指標，目前 CB 均採時間週期性維護(Time Based Maintenance, TBM)，需等定期的停電作業才會進行動作時間之量測(間隔至少 3 年)，而且動作時間會因停電操作後隱藏了潤滑油老化及操作機構異常等現象，導致停電點檢時無法發現該弱點及錯失改善機會，等停電點檢一段時間後該弱點就又顯現，致使無法達到預知維護的功效。而本系統利用每次停電操作機會即記錄 CB 動作時間。換言之，這 3 年期間若 CB 操作機構有潛在問題(如潤滑油脂發生變質導致枯澀)發生時，可及早發現，並適時安排停電處理。

CB 操作機構若發生枯澀將使 CB 延遲跳脫，以致無法完成快速啟斷故障電流的重要任務，導致事故影響的範圍擴大，並造成大區域用戶的停電損失。

「斷路器動作時間線上查詢系統」的建置是電力自動化資訊 e 化的再應用，也是變電設備從時間週期性維護策略(TBM)邁向狀態基準維護策略(Condition Based Maintenance, CBM)的精進作為，可提供資產管理及風險管控之決策參考，並進一步提升供電品質，更重要的是能提升變電設備維護人員的工作效率及士氣。



(圖片來自：<http://www.camlinpower.com/profile.php>)

圖 6 PROFILE P3

目前發現 CB 延遲跳脫的原因大多為跳脫鉤(圖 7)及電磁閥(圖 8)等機構枯澀所導致，最嚴重的延遲跳脫時間高達 565ms(正常標準 ≤ 33 ms)，經過適當的清潔及潤滑處理後皆已將異狀排除。試想，若該線路發生故障而 CB 等 565ms 後再跳脫，可能衍生多嚴重之事情，故本套系統對於 CB 診斷有無限之貢獻，避免了多起潛在的用戶停電損失及公司形象影響。



圖 7 GCB 跳脫機構



圖 8 氣動式 GCB 電磁閥分解圖示

輸電級地下電纜線路部分放電遠端診斷系統

On-line Remote Monitoring and Diagnosis System for Underground Transmission Cables

陳建富*	戴政祺*	王瑋民**	
Chen, Chien-Fuh	Tai, Cheng-Chi	Wang, Wei-Min	
邱敏彥***	鄭強****	蕭裕倉*****	
Chiu, Min-Yen	Cheng, Chiang	Hsiao, Yu-Tsang	
王嘉斌*	林典立*	江佩蓉*	許家銘*
Wang, Chia-Pin	Lin, Tien-Li	Chiang, Pei-Jung	Syu, Jia-Ming

摘要

基於安全與電力品質等因素考量，近年來地下輸電系統的比率及負載日益升高，使得地下電纜事故逐漸成為影響電力品質及供電可靠度的重要因素。本計畫主要在開發台電公司輸電級電纜線路之絕緣檢測診斷預警維護系統，同時配合推行智慧型電網之策略目標，依輸電級電纜系統之 EBG、EBA、EBO 終端匣、NJ、IJ 接續匣及被覆導體之交錯連接及單端接地等組成結構，及電纜系統可能存在的絕緣缺陷類型，探討輸電級電纜系統之部分放電線上檢測方法及其關鍵性核心技術。

Abstract

Considering safety and power quality, the Taiwan Power Company has widely adopted underground-type transmission system in recent years. Damages occurring in underground cables gradually affect the quality and reliability of power supply. In this study, an on-line remote monitoring and diagnosis system for underground transmission cables is developed. In the meantime, in order to implement the strategy targets of smart power grid, this study further explores the detection methods and core technology of partial discharge for underground transmission cables to improve the detection performance according to the structure composed of cable sealing ends of EBG, EBA and EBO types, the joints of NI, NJ types, cross bonding of cable sheaths and possible insulation defects.

關鍵詞(Key Words)：部分放電(Partial Discharge)、地下電纜(Underground Power Cable)、遠端診斷系統(Remote Diagnosis System)、絕緣接續匣(Insulation Joint)、電纜被覆保護裝置(Cable Covering Protective Unit, CCPU)、終端匣(Sealing End)。

壹、前言

隨著台灣經濟發展與工商業的持續成長

下，市區範圍日趨擴大，各地新興都會區也陸續完成開發，為提高供電可靠度與顧及市容美觀，近年來台電位於都會區之輸、配電系統逐漸朝地下化設計，因而輸電地下電纜日漸增多。但地下

*國立成功大學電機系

**私立崑山科技大學電機系

***震江機電技術顧問股份有限公司

****台灣電力公司綜合研究所

*****中興工程顧問股份有限公司

電纜無法如同架空線路巡檢等點檢巡視，由外部瞭解目前線路的供電狀況是否有潛在的問題，若發生故障將造成無法預期停電的損失，因此地下電纜線路之先期診斷，是未來輸電發展上備受矚目的焦點。

目前電纜系統採行之竣工耐壓機制，能夠適時反應接續匣施工瑕疵之嚴重性，對提升附屬器材施工品質有所助益。本計畫為進一步提昇電纜系統運轉可靠性，研究電纜系統之電纜本體、接續匣、終端匣等器材之部分放電絕緣診斷技術，防範事故發生。

貳、電纜部分放電檢測技術

一、國際間之檢測技術

目前國際間有關電力電纜的檢測大致可分成電氣試驗及非電氣試驗，如圖 1 所示，在眾多的試驗方式中，由於電力電纜部分放電量與電力電纜絕緣狀況關係密切，且部分放電量的變化表示電纜絕緣一定存在著可能危及電纜安全運行及壽命的缺陷^[2,3]。

國際間目前對電纜部分放電檢測方法如

下：日本主要採用電容式感測器、德國柏林採用方向性耦合感測器、挪威 SINTEF Energy Research 結合電容式與方向性感測器^[4]。但那一種的檢測技術較適當，目前沒有定論。文獻指出差分法、方向耦合法和電磁耦合法等三種方法已經成功應用於現場檢測^[4]。

二、各類感測器比較

表 1 將 UHF、VHF 與 HF 三種感測器，根據其特性與優缺點做一分析比較。國際標準 IEC 62478^[1]雖已彙整目前市面上主要的非傳統檢測法的相關說明，但並無公認的指導方針與規定，此說明何種設備適用何種檢測法，僅能透過現場檢測人員，依據經驗法則與檢測實務技巧，才能在各檢測目標內，擬出有效的檢測方式並進一步提高精準度。

本計畫對於輸電級電纜交錯接續區段中 II、NJ 接續匣，採用 UHF 與 HFCT 感測器，貼附或環扣於接地線上之檢測模式，測得訊號藉以分析。

感測器之訊號傳播的有效檢測距離，會依據各廠家設計方式、靈敏度、元件特性與現場環境不同而有所差異。

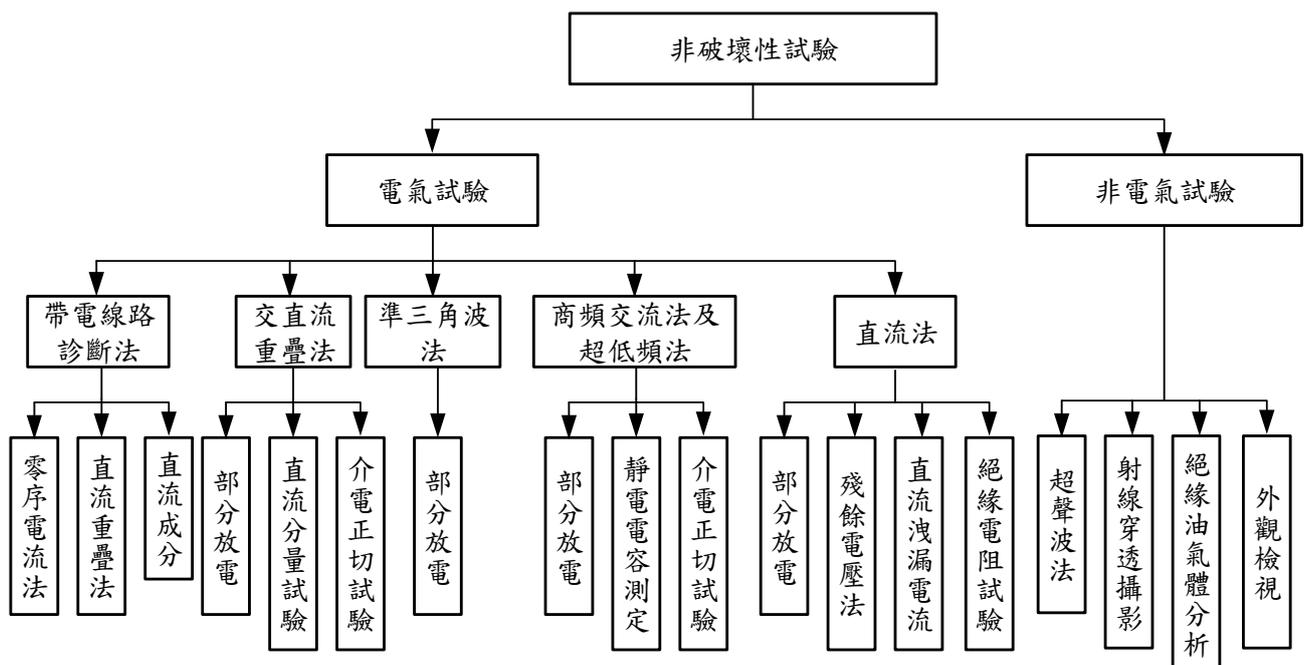


圖 1 國際間電力電纜檢測的方式^[2,3]

表 1 感測器適用性及優缺點

比較 檢測方式	UHF	VHF		HF
		電磁耦合	電場耦合 (金屬箔極)	
檢測原理	放電時之超高頻無線電訊號	利用放電脈衝電流產生之磁力線	利用放電脈衝電流產生暫態電壓變化	放電時之電氣脈衝電流
檢測頻率	30 M~3 GHz	1 M~300 MHz		50 k~50 MHz
量測優點	屬電氣特性檢測方式，可避開低頻之背景雜訊，較適合戶外型設備使用。	1. 接於接地線上，適用於線上監測。 2. 訊號衰減較 UHF 小。 3. 偵測範圍較 UHF 廣。	1. 放電方向性易掌握。 2. 訊號衰減較 UHF 小。 3. 偵測範圍較 UHF 廣。	現場量測可偵測範圍較左列二者廣。
量測缺點	1. 偵測範圍較窄 2. 只可定性不可定量	測試危險性高		1. 指向性差 2. 易接收到低頻雜訊
靈敏度	<10 pC	10 pC		10 pC

三、訊號處理

(一) 小波轉換法

小波轉換是空間與頻率的局部轉換，因此適合應用於非穩態信號的分析(如部分放電信號)，透過伸縮與平移對信號進行多尺度細化分析，解決傅立葉轉換不能解決的許多難題。

小波轉換應用於雜訊抑制程序為：

1. 利用轉換將信號分解，如圖 2(a)產生與訊號及雜訊相關的小波係數。
2. 利用門檻移除或降低小波係數中假設為雜訊的量值。
3. 將門檻處理後的小波係數，利用小波逆轉換獲得雜訊抑制後的訊號，如圖 2(b)所示^[5]。

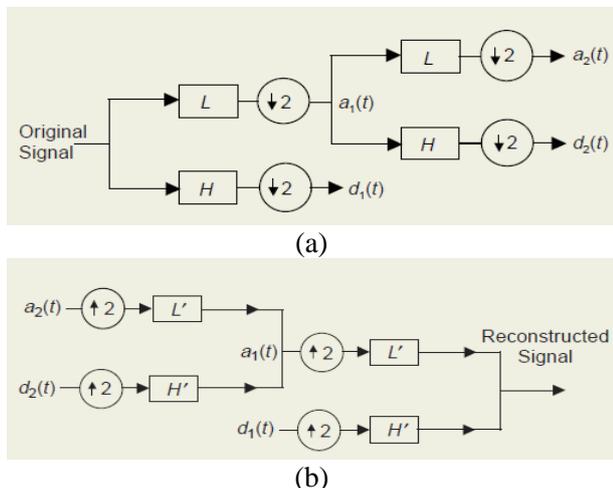


圖 2 小波轉換與逆轉換

對於下列三種電氣信號，此方法可自雜訊中成功辨識：

1. 連續正弦波形態之雜訊，例如：通訊系統。
2. 週期性脈衝雜訊，例如：由閘流體動作產生。
3. 推測雜訊，在時間及幅值呈現隨機，常與電暈、火花、機車火星塞脈衝波及檢測電路內的雜訊有關。

(二) 脈衝特徵法

脈衝特徵法透過理想的部分放電脈衝特徵參數，如：放電量值、放電間隔時間、放電值與相角關係等特徵參數，將雜訊抑制達到辨識的目的。

理想部分放電脈衝波形如圖 3 所示，其相關參數定義如下^[6]：

1. 脈衝上升時間(Pulse rise time) t_r ：由峰值的 10% 上升至 90% 所需的時間；
2. 脈衝下降時間(Pulse decay time) t_d ：由峰值的 90% 下降至 10% 所需的時間；
3. 脈衝寬度(Pulse width) t_w ：在峰值兩邊的 50% 所間隔的時間；
4. 脈衝下面積(Area under pulse)：在上升與下降段 10% 幅值的時間間距下 q-t 曲線所包含的面積；

應用脈衝特徵法分析是假設僅有一種部分放電現象(一種放電源)，然而現場實

際量測，可能會同時超過一種以上的放電源(多重瑕疵或電極雜訊)，一般此法必須搭配其他法則共同使用。

(三) 3D 圖譜辨識法

3D 圖譜分析是由相位角(φ)、電量值(V)和重複次數(N)所構成的立體空間座標判別部分放電特徵，相關參數說明如下：

1. 相位角(φ)為訊號發生時的相位角，與時間的關係為

$$\varphi_i = 360 \left(\frac{t_i}{T} \right) \quad (1)$$

其中

- φ_i ：相位角，以角度表示
- t_i ：從零到出現瑕疵訊號的時間
- T：供給電壓的週期

2. 電壓值(V)

定義為當瑕疵訊號產生時，其波形超過所設定門檻值的脈衝電壓，再經過絕對值後的電壓值。

3. 重複次數(N)

為在同相位重複發生的次數，當發生的重複次數愈多，代表為此訊號所分佈的特徵位置，如果重複次數高且電壓高的話，為須注意線段。

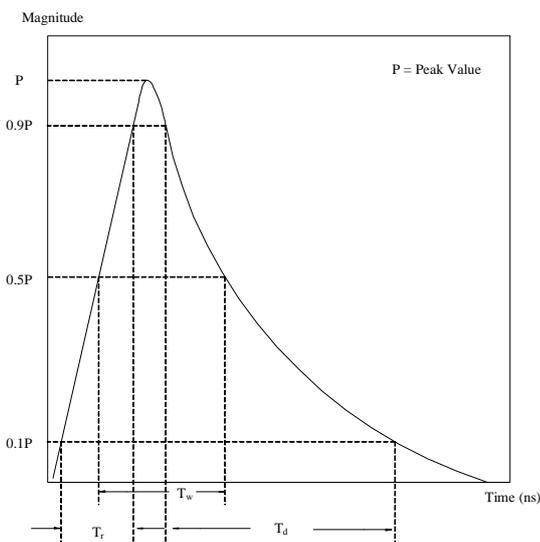


圖 3 理想部分放電脈衝特徵

參、部分放電檢測系統

為建置輸電級電纜線路之絕緣檢測診斷預警維護系統，配合台電推行智慧型電網之策略目標，建立輸電級電纜系統部分放電訊號分析軟體技術，並提出地下線路部分放電遠端監視與預警診斷系統資料庫所需規格，作為日後擴展智慧型電網基礎建設之一。

一、系統演算架構

系統架構主要分為四個部分，如圖 4 及圖 5 所示包含：

(一) 量測單元：

放電訊號由感測器接收，經類比放大電路濾波、放大，將輸入信號調整在適當電壓增益範圍後，傳遞至後端；

(二) 處理單元：

透過 ADC 與 ZC702(FPGA)做訊號處理，由 ARM 透過網路將資料傳輸至後端 PC；

(三) 傳輸/介面：

使用 LabVIEW 程式以演算法一(Algorithm1)辨識放電脈衝信號，再將取得之資料透過控制演算法二(Algorithm2)處理後送至後端。

(四) 監控電腦：

匯集成長時間之放電變化趨勢圖。

圖 5 中 PC Program 方塊內之 Algorithm1 (演算法一)，使用「小波轉換法」，將輸入訊號過濾大部分外部雜訊後，再利用「脈衝特徵法」辨識放電訊號波形，如此可節省大量的儲存空間，加速資料處理速度。

PC Program 方塊內之 Algorithm 2(演算法二)(資料統計趨勢分析)，根據前端演算法一所獲得之資料，統計固定時段累計之放電量，透過分群演算法記錄長時間的放電訊號趨勢。

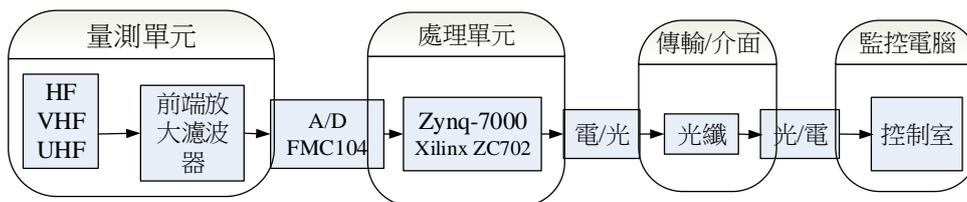


圖 4 系統演算架構

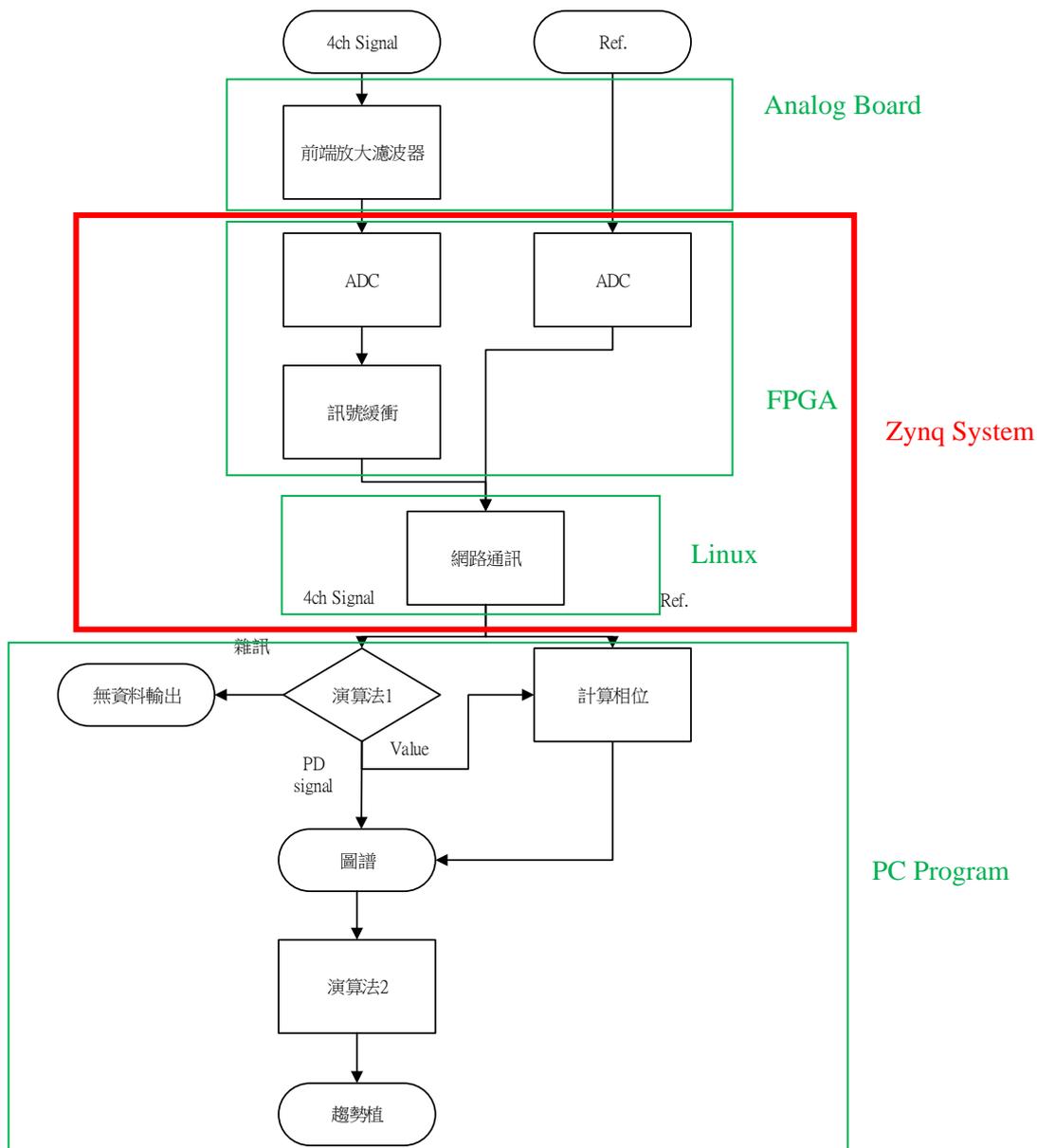


圖 5 系統演算架構流程圖

二、系統硬體架構

如圖 6 所示，本計畫之主系統採用搭配 Zynq-7000 晶片的 Xilinx ZC702 開發板，高速

ADC 採用 4DSP 的 FMC104 4ch 250 MHz/s 取樣率，前端類比放大電路則自行設計。

(一) 量測單元

1. HFCT 感測器

如圖 7 所示，部分放電產生時，電力電纜的接地線會有部份放電的脈波電流流動，HFCT 可從接地線感應此脈波電流，此電流信號頻率分佈很高，約在數 MHz 至數十 MHz 之間，所以可利用設計完善的濾波器及處理與電腦軟體濾

波處理，偵測電力電纜局部放電的脈波電流信號。

本計畫使用自製 HFCT 感測器量測放電訊號，外觀與現場量測如下圖 8 所示，圖 9 為其特性曲線圖。

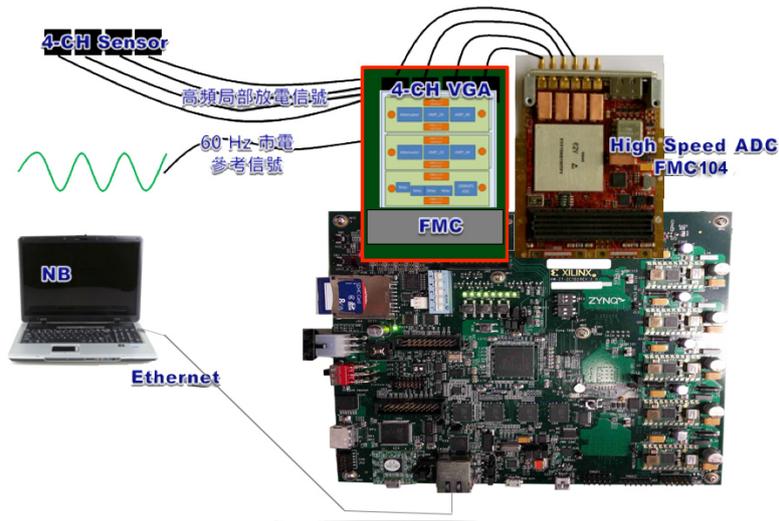
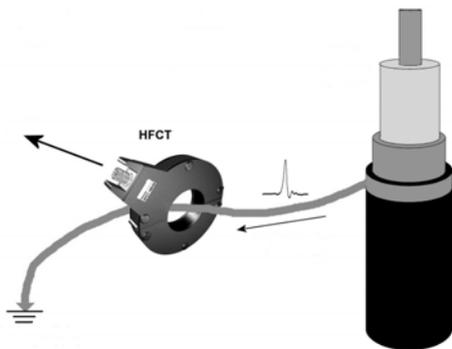


圖 6 系統硬體架構



(a) 使用示意圖



(b) 現場量測

圖 7 以 HFCT 量測電力電纜局部放電



(a) 自製 HFCT 外觀



(b) 現場量測

圖 8 自製 HFCT 外觀與現場量測

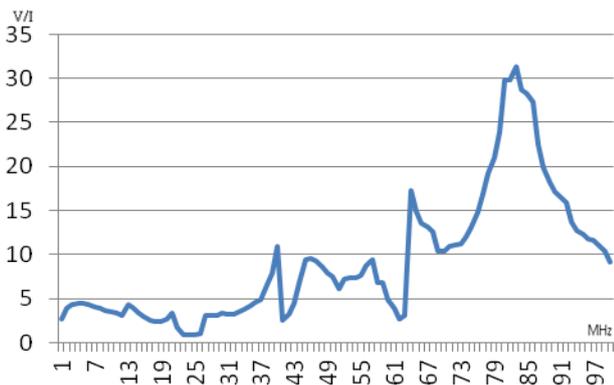


圖 9 自製 HFCT 特性曲線圖

2. 類比放大電路

利用 FPGA 控制自行研發設計之高頻數位前端硬體電路板，如圖 10 所示，可將輸入之外部訊號調整在適當的電壓增益範圍之內。此高頻前端硬體電路板又分為部放電訊號控制硬體電路板與參考訊號控制硬體電路板，分別對部放電訊號與參考訊號之訊號進行電壓準位之控制。

PD 輸入類比電路前端設計為 0 ~ -31dB 的衰減器，然後再經由兩段 0 ~ 20dB 及 0 ~ 40dB 的放大電路組成，控制由 GPIO(General Purpose I/O，通用型之輸入輸出)控制。

利用外部供電並搭配不同輸入電壓準位之訊號控制放大或衰減倍率，使用不同數值查表的排列組合，可達到-31dB ~ +60dB 的可調增益，並擁有 1dB step 的解析度。

3. 參考訊號控制電路

參考訊號控制電路外觀如圖 11 所示，參考電壓輸入設計為-60 dB、-40 dB、-20 dB 以及 0 dB 等 4 段，再由 1 個低速 200k/s ADC 取樣參考電壓。

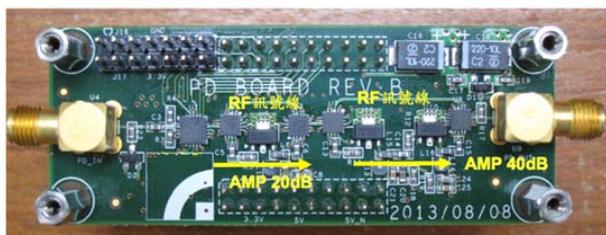


圖 10 類比放大電路外觀圖



圖 11 參考訊號控制電路外觀

(二) 處理單元

1. ADC_FMC104

FMC104 是一個四通道 ADC FMC(FPGA 夾層卡)，外觀如圖 12 所示，它提供四個 14 位 250 MSPS 的 A / D 通道，此通道可由內部 clock(可選定到一個外部參考)或是外部提供的取樣 clock。觸發輸入可自行定義採樣控制。FMC104 具有 LPC(Low-Pin Count)160 針連接器，前端面板 I/O，並具散熱功能。FMC104 另一個重要的特色是由單一 clock 頻率支援多個 FMC 電路板的能力。該設計基於 TI 的 ADS62P49 雙通道，14 位，250 MSPS ADC，具有可編程的 DDR LVDS 或並行 CMOS (LVCMOS)輸出，架構圖如圖 13 所示。

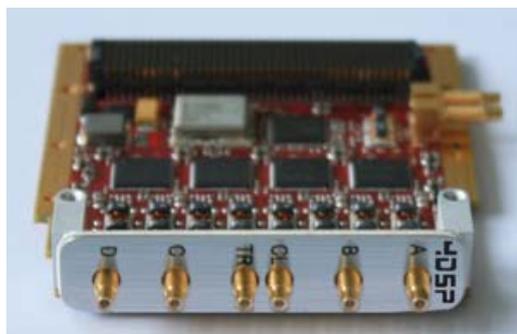


圖 12 FMC104 外觀圖

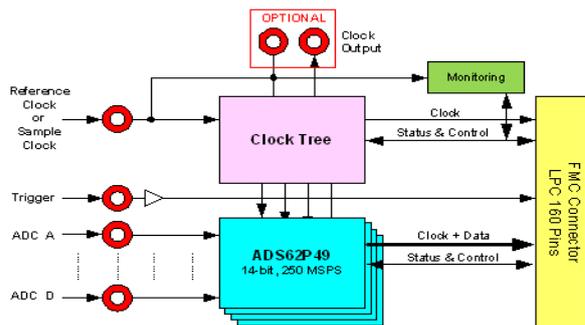


圖 13 FMC104 架構圖

2. ZYNQ-7000 ZC702

ZC702 外觀如圖 14 所示,包括 XC7Z020 -CLG484-1 AP 的 SoC 電源 12V, DDR3 元件內存 1GB, 支持 32 個數據寬度, 通信及網路為千兆乙太網 GMII、RGMII 和 SGMII, USBOTG 1(PS)主機的 USB, IIC 總線接頭/集線器(PS), 擴充之連接器為 FMC # 1-LPC/FMC # 2-LPC 連接 (0 GTX 收發器, 68 單端或差分 34 用戶定義的信號)、IIC 集線器/擴展器。

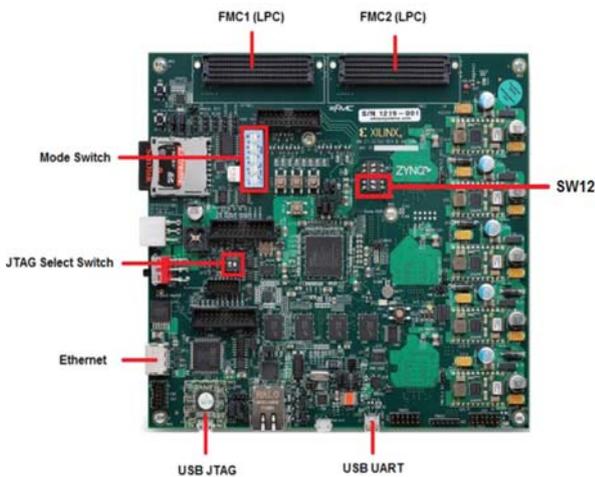


Figure 49: ZC702 development board

圖 14 ZC702 外觀圖

肆、人機介面

本系統之人機介面使用流程如圖 15 所示, 監控系統於登入畫面鍵入帳號、密碼後, 選擇以「觀看者」或「分析者」身份, 進入「即時監控」或「功能選擇」畫面, 即時監控主要能觀察目前檢測之「即時波形圖」與「趨勢圖」;「功能選擇」主要針對欲觀察之即時波形執行演算法分析, 並觀察其波形特徵, 如圖 16 至圖 19 所示。

即時監控畫面內有「即時波形圖」與「趨勢圖」可點選, 如圖 18 所示, 於即時波形圖左上方輸入時間設定, 隨即呈現原始測量波形與濾波後波形, 系統每 300 秒取一次資料, 可觀察各通道於當時的原始波形, 為了提高系統抗雜訊能力, 增加濾波功能, 濾波採用小波濾雜訊法, 而系統會以當時最高的電壓(mV)顯示, 可隨時掌握

最大電壓大小。

系統會紀錄 R、S、T 三相最大電壓與平均電壓, 量測結束後隨即產出報表, 如圖 19 所示, 報表內容包括: 時間、三相最大電壓、三相最大電壓發生相位、三相平均電壓。

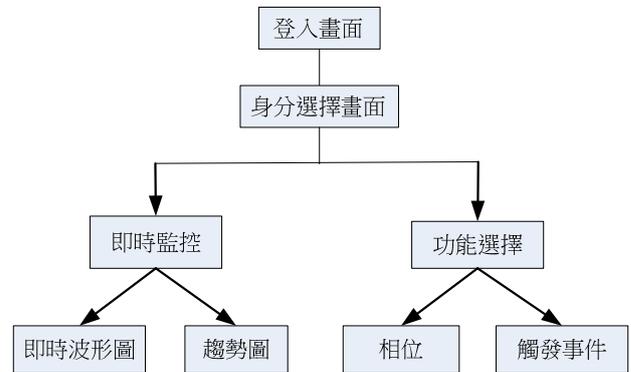


圖 15 使用流程圖



圖 16 登入畫面



圖 17 身分選擇畫面

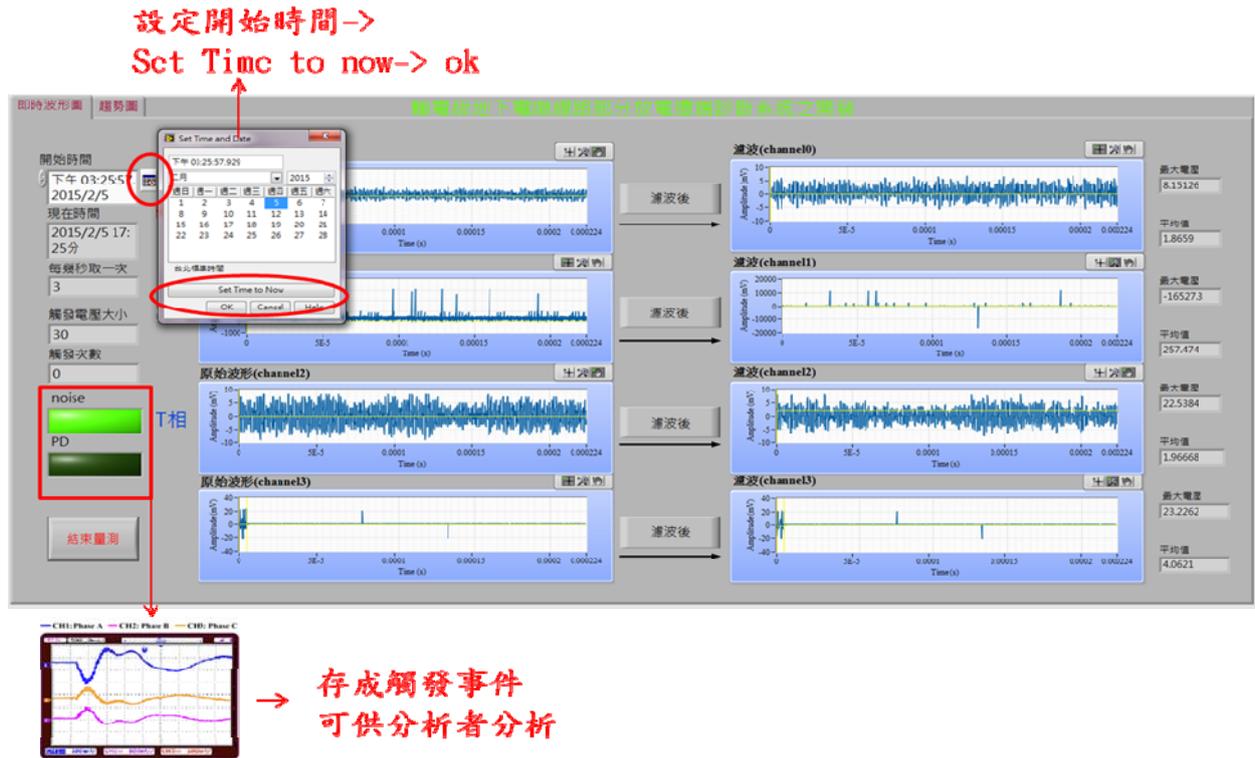


圖 18 即時波形圖畫面

	A	B	C	D	E	F	G
1	時間	R相位	R電壓	S相位	S電壓	T相位	T電壓
2	2015/1/15 16:40分	310	9	288	3197	203	6
3	2015/1/15 16:45分	312	8	285	3162	283	6
4	2015/1/15 16:50分	316	8	303	3206	158	8
5	2015/1/15 16:55分	215	9	189	3144	60	8
6	2015/1/15 17:0分	73	8	172	3082	14	7
7	2015/1/15 17:5分	328	8	308	3162	149	8
8	2015/1/15 17:10分	356	9	92	12145	112	-9
9	2015/1/15 17:15分	317	8	54	3135	182	7
10	R平均電壓	R最大電壓	S平均電壓	S最大電壓	T平均電壓	T最大電壓	
11		8	9	4279	12145	5	-9

圖 19 輸出報表畫面

如圖 20 所示，趨勢圖代表的是一個電壓變化趨勢的概念，X 軸為時間(5 分鐘)，Y 軸為電壓變化量(mV)，為避免長時間監測下，系統誤判造成假警報，因此利用脈衝特徵法，取五分鐘內的平均放電量，執行二次微分後的值，製成趨勢圖，監控期間內，若電壓趨勢逐漸增長，警示燈號便自動亮起，紅燈(危險)、黃燈(警告)、綠燈(安全)燈號，如此便可減少因突波所造成的干擾，進而減少系統誤判。

相位圖內可顯示 R、S、T 三相之相位圖與 3D 圖譜，如圖 21 所示，分析者可於左上方鍵入

異常波形發生時間(月、日、時分)，即可得知當時三相資訊；另外，鍵入欲觀察之相位，便可於畫面右下方顯示 3D 圖譜，藉此辨識分析。

如圖 22 所示，觸發事件為即時監控系統中，若被判斷某波形為部分放電時，系統會自動記錄當下時間與波形，並於觸發事件畫面左上方，輸入時間(月、日)並按 OK 後，系統於左列顯示當時所有觸發事件之時間點，使用者可擇一取得其原始波形、濾波波形及脈衝特徵相關資料，透過特徵參數判斷分析。

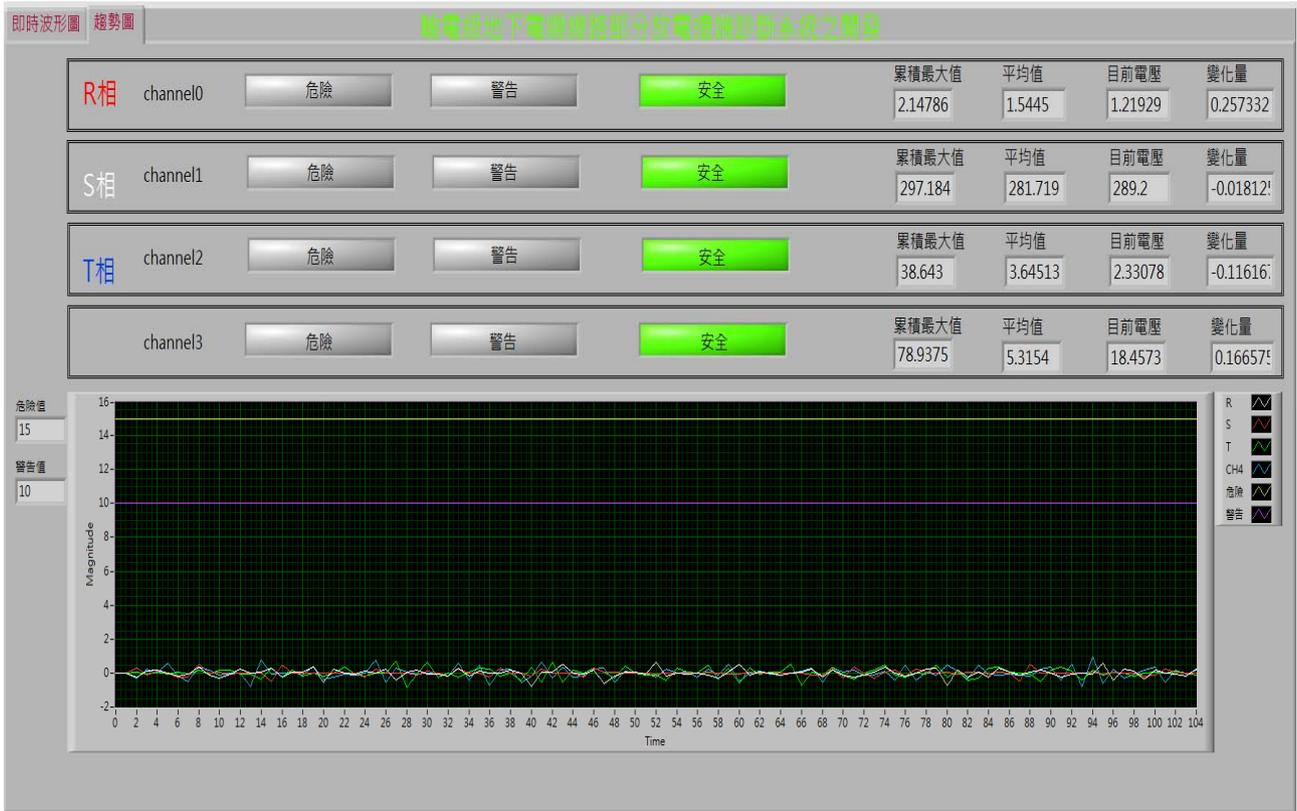


圖 20 趨勢圖畫面

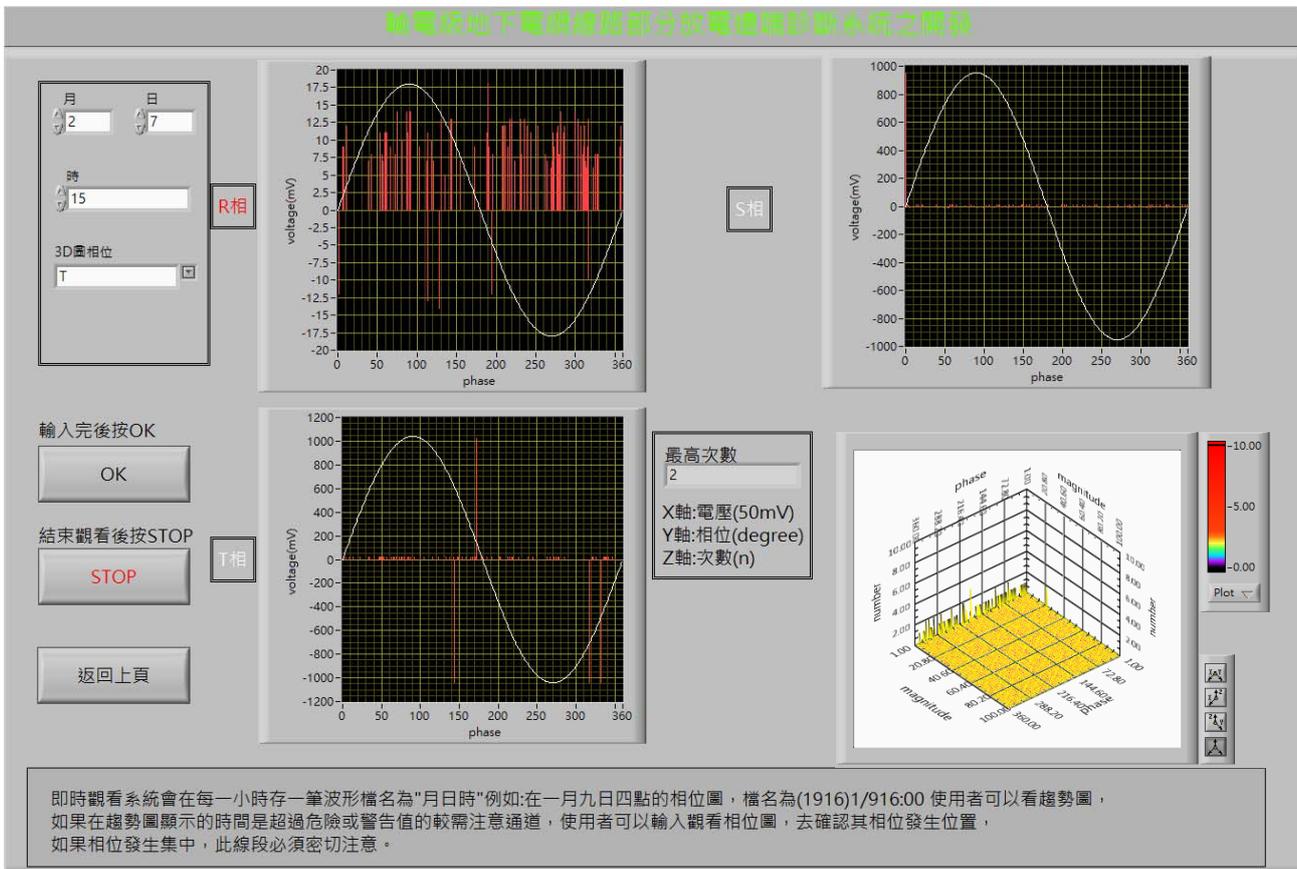


圖 21 相位圖畫面

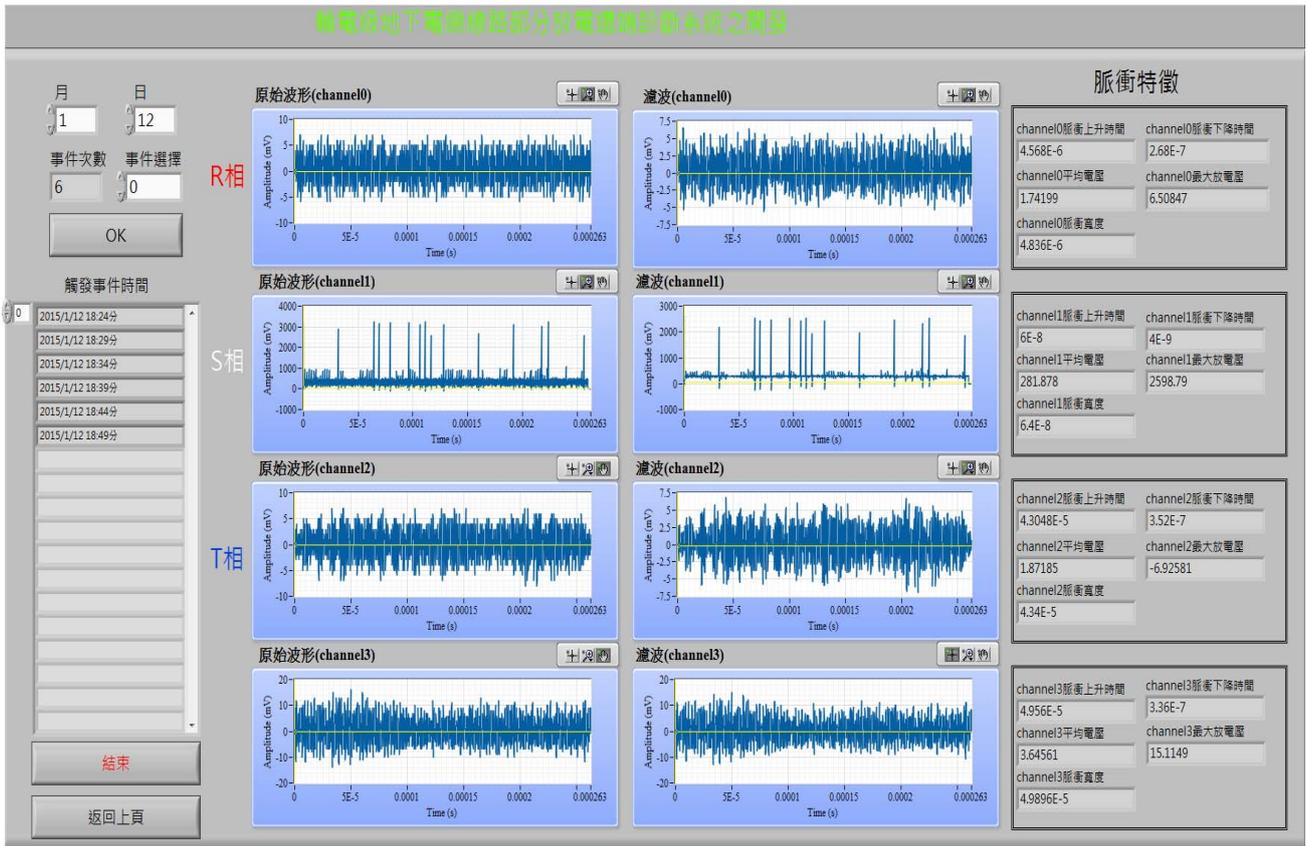


圖 22 觸發事件畫面

伍、系統測試

一、實驗室測試

利用訊號校正器(LDIC LDC-5)手動隨機切換四種不同 pC 值，提供本系統訊號來源，透過 HFCT 接收的訊號，如圖 23 所示，經由前端放大器與 FMC104，將訊號傳遞至前置處理單元(ZC702)，接著把類比資料轉為數位訊號後，藉由網路傳達至後端電腦顯示結果，系統架構如圖 24 所示，其電腦端接收之訊號如圖 25 所示。



圖 23 訊號輸入



圖 24 系統架構

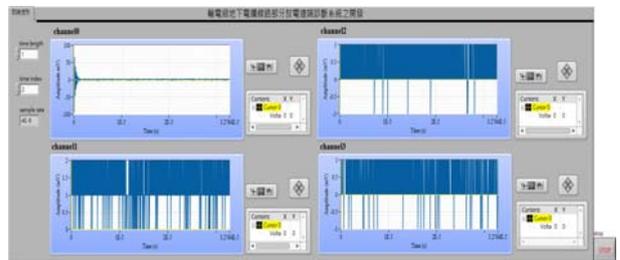


圖 25 測試之即時監控畫面

二、本系統與商用系統比對測試

為驗證本系統量測應用上的正確性，遂與合作研究廠商震江電機之商用量測儀器(LDS-6 PD Measure System)做比對試驗，待測物為一故障比

流器(自委託客戶工廠運回, 故障種類不明), 規格與外觀如表 2 與圖 26 所示, 測試系統架構如圖 27, 分別以 14 kV 與 11 kV 加壓至比流器, 同時使用本系統與商用系統做圖譜比較。

表 2 待測比流器規格表

TYPE	WIDTH mm	MAX.INSUL. kV	MAX. IMPULSE kV	HEIGHT OF PRIMARY TERMINALS	MAX. PRIMARY A	NUMBER OF CORES
SW45	178	24	125	250	1250	1 or 2

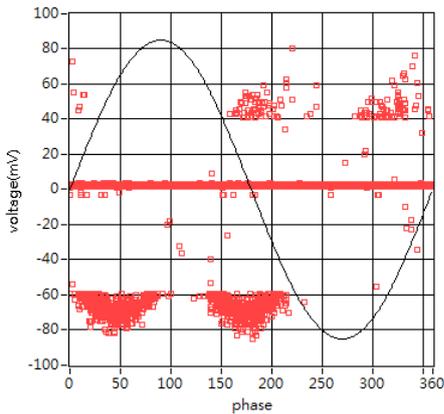


圖 26 待測比流器外觀及銘牌

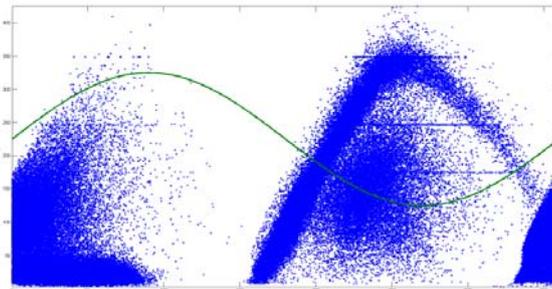


圖 27 實際測試系統圖

圖 28 與圖 29 分別為加壓 14 kV 與加壓 11 kV 圖譜, 圖 28(a) 與圖 29(a) 由本系統測得, 圖 28(b) 與圖 29(b) 為商用系統(LDS-6 PD Measure System) 測得, 本開發系統圖譜因數值未取絕對值, 因此顯示負半周的打點群聚, 若將負半周對應至正半周, 可觀察兩系統打點群聚於 I、III、IV 象限(商用系統取樣率高, 故群聚點較密集), 驗證本系統可達到商業系統應用上之目的。

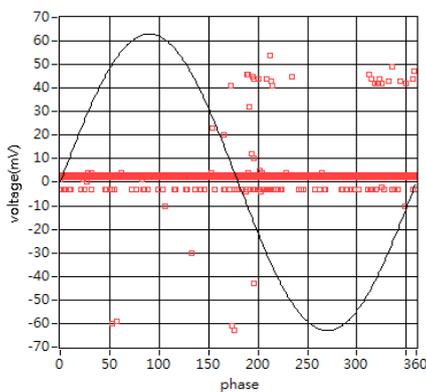


(a) 本系統

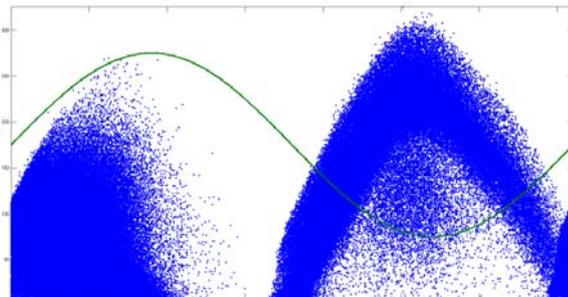


(b) 商用系統

圖 28 加壓 14 kV 圖譜



(a) 本系統



(b) 商用系統

圖 29 加壓 11 kV

三、仁德變電所測試

此次檢測將本系統於 104 年 2 月份架設於仁德變電所 GIS 室，如圖 30 所示，藉由監測仁德變電所之仁德—二甲紅線(此線路 103 年 11 月 17 日於 M21 人孔 S 相發生接續匣故障)，驗證本計畫開發之部分放電診斷系統雛型之適用性與運作效能，後續將針對現場檢測所發現之軟、硬體

缺失，建置更完善之診斷試驗系統。圖 31 以及圖 32 為各時段量測之 R、S、T 三相趨勢圖，X 軸為時間(5 分鐘)，Y 軸為電壓變化量，設定 50 以上為危險，30 以上為警告值，當電壓變化量超過設定值，警示燈將亮起。此設定值需依照不同環境背景而調整，而當此警示燈號亮起時，則代表目標物可能有問題，此時可以至觸發事件畫面作進一步的確認。

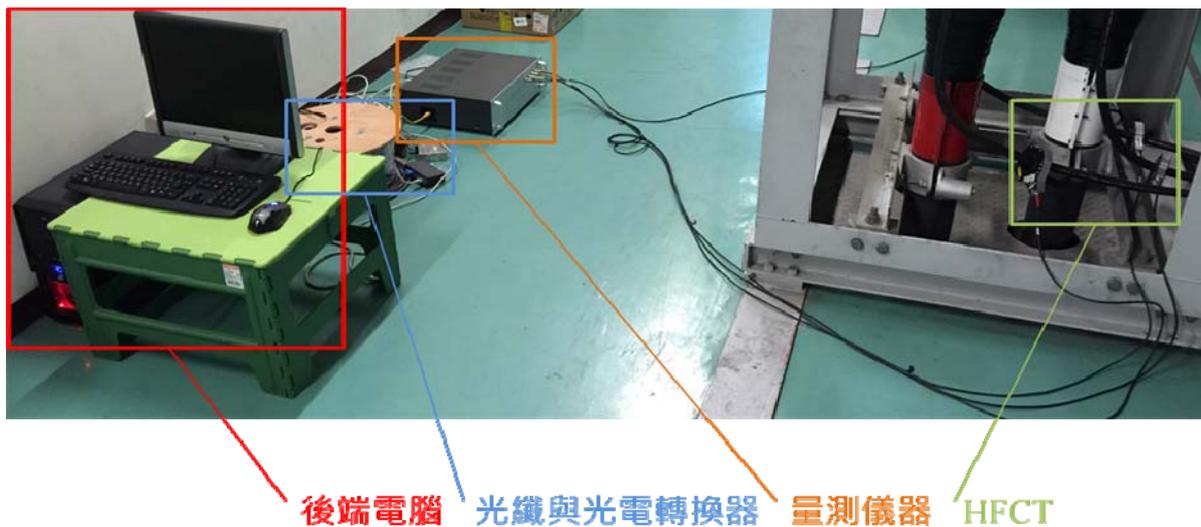


圖 30 現場系統架設

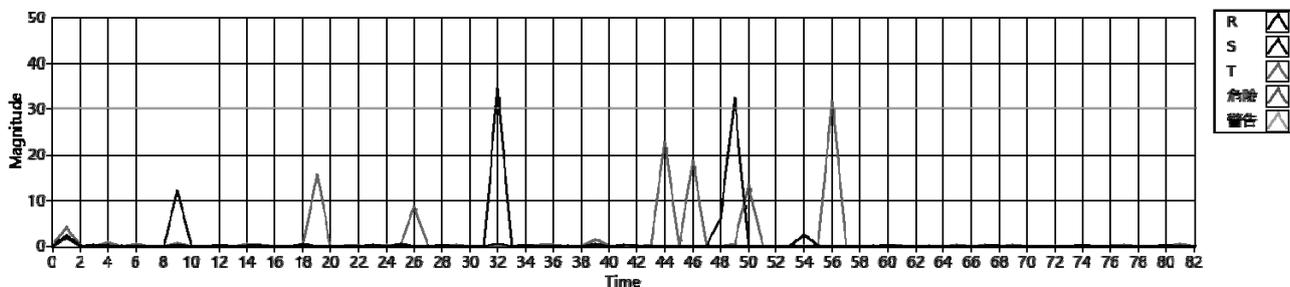


圖 31 1/16-1/17 量測趨勢圖

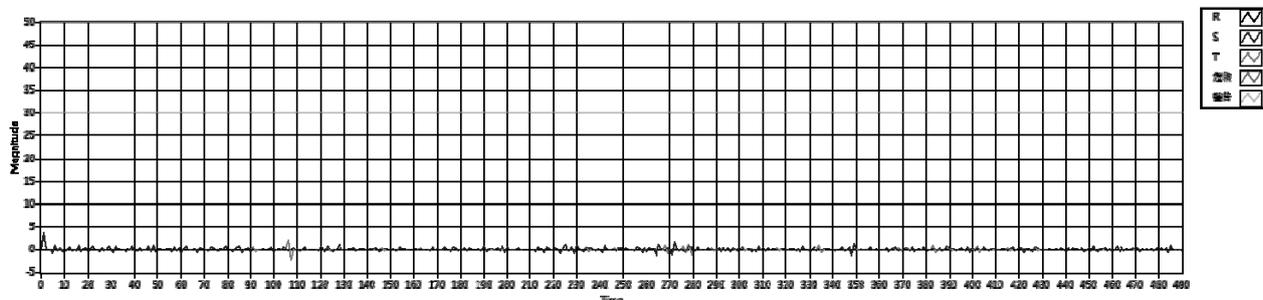


圖 32 2/7-2/9 量測趨勢圖

陸、結論

- 一、不同感測器會隨著各廠家設計方式、靈敏度、元件特性與現場環境不同，而影響其訊號傳播的有效檢測距離，其檢測頻段、適用量測物件不同。
- 二、初步系統測試結果顯示，本系統能正確擷取訊號並顯示於遠端電腦之人機介面上，而與商用儀器所得到的數據不同，是因為感測器以及表示方法略有不同而導致的。
- 三、本系統採小波演算法執行濾波功能，即時監控系統中，若診斷系統被觸發，便自動記錄當下時間與波形，可透過特徵參數進行判斷分析，另外，利用脈衝特徵法取五分鐘內(時間可人工變更設定)的平均放電量，執行二次微分後，製成趨勢圖，並透過警示燈警告使用者。

柒、參考文獻

- [1] "Measurement of Partial Discharge by Electromagnetic and Acoustic Methods," IEC 62478, 2007.
- [2] B. H. Ward, "Digital Techniques for Partial Discharge Measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 2, pp. 469-479, 1992.
- [3] 李華春,「電纜局部放電在線檢測方法的分析比較」,電力設備,第6卷第5期,第29-33頁,2005年5月。
- [4] N. C. Sahoo, M. M. A. Salam, and R. Bartnikas, "Trends in Partial Discharge Pattern Classification: A Survey," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 2, pp.248-264, April 2005.
- [5] I. Shim, J. J. Soraghan, and W. H. Siew, "Detection of PD Utilizing Digital Signal Processing Methods Part 3: Open-Loop Noise Reduction," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 17, no. 1, pp. 6-13, January/ February, 2001
- [6] "High Voltage Test Techniques-Partial Discharge Measurement," IEC 60270, 2001.

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

大環境變化主導第三核能發電廠附近海域 水文與水質化學

Hydrology and Water Chemistry around the Third Nuclear Power Plant Dominated by Large
Scale Environmental Changes

陳鎮東*
Chen, Chen-Tung

蔡顯修**
Tsai, Hsien-Shiow

林武煌**
Lin, Wu-Huang

王冰潔*
Wang, Bing-Jye

雷漢杰*
Lui, Hon-Kit

(102~103 年度研究計畫論文)

摘要

南灣的第三核能發電廠有兩部發電機組，分別於民國 73 年 7 月與 74 年 5 月進行商業運轉發電。為瞭解電廠運轉後，對該地區海域生態及海洋資源的影響程度，行政院原子能委員會與台灣電力股份有限公司，於 68 年 7 月開始資助中央研究院國際環境科學委員會中國委員會（環科會）進行長期調查與研究工作，目的在於瞭解第三核能發電廠附近海域，在核能發電廠開始運轉前與運轉時之生態系的平衡狀況。82 年 7 月起改委國立中山大學執行，85 年 7 月起改由台灣電力股份有限公司資助。本文使用此長時間的文獻資料，結合大尺度之海洋事件，以了解影響本海域的水文、水質因子為何。經由溫度、鹽度、pH、硝酸鹽、磷酸鹽、矽酸鹽以及葉綠素甲之統計資料，發現本海域溫度之變化與溫排水並無直接相關，主要是受天候、季節性以及大尺度海洋事件如颱風、聖嬰、反聖嬰，以及太平洋十年期振盪的影響。在太平洋十年期振盪暖期時，南灣海水性質介於南海水與西菲律賓海水之間，溫度、葉綠素甲偏低，而鹽度以及營養鹽濃度較高，但太平洋十年期振盪冷相時，南灣海水性質較偏向南海水，上述的化學參數變化則相反。多年來之資料顯示，大環境之變化乃改變南灣水文及水質之最主要因素。

Abstract

The first and the second units of the Third Nuclear Power Plant, located on the coast of Nanwan Bay on the southernmost tip of Taiwan, started commercial operation in July 1984 and May 1985 respectively. To understand influences of their operation on the marine ecosystems and resources on the coasts around the plant site, the National Scientific Committee on Problems of Environment (SCOPE) of the Academia Sinica, funded by the Atomic Energy Council and Taiwan Power Company, launched a long-term survey around the coast where the plant is situated in July 1979. The main purpose of the survey was to understand changes in the status of the marine ecological balance before and after the operation of the nuclear power units. Later in July 1993 the National Sun Yat-Sen University was appointed to continue the survey, and the survey has been solely funded by the Taiwan

*國立中山大學海洋科學系

**台灣電力公司環境保護處

Power Company since July 1996. In this study, data from the survey were adopted to investigate the factors influencing the changes in hydrology and seawater chemistry on the coasts around the plant site. Statistical results based on the seawater temperature (T), salinity (S), pH, as well as concentrations of nitrate, phosphate, silicate and chlorophyll-a showed that the discharge of thermal effluent had negligible influence on T. In contrast, T had been mainly influenced by the weather, seasonal cycles, as well as the events of El Niño, La Niña, and the Pacific Decadal Oscillation (PDO). During the PDO warm phases, the properties of seawater at Nanwan Bay were between those of the South China Sea (SCS) and West Philippines Sea seawaters, and the seawater had higher proportion of the SCS seawater during the PDO cold phases. In the PDO warm phases, seawater at Nanwan Bay had higher S and nutrient concentrations but lower T and chlorophyll-a concentration, and vice versa in the case of the cold phases. Data from the long-term survey suggested that changes in hydrology and water chemistry identified in the Nanwan Bay were dominated by large scale environmental changes.

關鍵詞(Key Words)：第三核能發電廠 (Third Nuclear Power Plant)、環境變遷 (Environment Changes)、南灣 (Nanwan Bay)、水文 (Hydrology)、水化學 (Water Chemistry)。

壹、前言

台灣電力股份有限公司為配合南部突飛猛進之經濟建設與工業開發，在台灣最南端（馬鞍山附近）興建第三核能發電廠。該廠之第1部及第2部發電機組已分別於73年5月及74年2月順利併聯發電，並於73年7月及74年5月商業運轉。由於上述兩部發電機組運轉期間，每天會由南灣汲取及排出大約一千餘萬噸冷卻用海水，使南灣海域之非生物環境遭受變化（如沿岸流之改變、海水混濁度，氯及溫度之增高等）。這些非生物因子的變化，可能使原來的生態系中的生物相（諸如基礎生產力、浮游植物及動物、魚類、底棲動物、珊瑚等）發生改變，因此對於該地區之非生物因子與生物因子有長期研究之必要。

浮游植物在最適宜的非生物條件下，利用二氧化碳及營養鹽（亞硝酸鹽、硝酸鹽、磷酸鹽及矽酸鹽等），進行光合作用而合成有機體，同時釋出溶氧。浮游植物得以繁衍生長後，為浮游動物捕獲，使得浮游動物得以繁衍生長。浮游動、植物同為底棲生物與魚蝦等海洋生物生長繁殖時

所須之食物。最後，死亡之浮游生物體、底棲生物以及魚蝦等有機體，經海水微生物等消化分解後，再次釋出為無機營養鹽及二氧化碳，並消耗溶氧，而形成一個生態循環的食物鏈。因此非生物因子是所有生態調查之最基本資料。

行政院原子能委員會與台灣電力股份有限公司，於68年7月開始委託環科會執行第三核能發電廠附近海域生態環境調查研究，82年7月改委中山大學進行調查。環科會及中山大學已分別逐年完成工作報告（蘇等，1980~1991^[1]；洪等，1992~1993^[2]；陳等，1994~2014^[3]）；第三核能發電廠運轉前之生態環境背景資料也於73年6月完成（蘇等，1984^[1]）。本文由多年來所取得之水文及營養鹽資料，探討南灣水域環境變化之主因。

根據多年來的調查研究結果顯示，第三核能發電廠附近海域水溫的變化，除了溫排水口附近測站(#24)比其他測站之平均表水溫度高約0.2~2.0 °C之外，其餘測站的水溫主要受天候、季節性及全球暖化的影響；其中全球暖化之長期趨勢易與溫排水所成之長期累積效應重疊、不容忽視。以南灣附近海域為例，1870至2007年間，

每年水溫上升約 0.006 - 0.008 °C 之間 (Jin and Wang, 2011^[4])。此外，本海域常出現湧升現象，甚至有湧至表水的情形。湧升流出現時，海域的溫度下降、鹽度升高、溶氧飽和度偏低、營養鹽升高。

貳、材料與方法

一、現場取樣

歷年來第三核能發電廠附近海域生態調查資料(蘇等, 1980~1991^[1]; 洪等, 1992~1993^[2]; 陳等, 1994~2014^[3])顯示, 溫排水對海域生態影響範圍僅局限於近岸測站。故本調查在第三核能發電廠附近海域共設立 7 個採樣站, 包括海灣內 14、16、18、20 等 4 個測站, 第三核能發電廠進水口(#22)、出水口(#24) 2 個測站, 及後壁湖漁港港口(#23)。87 年 7 月開始, 去除 14、16 站, 改設 12、21 站, 並由測站 24 往南拉出 1 條測線共 5 個測點 (含 24 及 12 站) (圖 1), 此 5 站以溫鹽深儀測定水層的海水水溫、鹽度, 以了解溫鹽的變化情形。採樣位置之定位是以 GPS (全球衛星定位系統)取得。

從民國 69 年至今, 每 3 個月進行偵測一次, 共 148 次。現場利用溫鹽深儀測量不同深度之水溫及鹽度, 並以沙奇盤 (Secchi Disk) 測量透明度。採得之水樣, 當場測量溫度、溶氧量及溶氧飽和度。另外過濾水樣 500 ml, 取得葉綠素甲樣本後, 攜回實驗室分析。

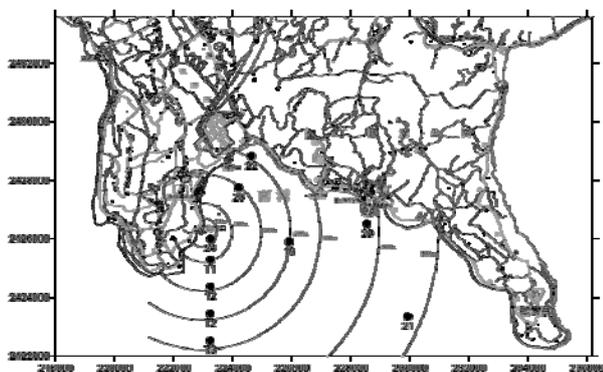


圖 1 研究區域暨採樣位置圖

二、實驗室分析

乃採用標準方法, 分析鹽度、pH、溶氧及溶氧飽和度、硝酸鹽、亞硝酸鹽、磷酸鹽、矽酸鹽、葉綠素甲、濁度、基礎生產力及總殘餘氧化劑濃度, 詳細分析方法請卓參陳等, 2014^[3]。本文將著重在溫度、鹽度、pH、硝酸鹽、磷酸鹽、矽酸鹽以及葉綠素甲等參數的分析比較。

本海域陸地上最大的溪流為石牛溪, 屬於小型溪流, 影響範圍僅侷限於近岸處。為半封閉海灣, 面臨巴士海峽, 海流的交換、季節的更替相當明顯^[5], 採樣位置雖在灣內, 但卻記錄著大環境變化的資訊, 足以利用此資料來闡釋大尺度海洋環境的變化對本海域的影響。

參、研究成果

一、溫度及鹽度

測站 24 距離溫排水口最近, 可以監測溫排水排入海洋後之溫度狀況。以 102 年 2 月監測為例, 表水的水溫 29.5°C, 較對照測站(測站 12、18、20、21)表水的平均值 26.9°C, 高了 2.6°C; 整體來看, 先扣除可能受溫排水影響的第 24 站後, 此時表水平均水溫為 26.9±0.1°C, 高於歷年同月之平均水溫 24.9±1.2 °C (P<0.01); 對比中央氣象局的南灣測站, 採樣當天的表水均溫為 27.2°C, 與本調查相近, 因此此高溫應該不是調查實驗之誤差。進一步對比 OceanColor Web 的衛星資料 (圖 2) 顯示, 發現有一較高溫的海水於採樣時期, 從菲律賓附近海域向北延伸至台灣東南海域, 其寬度約 100 km、水溫較周遭海域高 2~3°C, 顯示此高溫現象是大尺度的海水溫度, 並非由電廠溫排水所造成。

將南灣水溫與貓鼻頭南方、離台灣南岸最近之南北向測線 (PR-21, 沿著 120° 43' E) 之水溫資料 (劉和白, 1992^[6]; 劉等, 1992^[7]; 陳等, 1993a~c^[8-10], 1995^[11], 1996^[12], 1997^[13]) 比較, 亦發現本海域的水溫不高於該測線, 再次說明本海域的水溫並不受溫排水的影響。

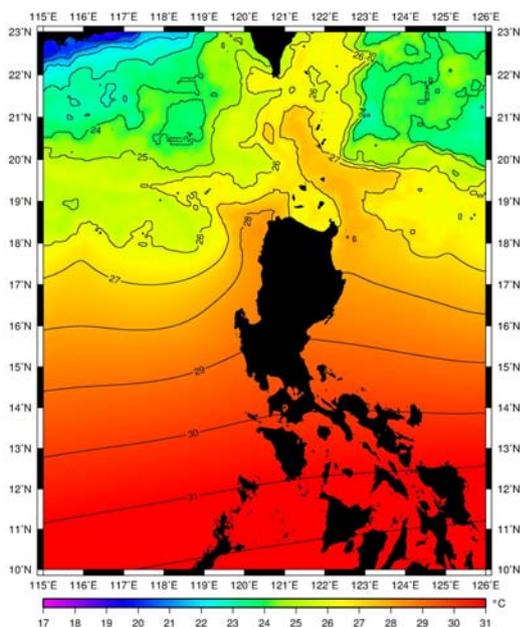


圖 2 102 年 3 月 18 日南灣附近海域水溫圖

102 年 5 月監測，受核三廠影響最大的測站 24，表水的水溫僅為 28.5°C ，較對照測站表水之平均值 29.4°C ，還低了 0.9°C 。扣除可能受溫排水影響的第 24 站後，表水平均水溫為 $29.3\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ ，高於歷年同月之平均水溫 $27.4\pm 1.3^{\circ}\text{C}$ ($P<0.01$)；從 OceanColor Web 的衛星資料顯示，採樣期間西菲律賓海及南海表水水溫大致都高於 27°C ，尤其是南海水溫約為 $28\sim 31^{\circ}\text{C}$ 左右，顯示本海域表水高溫現象並非小區域的特殊現象，主要反應著大尺度的環境變化。

再舉一例，103 年 2 月的表水水溫平均為 $23.3\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，低於歷年同月之平均水溫 $24.5\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ ，而 5 月水溫平均為 $26.4\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，亦低於歷年同月之平均水溫 $27.1\pm 1.3^{\circ}\text{C}$ 。103 年 1 月開始太平洋十年期振盪指數已改變成正值，而 103 年 2、5 月的水溫調查均低於歷年同月之記錄，似乎呼應本海域在太平洋十年期振盪暖相時，水溫偏低；而太平洋十年期振盪冷相時，水溫偏高(102 年 2、5 月調查資料)。

再以鹽度為例，102 年 8 月鹽度介於 $33.505\sim 34.190$ 之間，平均 33.663 ± 0.200 ；11 月鹽度介於 $33.707\sim 33.858$ 之間，平均 33.750 ± 0.029 ，明顯低於歷年來 11 月水樣鹽度平均值

34.23 ± 0.33 。由於採樣前幾天恆春地區並未有雨，因此較為低鹽的現象並非由當地下雨造成。推測可能與 102 年 11 月 8 日在菲律賓中部造成嚴重水災與土石流的海燕颱風有關。據報導海燕颱風的強度超過 99 年的梅姬颱風，成為西北太平洋有紀錄以來第三強的熱帶氣旋，僅次於 50 年的南施颱風及 68 年的狄普颱風。颱風的暴雨造成海域鹽度下降，經 20 天流至南灣，也造成南灣海域的鹽度下降。

本研究於 100 年 11 月以及 101 年 2 月也觀察到較歷年低鹽的現象，而該兩次之所以低鹽也與 100 年 10 月泰國大水災有關。Durack 等人 (2012)^[14] 研究指出，全球暖化將造成水圈循環加強，從過去 50 年(1950-2000)的資料顯示，蒸發大於降雨的海域，鹽度變高；降雨大於蒸發的海域，海水鹽度變得較低，而南海海域在過去 50 年即屬於後者之變化。本海域這幾年頻頻觀察到低於歷史記錄的鹽度，與南海強降雨應有直接關係，而強降雨之所以發生則又與全球暖化脫不了關係。

一般而言，黑潮海流在往北流經台灣東南海域時，會有一支流進入南海北域，此支流向西流入南海北域之後再繞回台灣墾丁南部海域，才沿著台灣東部往北繼續流動；在聖嬰時期，此支流繞入南海北部並不遠(梁, 2002)^[15]；又聖嬰時期，南海湧升現象減弱，與外界交換變弱 (Chao *et al.*, 1996)^[16]，導致黑潮水流入南海的規模變小，黑潮水與南海水交換也變少，推論此時核三海域能保有較明顯黑潮水的性質。而反聖嬰年時則相反，可能量測到較低鹽水 (Chen *et al.*, 2010)^[17]；換言之，在第三核能發電廠附近海域的鹽度訊號，正可以反應此處南海水與西菲律賓海水(黑潮水)交換規模的大小。對照往年鹽度資料，當鹽度訊號偏高時，顯示較偏西菲律賓海水性質；除季節因素之外，大多適逢聖嬰現象時間，尤其以適逢太平洋十年期振盪暖相時最為明顯。圖 3 顯示太平洋十年期振盪暖相時，南灣之溫鹽信號介於南海水與西菲律賓海水之間。

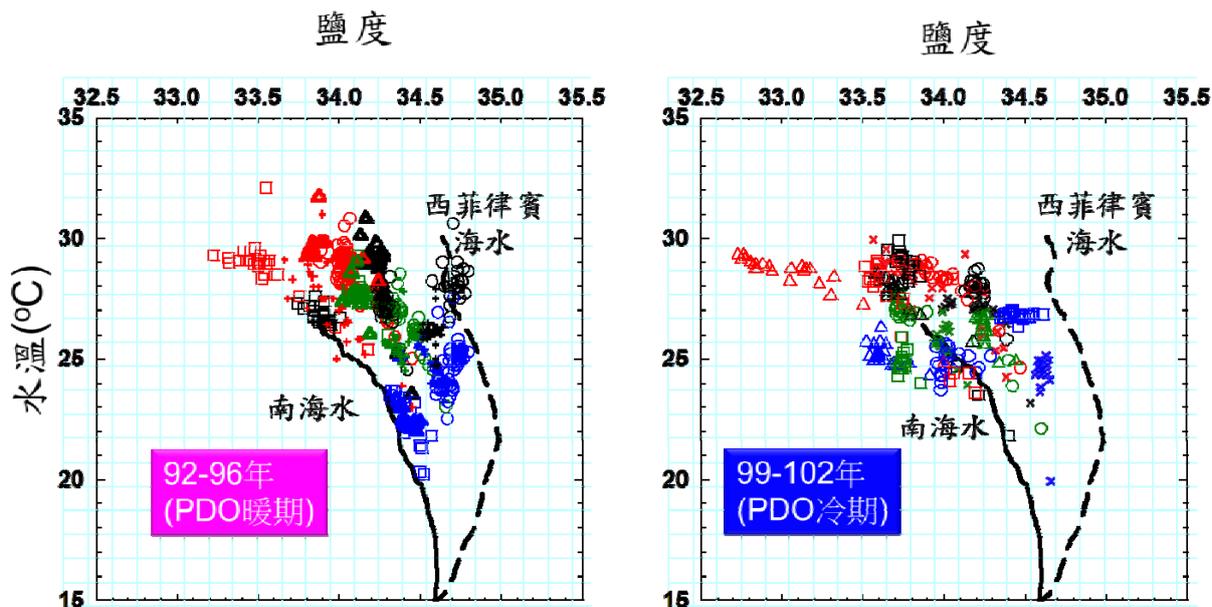


圖 3 本海域於 92~96 年太平洋十年期振盪(PDO)暖相以及 99~102 年太平洋十年期振盪(PDO)冷相之溫鹽變化圖

而太平洋十年期振盪冷相時，南灣之溫鹽信號偏向南海水，鹽度甚至低於正常南海水。這些鹽度異常低的海水，也可能受到珠江影響。圖 4 顯示 2005 年 7 月 9-14 日，2008 年 7 月 17-22 日及 2009 年 7 月 1-6 日南海北部流況圖 (取自 Bai

et al., 2015)^[18]。由圖上可看出由珠江流出的低鹽水，有可能流至南灣。圖 5 為由模式算出、相同日期的珠江沖淡水流向，亦顯示有一部份流至南灣。

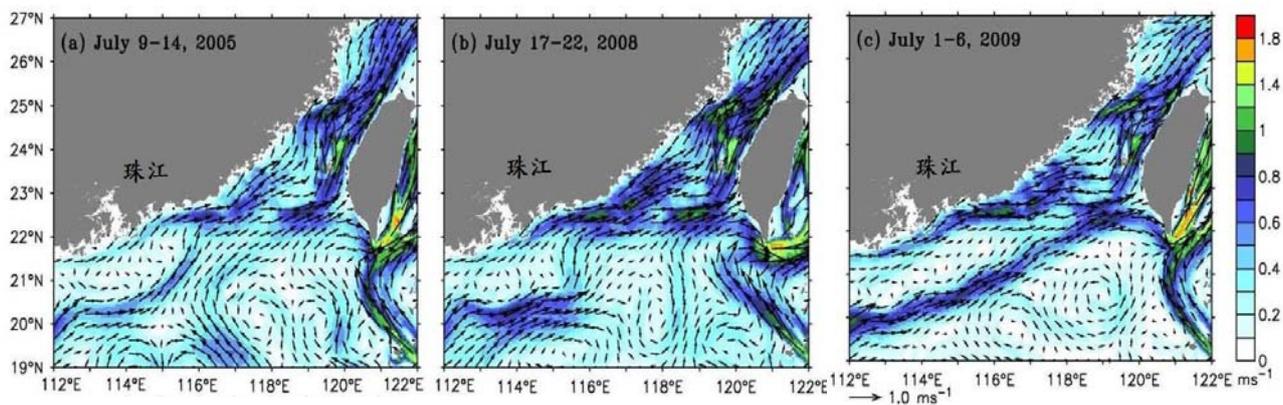


圖 4 2005 年 7 月 9-14 日，2008 年 7 月 17-22 日及 2009 年 7 月 1-6 日南海北部流況圖 (取自 Bai et al., 2015)^[18]

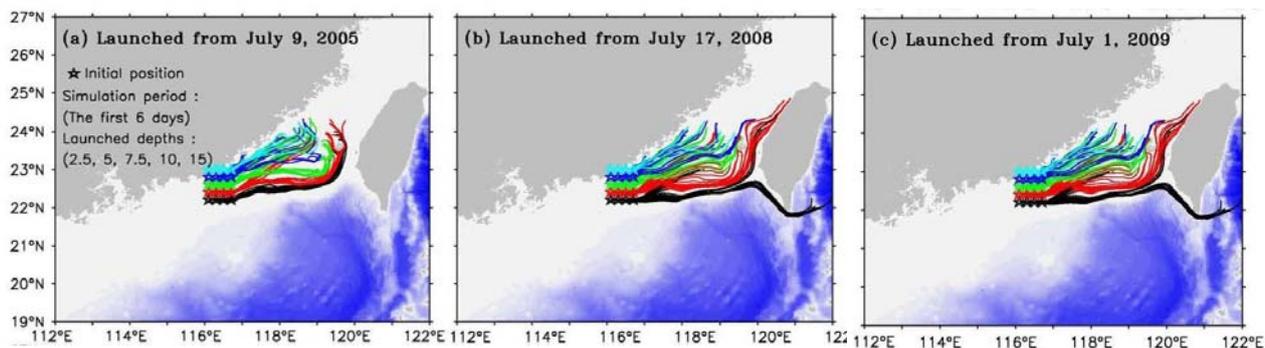


圖 5 模式顯示之珠江沖淡水流向，分別為 2005 年 7 月 9 日，2008 年 7 月 17 日及 2009 年 7 月 1 日^[18]

二、pH 與營養鹽

比較 92~96 年 PDO 暖相以及 99-102 年冷相各測站溫鹽訊號，發現暖相時水團較集中在南海水以及西菲律賓海水之間，而冷相時則南海水的訊號較為明顯。比較表水 pH 變化，前者的 pH 為 8.082 ± 0.039 ($n=140$)，而後者為 8.071 ± 0.020 ($n=110$)，pH 下降了 0.011。此數值大致符合大氣中二氧化碳逐年上升，理論上將造成表面海水每年約下降 0.0017(雷，2013)^[19]、而 6 年約下降 0.010 之數值相符。因此南灣海域 pH 的下降主要反應著大氣中逐年上升的二氧化碳，而與 PDO 冷暖期之變化較無相關。

海水中之營養鹽主要有硝酸鹽、磷酸鹽和矽酸鹽，這些營養鹽是水中植物生長所不能或缺的化學物質。在一般大洋中，營養鹽主要來源為有機質之分解。在沿岸地區，營養鹽除了來自有機質分解之外，亦可能受溪流輸入帶有家庭、農業及工業廢水的影響。

營養鹽的分佈情形不僅可以反映海洋生物活動的規律性，而且有助於瞭解水文及水系的混合情形。若海水中的營養鹽過量聚積，將促使水

體優養化，影響生物正常生長。圖 6 為南灣海域於 92~96 年太平洋十年期振盪暖相，以及 99~102 年太平洋十年期振盪冷相之硝酸鹽變化圖。可看出太平洋十年期振盪暖相時，南灣硝酸鹽濃度 ($0.68 \pm 0.58 \mu\text{M}$ ；樣品數 139) 遠高於太平洋十年期振盪冷相時之濃度 ($0.40 \pm 0.39 \mu\text{M}$ ；樣品數 111) ($P < 0.01$)。而磷酸鹽在暖、冷期分別為 $0.097 \pm 0.081 \mu\text{M}$ 、 $0.070 \pm 0.031 \mu\text{M}$ ，亦是暖期時高於冷期 ($P < 0.01$)；矽酸鹽在暖、冷期分別為 $2.25 \pm 0.92 \mu\text{M}$ 、 $2.12 \pm 0.55 \mu\text{M}$ ，兩者差別不大 ($P = 0.24$)。葉綠素甲在暖、冷期分別為 $0.15 \pm 0.13 \mu\text{g/L}$ 、 $0.22 \pm 0.18 \mu\text{g/L}$ ，暖期低於冷期 ($P < 0.01$)。

以溫、鹽資料來看，本海域暖期時，較常出現低溫、高鹽的海水，此訊號同時也表示有可能是由較深的海水湧升至南灣表層。而較深的海水通常帶有較高量的營養鹽以及較低的葉綠素甲，經由統計資料顯示硝酸鹽以及磷酸鹽的含量在 PDO 暖期、水團低溫、高鹽狀態下，均較冷期時來得高，而葉綠素甲則反之。由水質(營養鹽、葉綠素甲)變化的資料同步支持水文(溫度鹽度)之變化，可見大環境變化對南灣海水之影響。此種影響為過去所未知^[20]。

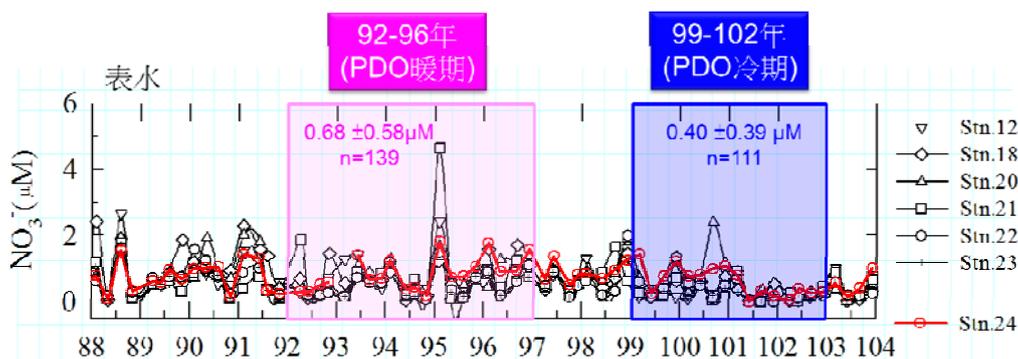


圖 6 南灣海域於 92~96 年太平洋十年期振盪(PDO)暖相以及 99~102 年 PDO 冷相之硝酸鹽變化圖

肆、結論

第三核能發電廠附近南灣海域水溫的變化，主要受天候、季節性以及大尺度海洋事件如颱風、聖嬰、反聖嬰，以及太平洋十年期振盪的影響。如在 102 年 3、5 月調查中，表水水溫高

於過去歷年同月水溫，即可能與太平洋十年期的振盪有關。103 年 2、5 月採樣，海域的水溫較過去同月份偏低，時值太平洋十年期振盪轉為暖相。

南灣海水主要是高鹽度黑潮水、南海中等鹽度海水及低鹽度沿岸水之混合水團。而 102 年 11 月鹽度偏低，可能是採樣之前，南海北部有強烈

颱風造成大量降雨所致。近幾年本海域頻頻觀察到低於歷史記錄的鹽度，應與南海強降雨有直接關係。多年資料顯示在太平洋十年期振盪暖期時，南灣海水性質介於南海水與西菲律賓海水之間，溫度、葉綠素甲偏低，而鹽度以及營養鹽濃度較高，但太平洋十年期振盪冷相時，南灣海水性質較偏向南海水，溫度、葉綠素甲偏高，而鹽度以及營養鹽濃度較低，兩者之間負相關明顯，此結論顯示本海域之水文變化與大尺度的海域事件相關性頗高。

伍、誌謝

本項調查承台灣電力股份有限公司第三核能發電廠於採樣時提供協助。

行政院原子能委員會、行政院環境保護署，台灣電力股份有限公司綜合研究所、公眾服務處、核能發電處、核能技術處、核能後端營運處、第一核能發電廠、第二核能發電廠、第三核能發電廠、龍門施工處、龍門核能發電廠(原為第四核能發電廠)、放射試驗室、環境保護處於歷年報告審查時，提供寶貴意見，使本調查內容漸趨完整，特此致謝。

陸、參考文獻

- [1] 蘇仲卿、洪楚璋、江永棉、譚天錫、張崑雄、邵廣昭、黃哲崇、黃奇瑜、范光龍、葉顯亞，臺灣南部核能電廠附近海域之生態研究，X II，第 12 年(民國 79 年 7 月至民國 80 年 6 月)執行報告，中央研究院國際環境科學委員會中國委員會專刊第 84 號，320 頁，1991 年。(及其 1980~1990 年之報告)
- [2] 洪楚璋、江永棉、譚天錫、張崑雄、邵廣昭、黃哲崇、朱鐵吉、范光龍、葉顯亞，臺灣南部核能電廠附近海域之生態研究，X III，第 14 年(民國 81 年 7 月至民國 82 年 6 月)執行報告，中央研究院國際環境科學委員會中國委員會專刊第 89 號，141 頁，1993 年(及其 1992 之報告)。
- [3] 陳鎮東、詹森、陳孟仙、劉莉蓮、黃榮富、楊穎堅，第三核能發電廠及蘭嶼貯存場附近海域之生態調查，臺灣電力股份有限公司調查報告，2014 年(及其 1994~2013 之報告)。
- [4] Q.H. Jin, and H. Wang, "Multitime scale variations of sea surface temperature in the China seas based on the HadISST dataset" *Acta Oceanologica Sinica*, vol. 30, issue4, pp. 14-23, 2011.
- [5] C.T. Chen, C.H. Wang, K. Y. Soong and B.J. Wang, "Water temperature records from corals near the nuclear power plant in southern Taiwan," *Science in China(D)*, vol. 44, no. 4, pp. 356-362, 2001.
- [6] 劉倬騰、白書禎，世界海洋環流實驗(WOCE) PR 20 及 PR 21 測線水文探測報告，中華民國 WOCE 探測報告第 92-2 號，中華民國 WOCE 辦公室，台北，110 頁，1992 年。
- [7] 劉倬騰、白書禎、劉康克，世界海洋環流實驗(WOCE) PR21 測線水文探測報告，中華民國 WOCE 辦公室，台北，34 頁，1992 年。
- [8] 陳鎮東，黃明祥，王樹倫，郭景聖，鄭莉伶，王冰潔，海研一號 257、262 航次初步報告：79 年 10-11 月於菲律賓，國立中山大學海洋地質所研究報告第 13 號，132 頁，1993a 年。
- [9] 陳鎮東，黃明祥，王樹倫，郭景聖，王綺華，海研一號 266、287 航次碳酸鹽數據初步報告，國立中山大學海洋地質所研究報告第 14 號，65 頁，1993b 年。
- [10] 陳鎮東，黃明祥，王樹倫，張雷風，海研一號 316 航次碳酸鹽及懸浮顆粒數據初步報告，國立中山大學海洋地質所研究報告第 15 號，52 頁，1993c 年。
- [11] 陳鎮東、黃明祥、王樹倫，海研一號 369 及 387 航次初步報告，國立中山大學海洋地質所研究報告第 22 號，69 頁，1995 年。
- [12] 陳鎮東、黃明祥、王樹倫，海研一號 403 及 418B 航次初步報告，國立中山大學海洋地質所研究報告第 25 號，199 頁，1996 年。
- [13] 陳鎮東、王樹倫、王冰潔、林祐邦、李福祥、蕭立銘、陳麗貞，海研一號 433、434 及 462 航次初步報告，國立中山大學海洋地質及化學研究所報告第 32 號，137 頁，1997 年。
- [14] P. J. Durack, S. E. Wijffels and R. J. Matear, "Ocean salinities reveal strong global water cycle intensification during 1950 to 2000," *Science*, vol. 336, no. 6080, pp. 455-458, 2012.
- [15] 梁文德，南海上層海溫及海流變化之研究，國立臺灣大學海洋研究所博士論文，共 127 頁，

- 2002 年。
- [16] S. Y. Chao, P. T. Shaw and S. Y. Wu, "El Nino modulation of the South China Sea circulation," *Prog. Oceanog.*, vol. 38, pp. 51-93, 1996.
- [17] C. T. A. Chen, S. Jan, T. H. Huang, and Y. H. Tseng, "Spring of no Kuroshio intrusion in the southern Taiwan Strait," *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, issue C8, 2010.
- [18] Y. Bai, T. H. Huang, X. Q. He, S. L. Wang, Y. C. Hsin, C. R. Wu, W. D. Zhai, H. K. Lui, and C. T. A. Chen, "Intrusion of the Pearl River plume into the main channel of the Taiwan Strait in summer," *Journal of Sea Research*, vol. 95, pp. 1-15, 2015.
- [19] 雷漢杰，人為與氣候驅動的海水酸化：觀測與模擬，中山大學海洋地質及化學研究所博士論文，共 135 頁，2013 年。
- [20] 陳鎮東，王冰潔，杜悅元，蔡顯修，南部核能發電廠及蘭嶼貯存場附近海域之水文與水質，台電工程月刊，第 658 期，第 76 - 83 頁，2003 年。

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

線性 SVM 診斷法於變壓器故障診斷實務

Linear SVM Method Applied to Transformer Fault Diagnosis in Practice

林明鐘*
Lin, Ming-Jong

吳銘芳*
Wu, Ming-Fang

摘要

變壓器絕緣油中氣體分析(Dissolved Gas Analysis, DGA)是一種可預先得知變壓器可能故障狀況之有效工具，本文針對絕緣油中氣體分析法則進行分析，並採用 ANSI/IEEE C57.104 規範與線型 SVM 診斷法建立分析法則，撰寫 MATLAB 程式設計出一套電力變壓器故障診斷實務之快速方法，將氣相層析儀所測得 H₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂、CO 等 TCG 氣體含量數據鍵入執行所設計程式之電腦平台，即能得到文字診斷說明並提供線型 SVM 診斷法圖形。本公司南科 E/S #4 ATr 與北勢 D/S #3 DTr 的變壓器檢測實務驗證本文所設計之方法確實便捷精準好用。

Abstract

The dissolved gas analysis (DGA) is an effective tool for detecting incipient faults in power transformers. In this paper, we develop a power transformer fault diagnosis code programmed in MATLAB based on DGA in accordance with the ANSI/IEEE C57.104 standards and the proposed linear support vector machine (SVM) diagnosis approach. The gas contents of main dissolved gases in electrical insulating oil, including H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂, CO and Total Combustible Gases (TCG), as detected by gas chromatography, are input to the aforementioned platform to yield the power transformer fault diagnosis. The diagnosis results are shown in explanatory texts and plotted figures based on the SVM diagnosis approach. This paper also refers to the tested DGA records of power transformers of Nankoh Extra-high Substation #4 ATr and Peishih Distribution Substation #3 DTr of the Taiwan Power Company to verify the effectiveness of the proposed diagnosis method.

關鍵詞(Key Words)：電力變壓器故障診斷(Power Transformer Diagnosis)、油中溶解氣體分析(Dissolved Gas Analysis, DGA)、可燃性氣體總量(Total Combustible Gases, TCG)。

壹、前言

變壓器在電力系統中扮演著電壓轉換之重要角色，若因絕緣油疏於檢測而導致劣化，進而發生變壓器故障，造成電力供應中斷其影響層面很廣，小則造成小區域停電，大則是大區域之電力中斷，甚至可能使得市區內交通號誌停擺。

2006年11月04日台灣北部某變電所發生變壓器火災事件後，台灣電力公司高層主管對於變壓器意外極為重視，爰此，對公司內所有服役運轉中浸油式電力變壓器絕緣油之維護與檢測乃至分析維護工作甚為關心，尤其事故之防範乃至於判讀絕緣油油中氣體含量之優、劣之精準甚為嚴苛。

電力變壓器絕緣油之各氣體成分含量與變

*嘉南供電區營運處南科超高壓變電所

壓器即將發生之可能故障狀況有高度關聯性，因此絕緣油中氣體分析(Dissolved Gas Analysis, DGA)是一種可預先得知變壓器可能故障狀況之有效工具，藉由絕緣油中氣體分析做為電力變壓器預防性維護之做法，已被各國電力公司廣泛使用於偵測方面。目前台灣電力公司供電運轉中之浸油式電力變壓器絕緣油皆依供電處編定之變電設備維護手冊內之標準程序，每年定期取變壓器內之絕緣油乙次送綜研所檢測可燃性油中氣體各含量，如檢測結果顯示氫氣(H₂)、甲烷(CH₄)、乙烷(C₂H₆)、乙炔(C₂H₂)、一氧化碳(CO)以及可燃性氣體總量(Total Combustible Gases, TCG)等氣體含量超過標準值時，需列入追蹤或執行檢修並查明原因。舉例而言，2012年8月13日本公司南科超高壓變電所第四號變壓器(#4 ATr)絕緣油以正常程序取油送驗^[1]，其報告顯示各氣體含量相較於前一次數據有明顯地增加，尤其甲烷、乙炔、乙烷分別由246 ppm、276 ppm、0 ppm增至387 ppm、496 ppm、0.8 ppm，可燃性氣體總量由808 ppm增至1199 ppm，此異常增加現象恐將危及浸油式電力變壓器正常運轉。基於穩定供電及設備安全前提下，本公司召集相關技術單位、廠商針對可燃性油中氣體含量異常進行研討並同時進行局部放電檢測，以查明原因並謀處理改善。

檢視前述絕緣油中氣體分析過程中，需使用浸油式電力變壓器故障各種診斷規範準則與文獻及廠商提供資料，若要精準有效須藉助參數值來繪圖判讀之依據，目前皆以電腦鍵入各氣體數據由應用程式顯示診斷結果及圖形繪製。基於判讀圖形之準確性，避免造成誤判之困擾，本文針對絕緣油中氣體分析法則進行分析，並採用ANSI/IEEE C57.104 規範與線型 SVM 診斷法建立分析法則，撰寫 MATLAB 程式設計出一套電力變壓器故障診斷實務之快速方法，使用者僅需將氣相層析儀(ASTM D3612)所測得數據鍵入個人電腦執行本文所設計之程式，即能依序顯示H₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂、CO 以及 TCG 等各氣體含量是否異常，並繪製圖形診斷電力變壓器是否故障，本文所設計之方法可免除人為誤

差造成誤判，利於本公司分析各變壓器之運轉狀態，提升變壓器異常之判定準確性，進而提高供電品質與穩定供電並建立變壓器完整運轉狀態資訊。

貳、變壓器故障診斷方法

絕緣油經氣相層析儀可測得氧氣、氮氣、二氧化碳、一氧化碳、氫氣、甲烷、乙烷、乙炔、乙炔等九種氣體成分，其中可燃性氣體總量係由H₂、CH₂、C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂、CO 等氣體含量組成^[2]，其定義如下(單位 ppm)：

$$TCG = \frac{H_2 + CH_2 + C_2H_6 + C_2H_4 + C_2H_2 + CO}{10^6} \quad (1)$$

可燃性氣體總量氣體隨著變壓器運轉時間與負載量及絕緣油送測週期之長短有密切之關係，然其增量值依據 IEEE C57.104 規範敘述如下式：

$$R = \frac{(S_T - S_O) \times V \times 10^{-6}}{T} \quad (2)$$

其中 R 為 TCG 值之增量(μg/L/day)、S_T 為本次 TCG 值、S_O 是前一次 TCG 值、V 是受測設備容量(受測浸油式電力變壓絕緣油總容量)以及 T 是受測間隔天數。可燃性氣體 TCG 值與受測間隔之增量值多寡可用來診斷變壓器是屬於「正常」、「注意」、「特別注意」、「檢修」等四種潛伏症狀訊息(如表 1 所示)。表 1 也顯示每種狀況下建議下次送檢之時間。以狀況 1 為例，若可燃性氣體總量合值小於 720 ppm，可判斷變壓器是屬於「正常」情況，當增量值大於 30 ppm 時，則絕緣油需隔月送檢測乙次；當增量值介於 10 ppm 與 30 ppm 之間時，則絕緣油需隔季送檢測乙次；當增量值小於 10 ppm 時，絕緣油隔年送檢測乙次即可。

前述方法可粗略診斷變壓器是否潛伏故障因子，同時提供何時該取變壓器絕緣油送檢的時間依據。此外，變壓器長期運轉受到熱或電應力之影響，變壓器的絕緣油和纖維素材料老化或本

體內部瑕疵時，其絕緣油會分解產生氧氣(O₂)、氮氣(N₂)、氫氣、甲烷、乙烷、乙烯、乙炔、一氧化碳、二氧化碳(CO₂)等氣體，若其值超過規定值且無及時處理改善，將造成變壓器故障，其故障類型可分電暈、電弧放電（電氣故障）、過熱（熱故障）、絕緣劣化等視其各氣體含量之多寡而決定嚴重程度。

表 1 可燃性氣體總量檢測週期表^[3] 單位:ppm

	TCG	增量	再測間隔	建議
狀況 1	720	> 30	月	正常
		10 ~ 30	季	正常
		< 10	年	正常
狀況 2	721 ~ 1920	> 30	月	注意
		10 ~ 30	月	注意
		< 10	季	注意
狀況 3	1921~ 4630	> 30	週	特別注意
		10 ~ 30	週	特別注意
		< 10	月	特別注意
狀況 4	> 4630	> 30	日	檢修
		10 ~ 30	日	檢修
		< 10	週	檢修

基於油中溶解氣體分析(Dissolved Gas Analysis, DGA)診斷分析方法，已被引入到變壓器異常判斷之依據。近年來已開發一些技術可藉由各氣體含量來預測變壓器潛伏之故障點，例如關鍵氣體法^[4]、杜瓦爾三角方法^[4]以及 Dornenberg 方法^[5]、羅傑方法^[5]等、日本電協-主導氣體類形診斷法則，概述如下。

一、關鍵氣體法

變壓器故障類型及其發生部位與其絕緣油組成之氣體成分有關，圖 1 顯示四個典型故障類型，分別為(1)此時絕緣油過熱會分解出的氣體以 C₂H₄ 為主並摻雜 C₂H₆ 與 CH₄；(2)絕緣油產生電

暈時則以 H₂ 為主外帶有 CH₄；(3)絕緣油產生電弧時則以 H₂ 為主並有 C₂H₂；以及(4)紙纖維過熱時則以 CO 氣體主要成分。此種藉由絕緣油中關鍵氣體含量以早期發掘變壓器故障的方法而稱之「關鍵氣體法」^[4]。

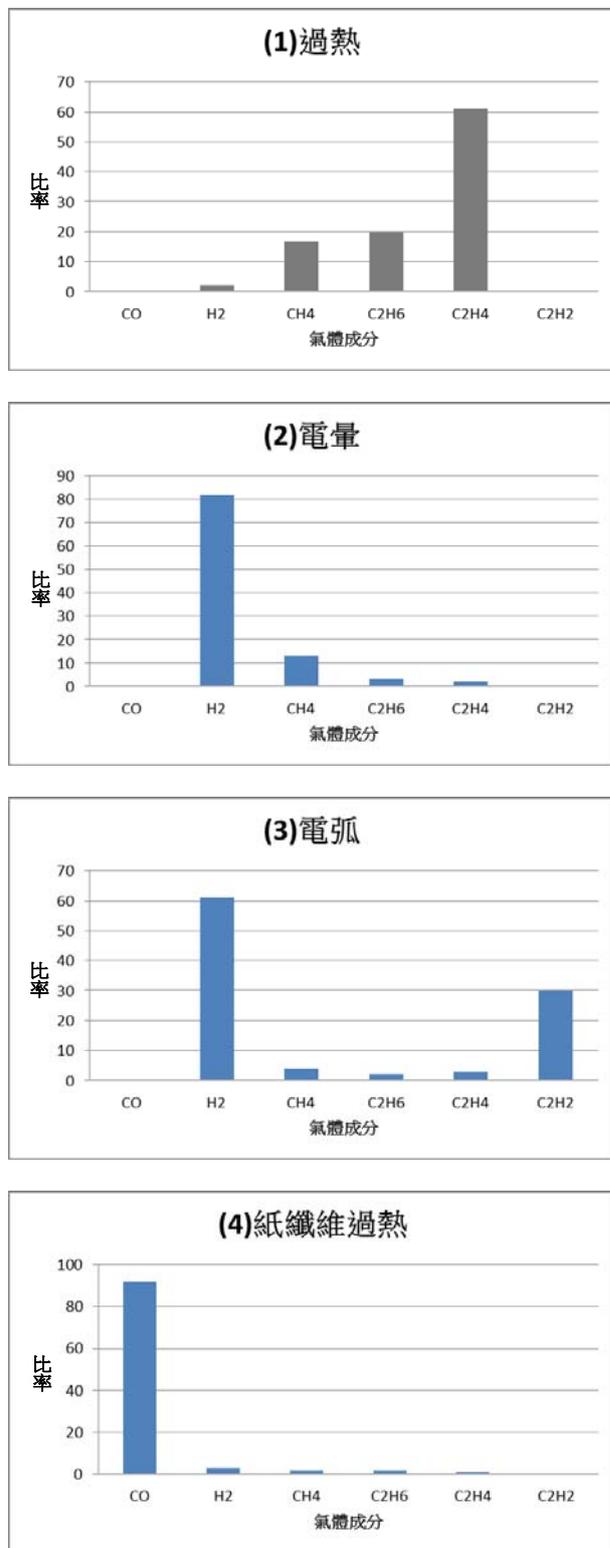


圖 1 四個典型故障對應主要氣體含量比例

二、杜瓦爾三角法

杜瓦爾(IEC-Duval)三角法利用絕緣油分解產生的三種氣體 CH_4 、 C_2H_4 與 C_2H_2 ，以 C_2H_2 為水平軸 CH_4 、 C_2H_2 分別在左邊及右邊形成等腰三角形之比值關係(如圖 2)，依比值對應關係區分為 7 個區塊，並依屬性規劃為 7 種故障區，分別為：PD 區的部分放電故障、T1 區的過熱故障溫度小於 300°C 、T2 區的中度過熱故障溫度在 300°C 與 700°C 之間、T3 區的高度過熱故障溫度大於 700°C 、D1 區的低能量放電故障、D2 區的高能量放電(電弧)故障、DT 區的混合物的電氣和過熱故障。此法為早期變壓器故障檢測的一種診斷工具。

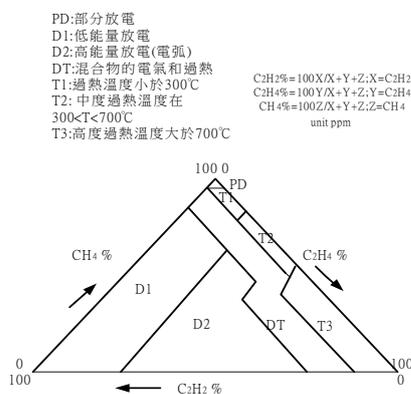


圖 2 IEC-Duval 三角法^[4]

三、Dornenburg 方法

Dornenburg 方法是利用絕緣油分解產生的 H_2 、 CH_2 、 C_2H_6 、 C_2H_4 與 C_2H_2 等五個氣體含量值間之對應比值大小，來區分為熱分解、部分放電或電弧等三種故障類型。Dornenburg 方法使用四種氣體比值關係定義如下： CH_4/H_2 、 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$ 與 $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$ 。此四種比值用來判讀變壓器故障之類型。

四、Roger 方法

Roger 方法則是利用絕緣油分解產生的 H_2 、 CH_2 、 C_2H_6 、 C_2H_4 與 C_2H_2 等五個氣體含量值間之對應比值大小，來區分正常、低能電弧、高能量電弧、低過熱(300°C)、中過熱($<700^\circ\text{C}$)、高過熱

($>700^\circ\text{C}$)等六種診斷類型。Roger 方法使用的比值關係定義成 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ 、 CH_4/H_2 與 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ ，此三種比值可用來判讀變壓器故障之類型。

五、日本電協-主導氣體類形診斷法則^[5]

首先測得絕緣油分解產生的 H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 等五種氣體含量，取其中最大值為基準，各氣體含量值再除此基準值並分別繪製其對應圖。舉例而言，檢視測得的 5 種氣體含量值中，若 H_2 含量值最大，則分別計算 H_2/H_2 、 CH_4/H_2 、 $\text{C}_2\text{H}_6/\text{H}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{H}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2$ ，再繪製各氣體之比值圖形。

除了上述幾種診斷方法，尚有 IEC basic gas Ratio 法則^[6]、線型 SVM 診斷法^[7]、等效過熱面積法^[7]、等，各種診斷方式皆有其優缺點，礙於篇幅無法一一詳述，本文將運用業界廣為使用之 ANSI/IEEE C57.104 規範診斷法與線型 SVM 診斷法則設計一套電力變壓器故障診斷實務之快速方法。

參、變壓器故障診斷規範

本節先摘述 ANSI/IEEE C57.104 規範診斷法與線型 SVM 診斷法則。

一、ANSI/IEEE C57.104 規範

依據 ANSI/IEEE C57.104 規範，可以利用絕緣油分解產生氣體含量值之多寡分析診斷出變壓器異常屬性(如表 2 所示)。

表 2 ANSI/IEEE C57.104 氣體含量診斷表

單位：ppm

名稱	含量值	屬性	名稱	含量值	屬性
H_2	> 1801	危險	CH_4	> 1001	危險
	> 701	異常		> 401	異常
	> 101	須注意		> 121	須注意
	< 100	正常		< 120	正常
C_2H_6	> 151	危險	C_2H_4	> 201	危險
	> 101	異常		> 101	異常
	> 66	須注意		> 51	須注意
	< 65	正常		< 50	正常
C_2H_2	> 35	危險	C_2H_2	> 2	須注意
	> 10	異常		< 1	正常

二、線型 SVM 診斷法

支撐向量機法(Support Vector Machine, SVM)是以核心函數(Kernel Function)為基礎的學習方法，可運用在分類與非線性迴歸上。在分類的問題方面，SVM 的主要概念是建構一個最佳的超平面作為分類決策的界面，透過此界面能有效分類為「正」「負」兩區，藉此來診斷函數之屬性。

日本電協從 1999 年起累積浸油式變壓器 1033 台含電抗器經分析，藉由支撐向量機法發展出一套線性回歸方式，並應用變壓器絕緣油中氣體診斷方法而稱之為「線型 SVM 診斷法」，該法判別式公式，係將經氣相層析儀測得氧氣、氮氣、二氧化碳、一氧化碳、氫氣、甲烷、乙烷、乙烯、乙炔等九種氣體成分取其中 H₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂、CO 各分量數據代入公式並藉由各係數所求得之值(Z)，來診斷變壓器內部異常狀態，公式及各項係數(如表 3 所示)。當 Z 值

為「正」，表示該變壓器運轉正常，Z 值為「負」，則可判斷此變壓器內部有異常。異常屬性分類成「過熱」、「放電」、「過熱+放電」與「絕緣油混入」等四種。當 Z 呈現為「負值」表示異常若其值越大表示故障情形越嚴重，若其中有二項以上表示「負值」時，應選用較大值為診斷之項目判讀分析。舉南科 E/S # 4ATr 為例代入 SVM 判別式公式 $Z = A * H_2 + B * CH_4 + C * C_2H_6 + D * C_2H_4 + E * C_2H_2 + F * CO + G$ ；公式(1)係診斷是否異常現象， $Z = 0.01815 * 194(H_2) + -0.01365 * 604(CH_4) + 0.02362 * 579(C_2H_6) + -0.12971 * 579(C_2H_4) + -7.32744 * 1.8(C_2H_2) + 0.01223 * 75(CO) + 2.21713 = -85.0$ 。至於公式(2)其取之參數及係數僅有 C₂H₄ 與 C₂H₂ 及 CO 不適本診斷法其餘公式(3)診斷是否過熱、公式(4)診斷是否電弧、公式(5)診斷是否過熱+放電、公式(6)診斷是否絕緣油混入等現象，至於算法皆跟公式(1)一樣在此不再贅述。

表 3 線型 SVM 判別式公式與 A~G 之係數

判別式	$Z=A * H_2 + B * CH_4 + C * C_2H_6 + D * C_2H_4 + E * C_2H_2 + F * CO + G$								診斷結果
	公式	A H ₂	B CH ₄	C C ₂ H ₆	D C ₂ H ₄	E C ₂ H ₂	F CO	G	
多 項 式 係 數	(1)	0.01815	-0.01365	0.02362	-0.12971	-7.32744	0.01223	2.21713	異常
	(2)	-	-	-	-0.06095	-11.21398	-	5.82626	異常
	(3)	0.015052	0.032666	-0.019081	-0.034072	0.084326	-0.002029	2.4662	過熱
	(4)	0.006088	-0.046683	0.124659	0.015673	-0.06937	0.016078	-1.19747	電弧
	(5)	-0.010295	-0.068228	0.023078	0.057307	0.16239	0.002373	0.79497	過熱+放電
	(6)	-0.033417	0.11355	-0.108216	0.029086	0.034658	-0.019222	1.1711	絕緣油混入

肆、變壓器故障線型 SVM 診斷法實務方法

經過前述絕緣油中氣體分析法則之研究，基於建立判讀圖形之準確性，並避免人為筆誤所造成誤判之困擾，本節運用 ANSI/IEEE C57.104 規範診斷法與線型 SVM 診斷法設計一套電力變壓器故障診斷實務之快速方法，其故障診斷流程(如圖 3 所示)，進行分析診斷以及診斷結果。流程包

括絕緣油抽取、絕緣油封存、以受熱分解層析法儀器(ASTM D3612)檢測、以 H₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂、CO、TCG 等各氣體含量數值依據 ANSI/IEEE C57.104 規範與線型 SVM 診斷法，本文重點在撰寫 MATLAB 程式進行上述診斷。程式提供人機介面，使用者輸入任意 H₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂、CO、TCG 等各氣體含量數值後，即可得到依據 ANSI/IEEE C57.104 規範診斷法(如表 2 所示)的判斷結果並以文字及圖形呈現方式(如圖 4)，進行變壓器故障診斷，進而擬定

後續處理方式。

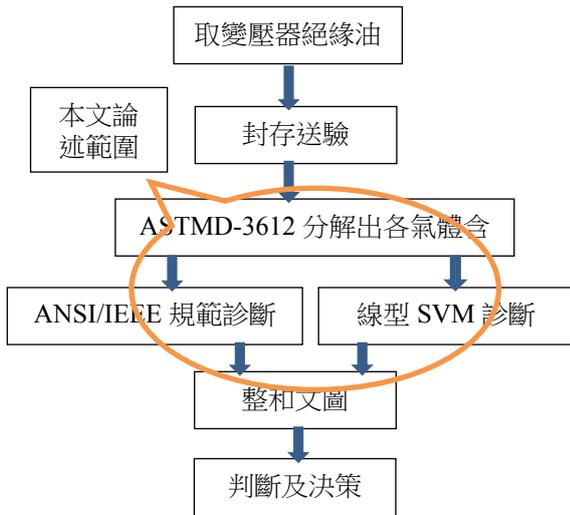


圖 3 變壓器油中氣體線型 SVM 診斷修流程圖

文字	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	TCG
	正常	正常	異常	正常	正常	正常	正常

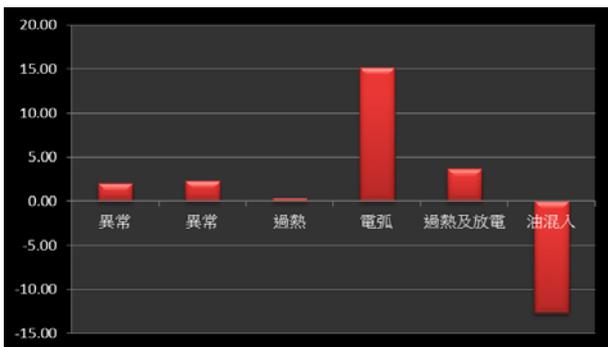


圖 4 任意氣體值線型 SVM 診斷輸出範例

一、南科 E/S # 4ATr 案例開蓋內檢結果

上述 MATLAB 程式執行於南科 E/S # 4ATr 經本公司綜研所檢測數據結果(如表 4),已明顯指示南科 E/S #4ATr 變壓器本體內部已潛伏危險因子的瑕疵點,而故障原因疑似過熱及放電可能現象(如圖 5)。確保南部科學園區之穩定供電品質及安全考量下,於 101 年 10 月 25 日停機執行變壓器本體內部檢修查明原因,結果發現 OLTC 選擇開關引線接點端子板四只螺絲其中一只螺絲可能未鎖緊致融化且大量銅化渣附著在周圍(如圖 6 所示)^[8],經檢修後再取油送測,期判別(如圖 7)所示,文字敘述各氣體含量值皆正常,線性 SVM

診斷圖形均在正常範圍內,此案例驗證本文之方法確實提供一個快速之變壓器故障診斷結果,此結果可做為變壓器檢修依據。

表 4 南科 E/S #4ATr 氣體含量數據 單位:ppm

日期	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	TCG
101.10.09	194	602	204	579	1.8	75	1656

文字	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	TCG
	須注意	異常	危險	危險	正常	正常	須注意

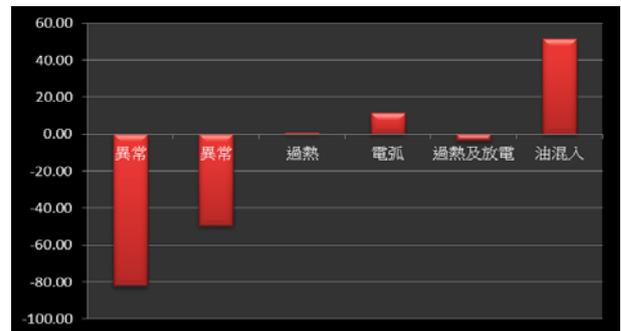


圖 5 南科#4ATr 線型 SVM 診斷輸出圖形(案例)



圖 6 螺絲融化與銅化之實況。

文字	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	TCG
	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常

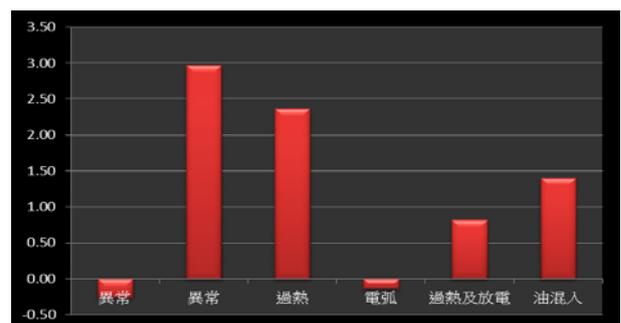


圖 7 南科#4ATr 檢修後線型 SVM 診斷輸出圖形

二、北勢 D/S # 3DTr 案例

102 年 7 月 8 日北勢 D/S # 3DTr 變壓器絕緣油送檢結果，氫氣、甲烷、乙烷、乙烯、乙炔、一氧化碳、可燃性氣體總量等氣體含量數據(如表 5 所示)，將此數據使用線型 SVM 診斷法，得到之文字判斷結果與圖形(如圖 8 所示)。文字判斷結果，說明 C₂H₄、C₂H₆ 屬危險等級、H₂、C₂H₂ 及 CO 為正常、CH₄、TCG 則為異常。另依據線型 SVM 診斷法則(如表 3 所示)，由圖 8 顯示此案例之異常成分高達負 14、過熱及放電成分達負 31 之情況，因此判斷其異常為過熱及放電現象。經停電內部檢修也是發掘線圈層間短路所致。

表 5 北勢 D/S#3 DTr 氣體含量數據 單位:ppm

日期	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	TCG
102.7.8	48	6946	356	107	0.4	36	2211

文字	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	TCG
	正常	異常	危險	危險	正常	正常	異常

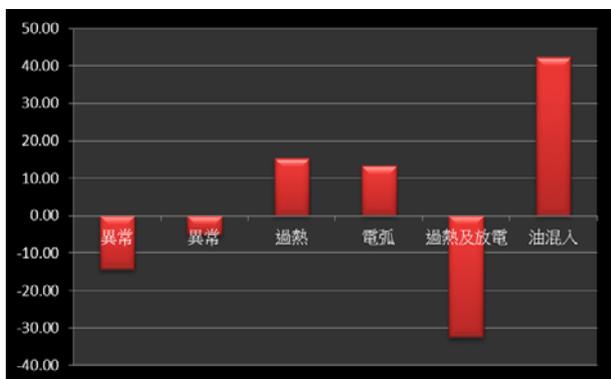


圖 8 北勢#3DTr 線型 SVM 診斷輸出圖形(案例)

伍、結論

在文獻中諸多學者專家及從事電力變壓器的資深工程師多認為「從絕緣油中各種氣體含量來判斷變壓器可能異常原因非常不易，故往往將它視為一種藝術而非技術」，因氣體成分之多寡及其相互間含量之比皆為診斷之變數，故要精準之判讀有賴經驗之累積，但是快速簡便的輔助系統對使用者也非常重要。本文運用 ANSI/IEEE C57.104 規範診斷法與線型 SVM 診斷法則完成

一套電力變壓器故障診斷實務之快速方法，藉電腦執行程式之方法可免除一些人為因素誤差，本系統提供操作簡易之人機介面，使用者輸入 H₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂、CO 等 TCG 各氣體含量數值後，即可快速得到文字與圖形方式之變壓器故障診斷結果。南科 E/S #4 ATr 與北勢 D/S #3 DTr 的變壓器檢測實務驗證本文所設計之方法確實便捷好用。可考慮增建於供電單位之變電維護管理系統內 TCG 分析判斷用辦法之一，以於本公司分析各變壓器之運轉狀態，提升變壓器異常之判定準確性，進而提高供電品質與穩定供電並建立變壓器完整運轉狀態資訊。

陸、參考文獻

- [1] 黃宗仁，「浸油式電力變壓器可燃性油中氣體分析與故障診斷」，台灣電力公司綜合研究所，民國 91 年 7 月。
- [2] IEEE C57.104 –“IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil – Immersed Transformers,” Minutes of WG Meeting Nashville, Tennessee, USA, March 13, 2012.
- [3] W. H. Tang, J. Y. Goulermas, Q. H. Wu, Z. J. Richardson, and J. Fitch, “A Probabilistic Classifier for Transformer Dissolved Gas Analysis with a Particle Swarm Optimizer,” *IEEE Trans. on Power Del.*, vol. 23, no. 2, pp. 751-759, Apr. 2008.
- [4] Sukhbir Singh and M.N. Bandyopadhyay , “Duval Triangle: A Noble Technique for DGA in Power Transformers,” *International Journal of Electrical and Power Engineering*, 2010 vol. 4, no.3, pp.193-197.
- [5] 日本電氣協同研究會，電力變壓器指導方針之修訂本，第 65 卷第 1 號(平成 21 年)。
- [6] IEC, “Guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gasses Analysis,” IEC standard 60599, IEC publ. 60599, Mar. 1999.
- [7] A. Mollman and B. Pahlavanpour, “New Guidelines for Interpretation of Dissolved Gas Analysis in Oil-filled Transformers,” *Electra*, CIGRE France, vol. 186, pp. 30-51, Oct. 1999.
- [8] 楊光圻、李坤銘、郭保欽、蘇詠舜、沈夏，「南科 E/S#4 ATr 檢修報告」，台灣電力公司綜合研究所，民國 101 年 11 月。

台電系統負載模型參數量測與驗證（一）： 動態負載模型之建立與參數辨識

Parameter Measurements and Verifications of Dynamical Load Model in Taipower System (1):
Dynamical Load Modeling Developments and Parameter Estimations

林堉仁*	朱家齊**	李盛輝***	徐書敏**
Lin, Yu-Jen	Chu, Chia-Chi	Lee, Sheng-Huei	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，將更能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。本文介紹電力系統負載模型建構方法，並說明其原理、步驟。現行負載模型建構方法分成兩大類別：監錄量測法與元件聚集法。在監錄量測法中，先將量測所得之電壓及電流瞬時值，轉換為同步相量，並且估算頻率與功率。接著選擇一個負載模型，並以最佳化方法估算該負載模型的參數。元件聚集法中，在任何一特定變電所的負載，先依負載資料，區分為住宅、商業、工業及農業用電，再定義出個別用戶負載設備，然後再聚集負載模型元件。本文針對這兩種負載模型建構方法，說明其優缺點，同時也列出國際大電力協會(CIGRE)對這兩種負載模型建構方法，在實施時的一些建議。

Abstract

This paper is a scoping study to examine research opportunities for improving the accuracy of the load models, data and performance assessment tools used by Taipower operation engineers and planning engineers. Conventionally, electric load is represented by a static model. Nowadays, due to the inaccuracy, these load models no longer adequately reflect the actual states of the system that they are witnessing in real time operations, especially during major disturbances on the system. This paper describes two classes of methods for dynamical load modeling which are commonly discussed in the literature: measurement-based and component-based method.

Measurement-based method measures the instantaneous values of voltage and current, estimates their phasors as well as the active and reactive powers, and then selects a load

*義守大學

**國立清華大學

***健行科技大學

****台灣電力公司綜合研究所

model and identifies the model parameters. Component-based method collects load data, classifies load class mix data, and finally identifies the component composition of the individual load. This paper lists the advantages and disadvantages of those two load modeling methods, and suggestions from CIGRE for applying both load modeling methods.

關鍵詞(Key Words): 電力系統負載模型 (Power System Load Model)、監錄量測法(Measured-based Method)、元件聚集法(Component-based Method)。

壹、前言

進行電力系統模擬時，需要足夠且適切的數學模型，來描述電力系統的動態響應。這些模型包括各式發電設備、輸配電電網及負載。這些數學模型，要能足以適切地模擬出電力系統的反應。然而負載電力系統的不確定性甚高，在不同的區域、不同的時間點，電力系統負載對於電壓及頻率，所消耗的有效功率與無效功率，呈現著非線性、時變的性質。

以西元 1996 年 8 月的美國-加拿大的大停電為例，原始的模擬軟體結果，並無法得到實際的系統響應。因為實際的系統響應，有著振盪，但模擬結果，並沒有預測到振盪的現象。若將西北和加拿大地區的負載模型，由原本的定電流模型，改為感應機與靜態模型的結合，就可以產生振盪的響應結果。而在西元 2000 年 8 月，也是因為加拿大 Alberta 省的一條線路斷掉，導致了持續了 60 秒的振盪。這兩次事件，使得 WSCC(Western Systems Coordinating Council)重新檢視負載模型，並隨後進行了修正，加入了約 20%-30%的動態感應電動機負載模型，再結合原有的 80%-70%的靜態負載模型，於此建構起所謂的 WSCC 負載模型概念。調整後的 WSCC 負載模型，能夠重建事故發生當下的電力系統振盪現象^[1]。

從過去幾次大規模停電事件的事後檢討報告中，可以發現，作為運行規劃依據的電力系統計算機模擬結果，與系統實際運行之響應，兩者並不全然相同。探究其原因，是電力系統模擬時，各元件設備數學模型會有失真錯誤及不準

確。而各式各樣設備元件的數學模型之中，又以負載模型的不確定性最高，如此一來也進一步影響到整個電力系統模擬結果。制定適當的負載模型，電力公司可以提升電力系統模擬的精準度，以協助規劃更經濟與安全的電力系統運行方針。

電力系統負載模型建立與驗證的方法，主要有兩個方法：一是監錄量測法，二是元件聚集法。本文就這兩種負載模型建立方法，進行討論。

貳、監錄量測法

監錄量測法是屬於系統識別與參數最佳化的方式，來進行電力系統負載模型量測與驗證。監錄量測法是以「由上而下」的方式，當電力系統發生偶發或觸發事件，在變電站或配電站進行電壓、電流瞬間值測量，並取得有效功率與無效功率等數據資料。事件之後，先選定負載模型的種類，再根據測量得到的數據資料，進行該負載模型的參數辨識。

監錄量測法的工作流程如下(圖 1)：

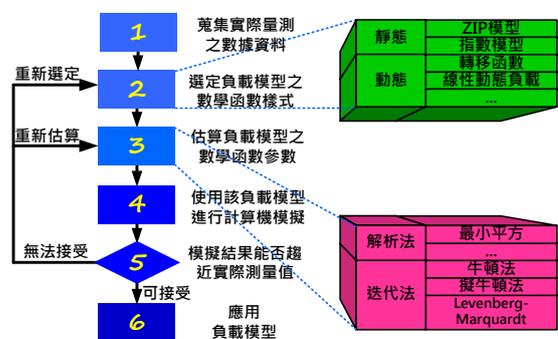


圖 1 監錄量測法

一、蒐集電力系統實際量測之數據，包括電壓、電流、有效及無效功率。

- 二、選定一個負載模型(靜態、動態)。
- 三、估算該負載模型之參數(解析法、智能法)。
- 四、依照選定負載模型，與其估算後之模型參數，進行電力系統模擬。
- 五、若模擬結果無法接近，則重新挑選負載模型，或是重新估算參數。
- 六、應用負載模型及所估算的參數。

一、蒐集量測數據與估算相量

電力系統所指的負載模型，通常是等效至一次變電所或配電變電所的二次側。然而在一次變電所和配電變電所之監錄設備所記錄的資料，一般都是三相電壓與電流的瞬時值。因此我們必須將所量測到的電壓、電流之瞬時值，估算出電壓與電流之相量、頻率，以及三相有效功率與無效功率，作為負載模型識別與參數估算的輸入資料。

在電壓與電流相量方面，已知一輸入弦波

$$x(t) = a_k \cos(2\pi k f_0 t) + b_k \sin(2\pi k f_0 t) \quad (1)$$

以相量表示：

$$X_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \cdot e^{j\phi} \quad (2)$$

其中

$$\phi = \tan^{-1} \left(-\frac{b_k}{a_k} \right) \quad (3)$$

使用複數形式表示相量：

$$X_k = \frac{1}{\sqrt{2}} (a_k - j b_k) \quad (4)$$

可對取樣數據進行離散傅立葉轉換，得到一週期函數的傅立葉級數的係數，利用傅立葉級數和離散傅立葉轉換間的關係，將相量表示式寫成

$$X_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta T) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (5)$$

$$X_k = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta T) \left\{ \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right\} \quad (6)$$

標示 $x_n = x(n\Delta T)$ 且 $2\pi/N = \theta$ ，則

$$X_k = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \{ \cos(kn\theta) - j \sin(kn\theta) \} \quad (7)$$

頻率和頻率變化率可由相量估測的相角來作估測，從非標稱頻率平衡輸入估測到的正序相量，其相量振幅有一個微小的衰減，假設輸入的負序成為零，正序電壓的估測式為

$$X'_{r1} = P X_1 e^{jr(\omega - \omega_0)\Delta t} \quad (8)$$

為對式(8)相量估測的相角微分，由一次與二次導數可得頻率偏差量和頻率變化量。任意時間的頻率為

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega + t\omega' \quad (9)$$

對頻率積分得相角

$$\Phi(t) = \int \omega(t) dt = \Phi_0 + t\omega_0 + t\Delta\omega + \frac{1}{2} t^2 \omega' \quad (10)$$

完成電壓及電流的相量，以及頻率的估測，接下來進行電壓、電流對稱分量的計算：

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{a1} \\ \bar{V}_{a2} \\ \bar{V}_{a0} \end{bmatrix} \quad (11)$$

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

再將予以計算複功率即可得到有效功率及無效功率：

$$\bar{S} = 3(\bar{V}_{a1}\bar{I}'_{a1} + \bar{V}'_{a2}\bar{I}'_{a2} + \bar{V}'_{a0}\bar{I}'_{a0}) \quad (13)$$

綜合上述，完成所量測到的電壓與電流瞬時值，並估算出電壓與電流之相量、頻率、以及三相有效功率與無效功率，作為負載模型識別與參數估算的輸入資料。

二、選定負載模型

進行電力系統分析時，常見的負載模型可分成兩大類：靜態模型和動態模型。靜態負載模型將使得負載對於電壓與頻率的變動，產生即時的響應。動態負載模型，則使得負載對於電壓和頻率的變動所造成的響應，和前一時刻的電力系統與負載的狀態有關。靜態和動態負載模型主要的差異，是動態負載模型為考慮時間的時變函數，而靜態負載則為非時變函數。電力系統發生擾動之後的響應將持續數個週期，使用靜態模型來代表擾動發生後的立即響應並不恰當，為了預測較長時間的響應，例如低電壓恢復現象，負載必須描述它的動態行為，在動態模型中將有效功率及無效功率負載表示成過去或目前之電壓大小及頻率的函數，動態模型結構通常表示為常微分方程式、偏微分方程式或轉移函數等等。動態負載模型可分為兩種：以輸入輸出之關係的動態模型、以實體為基礎的動態模型。不論是使用靜態或動態模型，都必須要充分且正確地描述負載特性，像是系統電壓與頻率的變化，所導致相對應的有效功率、無效功率的變動。

當電壓及頻率發生變化時，電力系統中大多數的負載響應非常迅速，可以很快地回到穩態，在這些情況下我們可以使用靜態模型作分析。靜態模型採用瞬時匯流排電壓振幅大小及頻率的代數方程式，表示此一時刻負載特性之有效功率及無效功率。由於負載建模的重要性，文獻上已發展出很多不同的靜態負載模型，儘管有這種多樣性，但原則上這些模型皆有一個共同的目標，即反映出負載有效及無效成分的電壓振幅和頻

率之相依性。

(一) 靜態模型

本文中，茲舉兩個靜態負載模型：ZIP 模型與 PSS/E IEEE 靜態模型。ZIP 模型從定功率負載模型精化而成，結合定阻抗(Z)、定電流(I)及定功率(P)成分來表示負載。ZIP 模型將功率與電壓振幅間的關係以多項式表現，且為一個頻率相依的靜態負載模型，通常以下列形式表示：

$$P_L = P_0 \left[p_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 + p_3 \right] (1 + K_{pf} \Delta f) \quad (14)$$

$$Q_L = Q_0 \left[q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 + q_3 \right] (1 + K_{qf} \Delta f) \quad (15)$$

其中 p_1 、 q_1 為定阻抗負載參數， p_2 、 q_2 為定電流負載參數， p_3 、 q_3 為定功率負載參數； K_{pf} 、 K_{qf} 為頻率靈敏度參數。當 $V = V_0$ 時， $p_1 + p_2 + p_3 = 1$ 且 p_1 、 p_2 、 $p_3 \geq 0$ ； $q_1 + q_2 + q_3 = 1$ 且 q_1 、 q_2 、 $q_3 \geq 0$ 。ZIP 模型具有一定的物理意義，因為大部分的負載可描述成定阻抗(電熱、白熾燈)，定電流(電動機)以及定功率(電源、VFD/HVAC)模型。

而 PSS/E IEEE 靜態模型，此為電壓振幅和頻率相依的模型，其負載有效功率及無效功率表示式如下所示，其中 $a_1 \sim a_8$ ， $n_1 \sim n_6$ 為估測參數， a_7 、 a_8 為頻率敏感度參數。當 $V = V_0$ 時， $a_1 + a_2 + a_3 = 1$ 且 $a_4 + a_5 + a_6 = 1$ 。

$$P_L = P_0 \left(a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_1} + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_2} + a_3 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_3} \right) (1 + a_7 \Delta f) \quad (16)$$

$$Q_L = Q_0 \left(a_4 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_4} + a_5 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_5} + a_6 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_6} \right) (1 + a_8 \Delta f) \quad (17)$$

(二) 動態模型

另關於動態模型，電力系統的響應隨擾動跨越好幾個時間週期，擾動後立即的初始響應可使用靜態負載模型適當地表示。然而，為了預測較長時間的系統響應，例如：緩慢的電壓恢復現象，負載的動態行為就需要重新描繪。動態負載模型的有效功率及無效功率成分，是使用前一刻及當下時間之匯流排電壓大小的方程式表示，其模型通常以常微分方程、差分方程、偏微分方程與轉移函數方程等形式表現。本文茲舉兩個動態負載模型的例子：一階感應電動機負載模型及線性動態負載模型。

首先，感應電動機模型為電力系統動態負載中一項很重要的成分，且其對暫態電壓穩定度有著很大的影響，小型感應電動機的一階線性模型表示如下：

$$\frac{d\Delta x}{dt} = -\frac{1}{T_{pp}} \Delta x + \left(K_{pv} - \frac{K_{pv} T_{pv}}{T_{pp}} \right) \Delta u \quad (18)$$

$$\Delta y = \begin{bmatrix} \Delta P_d(t) \\ \Delta Q_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{pp}} \\ K_{1p} \\ \frac{1}{T_{pp}} \end{bmatrix} \Delta x + \begin{bmatrix} \frac{K_{pv} T_{pv}}{T_{pp}} \\ K_{qv} + \frac{K_{qv} K_{pv} T_{pv}}{T_{pp}} \end{bmatrix} \Delta u \quad (19)$$

其中 $\Delta x = T_{pp} \Delta P_d - K_{pv} T_{pv} \Delta V$ ， $\Delta u = [\Delta V]$ 。全部需要辨識的參數有五個， $p = [T_{pp}, T_{pv}, K_{pv}, K_{qv}, K_{qp}]^T$ ，有效功率為電壓大小的時間導數常數 T_{pv} 與電動機的慣量有關。

線性動態負載模型，是基於指數恢復模型及適應負載模型的線性化動態負載模型，該線性模型可以被有效地作為替用模型，在某些情況下，此線性模型可以比指數恢復模型及適應負載模型更為準確。指數恢復模型和適應負載模型在穩態時的線性化，為有效及無效功率負載提供了以下相同的線性模型，以作為一個線性的通用非線性動態模型。

$$\Delta \dot{x}_p(t) = -\frac{1}{T_p} \Delta x_p(t) + \frac{P_0}{T_p} \left(\frac{N_{ps} - N_{pt}}{V_0} \right) \Delta V(t) \quad (20)$$

$$\Delta P_d(t) = \Delta x_p(t) + \frac{P_0 N_{pt}}{V_0} \Delta V(t) \quad (21)$$

$$\Delta \dot{x}_q(t) = -\frac{1}{T_q} \Delta x_q(t) + \frac{Q_0}{T_q} \left(\frac{N_{qs} - N_{qt}}{V_0} \right) \Delta V(t) \quad (22)$$

$$\Delta Q_d(t) = \Delta x_q(t) + \frac{Q_0 N_{qt}}{V_0} \Delta V(t) \quad (23)$$

更多靜態與動態負載模型，可以參照表 1 與表 2 [2-8]。

表 1 靜態負載模型表

編號	名稱	模型表示式
s1	指數模型	$P_L = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{K_{pv}} (1 + K_{pf} \Delta f)$ $Q_L = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{K_{qv}} (1 + K_{qf} \Delta f)$
s2	PSS® E IEEE 靜態模型	$P_L = P_0 \left(a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_1} + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_2} + a_3 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_3} \right) (1 + a_7 \Delta f)$ $Q_L = Q_0 \left(a_4 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_4} + a_5 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_5} + a_6 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_6} \right) (1 + a_8 \Delta f)$
s3	ZIP 模型	$P_L = P_0 \left[p_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 + p_3 \right] (1 + K_{pf} \Delta f)$ $Q_L = Q_0 \left[q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 + q_3 \right] (1 + K_{qf} \Delta f)$

編號	名稱	模型表示式
s4	EPRI 模型	$P_L = P_0 \left\{ P_{a1} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{K_{pv1}} [1 + K_{pf1} \Delta f] + (1 - P_{a1}) \left(\frac{V}{V_0} \right)^{K_{pv2}} \right\}$ $Q_L = P_0 \left\{ Q_{a1} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{K_{qv1}} [1 + K_{qf1} \Delta f] + \left(\frac{Q_0}{P_0} - Q_{a1} \right) \left(\frac{V}{V_0} \right)^{K_{qv2}} [1 + K_{qf2} \Delta f] \right\}$
s5	ZIP-指數模型	$\frac{P}{P_0} = (1 - (K_{pi} + K_{pc} + K_{p1} + K_{p2})) \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + K_{pi} \left(\frac{V}{V_0} \right) + K_{pc} + K_{p1} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{npv1} \times (1 + K_{pf1} \Delta f) + K_{p2} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{npv2} (1 + K_{pf2} \Delta f)$ $\frac{Q}{Q_0} = (1 - (K_{qi} + K_{qc} + K_{q1} + K_{q2})) \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + K_{qi} \left(\frac{V}{V_0} \right) + K_{qc} + K_{q1} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{nqv1} \times (1 + K_{qf1} \Delta f) + K_{q2} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{nqv2} (1 + K_{qf2} \Delta f)$

表 2 動態負載模型表

編號	名稱	模型表示式
d1	一階動態負載模型	$\Delta P(s) = \frac{K_{pu} + T_{pu}s}{1 + T_{1p}s} \Delta V(s)$ $\Delta Q(s) = \frac{K_{qu} + T_{qu}s}{1 + T_{1q}s} \Delta V(s)$
d2	二階動態負載模型	$\frac{\Delta P(s)}{\Delta V(s)} = \frac{K_{pu}(1 + T_{3p}s)}{(1 + T_{1p}s)(1 + T_{2p}s)}$ $\frac{\Delta Q(s)}{\Delta V(s)} = \frac{K_{qu}(1 + T_{3q}s)}{(1 + T_{1q}s)(1 + T_{2q}s)}$
d3	三階動態負載模型	$\frac{\Delta P(s)}{\Delta V(s)} = \frac{K_{pu}(1 + T_{4p}s)(1 + T_{5p}s)}{(1 + T_{1p}s)(1 + T_{2p}s)(1 + T_{3p}s)}$ $\frac{\Delta Q(s)}{\Delta V(s)} = \frac{K_{qu}(1 + T_{4q}s)(1 + T_{5q}s)}{(1 + T_{1q}s)(1 + T_{2q}s)(1 + T_{3q}s)}$
d4	指數恢復模型	$T_p \dot{x}_p(t) = -x_p(t) + P_0 \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{ps}} - P_0 \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{pt}}$ $P_d(t) = x_p(t) + P_0 \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{pt}}$ $T_q \dot{x}_q(t) = -x_q(t) + Q_0 \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{qs}} - Q_0 \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{qt}}$ $Q_d(t) = x_q(t) + Q_0 \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{qt}}$
d5	適應負載模型	$T_p \dot{x}_p(t) = -x_p \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{pt}} + P_0 \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{ps}}$ $P_d(t) = x_p \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{pt}}$ $T_q \dot{x}_q(t) = -x_q \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{qt}} + Q_0 \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{qs}}$ $Q_d(t) = x_q \left(\frac{V(t)}{V_0} \right)^{N_{qt}}$

編號	名稱	模型表示式
d6	線性動態負載模型	$\Delta \dot{x}_p(t) = -\frac{1}{T_p} \Delta x_p(t) + \frac{P_0}{T_p} \left(\frac{N_{ps} - N_{pt}}{V_0} \right) \Delta V(t)$ $\Delta P_d(t) = \Delta x_p(t) + \frac{P_0 N_{pt}}{V_0} \Delta V(t)$ $\Delta \dot{x}_q(t) = -\frac{1}{T_q} \Delta x_q(t) + \frac{Q_0}{T_q} \left(\frac{N_{qs} - N_{qt}}{V_0} \right) \Delta V(t)$ $\Delta Q_d(t) = \Delta x_q(t) + \frac{Q_0 N_{qt}}{V_0} \Delta V(t)$
d7	一階感應電動機負載模型	$\frac{d\Delta x}{dt} = -\frac{1}{T_{pp}} \Delta x + \left(K_{pv} - \frac{K_{pv} T_{pv}}{T_{pp}} \right) \Delta u$ $\Delta y = \begin{bmatrix} \Delta P_d(t) \\ \Delta Q_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{pp}} \\ \frac{K_{qp}}{T_{pp}} \end{bmatrix} \Delta x + \begin{bmatrix} \frac{K_{pv} T_{pv}}{T_{pp}} \\ K_{qv} + \frac{K_{qp} K_{pv} T_{pv}}{T_{pp}} \end{bmatrix} \Delta u$ <p>其中</p> $\Delta x = T_{pp} \Delta P_d - K_{pv} T_{pv} \Delta V$ $\Delta u = [\Delta V]$
d8	複合負載模型	$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = A_{dq}(p)x + B_{dq}(p)u \\ y = Cx \end{cases}$ <p>其中 $x = [\Delta i_{ds}, \Delta i_{dr}, \Delta i_{qs}, \Delta i_{qr}, \Delta \omega_r]^T$ 為狀態向量；</p> <p>$u = [\Delta v_{ds}, \Delta v_{qs}, \Delta \omega]^T$ 為輸入向量；</p> <p>$y = [\Delta i_{ds}, \Delta i_{qs}]^T$ 為輸出向量。</p> $p = [R_0, C_0, R_s, L_s, L_m, R_r, L_r, H, T_0, s_0, \beta]^T$
d9	ZIP-感應電動機負載模型	$\dot{x}_r = g(x_r, u, p)$ $\begin{cases} \frac{di_r}{dt} = (B_r - B_s A_s^{-1} A_r) i_r + (u_r - B_s A_s^{-1} u_s) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = -i_r C_r A_s^{-1} A_r i_r - i_r^T C_r A_s^{-1} u_s - \frac{T_0}{2H} \left(\frac{\omega_r}{\omega_b} \right)^\beta \end{cases}$ $y = h(x_r, u, p)$ $\begin{cases} P = P_p + I_{dl} v_{ds} + I_{ql} v_{qs} + \frac{v_{ds}^2 + v_{qs}^2}{R_z^2 + X_z^2} R_z + P_M \\ Q = Q_p + I_{dl} v_{qs} - I_{ql} v_{ds} + \frac{v_{ds}^2 + v_{qs}^2}{R_z^2 + X_z^2} X_z + Q_M \end{cases}$ <p>其中</p> $i_r = [i_{dr}, i_{qr}]^T$ $u_s = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix}$ $p = [P_p, Q_p, I_{dl}, I_{ql}, R_z, L_z, R_s, L_s, L_m, R_r, L_r, H, T_0, \omega_{r0}, \beta]^T$
d10	GZIP-感應電動機負載模型	<p>為 ZIP-感應電動機模型的延伸與模型 ZIP-感應電動機模型不同之處為其靜態 ZIP 部分的表示如下：</p> $P = P_{ZIP0} \left[p_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 + p_3 \right]$ $Q = Q_{ZIP0} \left[q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 + q_3 \right]$ $p = [R_s, L_s, L_m, R_r, L_r, H, T_0, \omega_{r0}, \beta, P_{ZIP0}, p_1, p_2, p_3, Q_{ZIP0}, q_1, q_2, q_3]^T$

編號	名稱	模型表示式
d11	EPRI 複合負載模型	<p>動態部分：</p> $\begin{cases} \frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'} [E'_d + (X - X')I_q] - (\omega - 1)E'_q \\ \frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'} [E'_q + (X - X')I_d] + (\omega - 1)E'_d \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{2H} [(A\omega^2 + B\omega + C)T_0 - (E'_d I_d + E'_q I_q)] \\ I_d = \frac{1}{R_s^2 + X^2} [R_s(U_d - E'_d) + X'(U_q - E'_q)] \\ I_q = \frac{1}{R_s^2 + X^2} [R_s(U_q - E'_q) - X'(U_d - E'_d)] \end{cases}$ <p>靜態部分：</p> $\begin{cases} P_s^* = P_z^* \left(\frac{U}{U_0}\right)^2 + P_l^* \left(\frac{U}{U_0}\right) + P_p^* \\ Q_s^* = Q_z^* \left(\frac{U}{U_0}\right)^2 + Q_l^* \left(\frac{U}{U_0}\right) + Q_Q^* \end{cases}$ $p = [R_s, X_s, X_m, R_r, X_r, H, A, B, K_{pm}, M_{lf}, P_p^*, P_z^*, Q_Q^*, Q_z^*]^T$

$$\hat{y}[k] = C_d(p_d)x[k] + D_d(p_d)u[k] \tag{29}$$

三、辨識模型參數

(一) 解析法

使用解析法作負載模型參數計算有 6 個步驟，分別為：

步驟 1：建立負載模型之微分-代數方程式

$$\dot{x}(t) = f(x(t), y(t), p_c) \tag{24}$$

$$\hat{y}(t) = g(x(t), p_c) \tag{25}$$

其中 x 為狀態變數， $y = [P \ Q]^T$ 為匯流排負載， p_c 為連續時間之負載模型參數。

步驟 2：將微分-代數方程式作線性化，轉換為連續時間之狀態空間表示法。

$$\dot{x}(t) = A_c(p_c)x(t) + B_c(p_c)u(t) \tag{26}$$

$$\hat{y}(t) = C_c(p_c)x(t) + D_c(p_c)u(t) \tag{27}$$

步驟 3：再將連續時間之狀態空間表示法轉換為離散時間之狀態空間表示法。

$$x[k+1] = A_d(p_d)x[k] + B_d(p_d)u[k] \tag{28}$$

步驟 4：將離散時間之狀態空間表示法轉換為差分方程式，並整理為超定線性聯立方程式(Overdetermined Linear Equations)。

$$Ap_d = b \tag{30}$$

步驟 5：以線性最小平方誤差法(Linear Least Square Error Method)，求解離散時間之負載模型參數 p_d 。

步驟 6：最後，將解離散時間之負載模型參數 p_d ，轉換為連續時間之負載模型參數 p_c 。

(二) 迭代法

在多維連續的參數空間裡識別出實際模型的參數，困難點在於誤差函數一般存在好幾個局部極小值，我們採用非線性最小平方最佳化程序來決定欲識別的模型參數 p ，使得誤差函數最小化。因此將模型參數識別作為一非線性最小平方模型的擬合問題(Fitting Problem)。

$$\min_p \varepsilon(p) = \min_p \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \varepsilon_k^2(p) \quad (31)$$

其中 n 為用於估測的樣本總數； $\varepsilon_k(p) = y(k) - \hat{y}(k)$ 為測量值 $y(k)$ 和估測值 $\hat{y}(k)$ 之間的誤差； y 為匯流排之有效功率 P 或無效功率 Q 。當 ε 函式的值為全域極小值或是局部極小值時，特定的 p^* 組合即為該 ε 函式的係數全域或是局部最佳解。所有的非線性最佳化都是用迭代方法計算，藉由迭代過程獲得參數 p ，必須先計算梯度 (Gradient) 和 Hessian 來求估測模型誤差的最小值。首先假設函式 ε_k 可微分，將函式 ε_k 以下列有效泰勒展開式表示，其中 J 為雅可比矩陣 (Jacobian Matrix)。

$$\varepsilon_k(p + \delta_p) = \varepsilon_k(p) + J(p)h + O(\|\delta_p\|^2) \quad (32)$$

則梯度 $\varepsilon'(p)$ 和 Hessian $\varepsilon''(p)$ 可分別整理為式(33)和式(34)。

$$\frac{\partial \varepsilon(p)}{\partial p_i} = \sum_{k=1}^n \varepsilon_k(p) \frac{\partial \varepsilon_k(p)}{\partial p_i} \quad (33)$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon(p)}{\partial p_i \partial p_j} = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial \varepsilon_k(p)}{\partial p_i} \frac{\partial \varepsilon_k(p)}{\partial p_j} + \varepsilon_k(p) \frac{\partial^2 \varepsilon_k(p)}{\partial p_i \partial p_j} \right) \quad (34)$$

基於某些物理自變數，可以對參數加入一些限制條件，限制條件包含線性方程式限制 ($A * p = b$) 和邊界限制 ($lb_i \leq p_i \leq ub_i$)，其中 lb_i 及 ub_i 分別為參數 p_i 的下界與上界。以 ZIP 負載模型為例，參數的線性方程式限制為 $p_1 + p_2 + p_3 = 1$ 及 $q_1 + q_2 + q_3 = 1$ ；邊界限制為 $0 \leq p_i \leq 1$ 、 $0 \leq q_i \leq 1$ 。

非線性實值函數平方總和的多變數函數，可用 Levenberg-Marquardt(LM)演算法以迭代方式找出函式的極小值，此演算法已成為解非線性最小平方問題的標準方

法。LM 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。當現行解離正確解很遠時，LM 演算法表現得類似於梯度下降法：很慢但收斂；當現行解接近於正確解時，其表現變為高斯-牛頓法。

ε 為參數向量 $p \in \mathcal{R}^m$ 映射至估測向量 $\hat{x} = f(p)$ ， $\hat{x} \in \mathcal{R}^n$ 的函式關係，已知初始參數 p_0 及實際量測向量 x ，LM 演算法欲解出最佳向量 p^+ 滿足函式 ε ，也就是使誤差平方 $\varepsilon_k^T \varepsilon_k$ 最小化，其中誤差 $\varepsilon_k = x - \hat{x}$ 。LM 演算法的基礎為在 p 的鄰域 ($\|\delta_p\|$ 足夠小時) 對 ε 作線性近似，其泰勒展開式為：

$$\varepsilon_k(p + \delta_p) = \varepsilon_k(p) + J(p)\delta_p \quad (35)$$

其中 J 為 Jacobian 矩陣。與所有的非線性最佳化方法相同，LM 演算法的迭代過程為：從初始點 p_0 對 ε 開始計算得到一連串 p_1, p_2, \dots ，其收斂至局部極小值 p^+ 。因此需在每一步找到 δ_p 來最小化，

$$\|x - \varepsilon(p + \delta_p)\| \approx \|x - \varepsilon(p) - J\delta_p\| = \|\varepsilon_k - J\delta_p\|$$

所求 δ_p 即為線性最小平方問題的解：當 $J\delta_p - \varepsilon_k$ 正交於 J 的行空間時，即可得到極小值，其使得 $J^T(J\delta_p - \varepsilon_k) = 0$ ，而得到正規方程式的解 δ_p 。

$$J^T J \delta_p = J^T \varepsilon_k \quad (36)$$

上式左側矩陣 $J^T J$ 為近似 Hessian，也就二階導數矩陣的近似項。LM 演算法實際上是解對式(36)稍作變化的增廣正規方程式：

$$\mathcal{N} \delta_p = J^T \varepsilon_k \quad (37)$$

\mathcal{N} 的非對角線元素與相對應的 $J^T J$ 元素項相

同，而對角線的元素則定義為 $\mathcal{N}_{ii} = \mu + [J^T J]_{ii}$ ，其中 $\mu > 0$ 。改變 $J^T J$ 對角線元素的策略稱作阻尼(Damping)，而 μ 為阻尼參數。假如更新數向量 $\mathbf{p} + \delta_{\mathbf{p}}$ 可使得誤差 ϵ_k 減小，則更新可被接受且繼續以此下降阻尼參數重覆程序；相反地，若阻尼參數為增加的，則重新解增廣正規方程式，迭代至找到一個可使誤差減小的 $\delta_{\mathbf{p}}$ 值為止。

在 LM 演算法中，每一次的迭代都會調整阻尼參數，以確保減小誤差 ϵ_k 。假如阻尼值很大，矩陣 \mathcal{N} 幾乎為對角且 LM 的更新步幅(step) $\delta_{\mathbf{p}}$ 接近梯度下降方向，此時要減小 $\delta_{\mathbf{p}}$ 的大小；若阻尼值很小時，LM 的步幅則近似可適用於線性問題的二次步幅。阻尼也可處理 Jacobian 矩陣秩不足時， $J^T J$ 因此為奇異的情況。LM 演算法具備轉換的能力，當離極小值很遠時，其採用緩慢的下降方法；而在接近極小值的鄰域時，其可快速收斂。LM 演算法為一個適應型方法，因為它可控制本身阻尼值：當步幅無法減小誤差 ϵ_k 時，則其增加阻尼值；反之，則減小阻尼值。阻尼參數影響步幅的方向及大小， μ 的初始值受 A_0 元素大小的影響，即：

$$\mu_0 = \tau * \max_i \{a_{ii}^{(0)}\} \quad (38)$$

τ 值由使用者決定，一般來說， τ 值介於 $10^{-6} \sim 1$ 之間。若 p_0 已經很近似於 p^* 時，則選擇較小的 τ 值(10^{-6})；反之則選 $\tau = 10^{-3}$ 或者更大的 τ 。

四、監錄量測法執行與驗證

本研究團隊已自行開發一套負載模型參數識別程式 LM_ID，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，用以識別於文獻中提到的各種負載模型。本節列舉四個負載模型，分別是靜態 ZIP 負載模型、靜態 PSS@ E IEEE 負載模型、動態一階感應電動機負載模型、線性動態負載模型，係為常見且廣為引用的負載模型。下列實測資料說明驗證結果。

由彰化 P/S 於民國一〇三年五月廿一日下午 16 點 59 分 53 秒監錄之事件資料檔案，應用靜態 ZIP 模型之有效功率負載模型，經辨識得到參數分別為： $a_p = 0.0741, b_p = 0.9259, c_p = 0$ ，其驗證之結果如圖 2 所示。其中虛線為實際量測量值，實線為該負載模型之估測結果，其相對誤差 0.8617%。若使用靜態 PSS@ E IEEE 有效功率負載模型，識別後參數分別為： $a_1 = 0.0487, a_2 = 0.2562, a_3 = 0.6951, n_1 = 1.3227, n_2 = 1.1489, n_3 = 1.0344$ ，其驗證之結果如圖 3，其中虛線為測量值，實線為該負載模型之模擬輸出，所得相對誤差為 0.8617%。

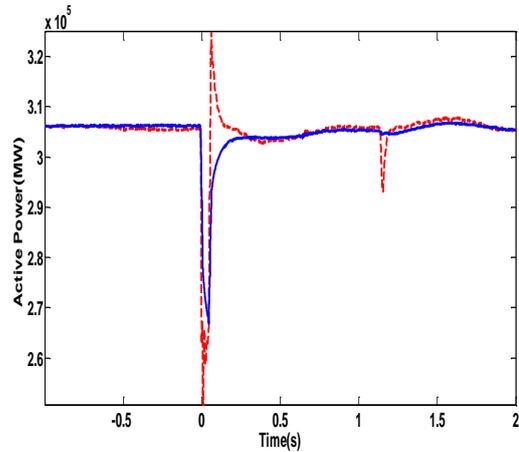


圖 2 靜態 ZIP 負載模型於彰化 P/S

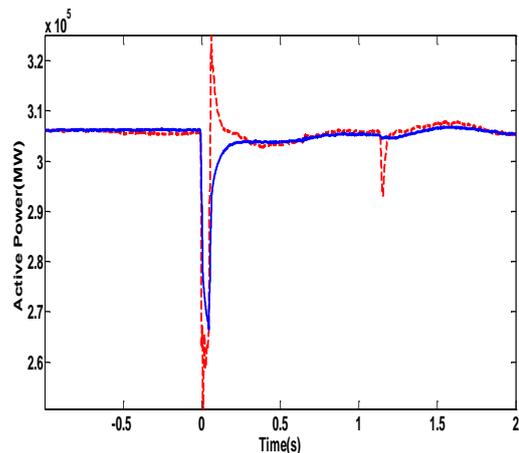


圖 3 靜態 PSS/E IEEE 負載模型於彰化 P/S

若以同一筆事件資料記錄檔案，應用到動態一階感應電動機模型之有效功率負載模型，其參數經識別後，參數為： $K_{pv} = 2.1077, T_{pp} = 0.016, T_{pv} = 0.1339$ 。驗證之結果如圖 4 所示。其中虛線為測量值，實線為該負載模型之

估算結果，相對誤差為 0.8673%。最後，採用線性動態模型之有效功率負載模型，經識別後參數分別為： $N_{ps} = 0.4856$ ， $N_{pt} = 1.5915$ ， $T_p = 0.0347$ ，其驗證之結果如圖 5 所示。其中虛線為測量值，實線為負載模型之模擬輸出，相對誤差為 0.4937%。

前述四種負載模型，經參數識別後，估測模擬結果與實測值均相當接近，其中，尤以線性動態負載模型所估測的模擬結果為較佳。

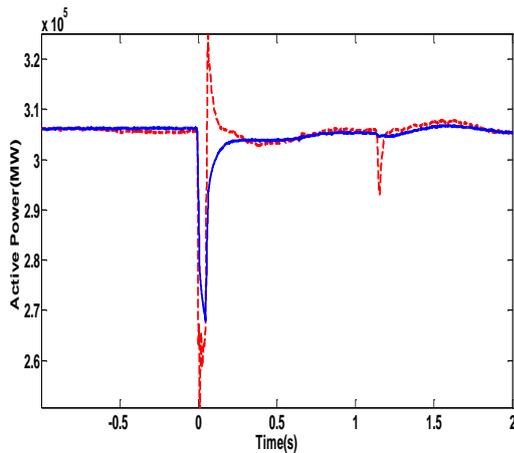


圖 4 動態一階感應電動機負載模型於彰化 P/S

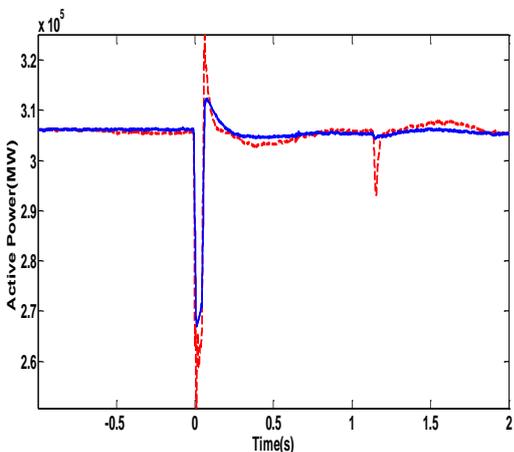


圖 5 動態線性負載模型於彰化 P/S

五、監錄量測法優缺點

監錄量測法的優點，是直接記錄測量點的電壓、電流、有效功率與無效功率等數據資料，即時建構負載模型及辨識參數。然而，監錄量測法的缺點，是依據電力系統裡某個匯流排的資料量測所建立之負載模型，並不能保證可應用到其他

匯流排。除非那些未加以測量的匯流排之負載成分，和已進行數據量測的匯流排之負載成分，相當相似。另一個缺點，是依據辨識而得到的負載模型，監錄量測法經計算所得到的數值結果，從數學的觀點來看雖可以逼近實際量測值，但從物理的角度來說，仍無法確切地解釋該負載模型在電力系統裡所代表負載實體之意義。

六、監錄量測法注意事項

採用監錄量測法建立負載模型，CIGRE 提供了八項建議^[9]：

- (一) 量測數據：辨識負載模型，往往依不同的電力系統分析之研究分析項目，來決定擷取電力系統數據資料的何種形式。一般而言，均方根值所表示之電力系統數據資料，就足以建構負載模型，不需要去取得瞬間值。估算負載模型的電力系統數據資料，大都是取自發生故障偶發或人為觸發事件後，電力系統所記錄到的三相電壓和電流的均方根值、相角、電力系統頻率。運用這些數據資料，將可以進一步推算出有效功率及無效功率。
- (二) 測量位置：CIGRE 建議在一次、二次變電站，進行電力系統資料數據測量。資料數據測量的時間長度，則取決於該負載模型將為應用分析的項目。若要進行電力系統短時電壓穩定度分析，則 2 秒的量測數據資料已足夠建立適當的負載模型；若要進行頻率穩定度的分析，則需要量測到 10 秒數據資料。若在電力系統施以人為觸發事件，來取得建立負載模型所需之電力系統數據資料，一般而言在實務上較為困難。CIGRE 建議可以採用過去歷史數據資料，來進行負載模型參數估算。但要注意這些歷史數據資料中，電壓、有效功率與無效功率的變動量要足夠大，才得以完成負載模型辨識。
- (三) 量測方式：電力系統的數據資料的量測與記錄，可以使用數位故障記錄器、及電力品質分析儀。而感測儀錶可以將三相即時電壓與電流瞬間值，轉換成均方根值。在擷取電力

系統的數據資料時，這些量測設備的反應時間與取樣頻率，扮演著重要的角色。因為電力系統故障清除時間約在 70 ms 到 250 ms 之間，且量測設備的反應時間一般約在 10ms 到 50ms 之間，則取樣頻率在單一週波內，應高於有 64 個取樣點。

- (四) 訊號處理：電力系統有效功率、無效功率、電壓與頻率等數據資料，不僅需要夠迅速的取樣頻率，仍需要一些訊號處理技術，像是離散傅立葉轉換滑動視窗、移動平均值、和重取樣技術。如要建構靜態負載模型，則取樣頻率建議設為每週期完成 0.5 至 1 個取樣點；若要建構動態負載模型，則取樣頻率建議設為每週期完成 50 到 60 個取樣點。
- (五) 人為觸發事件測試：若是藉由故障偶發事件取得電力系統數據資料，所能蒐集的數據資料較為有限。因此，我們可藉由變壓器分接頭切換、與並聯電容與電抗切換，視作電力系統擾動或偶發事件，從而獲得量測數據以進行監錄量測法。然而，藉由人為觸發事件，所量測得到的電壓與功率變動並不大，所得的數據資料，只能用於建立靜態負載模型。
- (六) 負載模型架構與初始值：在監錄量測法中，負載模型之參數可使用非線性最佳化演算法來估算。雖監錄量測法可以適用在建立靜態負載模型，和簡單的動態負載模型，若要應用建立複合負載模型，則負載模型參數勢必會增加，如何適切地設定這些負載模型參數之初始值，就會顯得相當重要。
- (七) 連續監測：過去幾年來，儀器的量測技術，記錄記憶體容量，以及建置於電力系統的量測儀器數量，均逐年增加，大大提升了連續記錄電力系統量測數據的質與量。如此一來，可以讓電力系統的數據資料記錄得更完整、更完善，也可進一步幫助我們求得更適合的負載模型。然而，更長時間記錄的數據資料，並非絕對適合。因為一旦當量測到的電壓、頻率開始變動後，原有的負載特性，將會隨著量測時間的進展，也隨之變動。

- (八) 低壓卸載：大多數的電力系統都設有低壓卸載保護。當電力系統的電壓過低且低電壓持續時間過長，電力系統就會開始卸除負載。除非建立的負載模型也涵蓋了低壓卸載的負載，否則當量測電壓低於額定電壓 80%，所記錄到的電力系統數據資料，CIGRE 建議不予使用。

七、負載模型參數多重解 - 高原現象

當我們以監錄量測法，進行負載模型參數估算時，經由負載模型計算所求得的功率，我們希望能夠和實際測量得到的功率數值，兩者之間的誤差是愈小愈好。若我們使用基於一次梯度方法進行上述誤差函數之最佳化，所求解負載參數向量時，誤差函數往往容易陷於局部最佳解。同時所求得的負載參數向量，也將有出現多重解的可能性。所得到的結果來看，使用監錄量測法和最佳化所求得的負載參數向量多重解，彼此不同。另外，每一個負載參數向量也是位於目標函數局部最小值，附近的無限組多重解的其中之一。這個現象又稱為高原現象^[8]。如果目標函數在局部最小值存在一片大高原，則不同的初始值，將會收斂得到具有幾乎相同的目標函數值，但彼此不同的參數解。這些最佳解看似為多重最佳化的結果，但實際上是位在一個局部最佳解析解的鄰近區域。

高原效應的檢視可以說明如下。首先，包括負載模型的電力系統可表示為：

$$\dot{x}(t, p) = f(x(t, p), u(t), p) \quad (39)$$

$$x_0 = x(t_0) = \Gamma(p)$$

$$y(t, p) = g(x(t, p), u(t), p) \quad (40)$$

其中， x 是狀態變數向量、 u 是模型輸入向量、 y 是模型輸出向量、 p 則是 n 維負載模型參數向量。 f 、 g 、和 Γ 則是向量 p 和 t 的微分非線性向量函數。如果使用靜態負載模型，則動態微分代數方程式可以簡化成代數方程式。

接著我們可以使用局部可辨識度 (Local

Identifiability) 的觀念，來分析高原效應。先去計算負載模型參數的輸出軌跡靈敏度 (Output Trajectory Sensitivity)，定義為：

$$J(N \times n) = \frac{\partial Y(t)}{\partial p} \quad (41)$$

若使用靜態負載模型，計算輸出靈敏度 J 是相當直接；若採用動態負載模型，對於負載模型第 i 個參數，則其輸出敏感度 J_i 為

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial x(t)}{\partial p_i} \right) = \frac{\partial f(x(t, p), u, p)}{\partial x} \left(\frac{\partial x(t)}{\partial p_i} \right) + \frac{\partial f(x(t, p), u, p)}{\partial p_i} \quad (42)$$

$$J_i(t) = \frac{\partial y(t)}{\partial p_i} = \frac{\partial g(x(t, p), u, p)}{\partial x} \left(\frac{\partial x(t)}{\partial p_i} \right) + \frac{\partial g(x(t, p), u, p)}{\partial p_i} \quad (43)$$

量測數據結果的局部可辨識度之定理為：一個負載模型在參數向量為 p^* 時，若該量測向量 y_m 為局部可辨識，則其靈敏度矩陣 J 為滿秩 (Full Rank)。靈敏度矩陣 J 的秩 (Rank)，可以使用奇異值分解 (Singular Value Decomposition) 求得。然而若能取得量測結果的雜訊進一步相關資訊，像是變異數 (Variance) 或是訊噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 等，皆能夠有助於 J 矩陣的秩。

奇異值為 0 的可能性來自兩個情況，其一是負載模型變數對模型輸出沒有影響；其二是該負載模型變數和其他變數呈現共線性 (Colinearity) 或是線性相依 (Linear Dependency)。相同地，近乎 0 的奇異值，就會導致該負載模型變數對模型輸出幾乎沒有影響，或是該負載模型變數和其他變數較為共線或線性相依。而共線性特性，使得這群負載模型參數雖可以辨識，但由於參數間彼此強烈地互動聯結，就不易於辨識個別的負載模型參數。特別是當量測時存在的噪音及雜訊，將會讓參數辨識更加困難。參數之間的共線性或相依，可以透過相關度矩陣 (Correlation Matrix) 來觀察。若 $\phi(i, j)$ 是相關度矩陣的非對角線元素，意義為參數 i 和參數 j 彼此的相關，若其值

為 1 或 -1，則表示參數 p_i 和 p_j 將不能夠個別辨識出來。若 $\phi(i, j)$ 愈接近 1 或 -1，則表示這兩個參數 p_i 和 p_j 高度相依，將不易被辨識出來。

因應負載模型參數多重解的高原現象，有下列方法：使用較為簡化的負載模型以減少模型參數的維度、加入模型參數之上下極限以縮減參數求解空間、配合元件聚集法以瞭解負載模型參數之特性。

八、基於人工智能算法

以監錄量測法，進行負載模型的另一種方式，是使用人工智能算法。此種方式可分為兩大類別。第一類，是先選定某個具有物理意義的負載模型，再利用像是適應性模擬退火法 (Adaptive Simulated Annealing)、基因演算法與演化計算 (Genetic Algorithms and Evolutionary Computing)、人群多樣化基因演算法 (Population Diversity-Based Genetic Algorithms) 等最佳化演算法，決定該具備物理意義之負載模型的參數^[10-11]。在此，人工智能演算法的角色，本質上和 Levenberg-Marquart 非線性最佳化演算法是相同的，都是在決定先前選定好具備物理性質的負載模型架構裡，所有的模型參數。

第二類人工智能演算法，直接以數學方式進行負載模型的描述，與第一類的概念，完全不同。前面在表 1 與表 2 各列出 5 種靜態負載模型，以及 11 種動態負載模型。這總共 16 種負載模型裡，即使各具有物理意義，但仍無法保證將電力系統負載的行為，足以完全捕捉下來。這個論點，支持了以人工智能算法建構負載模型的第二類，即直接進行電力系統輸入與輸出變數之數學函數映射，並非去預先選定某個具備物理意義的負載模型。這類的演算法，包括類神經網路 (Artificial Neural Network)、模糊系統 (Fuzzy Systems)、決策樹 (Decision Trees)^[12-14]。

人工智能算法的另一個應用，是協助解負載模型參數高原現象多重解的對策。以資料挖掘的技術，建構負載模型參數之領域知識，瞭解負載模型參數的變動和電力系統分析之間的關連性。欲建構負載模型參數之領域知識，此負載模

型參數領域知識，將提供充分的資訊，讓電力系統工程師，在進行暫態穩定度、小訊號穩定度與電壓穩定度等電力系統分析時，設定適當的負載模型參數，進而能夠獲得更為適切的分析結果。

參、元件聚集法

元件聚集法是一個「由下而上」的方式，選定一個匯流排之後，電力公司逐一從底下的個別負載進行調查，一一往高電壓層級的匯流排進行負載的聚集與整合。先進行負載類別的分類，例如：住宅用電、商業用電、工業用電、農業用電，每一類別具有類似的負載組成和特性。在不同的用電類別中，定義出各區所使用的典型負載元件。對於負載元件的電氣特性描述，一般皆以負載有效功率、無效功率表示為電壓、頻率的相依函數，進而求取元件的數學參數。然後，再依據線性重疊理論，由負載組成及網路排列等資料，經由聚集過程，從而建立該選定匯流排的複合負載模型。元件聚集法的實施步驟如圖 6：

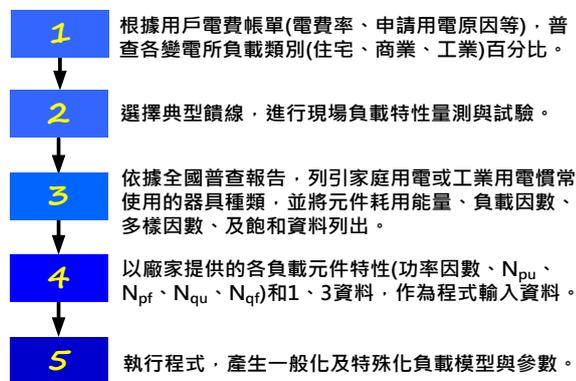


圖 6 元件聚集法

一、理論基礎

在元件聚集法中，首先每一變電所需提供負載類別混合資料，即住宅用電、商業用電、工業用電、農業用電所佔的比例。再來，該負載類別混合接著被分離成個別用戶負載設備，例如對商業用電之冰水機、壓縮機、電子設備、螢光燈等，住宅用電之單相空調主機、風扇、電視、電爐等。最後，最後末端使用者被聚集為負載模型元件，例如馬達、電子產品、電阻性負載等。

各類別之元件組成百分比及各元件特性資料，可由權重法及最小平方法求得。再由個別負載元件的參數特性 $N_{pu}^{(i)}$ 、 $N_{qu}^{(i)}$ 求得複合負載的合成參數 N_{pu} 、 N_{qu} 。電壓變動所引起複合負載特性的改變，可由下式決定：

$$P_1^{(i)} = P_{10} \left(\frac{U_1}{U_{10}} \right)^{N_{pu}^{(i)}} \tag{44}$$

$$Q_1^{(i)} = Q_{10} \left(\frac{U_1}{U_{10}} \right)^{N_{qu}^{(i)}} \tag{45}$$

$$P_1 = \sum P_1^{(i)} = P_{10} \left(\frac{U_1}{U_{10}} \right)^{N_{pu}^{(i)}} \tag{46}$$

$$Q_1 = \sum Q_1^{(i)} = Q_{10} \left(\frac{U_1}{U_{10}} \right)^{N_{qu}^{(i)}} \tag{47}$$

$$P_{10} = \sum P_{10}^{(i)} \tag{48}$$

$$Q_{10} = \sum Q_{10}^{(i)} \tag{49}$$

$$N_{pu} = \sum N_{pu}^{(i)} \frac{P_1^{(i)}}{P_1} \tag{50}$$

$$N_{qu} = \sum N_{qu}^{(i)} \frac{Q_1^{(i)}}{Q_1} \tag{51}$$

其中， $P_1^{(i)}$ ：第 i 個負載元件所消耗之有效功率； $Q_1^{(i)}$ ：第 i 個負載元件所消耗之無效功率； P_1 ：所有負載元件所消耗之有效功率總和； Q_1 ：所有負載元件所消耗之無效功率總和； $N_{pu}^{(i)}$ ：第 i 個負載元件之有效功率/電壓相依參數； $N_{qu}^{(i)}$ ：第 i 個負載元件之無效功率/電壓相依參數； N_{pu} ：複合負載元件之有效功率/電壓相依參數； N_{qu} ：複合負載元件之無效功率/電壓相依參數。

利用方程式(44)~(51)，負載分類區的負載參數如 N_{PUR} 、 N_{QUR} (住宅區)、 N_{PUC} 、 N_{QUC} (商業區)、 N_{PUI} 、 N_{QUI} (工業區)及 N_{PUA} 、 N_{QUA} (農業區)，再以 (52)、(53)式求取變電所複合負載參數合成值。所得結果，為單一匯流排上負載群的參

數合成。

$$N_{pu} = \frac{N_{PUR} \sum P_R + N_{PUC} \sum P_C + N_{PUI} \sum P_I + N_{PUA} \sum P_A}{\sum P_R + \sum P_C + \sum P_I + \sum P_A} \quad (52)$$

$$N_{qu} = \frac{N_{QUR} \sum P_R + N_{QUC} \sum P_C + N_{QUI} \sum P_I + N_{QUA} \sum P_A}{\sum P_R + \sum P_C + \sum P_I + \sum P_A} \quad (53)$$

當負載類別混合資料及負載元件組成比例的資料收集齊全後，再連結各元件特性資料做為程式的輸入資料，一般元件的特性可由理論分析或實驗量測的得到。有效功率、無效功率相對於電壓和頻率的曲線在下列假設下可估算出特性係數：(1)設備元件的正常運轉等於額定電壓；(2)元件特性係數是在額定電壓下線性化所求得的值。曲線函數以泰勒級數展開並忽略高階項後可得：

$$\Delta P = \frac{dP}{dU} \Delta U + \frac{dP}{df} \Delta f \quad (54)$$

$$\Delta Q = \frac{dQ}{dU} \Delta U + \frac{dQ}{df} \Delta f \quad (55)$$

上述式中特性係數可在已知的電壓、頻率範圍內求得常數值。功率因數(PF)也是一個重要的特性係數如式(56)所示：

$$PF = \cos(\tan^{-1} \frac{Q_0}{P_0}) \quad (56)$$

$$N_{pu} = \frac{\frac{dP}{P_0}}{\frac{dU}{U_0}} \quad N_{qu} = \frac{\frac{dQ}{Q_0}}{\frac{dU}{U_0}} \quad (57)$$

$$N_{pf} = \frac{\frac{dP}{P_0}}{\frac{df}{f_0}} \quad N_{qu} = \frac{\frac{dQ}{Q_0}}{\frac{df}{f_0}} \quad (58)$$

二、元件聚集法優缺點

元件聚集法的優點，是它並不需要電力系統量測儀器設備，但依照調查結果，按實際負載比例及組合而直接得到負載模型。而主要的缺點，是在進行負載元件的調查，不僅需要大量且正確的負載資訊，而且大規模的調查也相當耗時，有其有一定的難度。另一個缺點是隨著調查時間拉長，在調查負載之當下，匯流排負載也隨時變動，故無法確實且迅速地蒐集到要聚集的負載元件所有資訊。以元件聚集法研究負載模型的特性，其優點為不須實測並可藉由基本健全之數學結構，將負載的特性予以模型化。如能完整地掌握負載的基本特性、負載組成、網路結構等統計資料，則可精確地求得負載的特性參數。

而其主要缺點為須聚集負載的類別資料及複合資料，而這些負載資料取得不易。實際系統中，連接於系統上之用電設備數量及種類易受時間、天氣及用戶的使用習慣而有所改變，無法精確掌握，使問題趨於不確定之統計因素，進而影響所得負載模型之準確性。

三、使用元件聚集法注意事項

實施元件聚集法以建立負載模型，CIGRE 提供了六項建議^[9]：

- (一) 建立聚集負載模型：可以由電費資料，或是藉由負載普查方式，將電力系統內的負載予以分類與記錄。通常負載種類只需分為三類即可：住宅類、商業類與工業類，每一個分類裡又有其相關的個別負載細項。然而工業類負載常因地而異，差異性甚大，因此對於工業類負載，不太容易去掌握負載細項與模型。相反地，住宅和商業負載差異性較小，故負載模型較可以掌握。
- (二) 負載類別成分：住宅類負載可以再分成五個細項，分別是電力電子負載、電阻性負載、節能照明負載、直接連接型單相/三相馬達負載、控制驅動型單相/三相馬達負載。
- (三) 負載資料型態：一旦決定了負載組成類別及元件，元件聚集法接下來就是決定這些負載

組成的比例，即個別負載所佔的百分比。這些佔比資訊可以由電費資料或負載普查取得。而這些負載的佔比資訊，也會因時間、季節而有所不同。

- (四) 個別負載組成成分之數學模型：大部分的聚集負載成分，可以用靜態負載模型來表示。包含直接連接型單相/三相馬達負載，則 CIGRE 建議包含感應電機負載模型；若包含控制驅動型單相/三相馬達負載，則以定功率型的靜態負載，或特定的電力電子負載模型。
- (五) 配電負載：連接到中、低電壓配電站的各式負載，可以用一個聚集形式的負載模型來表示。然而，這個聚集形式的負載模型，也應涵蓋架空線路、變壓器、與各式分散式發電電源等效模型。為了要能準確建立中、低電壓配電站的聚集形式負載模型，上述設備的模型，也必須相當精準。
- (六) 資料漏失：在取得聚集負載資料過程中，若有些資料可能會漏失，則以常用或有統計意義的數值來取代。甚至也可以重新選擇負載模型架構，得以避開漏失數據的資料項目。

四、以 LOADSYN 執行元件聚集法

LOADSYN 是由 EPRI 所開發之負載模型合成軟體，其以元件聚集法作負載模型識別與參數估算，它可將電力公司之負載類別混合資料轉換為標準電力潮流及暫態穩定度分析程式所需之輸入資料，LOADSYN 可提供精確的負載模型作為電力系統模擬使用，使得輸電系統在運轉或規劃階段，能更精準地預測電力系統之動態行為。

LOADSYN 的執行分為兩個階段，第一階段為執行 GLDMOD 程式，第二階段為執行 SLDMOD 程式，如圖 7 所示。執行 GLDMOD 程式所需的輸入資料包括：匯流排負載類別混合資料(Load Class Mix Data)；各類別之負載元件組成比例資料(Load Component Composition)；負載元件特性資料(Load Component Characteristic Data)及 GLDMOD 控制資料檔。GLDMOD 程式的執行結果將作為 SLDMOD 程式的輸入資料。

SLDMOD 程式的輸入資料還包括電力潮流資料、選定之負載模型、穩定度之動態模型參數以及 SLDMOD 控制資料檔。SLDMOD 程式的輸出結果可用於修改或增加電力潮流與動態模型資料，以供電力系統之電力潮流與動態響應模擬。

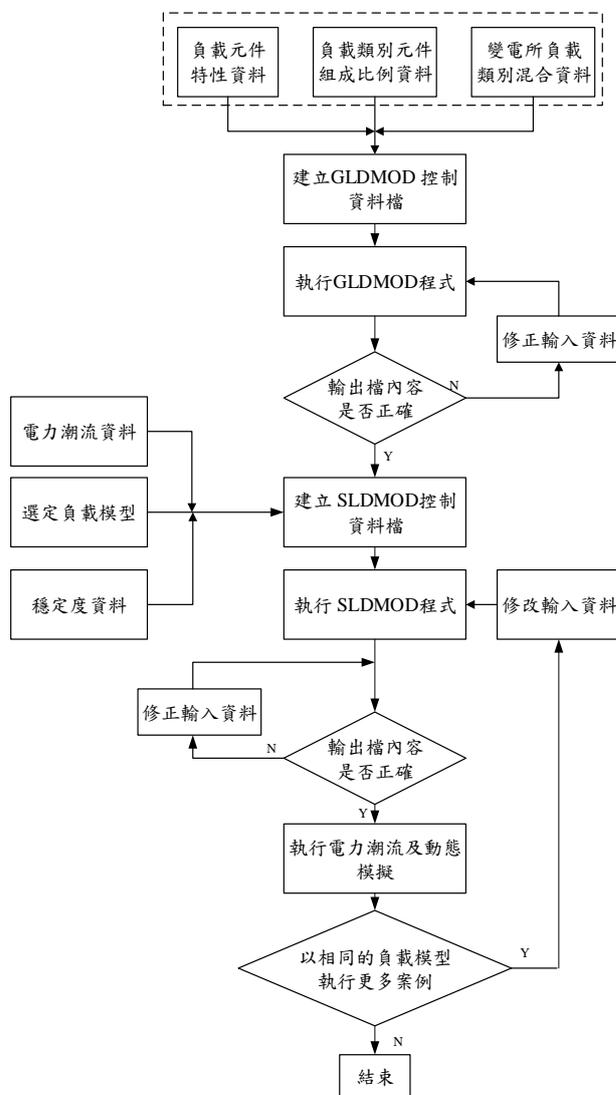


圖 7 使用 LOADSYN 執行元件聚集法流程

肆、結論與建議

一、主要成果

本文介紹負載模型建構方法：監錄量測法與元件聚集法。並針對這兩種負載模型建構方法，說明其原理、步驟、及優缺點。本文所提及的負載建構方法，可歸納如圖 8 所示。本文同時也列出國際大電力協會(CIGRE)對電力工程師在實施上述監錄量測法與元件聚集法時的一些建議。

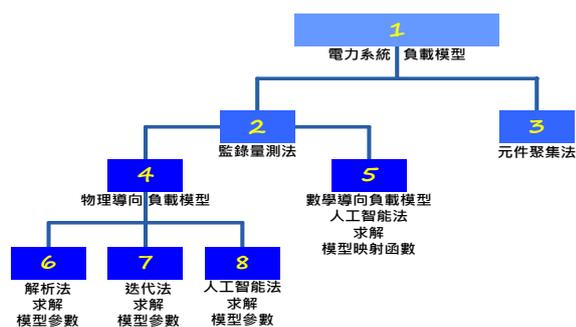


圖 8 電力系統負載模型建構

本研究以台電公司所裝設之同步相量量測裝置，蒐集西元 2007 年 10 月至 2014 年 8 月期間 11 站 P/S、D/S 之事件記錄資料，以數位信號處理，數值方法，系統參數識別，最佳化理論、與統計方法等技術，建立符合不同區域之負載動態模型。並由實測結果與模擬波形之相互比對驗證。研究主要成果如下：

- (一) 分析各負載模型建立與驗證之方法、使用之模型種類與特性，並比較各模型在分析使用上的精確性。探討之負載模型可分為：
 - A. 靜態負載模型：包含 s1.指數模型，s2.PSS@ E IEEE 靜態模型，s3.ZIP 模型，s4.EPRI 模型，與 s5.ZIP-指數模型。
 - B. 動態負載模型：包含 d1.一階動態負載模型，d2.二階動態負載模型，d3.三階動態負載模型，d4.指數恢復模型，d5.適應負載模型，d6.線性動態負載模型，d7.一階感應電動機負載模型，d8.複合負載模型(RC 電路+感應 電動機)，d9.ZIP-感應電動機負載模型，d10.GZIP-感應電動機負載模型，d11.EPRI 複合負載模型。
- (二) 調查台電系統 P/S、D/S 等變電所，依所屬位置及輸電線路用電類型，進行負載屬性調查與分類。
- (三) 蒐集 11 站 P/S、D/S 之事件記錄資料，自行建立批次作業之資料處理程式，以數位信號處理，數值分析，系統參數識別與統計方法等相關技術，建立符合不同區域，不同動態特性，與不同階數之負載動態模型，完成重點變電所各負載模型之參數識別。
- (四) 利用元件聚集法之 LOADSYN，識別台電重

點變電所之 IEEL、CLOD 及 CMOTOR (CIM5)負載模型參數。

- (五) 分析各種負載模型之參數辨識之統計特性(包含期望值與標準差等)。並將實測結果與模擬波形相互比對，驗證各種負載模型之準確性。
- (六) 研究團隊自行完成開發之負載模型參數識別程式的功能，及與 EPRI 之 LMDPPD 程式之功能作比較。利用 FORTRAN 與 FLECS 語法建立使用者自訂負載模型，加入 PSS@ E 動態模擬程式，已建立完成之使用者自訂負載模型包括:靜態指數模型、動態一階至三階轉移函數模型、動態指數恢復模型、動態適應負載模型、動態線性負載模型。

二、結論與建議

- (一) 透過 PMU 同步相量監測系統實測與調查負載特性，並以自行開發之分析程式，建立動態負載模型，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，可避免不必要之投資規劃。
- (二) 由於變電所低壓側匯流排上有裝置無效功率補償裝置，導致負載暫態紀錄器測得負值的無效功率電力量，無法真實反應負載之無效功率變化。未來可將事故時間前後電容器投入情形及容量值，以釐清各變電所監測位置之負載無效功率實際狀態。
- (三) 使用監錄量測法所求得的負載參數向量可能有多重解，彼此不同。因應負載模型參數多重解的高原現象，有下列方法：使用較為簡化的負載模型以減少模型參數的維度、加入模型參數之上下極限以縮減參數求解空間、配合元件聚集法以瞭解負載模型參數之特性。另一個多重解高原現象的對策，是建構負載模型參數之領域知識，瞭解負載模型參數的變動和電力系統分析之間的關連性。欲建構負載模型參數之領域知識，可以使用人工智慧、資料挖掘等相關技術。此負

載模型參數領域知識，將提供充分的資訊，讓電力系統工程師，在進行暫態穩定度、小訊號穩定度與電壓穩定度等電力系統分析時，設定適當的負載模型參數，進而能夠獲得更為適切的分析結果。

- (四) 由匯流排層級之負載模型驗證可知，複雜模型雖可更完整表示實際負載之物理特性，但增加數值解收斂的困難度，也不一定可增加模型之精準度，因此匯流排之負載模型，在滿足允許誤差的範圍內，宜優先選用簡單的負載模型。
- (五) 元件聚集法所建立負載模型之精準度，較記錄量測法識別參數後之模型差。其主因為(i)聚集負載的類別資料及複合資料取得不易。(ii)實際系統中，連接於系統上之用電設備數量及種類易受時間、天氣及用戶的使用習慣而有所改變，無法精確掌握，使問題趨於不確定之統計因素，進而影響所得負載模型之準確性。
- (六) 建議於歲修時段，設計小規模人工故障，產生負載變動之完整記錄。以增加負載模型參數識別所需之有效樣本，確保負載模型之準確性。
- (七) 負載模型的準確度，會依(i)電力系統各地區負載之特性(工業區或商業區)，(ii)量測資料所記錄的時間點(尖峰或離峰時段)，以及(iii)採用不同種類的負載模型(靜態或動態負載模型)，而有所差異。以台電系統為例，要在數百個變電所決定負載模型準確度，可廣設相量量測單元(PMU)，並且長時間記錄量測資料後，再進行負載模型識別。並依據輸出結果的準確度，進行負載模型的取捨。或是針對未裝設 PMU 之變電站，運用分類樹等人工智慧方法，尋找最接近的負載模型。

伍、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。台電公司電力系規處莊政宏先生、吳蒼堯先生及調度處等諸位台電

專業人員，在研究期間對本研究內容及技術諮詢，特此致謝。

陸、參考文獻

- [1] L. Pereira, D. Kosterev, P. Mackin, D. Davies, J. Undrill and W. Zhu, "An Interim Dynamic Induction Motor Model for Stability Studies in the WSCC," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 1108-1115, November 2002.
- [2] 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 Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 1, pp.309-315, February 1993.
- [3] Jin-Cheng Wang, Hsiao-Dong Chiang, Chung-Liang Chang, Ah-Hsing Liu, Chang-Horng Huang and Chiung-Yi Huang, "Development of a Frequency-dependent Composite Load Model Using the Measurement Approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 1546-1556, August 1994.
- [4] Hsiao-Dong Chiang, Jin-Cheng Wang, Chiang-Tsung Huang, Yung-Tien Chen and Chang-Horng Huang, "Development of a dynamic ZIP-motor load model from on-line field measurements," *International Journal of Electrical Power & Energy System*, vol. 19, issue 7, pp. 459-468, 1997.
- [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 Transactions 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," *International Journal of*

- Electrical Power and Energy Systems*, vol. 30, issue 9, 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.
- [9] Y. Yamashita, S. Djokic, J. Matevosyan, and F. R. Resende, *et. al.*, "Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks – Scope and Status of the Work of CIGRE WG C406.5," in *IFAC 8th Power Plant and Power System Control Symposium*, Toulouse, France, 2012, pp. 405-410.
- [10] L. Rodriguze-Garcia, S. Perez-Londono, and J. Mora-Florez., "Particle swarm optimization applied in power system measurement-based load modeling," *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 2368-2375, 2013.
- [11] P. Regulski, D. S. Vilchis-Rodriguez, S. Djurovic, and V. Terzija, "Estimation of Composite load model parameters using an improved particle swarm optimization method," *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol. 30, no. 2, pp. 553-560, 2015.
- [12] A. M. Azmy, I. Erlich, and P. Sowa, "Artificial neural network-based dynamic equivalents for distribution systems containing active sources," *IEE Proceeding C*, vol. 151, no. 6, pp. 681-688, 2004.
- [13] A. Y. Abdelaziz, M. A. L. Badr, and A. H. Younes, "Dynamic load modeling of an Egyptian primary distribution system using neural networks," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 29, issue 9, pp. 637-649, 2007.
- [14] A. Miranian, and K. Rouzbehi, "Nonlinear power system load identification using local model networks," *IEEE Trans. On Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2872-2881, 2013.

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

地下電纜及附屬機電 QR-code 設備維護排程管理系統

Maintenance and Management Information System Integrated with QR-code for Power Transmission Cables and Ancillary Electrical Devices

尤子瑋*
Yu, Tzu-Wei

鄭財貫*
Cheng, Tsai-Kuan

許文*
Syu, Wun

廖吉義*
Liao, Chi-Yi

劉國才*
Liu, Go-tsai

蕭勝任*
Hsiao, Sheng-Jen

摘要

目前電力設備大多以派遣維護人員進行定期巡查，進行量測及製作表單記錄留存，並將發現異常之設備紀錄進行更修作業。然而，此種表單記錄不僅浪費時間及紙張，且無法查證時間的真實性，意即管理階層並無法確實得知該表單記錄上記載內容之正確性，不僅浪費許多不必要的人力成本支出，且對於巡查工作是否落實，難以確實掌握。

本研究係為一種電力設備維護管理系統，尤指利用 QR-code 管理現場電力設備，達到提高維護效率，降低人力成本的功效，同時保證維護作業的可靠性，對於電力設備管理階層來說是一個重要的管理平台。

Abstract

Periodically inspecting the electric power facilities is the main method to make sure of their functioning as required. Maintenance personnel are dispatched to regularly measure and record the data so as to identify the facilities which are not in normal function for necessary repair or replacement.

It takes a lot of time and paper work to put the inspection data on record. Besides, the superiors cannot easily check the correctness of the records. It does cost lots of manpower to obtain the correct data of these inspections.

In this paper, an electric power equipment maintenance and management system is proposed. By means of Quick Response-code Scheduling System, we aim to cut down the cost of manpower, improve maintenance efficiency, and ensure the reliability of maintenance. It would be an important management platform for maintenance of power facilities.

關鍵詞(Key Words)：快速響應矩陣碼(Quick Response Code)、智慧手機(Smart Phone)、輸電電纜(Power Transmission Cable)。

壹、前言

103 年本處正式接管新高港~五甲~高雄 345kV 電纜及相關附屬機電設備，其造價金額達

120 億餘元，全案分成 8 個標案進行，而在附屬機電部份就佔了 4 個標案之工程量，可見其規模之龐大與過往其他洞道附屬機電設備無法相提並論，而若要透過全案發包委外維護方式進行維護管理，除在台電事業部成立之後將帶來不可忽

*台灣電力公司高屏供電區營運處

視之維護成本，其長期忽視附屬機電維護之關鍵技術，在後續大林~新高港 345kV 系統上線之後，若不盡快研擬有效之因應對策，將帶來不可忽視之影響，故針對附屬機電此區塊，確實有部分自營處理及研究精進之必要。

貳、系統簡介與設備介紹

本 345kV 輸電線路從高港 E/S 經五甲 E/S 至高雄 E/S，全線電纜及附屬設備以潛盾、推管、明挖洞道、直井及分歧井等多種施工環境，洞道總長度約 20 公里，為目前全台灣最長的 345kV 地下電纜洞道，全部洞道有 9 個直井、27 個出入口、41 個電纜接續段及 4 個冷卻機房。在冗長的洞道中，全線於機房及洞道佈設洩波電纜，洞道成為無障礙無線電通訊系統，可供現場施工人員及消防救援人員使用。在電纜送電中，會有發熱問題，故全線採用光纖偵溫來監測電纜洞道是否有異常溫度，並利用四個冷卻機房製造冰水儲存於冰水槽，利用 HDPE 管冷卻水藉自然對流原理冷卻洞道，排除電纜送電所散發之熱量，以增加電纜使用壽命，減少電纜損失。另外，侷限空間中，為了有效控制所有通風、照明、排水及安全監控等，設立了中央監控系統及門禁管制，來確保洞道人員安全及維護良好供電品質。

參、關鍵技術分析

洞道附屬機電設備繁多，但無論其建構了多少設備，關鍵技術仍可區分成四個區塊：(1)訊號回授診斷、(2)現場控制設備診斷、(3)SCADA 訊號分析、(4)電力系統檢測。本章節將透過上述四個架構，將其維護管理方式分析如下：

一、訊號回授診斷：

新高港~五甲~高雄 345kV 附屬機電系統，全案透過 4 大 PLC 程控系統，掌管洞道 182 處控制盤及機房 200 餘項大小型設施，以設備數量統計，設備單元多達 1000 餘項之多，而訊號傳送在整體系統之角色，彷彿人體之神經與感知系

統，傳達 SCADA 所下達之命令與執行緊急停機、啟閉等動作。輸電維護人員對於此類技術向來較為陌生，惟訊號查修確是確認設備狀況與故障排除之重要環節，因此訊號回授診斷對策，乃是作好輔機系統維護之重要課題。

(一) 劃分故障區段：

要了解設備無法運轉或異常停機之確切狀況，第一步驟乃確認出故障之區段。任何數位訊號之傳送，皆由 CPU 控制 PLC 而產生，而 SCADA 除了監視目的之外，也可立即下達指令供 CPU 及 PLC 設備進行指令之執行，因此判斷 PLC 指令以及確認控制方案屬數位或類比，為縮短查找時間之第一要務。

(二) 了解所屬控制方案：

本章節先以數位訊號為例，其數位訊號控制乃屬單一 0、1 狀況之控制，而為利系統控制參考，又細分為 DI(數位輸入)及 DO(數位輸出)兩種，其控制原理如下圖 1、2 所示。

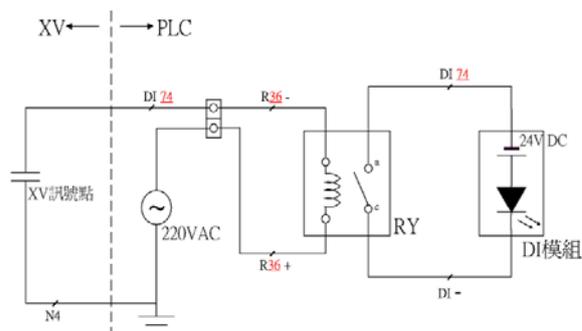


圖 1 DI 訊號之控制與回授流程

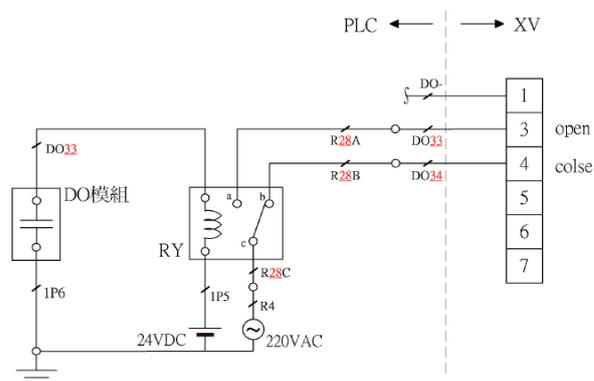


圖 2 DO 訊號之控制與回授流程

(三) 釐清控制電路故障或電源控制故障：

透過不斷的練習，維護人員將可了解，DI 控制之觸發電源屬現場設備提供，進而激磁控制盤 RELAY，讓預掛在 DI 模組內部之 24V 電源構成迴路，送一訊號給 PLC Module，俾利 CPU 獲得此一訊號及回傳 SCADA，若能反覆練習，即有能力去釐清故障起始點屬設備供電故障或者 RELAY 控制單元故障。

而 DO 訊號控制剛好相反，從圖 2 可了解，DO 訊號之切入皆由 SCADA 控制，透過內部模組收獲系統指令，將 DO 模組導通，構成 24V 電源送至控制 RELAY，而 RELAY 之 A 接點導通，將預掛好之設備動作電源(如:220V)送達設備本身，以執行相關動作。

二、現場控制設備診斷：

(一) 確認訊號抵達點：

要了解現場設備無法運轉或異常停機之確切狀況，第一步驟乃確認出訊號抵達位置，方能釐清是否單純屬現場控制設備故障或屬訊號傳輸異常狀況。圖 3 電路屬洞道設備最為簡單之控制流程，故以此圖做為案例，從圖可了解，PLC 所送達此處的訊號只有兩個：一個為低水位建立後之遠端強制啟動以及強制啟動兩台馬達之訊號源。因此，若確認低水位已建立且透過控制室人員遠端啟動訊號正常後，方能確認屬現場設備控制電路故障。

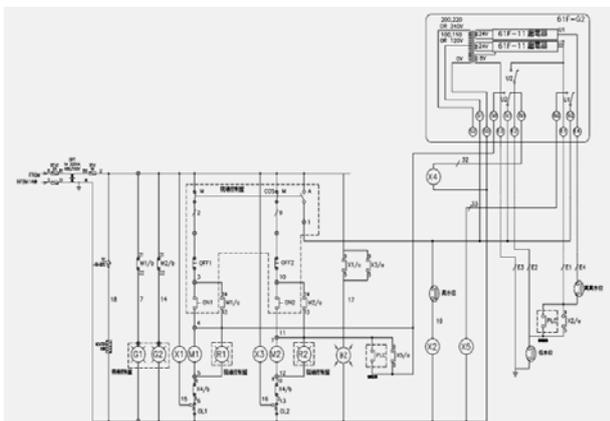


圖 3 交替循環之抽水馬達液位控制電路

(二) 確認設備絕緣狀況與供電狀況：

在進一步確認屬現場控制設備故障前，必須先確認設備絕緣狀況與電源供電狀況，排除上述之後再進行控制電路查修，避免方向錯誤，耗費大量查修時間。

(三) 釐清控制流程及故障停留點：

此部分需透過不斷的練習，熟讀電路圖之運作流程，並且透過時序圖之故障停留點，即可查找出故障控制單元，來進行故障設備更換，如圖 4 之控制電路時序圖 (Auto)。

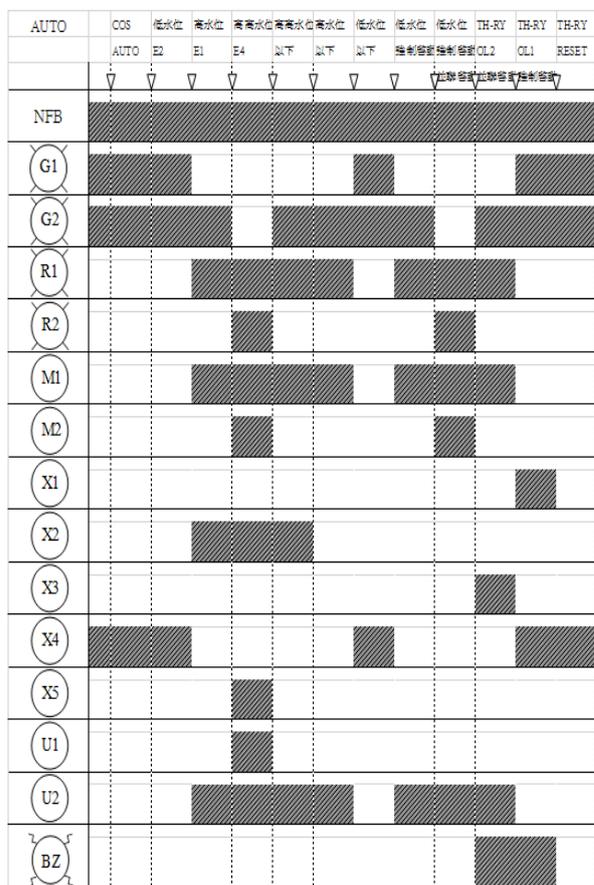


圖 4 控制電路時序圖(Auto)

三、SCADA 訊號分析：

新高港~五甲~高雄 345kV 洞道長達 20 公里，冰水機所製成之冰水透過 HDPE 管送至洞道內熱交換進行降溫，其控制主體分為：冰水迴路、冷卻迴路、循環迴路及相關蝶閥、流量控制。當 HDPE 管破損或相關不預警狀況發生時，為避

免擴大損壞範圍，主控室操作人員對於訊號的回授狀況，必須有進一步分析之能力，方能加快事故處理及盡快擬定查檢對策。本章節將以 104 年 1 月 7 日儲水槽極低水位警報案例進行分析。

(一) 指令屬人為或自動之確認：

新高港~五甲~高雄洞道冰水系統指令操作分為三種，1.現場控制盤啟動：此方案系統不留任何紀錄，只會在事件當下在 SCADA 圖控顯示設備運轉狀況，停機後即消失，但權限最高以利緊急情況操作。2.現場 Touchscreen 啟動：此方案系統會留下啟動紀錄，但不留下操作紀錄及訊號回授狀況，屬現場維護最常操作之方法。3.主控室啟動：此方案紀錄資料最為完整，除留下事件動作紀錄之外，對於操作訊號之狀況與回授，也會詳加記錄，故在系統診斷上最為仔細。

透過圖 5、圖 6 及啟動原則可了解，於 104 年 1 月 7 日下午 14 時 46 分時發生低低水位警報，伴隨著發生關閉蝶閥(XV)事件，而透過主控室 SCADA 了解，上述動作係系統自動運作，非人為操作而發生。而系統為何自動關閉蝶閥且與儲水槽低低水位是否有關連性，則必須進一步釐清。

2015/01/07 14:39:51	排氣風車 EAF32 控制輸出	停機	COS
2015/01/07 14:41:11	區域泵 ZP23 變頻器 手自動	手動	COS
2015/01/07 14:42:40	區域泵 ZP23 變頻器 手自動	手動	COS
2015/01/07 14:42:41	區域泵 ZP23 變頻器 手自動	手動	COS
2015/01/07 14:46:32	過埠機房 蓄冰水槽 LT201 超低水位ALM	警報	CFN
2015/01/07 14:46:46	洞道電動閥 XV214H 控制	開啟	COS
2015/01/07 14:46:47	洞道電動閥 XV215H 控制	開啟	COS
2015/01/07 14:46:53	洞道電動閥 XV214E 控制	開啟	COS
2015/01/07 14:46:55	洞道電動閥 XV215E 控制	開啟	COS
2015/01/07 14:47:16	洞道電動閥 XV214D 控制	開啟	COS
2015/01/07 14:47:17	洞道電動閥 XV215D 控制	開啟	COS
2015/01/07 14:47:48	洞道電動閥 XV215D 控制	關閉	COS
2015/01/07 14:47:49	洞道電動閥 XV215E 控制	關閉	COS
2015/01/07 14:47:50	洞道電動閥 XV214D 控制	關閉	COS
2015/01/07 14:47:50	洞道電動閥 XV214E 控制	關閉	COS
2015/01/07 14:47:51	洞道電動閥 XV214H 控制	關閉	COS
2015/01/07 14:47:52	洞道電動閥 XV215H 控制	關閉	COS
2015/01/07 14:51:47	過埠機房 蓄冰水槽 LT202 超低水位ALM	警報	CFN
2015/01/07 14:55:00	洞道電動閥 XV220H 控制	關閉	COS
2015/01/07 14:55:00	洞道電動閥 XV220I 控制	關閉	COS
2015/01/07 14:55:04	洞道電動閥 XV220G 控制	關閉	COS
2015/01/07 14:55:20	洞道電動閥 XV220G 控制	開啟	COS
2015/01/07 14:56:52	排水泵 SPS4_01B 運轉狀態	運轉	CFN
2015/01/07 14:56:53	排水泵組 SPS4_01 液位	異常	CFN
2015/01/07 14:57:57	洞道電動閥 XV220H 控制	開啟	COS
2015/01/07 14:57:58	洞道電動閥 XV220I 控制	開啟	COS
2015/01/07 14:59:01	排水泵組 SPS4_01 液位	低水位	OK
2015/01/07 14:59:01	排水泵 SPS4_01B 運轉狀態	停止	OK

圖 5 事件發生時警報紀錄

日期時間	NODE	事件敘述
2015/01/07 13:41:57	TPCK1	[TPCK1] Fix32.TPCK1.LIS_L17_LP02_OUT.F_CV set to 1 by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 13:41:57	TPCK1	[TPCK1] Fix32.TPCK1.LIS_L17_LP02_OP.F_CV set to 1 by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 13:41:58	TPCK1	[TPCK1] Fix32.TPCK1.LIS_L17_LP03_OUT.F_CV set to 1 by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 13:41:58	TPCK1	[TPCK1] Fix32.TPCK1.LIS_L17_LP03_OP.F_CV set to 1 by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 13:42:05	TPCK1	[TPCK1] DWS_SPM12B_01_LT_ALARM is acknowledged by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 13:42:05	TPCK1	[TPCK1] DWS_SPM12B_01A_STA_ALARM is acknowledged by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 13:42:05	TPCK1	[TPCK1] DWS_SPS4_01_LT_ALARM is acknowledged by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 13:42:05	TPCK1	[TPCK1] DWS_SPS4_01B_STA_ALARM is acknowledged by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 13:42:05	TPCK1	[TPCK1] DWS_SPM14C_01B_STA_ALARM is acknowledged by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 13:42:05	TPCK1	[TPCK1] DWS_SPM14C_01A_STA_ALARM is acknowledged by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 13:42:05	TPCK1	[TPCK1] DWS_SPS4_01A_STA_ALARM is acknowledged by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 13:42:45	TPCK1	[TPCK1] Fix32.TPCK1.VES_SAF64_OUT.F_CV set to 1 by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 13:42:45	TPCK1	[TPCK1] Fix32.TPCK1.VES_SAF64_OP.F_CV set to 1 by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 13:42:48	TPCK1	[TPCK1] Fix32.TPCK1.VES_SAF63_OUT.F_CV set to 1 by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 13:42:48	TPCK1	[TPCK1] Fix32.TPCK1.VES_SAF63_OP.F_CV set to 1 by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 13:42:58	TPCK1	[TPCK1] Fix32.TPCK1.VES_SAF65_OUT.F_CV set to 1 by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 13:42:58	TPCK1	[TPCK1] Fix32.TPCK1.VES_SAF65_OP.F_CV set to 1 by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 14:03:04	TPCK1	TPCA02 logged out as Application User
2015/01/07 14:03:04	TPCK1	GUEST logged in as Application User
2015/01/07 16:07:40	TPCK1	GUEST logged out as Application User
2015/01/07 16:07:43	TPCK1	TPCA02 logged in as Application User
2015/01/07 16:07:47	TPCK1	[TPCK1] ALL ALARMS acknowledged by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 16:27:47	TPCK1	TPCA02 logged out as Application User
2015/01/07 16:27:47	TPCK1	GUEST logged in as Application User
2015/01/07 16:43:19	TPCK1	GUEST logged out as Application User
2015/01/07 16:43:24	TPCK1	TPCA02 logged in as Application User
2015/01/07 16:48:39	TPCK1	[TPCK1] SES_MRS050_ALARM is acknowledged by TPCK1:TPCA02
2015/01/07 16:48:43	TPCK1	[TPCK1] SES_PIR016_ALARM is acknowledged by TPCK1:TPCA02

圖 6 事件發生時操作紀錄

(二) 警報區間之設備關閉並確認：

為利異常原因之排除與避免事件擴大，主控室人員進行 BYPASS 操作，強制關閉異常區間所屬循環管路避免事故擴大，以及透過操作紀錄，確認訊號 Output 與 Operation feedback 確實執行並且回授正常，以利後續事故檢討判讀。

(三) 現場確認與模擬狀況：

在 104 年 1 月 8 日上午到達現場後，發現洞道內無異狀，但為利查找故障原因，將昨日 BYPASS 之訊號全部開啟，維護人員分散在事件區間進行觀察，了解是否有異狀產生並與主控室保持橫向聯繫。在開啟所有蝶閥訊號後，過埠 #12 出入口區間，發現 HDPE 管破損且大量洩漏，故合理懷疑係因開啟循環水路後，HDPE 管內部循環水隨著壓力從破損點洩出，相關操作畫面如圖 7、圖 8 所示。

日期時間	TAG描述	值	警報別
2015/01/07 16:49:26	送風機 SAF63 控制輸出	停機	COS
2015/01/07 16:49:29	送風機 SAF64 控制輸出	停機	COS
2015/01/07 16:51:16	洞道電動機 XV220A 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:51:19	洞道電動機 XV220B 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:51:22	洞道電動機 XV220C 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:51:24	洞道電動機 XV220D 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:51:26	洞道電動機 XV220E 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:51:32	洞道電動機 XV220F 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:51:34	洞道電動機 XV220G 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:51:35	洞道電動機 XV220H 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:51:37	洞道電動機 XV220I 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:51:44	洞道電動機 XV219A 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:51:47	洞道電動機 XV219B 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:51:54	洞道電動機 XV219C 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:51:59	洞道電動機 XV219D 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:52:03	洞道電動機 XV219E 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:52:07	洞道電動機 XV219F 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:52:12	洞道電動機 XV219G 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:52:20	洞道電動機 XV219H 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:52:25	洞道電動機 XV219I 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:59:18	電動風門 MD141 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:59:18	空調箱 PAH11 控制輸出	停機	COS
2015/01/07 16:59:21	電動風門 MD142 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:59:21	空調箱 PAH12 控制輸出	停機	COS
2015/01/07 16:59:25	電動風門 MD143 控制	關閉	COS
2015/01/07 16:59:25	空調箱 PAH13 控制輸出	停機	COS
2015/01/07 16:59:26	排氣風車 EAF21 控制輸出	停機	COS
2015/01/07 16:59:26	排氣風車 EAF22 控制輸出	停機	COS

圖 7 BYPASS 訊號之設備回授

日期時間	NODE	事件敘述
2015/01/07 16:51:16	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV220A_OP.F_CV set to 1 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:19	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV220B_OUT.F_CV set to 0 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:19	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV220B_OP.F_CV set to 1 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:22	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV220C_OUT.F_CV set to 0 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:22	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV220C_OP.F_CV set to 1 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:24	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV220D_OUT.F_CV set to 0 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:24	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV220D_OP.F_CV set to 1 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:26	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV220E_OUT.F_CV set to 0 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:26	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV220E_OP.F_CV set to 1 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:32	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV220F_OUT.F_CV set to 0 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:32	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV220F_OP.F_CV set to 1 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:34	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV220G_OUT.F_CV set to 0 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:34	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV220G_OP.F_CV set to 1 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:35	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV220H_OUT.F_CV set to 0 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:35	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV220H_OP.F_CV set to 1 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:37	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV220I_OUT.F_CV set to 0 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:37	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV220I_OP.F_CV set to 1 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:44	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV219A_OUT.F_CV set to 0 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:44	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV219A_OP.F_CV set to 1 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:47	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV219B_OUT.F_CV set to 0 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:47	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV219B_OP.F_CV set to 1 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:54	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV219C_OUT.F_CV set to 0 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:54	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV219C_OP.F_CV set to 1 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:59	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV219D_OUT.F_CV set to 0 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:51:59	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV219D_OP.F_CV set to 1 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:52:03	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV219E_OUT.F_CV set to 0 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:52:03	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV219E_OP.F_CV set to 1 by TPCK1::TPCA02
2015/01/07 16:52:07	TPCK1	J Fix32.TPCK1.ACS_XV219F_OUT.F_CV set to 0 by TPCK1::TPCA02

圖 8 BYPASS 訊號之操作回授

四、電力系統檢測：

高港~五甲~高雄 345kV 洞道長 20 公里，依機房供應之不同高壓電源，透過變壓器轉換成 480V/277V/120V 分別供應動力設備與其他低壓弱電設備使用，以四個機房為主，規劃出四個供電區段，自此引接各別用電迴路供應冰水主機、冷卻水泵馬達、區域水泵馬達、汙水排水泵馬達、照明系統、插座系統及其他有關之系統用電。

每機房同時有兩饋線供應附屬設備所需之電力，自 MOF 進來後，經過 DS、CB 透過變壓器將 22.8KV/11.4KV 轉成 480/277V，以提供冷卻機房及洞道設備用電。其中高雄、過埤及高港機房皆設有高壓自動切換開關(ATS)做為正常電源及緊急電源切換使用，以高雄機房為例，HATS1 正常由 MOF01 供電，HATS2 由 MOF02 供電，當 MOF01 發生跳電時，系統可以利用 ATS 自動切換至 MOF02 供電，當 MOF01 電力恢復時，ATS 自動切換回 MOF01 供電，以維持整個電力系統運作。

負載端所需 480/277V 電力，以高雄機房為例，是由 A9HTR1、A9HTR2 盤內之變壓器降壓後供應電源，當 A9MP1 之 ACB 跳脫時，需投入 A9MP1T2 之 TIE ACB，A9MP1 下游設備改由 A9MP2 供電。A9MP1、A9MP1T2、APMP2 為電氣連鎖，現場附有兩把鑰匙，同時只能開啟兩台 ACB 作業，避免兩回路同時投入造成設備損壞。例：A(主回路)、B(備用回路)、C(連結斷路器)三台斷路器，僅有兩把鑰匙啟動其中兩台作業，A+B 為兩回路個別供電，A+C 為主回路供電，B+C 為備用回路供電。而有關電力系統之主要的年度保養檢測項目，如表 1 說明。

表 1 電力系統主要年度保養項目

項次	維護項目	重點
1	DS	絕緣量測
2	GCB	絕緣量測
3	LA	絕緣量測
4	POWER FUSE	絕緣量測
5	POWER CABLE	絕緣量測
6	SC	面板設定
7	ACB	接觸電阻
8	Tr.	絕緣量測
9	PT	絕緣量測
10	CT	絕緣量測
11	RELAY	特性試驗
12	UPS	蓄電電壓
13	CTD	電容電壓
14	ATS	轉換操作
11	功因值即自動功因校正器	0.95 管制
12	溫度 異音 燈泡 空調	一般檢查

肆、整合型維護方案

新高港~五甲~高雄 345kV 地下電纜及附屬機電系統，工程範圍除涵蓋 6 回線輸電電纜線路之外，另為達系統有效運作，裝設有冰水系統等多項附屬機電設備，全案透過 6 處配電室及 4 大 PLC 程控系統，掌管洞道 182 處控制盤及機房 200 餘項大小型設施，以設備數量統計，設備單元多達 1000 餘項之多，其主體架構如圖 9 所示。由此可見，上述維護標的數量龐大，倘無透過有效之維護計畫，將耗去大量彙整與統計時間，且無法有效規劃維護流程恐造成設備維護不良之狀況。

本報告將透過一整合維護平台掌管全案所有設備^[1]，並透過電腦排程擬定維護方針，協助人員進行維護工作。全案所屬設備旁建構有 QR-Code 碼，人員到達現場後可透過平板電腦或手機建構之 APP 軟體，透過掃描 QR-Code 碼，調閱出維護表單並填入維護訊息。當維護人員回到辦公場所，平板電腦將透過 WIFI 自動更新伺服器維護資訊，並排定下次維護時間且自動更新維護表單，將大幅縮短維護人員之維護紙本流程以及提高維護效率，其整體維護架構如圖 10 所示。



圖 9 附屬機電主體架構圖

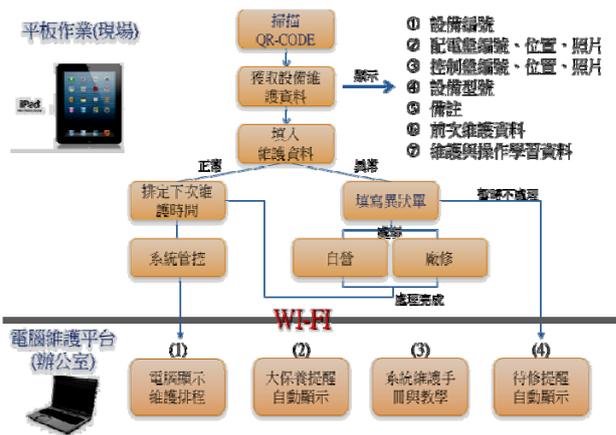


圖 10 QR-Code 維護管理系統架構圖

透過本研究所建立之維護平台及 APP 軟體，維護人員可加快巡視、點檢的效率以及任務執行之確實性。並且依據實際需要，劃分修繕為自營或委外處理項目，有效規劃維護方針。並且透過平台彙整功能，可了解未來一個月或一季之維護計畫以及即將來臨之設備大保養項目，供管理人員調派人力及維護計畫參考，可達事半功倍及維護確實之功效。

伍、維護平台資料分析與建置

本章結將介紹如何操作及建構維護平台，第一步本處先針對新高港~五甲~高雄第 5 標工程之附屬機電設備共 1,132 筆資料透過 Excel 建立其 Database，上述資料必須包含：維護區段編號、設備類別、保養週期，並將資料匯入維護平台伺服器，如圖 11 所示。

設備編號	設備名稱	設備類別	保養週期	保養日期	保養人員	保養狀態	備註
1	SCADA	電力系統	每月	2023-01-01	張三	完成	
2	PLC	電力系統	每月	2023-01-01	李四	完成	
3	SIGNAL	電力系統	每月	2023-01-01	王五	完成	
4	CONTROL	電力系統	每月	2023-01-01	趙六	完成	
5	LOCAL	電力系統	每月	2023-01-01	陳七	完成	
6	冰水機	空調系統	每月	2023-01-01	林八	完成	
7	變頻馬達	抽水馬達	每月	2023-01-01	黃九	完成	
8	廣播	光纖	每月	2023-01-01	周十	完成	
9	電力系統	變壓器	每月	2023-01-01	吳十一	完成	
10	照明	插座	每月	2023-01-01	孫十二	完成	
11	SCADA	HDPE	每月	2023-01-01	張十三	完成	
12	DTS	訊號回授	每月	2023-01-01	李十四	完成	
13	控制單元	其他...	每月	2023-01-01	王十五	完成	

圖 11 維護設備 Database 總表

透過 Database 與平台契合，系統自動將排訂之維護週期與設備，依據所規定的保養月份建立設備預排總表，如圖 12 說明。

圖 12 設備預排總表

M:月保養 H:半年保養 Y:年度保養

建構好年度進度之後，系統將會展示近三個月的維護工作量，如圖 13 所示，方便領班安排維護人員與配置。而當人員到達現場後掃描現場設備旁的 QR-Code 碼，即可依據所顯示的維護工作與檢測項目進行工作，例如以設備編號 A001-CHP-02 冰水泵設備，掃描其所屬 QR-Code 碼後，則會立即顯示目前需完成的維護項目如圖 14 所示。必須特別說明的是，本維護管理系統是針對每一項設備必須定期維護的維護項目，而有關設備狀況將預排在線路巡視當中完成，不放入平台內管控。

圖 13 近三個月內預排工作規劃



圖 14 平板 APP 操作畫面

當維護人員完成作業回到辦公室之後，透過 WI-FI 即可將已完成之維護訊息同步到伺服器當中，如圖 15 所示。

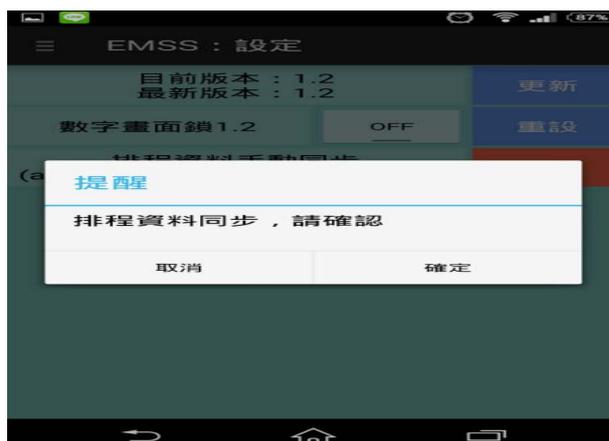


圖 15 手機資料同步畫面

當系統完成同步資料後，隨即將已完成設備放入「已巡檢無異常排程」，並等待核示後，該設備就會跳至下一個維護週期，等待下一次維護工作的來臨，如圖 16 所示。

圖 16 每日完成工作陳核選單

另外若在巡檢或保養過程當中，發現設備有異狀必須處理，則可暫時放在系統的「設備異狀單據」內，等待維護人員選擇自營處理或者委外處置，雖然資料多達 1000 多筆，透過這樣的管理，就可對於現場設備作妥善的管控與管制。

陸、結論

本報告針對新高港~五甲~高雄 345kV 第五標工程進行示範，後續各標案附屬機電工程正式點交後，也會併入系統內進行管控，以達同時掌管多項設備並了解其維護週期，提高整體工作效率與確實性。

透過本研究所建立之維護平台及 APP 軟體，維護人員可加快巡視、點檢的效率以及任務執行之確實性。並且依據實際需要，劃分修繕為自營或委外處理項目，有效規劃維護方針，並且透過平台彙整功能，可了解未來一個月或一季之維護計畫以及即將來臨之設備大保養項目，供管理人員調派人力及維護計畫參考，可達事半功倍及維護確實之功效。

柒、參考文獻

- [1] Yue Liu, Ju Yang and Mingjun Liu, "Recognition of QR Code with mobile phones," in *Control and Decision Conf*, 2008, pp. 203-206.

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

低壓貫穿式比流器之廠商製程中間檢查作業概述

Overview of the In-process Inspection for Low Voltage Current Transformers

郭士慶*
Kuo, Shih-Ching

吳書齊**
Wu, Su-Chi

劉旭晃***
Liu, Shiu-Huang

摘要

低壓貫穿式比流器為台灣電力公司材料處選擇性招標器材項目之一，由台電公司材料處、使用單位(配電處)及試驗單位(綜合研究所)之相關人員組成小組，於承製廠商在製造過程中，依契約規定得到廠施作製程中間檢查，先核對檢驗設備之校正報告，符合規定後始依契約作檢驗項目之檢查。本文以樂士股份有限公司之實務案例，說明低壓貫穿式比流器之製程中間檢查作業內容，可作為日後辦理本項業務之參考依據。

Abstract

Low Voltage Current Transformers are among the major items of the equipment/materials procured by TPC Material Department according to the format of selective tendering procedures. During the manufacturing process, TPC may dispatch the squad, which is composed of the Material Department, the Power Distribution Department, and the Research Institute of the company, to the factories of firms to implement the In-process Inspection by collating the calibration report and conducting the relevant testing pursuant to the Contract requirements. The article illustrating the In-process inspection of Low Voltage Current Transformers with the practical case of Luxe Electric Co., Ltd could serve as a good reference for future practices.

關鍵詞(Key Words)：低壓貫穿式比流器(Low Voltage Current Transformers)、製程中間檢查(In-process Inspection)、特性試驗(Characteristic Test)。

壹、前言

台灣電力公司標準材規「低壓貫穿式比流器」C004(101-07)^[1]適用於屋內，與計費電表等配合組套之低壓貫穿式比流器。

中間檢查之作業方式依據台電公司「材料處器材驗收作業程序書」^[2]，作業流程如圖 1，並應詳實填寫台灣電力公司器材中間檢查紀錄表如圖 2，中間檢查結果符合規範者，中間檢查紀

錄表併入驗收紀錄備查；中間檢查結果不符合規範者，應改正至符合規定。

中間檢查之規定依據本器材標準材規之附錄 2：

- 一、低壓貫穿式比流器製造廠得標後，每批開始製造前 7 天（日曆天），承製廠商應提出製造計畫表送交台電公司備查，台電公司得隨時派員查驗，如未依規定提出該項進度表而逕行製造者，台電公司得拒絕驗收其產品。
- 二、中間檢查範圍及試驗項目：至中間檢查階段

*台灣電力公司材料處

**台灣電力公司綜合研究所

***樂士股份有限公司

已製造完成或裝妥之項目均列為中間檢查範圍，每次中間檢查，台電公司得任抽 3 具成品或半成品施作外觀檢查或構造檢查（含進料證明及自主檢查資料），經檢查合格後每具得依器材標準材規「低壓貫穿式比流器」C004(101-07)第 6.3~6.6 節(6.3 節電力頻率耐電壓試驗、6.4 節開路試驗、6.5 節誤差試驗及 6.6 節感應電壓試驗)施作至少一項可施行之特性試驗。

- 三、中間檢查項目之試驗，如有任何一項試驗不合格時，由承製廠商將該批全數改善後，3 天內(工作天)通知台電公司派員再施行中間檢查(複查)，直至合格後方准予繼續製造。
- 四、如因辦理中間檢查(複查)逾期交貨者，概由承製廠商自行負責。

- 本文架構依中間檢查內容可分為三部分：
- 一、文件查證作業：檢驗設備之校正報告、進料品質管制文件及自主檢查資料。
- 二、製程查證作業：依承製廠商提出之製造計畫表及製程現況，執行製程查證作業。
- 三、外觀檢查或構造檢查及特性試驗：任抽 3 具成品或半成品經外觀或內部構造檢查合格後，每具至少施作 1 項特性試驗。

貳、文件查證作業

一、檢驗設備之校正報告：

核對相關檢驗設備如表 1 之型號/規格、廠牌、序號、校正有效期限及校正實驗室。

表 1 檢驗設備清單

項目	試驗名稱	設備名稱
1	外觀檢查	數位游標卡尺
2	電力頻率耐電壓試驗	交流耐壓試驗系統
3	誤差試驗	標準比流器
		自動比較試驗設備
		負擔箱
4	開路試驗	標準比流器
		電力計
		碼錶

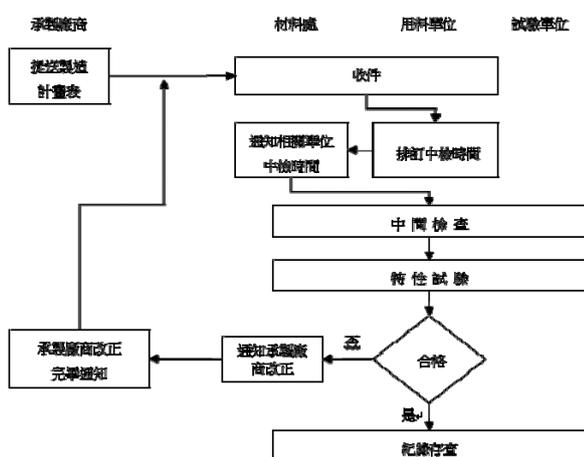


圖 1 中間檢查作業流程

台灣電力公司
器材中檢紀錄表

一、材料代碼:	00020000102	契約總數量:	17,000 具
二、合同批號:	契約代碼 000 批	數量:	0,000 具
三、器材名稱:	低壓貫穿式比流器	規格型式:	0.38C200A/5A
四、買賣廠商:	聯益股份有限公司		
五、中檢日期:	103 年 12 月 19 日		
六、中檢地點:	桃園縣楊梅市武甯路一段 796 巷 222 弄 19 號		
七、中檢規格:	低壓貫穿式標準材規 C004(101-07)規定製成		
八、製造廠號:	0210001-2021000		
九、查檢項目:	查檢內容:	查檢結果:	
1. 外觀目視(照 X)	1. 進料證明	符合廠商作業流程, 詳附件一	
2. 裝圖	2. 自主檢查資料	符合廠商作業流程, 詳附件二	
3. 成品檢查	3. 外觀檢查	符合廠商作業流程, 詳附件三	
製造編號:	4. 電力頻率耐電壓試驗	符合廠商, 詳附件四	
0212740	5. 感應電壓	符合廠商, 詳附件五	
0214800			
0214740			
4. 校正設備	校正報告	符合材料, 詳附件六	
5. 其它	中檢試驗資料	符合廠商作業流程, 詳附件七	

十、處理意見(中檢結果): 本次中間檢查合格

台電公司 啟用代章: 聯益股份有限公司
 材料處: 盧俊翰 12/19 郭士隆 簽
 製造處: 吳志平 簽
 檢驗所: 吳晉賢 簽

圖 2 中間檢查紀錄表

二、進料品質管制文件：

檢查零組件(如鐵心及線圈等)之進料憑證、零組件供應商出廠檢驗報告及承製廠商進料檢驗。依據製程及製交數量，核對材料進貨發票或進貨證明之進貨日期及數量是否與之配適；查證各項零配件之供應商出廠檢驗報告及製造商進料檢驗，是否符合承製廠商作業流程。

三、自主檢查資料：

查證承製廠商之半成品或成品出廠試驗報告等品質自主檢查資料是否符合承製廠商作業流程。

參、製程查證作業

一、鐵心捲繞及燒焯：

先將鐵心模固定於捲繞機上，確認所需尺寸後方可捲繞如圖 3，繞製完成如圖 4，經尺寸確認正確再依矽鋼片廠家所提供之材質特性所需溫度及保溫時間進行燒焯如圖 5。

二、繞線：

鐵心燒焯完成經測試合格後蓋上鐵心塑膠覆蓋進行儲線如圖 6，線圈捲繞如圖 7 及接續端子焊接如圖 8。

三、射出成型及組立：

線圈繞製完成經檢查合格後進行加溫、組模、進料、加熱、射出成型如圖 9、毛邊整理、極性符號上漆標記及鎖端子螺絲如圖 10。將比流器心體與底板組裝如圖 11。

肆、外觀檢查或構造檢查及特性試驗

每次中間檢查任抽 3 具成品或半成品如圖 12，依材規施作外觀檢查或構造檢查如圖 13。經抽樣檢查合格後每具得依標準材規「低壓貫穿式比流器」C004(101-07)第 6.3~ 6.6 節施作至少一項可施行之特性試驗。



圖 4 鐵心繞製完成



圖 5 鐵心燒焯



圖 6 鐵心塑膠覆蓋及儲線



圖 3 鐵心捲繞



圖 7 線圈捲繞



圖 8 接續端子焊接



圖 12 中間檢查抽樣



圖 9 射出成型



圖 13 外觀檢查



圖 10 射出成型後整理



圖 11 組立

尺寸實際量測結果須在材規及設計圖面所訂尺寸之允許誤差值內。

低壓貫穿式比流器各項特性試驗，其試驗目的、引用規範、試驗方法、合格標準、試驗情形及注意事項可參考「低壓貫穿式比流器之廠商承製能力審查作業概述」^[3]。

一、電力頻率耐電壓試驗：

(一) 試驗方式：

- 1.比流器供作一次側繞組之線路導體通過貫穿孔口，在二次側及底座接地時，須能承受 60 赫 4kV 正弦波電壓一分鐘如圖 14。
- 2.比流器二次側加壓、底座接地，須能承受 60 赫 2.5kV 正弦波電壓一分鐘如圖 15。

(二)合格標準：

比流器未發生閃絡或擊穿現象。

二、開路試驗：

(一) 試驗方式：

比流器一次側加最大額定連續電流或開路電壓達 3.5kV (全波峰值) 一分鐘如圖 16。

(二) 合格標準：

比流器不得發生任何機械或電氣之損傷。



圖 14 (一次側)電力頻率耐電壓試驗



圖 15 (二次側)電力頻率耐電壓試驗



圖 16 開路試驗

三、誤差試驗：

(一) 試驗方式：

誤差量測是將待測比流器與標準比流器作比較,在受測負載功因為落後 0.6~1.0 及額定頻率、額定負擔情況下,如準確性為 0.3,其一次側通過最大額定連續電流及額定電流時,比流器校正因數(Transformer Correction Factor, 簡稱 TCF)應在 0.997~1.003 範圍以內,變比校正因數(Ratio Correction Factor, 簡稱 RCF)之限制亦同;通過電流減低至額定一次電流之 10% 時,比流器校正因數(TCF)應在 0.994~1.006 範圍以內,變比校正因數(RCF)之限制亦同如圖 17。若受測負載功因為 0.6 時比流器校正因數(TCF)與變比校正因數(RCF)及相位移角度 β (以分表示)得依下列公式計算：

$$RCF = 1 - (\text{比誤差} / 100) \quad (1)$$

$$TCF = RCF - \beta / 2600 \quad (2)$$

(二) 合格標準：

最大額定連續電流、額定電流及 10% 額定電流之 TCF 及 RCF 應在規定範圍內。

四、感應電壓試驗：

(一) 試驗方式：

800A 以上之比流器,其一次側開路情況下,二次繞組加 60 赫、200V 電壓一分鐘。

(二) 合格標準：

比流器應無任何損壞現象。



圖 17 誤差試驗

伍、結論

為確保承製廠商於製造過程使用之材料符合契約規定，且製造作業落實其品質管制作業流程，台電公司於製造過程得派員至承製廠商進行中間檢查。101 年標準材規「低壓貫穿式比流器」C004(101-07)改版後執行迄今，實有助台電公司人員之技術經驗傳承及承製廠商製交器材之品質穩定。

陸、誌謝

本文在台電公司材料處、配電處、綜合研究所相關同仁以及樂士公司相關員工的協助下，得以順利完成。

柒、參考文獻

- [1] 台灣電力公司，材料標準編號：C004，「低壓貫穿式比流器」，2012 年 7 月。
- [2] 台灣電力公司，材料處專屬性單位章則，「器材驗收作業程序書」，2014 年 2 月 7 日。
- [3] 郭士慶、吳書齊、曾若玫，「低壓貫穿式比流器之廠商承製能力審查作業概述」，台電工程月刊，第 793 期，第 51-57 頁，2014 年 9 月。

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：請提供稿費受款人及聯絡人姓名、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.810 February 2016

RENEWABLE ENERGY :

Study on the Impact of Substantial Growth in Renewable Energy on
Taiwan Transmission System in the Future and Coping Strategies.....Wu, Yuan-Kang et al.....(1)

HYDRAULIC POWER GENERATION :

Phase III Study on River Ecology and Fish Conservation Plan
at Nan-Chi Dam.....Hsieh, Kuo-Cheng et al.....(21)

FOSSIL POWER GENERATION :

A Computer Code to Calculate the Performance of Double Pipe Heat
Exchangers Powered by High Pressure Steam.....Liaw, Shih-Pin et al.....(33)

TRANSMISSION AND TRANSFORMATION :

The New Methodology of Network Investment in Taiwan Power System.....Chang, Chung-Liang et al.....(39)

On-line Monitoring Application Examples and Research of Circuit Breaker
Operating Time.....Chen, Pang-Feng et al.....(45)

On-line Remote Monitoring and Diagnosis System for Underground
Transmission Cables.....Chen, Chien-Fuh et al.....(50)

ENERGY AND ENVIRONMENT :

Hydrology and Water Chemistry around the Third Nuclear Power Plant
Dominated by Large Scale Environmental Changes.....Chen, Chen-Tung et al.....(64)

CHEMISTRY AND MATERIAL :

Linear SVM Method Applied to Transformer Fault Diagnosis in Practice.....Lin, Ming-Jong et al.....(72)

INFORMATION AND COMPUTER :

Parameter Measurements and Verifications of Dynamical Load Model
in Taipower System (1): Dynamical Load Modeling Developments
and Parameter Estimations.....Lin, Yu-Jen et al.....(79)

ENGINEERING TECHNIQUES :

Maintenance and Management Information System Integrated with QR-code
for Power Transmission Cables and Ancillary Electrical Devices.....Yu, Tzu-Wei et al.....(98)

Overview of the In-process Inspection for Low Voltage Current
Transformers.....Kuo, Shih-Ching et al.....(106)



GPN : 2003700005
定價 : 新台幣100元