經濟部

ISSN 0494-5468

台電工程月刊

MONTHLY JOURNAL OF TAIPOWER'S ENGINEERING
第820期　105年12月號　　Vol.820　December 2016

火力發電：

短期汽力機組排程.....陸臺根 等.....(1)

輸 變 電：

輸工系統潛盾工程特殊案例.....竺文彥 等.....(11)

應用地面光達監測輸電鐵塔結構物之精度分析.....楊金石 等.....(31)

配　　電：

校園配電系統升級整合技術之研究.....楊念哲 等.....(40)

分類技術應用於高壓AMI資料之研究.....吳承翰 等.....(53)

能源與環境：

用戶月計費及氣溫資料與台電需量反應成效分析.....林素真.....(62)

資訊與電腦：

開放圖台應用於配電圖資地理空間資料網路服務研究.....蔡森洲 等.....(72)

其　　他：

需量交易最佳化之研究.....姚立德 等.....(93)

誠信 Integrity　關懷 Caring　服務 Service　成長 Growth

台灣電力公司編印

回至目錄頁

台電工程月刊

第 820 期
中華民國 37 年 9 月創刊
中華民國 105 年 12 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】：鍾炳利
【主　任　委　員】：蒯光陸
【總　　編　　輯】：林正義
【副　總　編　輯】：陳以彥
【外文編輯委員】：林宗賢
【財　務　委　員】：張兆瓊
【編　輯　委　員】：吳有基　吳明勳　徐眞明　郭政謙　王金墩　呂天泰　沈宗華
吳瑞賢　何錦洪　林蒼喬　花敬翰　涂秀錦　侯明亮　洪紹平
范振理　曾重富　楊金石　蒲冠志　廖鴻徹　蔡世育　劉建勳
劉至瑄　鄭錦榮　鍾年勉　鍾輝乾
【顧　　問】：王振勇　王耀庭　李清雲　李清課　吳士襄　陳永享　陳慰慈
郭天合　黃凱旋　張武侯　蔡顯修　顏德忠　簡福添　蕭勝任
【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 號執照登記爲雜誌交寄

回至目錄頁

短期汽力機組排程

Short-term Unit Commitment of Steam-turbine

陸臺根* Lu, Tai-Ken　徐晧軒* Hsu, Hao-Hsuan　黃楷雯* Huang, Kai-Wen　陳鳳惠** Chen, Fung-Fei
祁培倫*** Chi, Pei-Ruen　葉宏志*** Yeh, Hung-Chih　雷旭民*** Lei, Hsu-Min　黃啟峰*** Huang, Chi-Feng

(104 年度研究計畫論文)

摘　要

如何降低成本、提高績效為電業經營的關鍵因素之一。而其中營運成本又以燃料成本為主要成本。因此如何有效地擬定前一日機組排程，使之滿足系統負載需求及安全性，並能以最經濟情況下進行調度為本文的研究目標。

本文使用混合整數規劃法建立一套完整的短期汽力機組排程模型進行模擬，但由於短期汽力機組排程所需考慮的機組特性及系統特性較為複雜，使之求解不易。故本文又提出一套快速演算法來加快求解的時間，且以台灣電力公司之汽力機組進行實務上的模擬，並進行比較。

Abstract

How to reduce generating costs and improve operational performance are among the key factors for effective management of the electrical sector and fuel cost is a main item in overall operation costs. Therefore, how to effectively prepare the day-ahead unit scheduling to satisfy the load requirements and system operation safety and how to make the most economic unit-dispatching are therefore selected to be our research goals for this paper.

This paper presents a short-term unit commitment model of Steam-Turbine by using mixed integer programming. However, numerous unit characteristics and complicated system characteristics involved in steam-turbines for the short-term unit commitment make it much difficult to solve the problem. So this paper proposes a fast algorithm to accelerate the overall process in solving problems and uses Taipower's units to do practical simulations and make comparisons.

關鍵詞(Key Words)：混合整數規劃法(Integer Mixed Linear Programming, MILP)、機組排程(Unit Commitment, UC)、快速演算法(Fast Algorithm)。

*國立海洋大學電機系
**台灣電力公司綜合研究所
***台灣電力公司電力調度處

壹、前言

隨著人類生活型態、經濟結構改變，能源已成為生活中不可或缺的一個環節。時至今日，電力產業為主要能源產業之一。

電力調度運轉常須預先根據系統狀況(如機組檢修、燃料用量限制等等)建立一個前一日調度運轉計畫做為參考基準，而常用的分析工具即是機組排程。以往機組排程大多為期 1 至 7 天、時間間隔為 1 小時進行模擬，然隨著電力品質的要求提高、機組運轉特性的複雜化，機組排程的模擬已需要進行為期一天半、時間間隔 15 分鐘的模擬。在短期的模擬中，機組的啟動解聯期間的升降載特性、電廠內各機組的啟動時間差等屬於短時間的運轉要求，就成為必須考量的問題，而這些限制大都是時間耦合限制，大幅增加求解的難度。由於短期電力調度限制因素與發電機的機組特性有密切的關係，所以需要一個更完整的短期電力調度的工具來協助分析，建立一個符合實務需求的前一日調度運轉計畫，故本文提出一短期機組排程結合快速演算法來作為分析工具。

文獻上研究方法主要可以區分為兩大類：第一類為新興的智慧型演算法，其中包含粒子群演算法(Particle Swarm Optimization, PSO)[1]、基因演算法(Genetic Algorithm, GA)[2]、模糊邏輯演算法(Fuzzy Logic Algorithm, Fuzzy)[3]、模擬退火法(Simulated Annealing, SA)[4]等；第二類為傳統的數學規劃求解法，其中包含優先排序法(Priority List, PL)、混合整數線性規劃法(Mixed Integer Linear Programming, MILP)[5][6]、動態規劃法(Dynamic Programming, DP)[7]、拉氏鬆脫法(Lagrangian Relaxation, LR)[8]等。

智慧型演算法中，粒子群演算法及基因演算法是近年來較常被廣泛使用的演算法。粒子群演算法則先透過粒子搜尋解空間，粒子有記憶功能所以會避免重複搜尋解空間，當一個粒子搜尋到最佳解時，所有粒子會往最佳解靠攏，反覆執行疊代後，所找到的解即是全區最佳解，但如初始參數沒有設定好，此時求得之解也有可能陷入區域最佳解，而非全區域最佳解。基因演算法的原理主要是模擬自然界中生物遺傳進化的行為，將問題的解空間表示為生物上的染色體，再依照「物競天擇，適者生存」的原理，透過染色體交配和變異產生下一代，產生結果適應的下一代染色體即為最後求得之解，與 PSO 一樣有類似的問題，假使初始的參數或編碼設定不理想，則此時求得之解有極大機會陷入區域最佳解，而非全區域最佳解。模糊邏輯演算法是從模糊理論(Fuzzy Theory)衍伸而來，其仿照人類的思考邏輯模式，例如在黑或白、善或惡兩相極端之間，可能存在的模糊領域，也提供了數位運算中除 0 與 1 外的第三種選擇。而模糊邏輯演算法主要包含了：(1)模糊化(Fuzzifier)、(2)模糊規則(Fuzzy Rule)、(3)模糊推論 (Fuzzy Inference)、及(4)解模糊化(Defuzzifier)等。其做法為將一明確的(Crisp)資料模糊化成模糊資訊，可視為由明確集合(Crisp sets)映射至特定的模糊集合(Fuzzy Sets)空間，透過歸屬函數(Membership Function)將量化的資料予以模糊化，以歸屬程度(Degrees of Membership)的大小做為主要的抉擇機制。而後經由模糊規則進行模糊推論，並將其所產生的結論解模糊化，意即找出最能代表該模糊推論結果的明確資訊後結束。模擬退火法為一種模擬物質經由加熱後溶解再退火結晶過程的一種隨機性最佳化演算法，將問題的解空間表示成粒子的結晶狀態，先將物質加熱，使粒子自由移動，再使物質退火，當溫度下降過程中，粒子會漸漸停止活動，直到冷凍狀態時為系統的能量最低點，此時物質凝固求得之解則為問題之最佳解，此演算法可透過溫度調整搜索到最佳解，但求解的時間較長為其缺點。

而傳統的數學規劃法求解方式中，目前最簡單解決機組排程的演算法為優先排序法(Priority List)，概念是將機組依燃料成本或運轉成本高低依序排列，當負載需求增加時，優先將成本低之機組依序上線運轉，直到上線機組之可供電量滿

足負載需求；當負載需求減少時，優先將成本高之機組下線停機，簡而言之即是便宜的機組優先上線運轉，貴的機組優先解聯，此演算法原理簡單易懂且計算迅速，但可考慮限制式極少，主要為快速求得一合理可行解作為參考，而非求得最佳解。整數規劃決策變數考慮全部須是整數，而線性規劃法則考慮之限制都為線性不等式或線性等式，若部分決策變數為整數，而其餘決策變數不為整數時，且考慮之等式或不等式限制式皆為線性，則此規劃法稱為混合整數線性規劃，由於機組的狀態變數往往可利用 0 或 1 來表示，故混合整數規劃法常被用來解機組排程問題。動態規劃演算法能夠有效求解多決策的數學方法，由於機組排程會依照時間變動而改變當前階段決策，且當前階段決策會影響下階段，故機組排程問題本身就是個多個時間點機組狀態決策的問題。因此，動態規劃演算法可將機組排程問題分割成多個子問題逐個求解，接著找出各子問題間的最佳路徑，進而得出最佳解。由於動態規劃法的必須考慮所有子問題及路徑，因此耗費之求解時間相對的也較多。拉式鬆脫法可以藉由乘上拉式乘數先將系統限制式鬆弛，在將限制式重新考慮求解，且可以進一步分解 N 個子問題來降低求解的困難度，進行重複疊代求得最佳解。但由於拉式鬆脫法已經利用拉式乘數先將系統限制式鬆弛，故有個最主要的缺點就是找到的解極有可能違背限制式。

因機組排程問題中，機組的狀態可用狀態變數 0 或 1 來表示，且機組排程為變數極多的耦合性數學問題，故本文使用較能求解大型問題且結合整數變數之混合整數線性規劃法進行求解。

貳、數學模型

本文提出之完整模型，考量之模擬時段長度為 15 分鐘，目標函數為系統電力生產成本最小化。目標函數及機組及系統限制式如下所示。

一、目標函數

營運成本最小化

$$\sum_{t\in\{T\},i\in\{TH\}} thGcal_i^t * fC_i^t \tag{1}$$

$$thGcal_i^t = \left[\begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} HR_i\left(MW\min_i\right) \\ *\left(U_i^t - suS_i^t - sdS_i^t\right) \\ +\sum_{j=1}^{N_J} MW_{i,j}^t * S_{i,j} \end{array}\right) * Tsch^t \\ +\sum_{j=1}^{3}\left(suHR_{i,j} * suU_{i,j}^t\right) \\ +sdHR_i * sdU_i^t \end{array}\right] \tag{2}$$

其中 T 為模擬時段集合，TH 為火力機組集合，$thGcal_i^t$ 為機組 i 於時段 t 之熱耗量(GCal)，fC_i^t 為機組 i 於時段 t 之燃料成本(千元/GCal)，$HR_i(x)$ 為出力 x 之熱耗函數，$MWmin_i$ 為機組 i 之最小出力(MW)，U_i^t 為機組 i 於時段 t 之狀態變數，為 0 及 1 變數，1 表示上線，0 表示下線；suS_i^t 為機組 i 於時段 t 之啟動過程狀態變數，為 0 及 1 變數，其中 1 表示處於啟動過程；sdS_i^t 分別為機組 i 於時段 t 之停機過程狀態變數，為 0 及 1 變數，1 表示處於停機過程；N_J 為熱耗率曲線的線性片段總數，$MW_{i,j}^t$ 為機組 i 第 j 片段於時段 t 之出力(MW)，$S_{i,j}$ 為機組 i 第 j 片段之斜率(Gcal/MWh)，$Tsch^t$ 為時段 t 之時間長度，$suHR_{i,j}$ 為機組 i 之第 j 種併聯所需熱耗值(Gcal)，$sdHR_i$ 為機組 i 之解聯所需熱耗值(Gcal)；$suU_{i,j}^t$ 為機組 i 時段 t 之第 j 種併聯狀態變數，為 0 及 1 變數，1 代表有併聯動作；sdU_i^t 分別為機組 i 時段 t 之解聯狀態變數為 0 及 1 變數，1 代表有解聯動作。

二、機組限制式

(一) 機組出力&機組各階段出力

$$MW_i^t = \begin{pmatrix} MW\min_i * \left(U_i^t - suS_i^t - sdS_i^t\right) \\ +\sum_{j=1}^{N_J} MW_{i,j}^t \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$MW_{i,j}^t \le \left(MW\max_{i,j} - MW\min_{i,j}\right) \quad (4)$$

$$MW\min_i^t * \left(U_i^t - suS_i^t - sdS_i^t\right) \le MW_i^t \quad (5)$$

$$MW_i^t \le \begin{pmatrix} \left(MW\max_i^t - dutySR\min_i^t\right) \\ * \left(U_i^t - suS_i^t - sdS_i^t\right) \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中 MW_i^t 為機組 i 於時段 t 之出力(MW)，$MWmax_{i,j}$ 及 $MWmin_{i,j}$ 分別為機組 i 第 j 片段之最大出力及最小出力(MW)，$MWmax_i^t$ 及 $MWmin_i^t$ 為機組 i 於時段 t 之出力上限及出力下限(MW)，$dutySRmin_i^t$ 為機組 i 於時段 t 之所需承擔之備轉容量下限(MW)。

(二) 啟動/停機過程出力限制

$$MWsu_i^t = \begin{bmatrix} MWsu_i^{t-1} \\ +\left(suS_i^t - suU_i^t\right) * \dfrac{MW\min_i}{suT_i} \\ -suU_i^{t-suT_i-1} * MW\min_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$MWsd_i^t = \begin{bmatrix} MWsd_i^{t-1} \\ +\left(sdS_i^t - sdU_i^t\right) * \dfrac{MW\min_i}{sdT_i} \\ +sdU_i^{t+sdT_i} * MW\min_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$suS_i^t = \sum_{k=t}^{t-suT_i} suU_i^k \quad (9)$$

$$sdS_i^t = \sum_{k=t}^{t+suT_i} sdU_i^k \quad (10)$$

其中 $MWsu_i^t$ 及 $MWsd_i^t$ 分別為機組 i 於時段啟動或停機過程的出力(MW)，suT_i 及 sdT_i 為機組 i 併聯爬升至最小出力及解聯降載至 0 出力所需時段數，suU_i^t 為機組 i 於時段 t 之併聯狀態變數。

(三) 機組啟動/停機限制

$$suU_i^t + sdU_i^t \le 1 \quad (11)$$

$$suU_i^t - sdU_i^t = U_i^t - U_i^{t-1} \quad (12)$$

(四) 機組熱/暖/冷機起動限制

$$\frac{\sum_{k=t-HsuT_i}^{t-1} U_i^k}{HsuT_i} \le suU_{i1}^t \le \sum_{k=t-HsuT_i}^{t-1} U_i^k \quad (13)$$

$$\frac{\sum_{k=t-WsuT_i}^{t-1} U_i^k}{WsuT_i} \le suU_{i1}^t + suU_{i2}^t \le \sum_{k=t-WsuT_i}^{t-1} U_i^k \quad (14)$$

$$suU_{i1}^t + suU_{i2}^t + suU_{i3}^t = suU_i^t \quad (15)$$

其中 $HsuT_i$ 及 $WsuT_i$ 分別為機組 i 冷機及暖機併聯所需時段數。

(五) 機組必須上線及機組必須下線

為了確保系統的安全及機組維修的情況，短期汽力機組排程理論模型考慮了機組必須上下線的限制，當必須上下線參數為「1」時，代表機組必須上線，為「-1」時代表機組必須下線，若為「0」則表示機組組態無任何限制，如(16)所示。

$$\left(1 + mustonoffU_i^t\right) \ge U_i^t \ge mustonoffU_i^t \quad (16)$$

其中 $mustonoffU_i^t$ 為機組 i 於時段 t 之必須上下線參數。

(六) 機組熱機備轉容量限制

本模型考慮之機組各時段所能提供的備轉容量為機組之熱機備轉容量總和。由於熱機備轉容量有不同時間的要求，所以機組之熱機備轉容量計算須同時考慮機組升載率、熱機備轉容量計算時間、機組出

力等因素。式(17)判斷熱機備轉容量計算是受機組出力或機組升載率的限制、式(18)計算機組升載率所能提供的熱機備轉容量、式(19)為機組出力和熱機備轉容量的總和最大只等於機組的淨尖峰供電能力。

$$\begin{bmatrix} \dfrac{MW\min_i}{MW\max_i^t}\left(\dfrac{MW_i^t}{MW\max_i^t - ruR_i * srT_j} - 1\right) \\ \le srU_{ij}^t \\ \le \dfrac{MW_i^t}{MW\max_i^t - ruR_i * srT_j} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} \left(U_i^t - srU_{ij}^t\right) * ruR_i * srT_j \\ \le SR_{ij}^t \\ \le U_i^t * ruR_i * srT_j \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{pmatrix} srU_{ij}^t * MW\max_i^t \\ \le MW_i^t + SR_{ij}^t \\ \le U_i^t * MW\max_i^t \end{pmatrix} \quad (19)$$

其中 ruR_i 為為機組 i 升載率(MW/hour)，srT_j 為 j 類熱機備轉容量計算時間，$SR_{ij}{}^t$ 為機組 i 於時段 t 第 j 類熱機備轉容量(MW)，$srU_{ij}{}^t$ 為機組 i 於時段 t 第 j 類熱機備轉容量判斷用狀態變數。

(七) 機組升/降載率

$$MW_i^t - MW_i^{t-1} \le \begin{bmatrix} \left(U_i^t - suS_i^t - sdS_i^t\right) \\ *\left(ruR_i * Tsch^t\right) \\ +suU_i^{t-suT_i-1} * MW\min_i \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$MW_i^{t-1} - MW_i^t \le \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} U_i^t - suS_i^t \\ -sdS_i^t + sdU_i^{t+sdT_i} \end{pmatrix} \\ *\left(rdR_i * Tsch^t\right) \\ +sdU_i^{t+sdT_i} * MW\min_i \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中 rdR_i 為為機組 i 降載率(MW/hour)。

(八) 機組最小並/解聯時間

由於考量到機組特性及機組發電和啟動停機成本，在實務調度上，機組起動時有最小必須併聯時間，停機時有最小必須解聯時間。

$$\sum_{k=1}^{suT\min_i - 1} U_i^{t+k} \ge \left(suT\min_i^t - 1\right) * suU_i^t \quad (22)$$

$$\sum_{k=1}^{sdT\min_i - 1} \left(1 - U_i^{t+k}\right) \ge \left(sdT\min_i^t - 1\right) * sdU_i^t \quad (23)$$

其中 $suTmin_i$ 及 $sdTmin_i$ 為機組 i 至少須併聯及解聯所需時段數。

三、系統限制式

(一) 供需平衡限制

$$\sum_{i\in\{TH\}} \begin{pmatrix} MW_i^t \\ +MWsu_i^t \\ +MWsd_i^t \end{pmatrix} + dR^t = MWLoad^t \quad (24)$$

其中 dR^t 及 $MWLoad^t$ 分別代表時段 t 之需求管理面及系統負載(MW)。

(二) 熱機備轉容量限制

$$SRrate\min_j^t * MWLoad^t \le \sum_{i\in\{TH\}} SR_{ij}^t \quad (25)$$

其中 $SRratemin_j{}^t$ 為時段 t 第 j 類熱機備轉容量率(%)。

(三) CO_2 排放量限制

基於未來可能之環保法規相關規範，本文假設系統所排放之二氧化碳量，必須小於法規所定之量，如式(26)所示。

$$\sum_{\substack{t\in\{T\}\\ ,i\in\{TH\}}}\begin{pmatrix} MW_i^t \\ +MWsu_i^t \\ +MWsd_i^t \end{pmatrix} * Tsch^t * CO_2coe_i \le SysCO_2\max \tag{26}$$

其中 CO_2coe_i 為機組 i 之 CO_2 排放係數(噸/MWh)，$SysCO_2$max 為系統之 CO_2 最大排放量(噸)。

參、快速演算法

機組排程問題為成本求解問題，傳統上若要快速求解，最常使用優先排序法對各機組成本進行排序求解，然優先排序法很難考慮機組之時間耦合限制，只能以單時段去進行簡易排程，對於接近短期實務調度的短期機組排程問題，求出之解參考性不高。由於機組排程問題為強時間耦合問題及成本問題，故本文針對這個特性，找出關鍵性影響因素，即機組之冷暖熱機啟動成本，先只考慮單種啟動成本下的解，再進行不同解間的比較以設定必須上下線參數後，進行快速的完整模型求解，其演算流程如下。

一、考慮單一啟動成本之各別求解

利用本文所提出之模型，忽略啟動狀態部分，得到兩種模型，其中一種只考慮冷機啟動，而另一種只考慮熱機啟動，分別進行求解，得到兩種模型的機組狀態解。

二、設定新的初始狀態之完整求解

比較兩種模型的機組狀態解，若兩種模型該機組該狀態皆為上線，此機組新的初始狀態設為必須上線，若兩種模型該機組該狀態皆為下線，此機組新的初始狀態設為必須下線，其餘機組狀態維持原樣，接著對於機組狀態開始併聯點往後幾個時點及開始解聯點往前幾個時點進行放寬，機組狀態設定回忽略，即完成初始機組狀態設定，再帶入本文提出之完整模型進行求解，即為最終解。

肆、案例模擬

本文只使用台電 29 部汽力機組進行模擬分析，總最大裝置容量為 12362.26MW，其中包含燃煤 18 部機組、燃油 6 部機組、天然氣 2 部機組以及輕柴油 3 部機組，而未包括核能、水力和 IPP 等其他機組。圖 1 為系統一天半，即 36 小時負載曲線(模擬時間間隔為 15 分鐘，共有 144 個的時點負載)，其中最大負載為 10320MW，系統最小備轉容量需求為 15%，以下將進行 4 個案例的模擬及分析，來驗證所建模型的適用性。

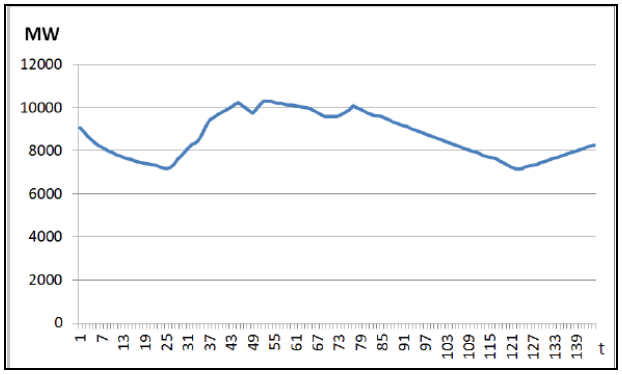


圖 1　模擬案例之系統負載

一、案例一：基本案例模擬

案例一的總成本為 50.2 仟萬元、CO_2 排放量為 26.942 萬噸和求解時間 725.149 秒，如表 1 所示。

表 1　案例一之模擬結果

總成本 (仟萬元)	CO_2 排放量 (萬噸)	求解時間 (秒)
50.2	26.942	725.149

表 2 列出基本案例各燃料別之燃料用量、發電總量、燃料成本和備轉容量，由於燃煤發電因成本最低而幾乎滿載運轉，輕柴油發電則因成本

高而完全停機運轉，天然氣及燃油機組則在負載尖峰時段上線運轉，且以天然氣發電持續時間較長。備轉容量則受機組上線狀況來決定，由於本文只模擬汽力機組，離峰時段只有燃煤機組上線，使得燃煤機組所提供的備轉容量也相對較多。

表 2　案例一之各燃料別的燃料用量、發電量、成本和備轉容量

燃料別	燃料用量 (噸/公秉/km^3)	發電總量 (MWh)	燃料成本 (仟萬元)	備轉容量 (MW)
燃煤	102834	264775	31.14	132933.31
燃油	6622	24811	11.13	31350
天然氣	5360	22770	7.93	23130
輕柴油	0	0	0	0

表 3 為基本案例各電廠的發電總量、燃料成本和備轉容量，其中台中電廠總出力較其他電廠高出許多是因為此電廠皆為燃煤機組為台電基載機組，且其電廠的機組數也較其他電廠高出許多。

表 3　案例一之各電廠的發電總量、燃料成本和備轉容量

電廠別	發電總量 (MWh)	燃料成本 (仟萬元)	備轉容量 (MW)
興達電廠	52215	6.58	75565.77
林口電廠	14418	1.88	12960
大林電廠	43366	12.77	47565
協和電廠	20499	8.62	19875
台中電廠	181858	20.36	31447.53

二、案例二：協和電廠於離峰時段上線 3 部機組

案例二將模擬協和電廠在離峰時段機組必須上線 3 部機的情境，必須上線時段為時點 117 至 129。表 4 為案例二的總成本、CO_2 排放量、求解時間、燃煤用量、燃油用量、天然氣用量、輕柴油用量、燃煤發電量、燃油發電量、天然氣發電量、和輕柴油發電量與案例一的比較，可看出案例二求解時間減少為 219.208 秒；而燃油用增加至 7421 公秉，發電量增加至 27586MWh，符合協和電廠上線機組數增加必會增加燃油用量及發電量的趨勢；由於燃油機組發電量的增加，也使得天然氣機組燃料用量降至 4778 千立方公尺，發電量降至 20192MWh；而總成本由於燃油機組發電量增加，微升至 50.61 仟萬元。

表 4　案例二與案例一模擬結果之比較

	案例一	案例二
總成本(仟萬元)	50.2	50.61
CO_2(萬噸)	26.942	26.987
求解時間(秒)	725.149	219.208
燃煤用量(萬噸)	10.283	10.274
燃油用量(公秉)	6622	7421
天然氣用量(km^3)	5360	4778
輕柴油用量(公秉)	0	0
燃煤發電量(MWh)	264775	264577
燃油發電量(MWh)	24811	27586
天然氣發電量(MWh)	22770	20192
輕柴油發電量(MWh)	0	0
燃煤成本(仟萬元)	31.14	31.11
燃油成本(仟萬元)	11.13	12.43
天然氣成本(仟萬元)	7.93	7.07
輕柴油成本(仟萬元)	0	0

表 5 為案例二之電廠發電量統計，可看出協和電廠出力的增加主要是由大林電廠減載來因應，台中電廠和興達電廠等主要燃煤出力變動不大，這也反映出表 4 中 CO_2 排放量的變化不大。

表 5　案例二與案例一模擬結果之各電廠發電量 (單位：MWh)

電廠別	案例一	案例二
興達	52215	52345
林口	14418	14098
大林	43366	40341
協和	20499	23517
台中	181858	182053

三、案例三：興達電廠燃煤用量上限較案例一結果低 30%

案例三將模擬興達電廠燃煤用量減 30%的情境。表 6 為案例三的總成本、CO_2 排放量、求解時間、燃煤用量、燃油用量、天然氣用量、輕柴油用量、燃煤發電量、燃油發電量、天然氣發電量、和輕柴油發電量與案例一的比較，由表中可看出求解時間為 529.52 秒。燃煤用量為 9.844 萬噸，只有少量的減少是因興達電廠發電總量的減少主要是由其他尚未滿載的燃煤機組提高出力來因應之故，伴隨著總成本增加至 53.18 仟萬元。燃油用量為 8524 公秉，是因燃煤機組的出力已達滿載，使興達電廠降載的供電不足須由燃油機組增載來補足。天然氣用量在案例三為 6142 仟立方公尺，顯示興達電廠減載使得次貴的燃氣機組均全時段上線發電至上限。

表 6　案例三與案例一模擬結果之比較

	案例一	案例三
總成本(仟萬元)	50.2	53.18
CO_2(萬噸)	26.942	26.71
求解時間(秒)	725.149	529.52
燃煤用量(萬噸)	10.283	9.844
燃油用量(公秉)	6622	8524
天然氣用量(km^3)	5360	6142
輕柴油用量(公秉)	0	0
燃煤發電量(MWh)	264775	252663
燃油發電量(MWh)	24811	33052
天然氣發電量(MWh)	22770	26641
輕柴油發電量(MWh)	0	0
燃煤成本(仟萬元)	31.14	29.71
燃油成本(仟萬元)	11.13	14.38
天然氣成本(仟萬元)	7.93	9.09
輕柴油成本(仟萬元)	0	0

表 7 為案例三之電廠發電量統計，可看出興達電廠出力的減少主要是由大林和協和電廠升載來因應。

表 7　案例三與案例一模擬結果之各電廠發電量

(單位：MWh)

電廠別	案例一	案例三
興達	52215	35259
林口	14418	14673
大林	43366	50813
協和	20499	25667
台中	181858	185943

四、案例四：二氧化碳排放總量上限較案例一結果低 5%

案例四將模擬二氧化碳排放總量減 5%的情境。二氧化碳排放量是一個時間耦合限制，某時點的機組組合改變就會改變其他時點的機組組合，可預期求解時間將大幅增加。表 8 為案例四的總成本、CO_2 排放量、求解時間、燃煤用量、燃油用量、天然氣用量、輕柴油用量、燃煤發電量、燃油發電量、天然氣發電量、和輕柴油發電量與案例一的比較，由表中可看出由於 CO_2 排放總量減 5%，求解時間大幅增加至 10501.49 秒，相比於案例一可明確看到二氧化碳排放總量的時間耦合限制式對求解時間有很大的影響。燃煤用量為 8.155 萬噸，變動略大是因 CO_2 限制，高排放係數之燃煤機組發電總量減少，伴隨著總成本增加至 64.274 仟萬元。燃油用量為 16498 公秉，天然氣用量則從 5360 仟立方公尺上升至 8249 仟立方公尺，可看出燃煤機組降載部分由其他燃料類別機組提高出力彌補不足時段之供電量。顯示 CO_2 限制使得燃油及天然氣機組上線時段激增。

表 9 為 CO_2 案例之電廠發電量統計，可看出 CO_2 出力的減少主要是由協和電廠增載來因應，大林電廠和林口電廠等出力變動較不大，協和電廠在案例四則大幅增加 45957MWh。由於 CO_2 案例的機組出力變動主要是燃煤為主電廠的出力限制，所以台中電廠的總出力也因此大幅減少。

表 8　案例四與案例一模擬結果之比較

	案例一	案例四
總成本(仟萬元)	50.2	64.274
CO_2(萬噸)	26.942	25.595
求解時間(秒)	725.149	10501.49
燃煤用量(萬噸)	10.283	8.155
燃油用量(公秉)	6622	16498
天然氣用量(km^3)	5360	8249
輕柴油用量(公秉)	0	0
燃煤發電量(MWh)	264775	207065
燃油發電量(MWh)	24811	68575
天然氣發電量(MWh)	22770	36716
輕柴油發電量(MWh)	0	0
燃煤成本(仟萬元)	31.14	24.80
燃油成本(仟萬元)	11.13	27.27
天然氣成本(仟萬元)	7.93	12.20
輕柴油成本(仟萬元)	0	0

表 9　案例四與案例一模擬結果之各電廠發電量

(單位：MWh)

電廠別	案例一	案例四
興達	52215	56834
林口	14418	15562
大林	43366	45028
協和	20499	66456
台中	181858	128475

伍、結論

目前國人用電習慣，深深影響電力負載及區域輸送的問題，使得電力調度計劃之擬定不同以往，更加困難。近年來由於人類生活型態、經濟結構改變，使得台灣對於即時電力調度等問題更需重視。對於電力產業而言，燃料以及溫室氣體排放限制使得在擬定汽力機組排程時，須符合電力平衡同時又滿足目標成本最小化等問題，增加實際調度上的困難。而本文提出之汽力機組排程之模型，除考量到傳統機組等相關限制式，更考量到短時間內的電力調度以及機組啟停出力等問題，適用模擬之時間區間為 15 分鐘，結合本文提出之快速演算法，能有效模擬實務上台電的情境。本文的模擬案例僅在探討汽力機組排程模型的適用性，非台電實際狀況。未來將再建立複循環機組、IPP 機組和抽蓄水力機組等模型，進行更貼近實際系統的模擬分析。

陸、參考文獻

[1] C. C. Columbus and S. P. Simon, "Hybrid particle swarm approach for security constrained unit commitment,"in *Proc. of 2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET)*, 2012, pp. 128-133.

[2] T. Senjyu, H. Yamashiro, K. Shimabukuro, K. Uezato, and T. Funabashi, "A fast solution technique for large scale unit commitment problem using genetic algorithm," in *Proc. of IEEE Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific 2002*, vol.3, pp. 1611-1616, Oct. 2002.

[3] D. P. Kadam, P. M. Sonwane, V. P. Dhote, and B. E. Kushare, "Fuzzy logic algorithm for unit commitment problem," in *Proc. of 2009 International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation*, June 2009, pp. 1-4.

[4] D. N. Simopoulos, S. D. Kavatza, and C. D. Vournas, "Reliability constrained unit commitment using simulated annealing," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 21, no.4, pp. 1699-1706, Nov. 2006.

[5] H. Daneshi, A. K. Srivastava, and A. Daneshi, "Application of fuzzy logic to priced-based unit commitment under price uncertainty," in *Proc. of 2010 IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Apr. 2010, pp. 1-5.

[6] H. Ahmadi and H. Ghasemi, "Security-constrained unit commitment with linearized system frequency limit constraints," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 29, no. 4, pp. 1536-1545, July 2014.

[7] P. K Singhal and R.N. Sharma,"Dynamic Programming Approach for Solving Power

Generating Unit Commitment Problem,"in *Proc. of 2011 International Conference on International Conference on Computer & Communication Technology (ICCCT)*, 2011, pp. 298-303.

[8] B. Rampriya, K. Mahadevan, and S. Kannan, "Unit commitment in deregulated power system using lagrangian firefly algorithm," in *Proc. of 2010 International Conference on Communication Control and Computing Technologies (ICCCCT)*, Oct. 2010, pp. 389-393.

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

輸工系統潛盾工程特殊案例

The Special Cases of Shield Tunneling Project Built by Dept. of Transmission & Substation Projects, TPC

竺文彥* Chu, Wen-Yen　李宗坤* Lee, Tzeon-Kung　孫漢豪** Sun, Han-Hao　蘇百加** Su, Pai-Chia

摘　要

台灣之潛盾工法普遍應用於捷運隧道工程，捷運之潛盾隧道大都為單一口徑及大曲率半徑。輸工系統自民國 89 年首度以潛盾工法穿越台南市鹽水溪以來，陸續已完成超過 20 件的潛盾工程，潛盾洞道內徑介於 2.6~6.0 公尺，單一潛盾洞道長度介於 250~2,594 公尺，最大覆土深度超過 40 公尺，而曲率半徑最小為 20 公尺。本文主要介紹輸工系統特有之潛盾洞道案例，包括長距離、急曲線、大深度大水壓、大卵石及複合地層，提供日後工程設計及施工參考。

Abstract

The shield tunneling method have been widely used in MRT tunnel projects in Taiwan, and most of the tunnels using this method are of single-diameter and large-curvature radius. Since the year of 2000 when Department of Transmission & Substation projects of TPC first built a tunnel that straddles Yen-Shui River by using this construction method, more than 20 tunnels of this kind have been completed, with tunnel calibers ranging from 2.6 to 6 meters, tunnel lengths ranging from 250 to 2,594 meters, the maximum overburden depth of more than 40 meters, and the minimum curvature radius of 20 meters. This essay introduces some typical projects completed by Department of Transmission & Substation of our company using the shield tunneling method, which can serve as reference of other tunnel construction projects in the future.

關鍵詞(Key Words)：潛盾工法(Shield Tunneling Method)、長距離(Long Distance)、急曲線(Small Radius Of Curvature)、大深度大水壓(Deep Depth, High Hydraulic Pressure)、大卵石(Cobble)、複合地層(Complex Layer)。

壹、前言

輸工系統潛盾工程經歷十餘年來的發展，已完成超過 20 條潛盾洞道。其內徑依佈纜需求介於 2.6~6.0 公尺，單一洞道長度介於 250~2,594 公尺間，且分佈台灣各地區，技術已趨進成熟，斷面、長度、深度及所遇地層等皆較其它單位之潛盾洞道變化大。

輸工系統潛盾工程難以比照捷運隧道於道

*台灣電力公司輸供電事業部輸變電工程處南區施工處
**萬鼎工程服務股份有限公司

路上設置工作井，一般用地亦難以取得，所以大都利用自有變電所或發電廠用地，然受限出發及到達井位置，以及隧道常須克服市區道路狹窄及轉彎，故衍生出長距離與急曲線等問題。另一方面，由於輸工系統潛盾工程分佈台灣各區域，故遭遇的地層亦較多樣化，穿越的障礙物除一般地下管線外，尚包括河川、橋梁基樁、捷運潛盾洞道及高雄港航道等。

本文針對輸工系統已完成(或施工中)之潛盾工程當中，挑選出『長距離(單一隧道及地中接合)』、『急曲線』、『大深度大水壓』、『大卵石及複合地層』等特殊案例簡介，並提出遭遇狀況與解決方式供日後工程參考。

貳、長距離(單一隧道/地中接合)

潛盾工法係利用潛盾機於地底下掘進，並組裝環片防止土壤崩塌之隧道工法。雖隧道上方之地面無開挖，但仍需於起點與終點二端開挖工作井，以提供機具材料投入、土石方取出及日後維修人員進出等需求。潛盾洞道之長度即受限工作井之距離，雖隧道長度越長越經濟，但相對施工越困難。本節分別介紹單一長距離之安南-府城 161kV 線及二端發進於地中接合之大林-高港 345kV 線第一工區。

一、安南~府城 161kV 線(單一隧道)

(一) 基址條件

本工程位於台南市安南區[1]，由安南變電所至運河變電所，主要行經中華北路與中華西路，全長 2,446 公尺。由於中華北路與中華西路(台 17 省道)均為台南市安南區重要聯外道路，無法採用明挖施工埋設管路，以容納八回線 161kV 電纜，若採用推進工法因常用最大內徑為 2.4 公尺而須採雙推管，且路徑中仍須設置數處工作井，而不易取得道路挖掘許可。最後決定採用內徑 3.9 公尺之潛盾工法，僅於兩端之變電所內設立工作井，路面皆免開挖，另於觀海橋南側設有一#3 分歧井，該分歧井由於用地空間狹窄，採用壓入式沉箱構築，為台電公司首次採用壓入式沉箱之工程。本工址地層以粉質粘土及細砂為主，平縱斷面如圖 1 所示。

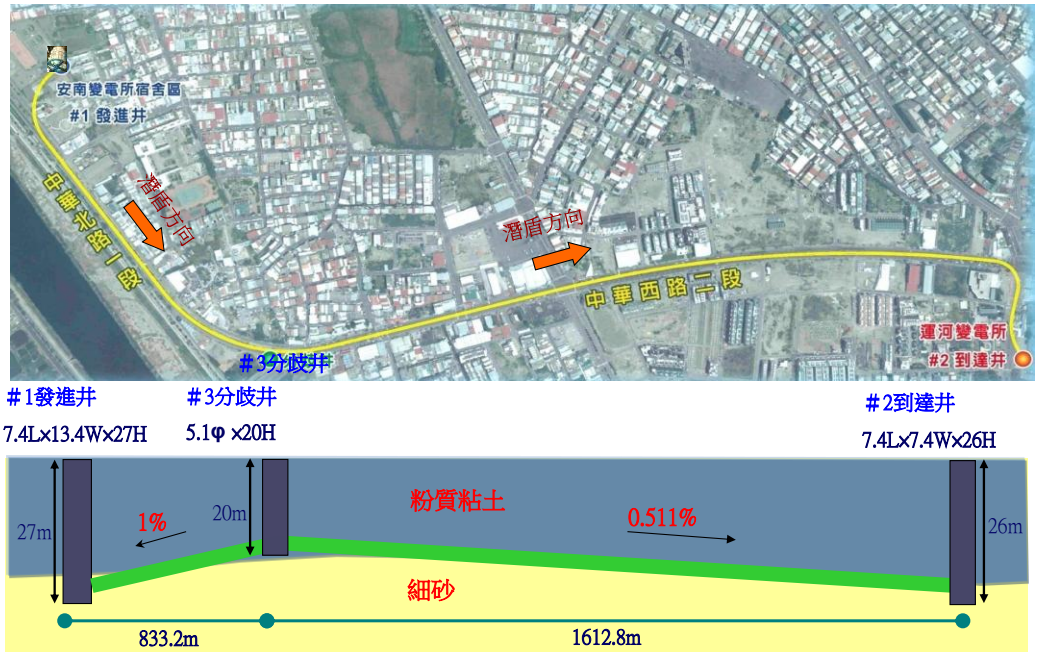
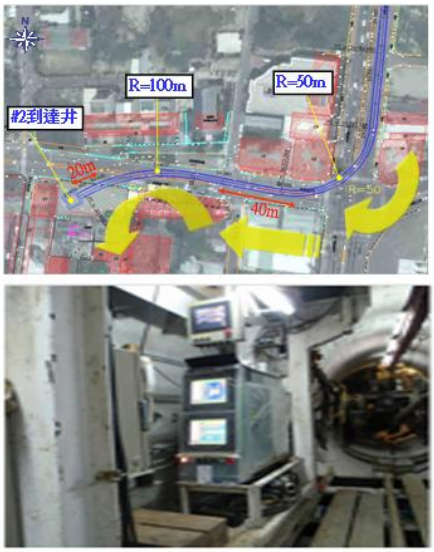


圖 1　安南~府城 161kV 線平縱斷面圖

(二) 遭遇狀況與解決方式

本工程潛盾洞道單一長度達 2,446 公尺，施工過程中人員進出、出土、環片搬運、通風及消防等須特別考量，並需加設中繼設備來克服。另長距離潛盾鑽掘時精度控制非常重要，接近#2 到達井處潛盾線形經急彎段(R=50m)後，以 40 公尺直線段銜接曲線段(R=100m)，最後僅經 20 公尺直線段即須進入到達井(圖 2)，施工控制困難度高，且#2 到達井僅鄰民房約 3.5m，故本工程採用高精度全測站光波經緯儀及自動化控制管理系統，輔以每日 2 次人工檢測，以確保掘進線型。最終，潛盾掘進到達端平面偏差量為 2.7 公分，高程偏移量亦僅 0.8 公分，遠低於規範值 10 公分(圖 3)。



自動化控制系統

圖 2　#2 到達井前之反曲線及其自動化控制系統

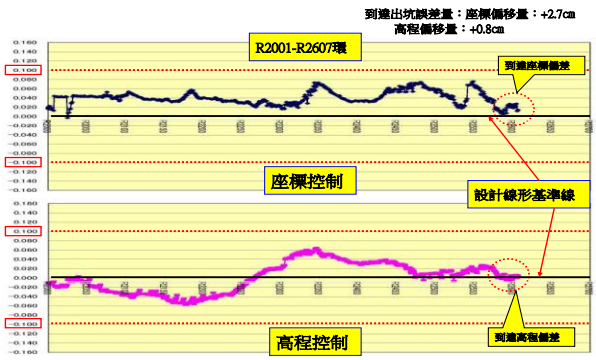


圖 3　自動控制系統量測結果

二、大林~高港 345kV 線第一工區(地中接合)

(一) 基址條件

本工程位於高雄市小港區[2]，由大林發電廠內之#1 直井，經南星路、中林路至南工變電所內之#2 直井，全長約 5,344 公尺，潛盾洞道內徑為 5.7 公尺。因採地中接合，僅有兩端之出發井，無到達井，出發井均採壓入式沉箱施工，路徑中設有兩處人員出入口，採全套管工法施工。洞道內需容納 161kV 四回線複導體及 345kV 四回線單導體，本工址地層主要以粉土質砂夾薄層黏土為主，平縱斷面如(圖 4)所示。

(二) 遭遇狀況與解決方式

本工程潛盾洞道計畫採地中接合，為台灣首例，目前施工中。採地中接合係因路徑需經中林路，兩側為中油公司大林廠及中鋼公司，道路下方遍佈各類型的中油長途管線及維生管線，因中油長途管線動輒數公里，無法輕易遷移供設置工作井，若採單一部潛盾機則距離太長且無法符合供電時程。故決定於大林電廠(#1 機)及南工變電所內(#2 機) 分別設置出發井，2 部機同時推進，於地中作接合，以克服無法設置到達井之困難。

本工程採用機械式地中接合工法之 CID (Concentric Interlace Docking Shield Method)工法，接合機制為二部潛盾機(圖 5)接近時，受入側潛盾機(#2 機)，有外筒、內筒構造，到達預定位置後停止挖掘，其切刃盤向後縮入後，貫入側潛盾機(#1 機)往前並將機身盾殼直接與受入側盾殼前端止水構件接合。地中接合成功之關鍵，在於是否能達到預期止水功能及其接合精度。地中接合處之止水機制採用多重防禦觀念，包括第一層注入固化材；第二層焊封止水鋼板；最後再視需要以止水材填充，共 3 道措施以達確實穩靠的止水效果。

如何使 2 部潛盾機得以準確接合，為整個地中接合施工中最重要之一環。平時之潛盾施工定位測量，係採自動控制系統並輔以每日 2 次人工檢測，隨時掌握線形的偏差量。因接合精度需達 50mm，故於到達接合點前約 200~300m 設置 1~2 處垂直測量貫通孔，將洞道內測量數值予以閉合以增加精度。當兩台潛盾機相距 30m 及 3m 時，由受入側潛盾機內施作水平探查孔施以水平測量以確保接合精度可在誤差範圍內，如(圖 6)所示。

圖 4　大林~高港 345kV 第一工區平縱斷面圖

圖 5　大林~高港 345kV 第一工區地中接合潛盾機(受入側)&(貫入側)

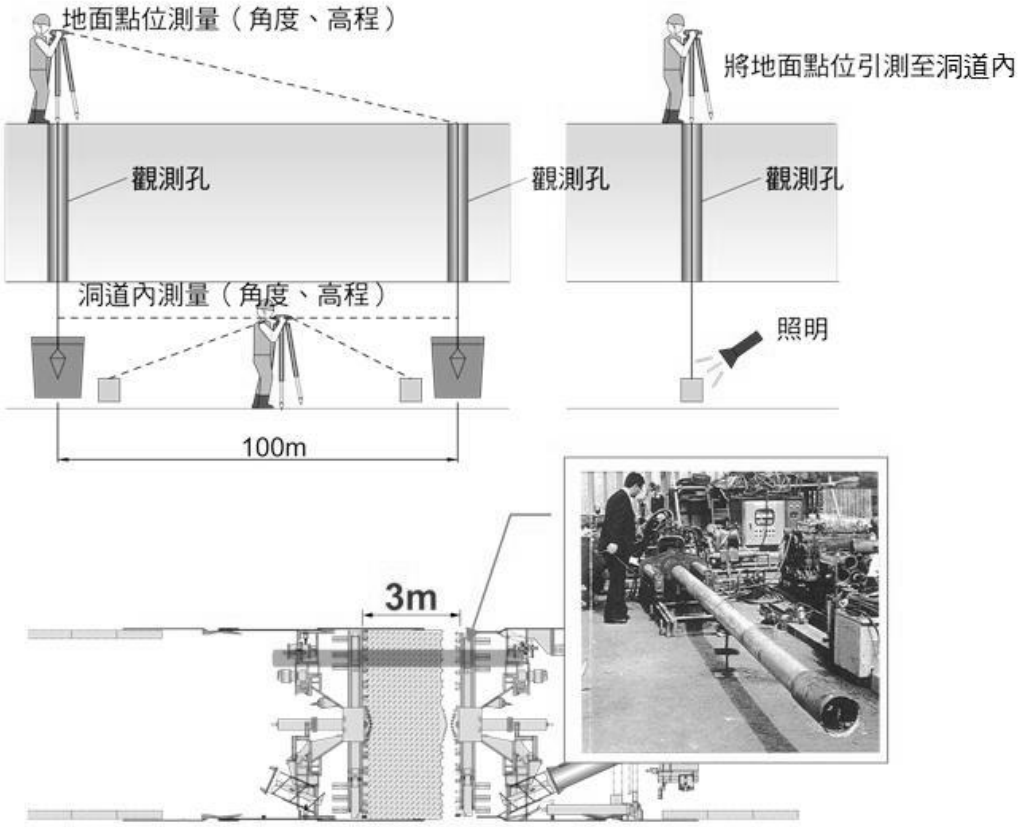


圖 6　地面增設垂直測量貫通孔及受入側施作水平探查孔

本工程 2 號潛盾機於 104 年 8 月 23 日鑽掘至高雄市小港區中林路與中利路交叉口預定進行地中接合之定位點，開始進行地中接合之受入前置作業，即外胴向前掘進推出。104 年 9 月 17 日下午 10 點 30 分外胴已向前掘進推出 1.8 公尺，因不明原因 2 號潛盾機於 4 點鐘方向發生軸封壓板螺栓突然斷裂及軸封遭擠出，造成地下水夾粉質細砂流入機內，施工廠商先以布料及楔木填充出水砂處，同時於止水軸封處灌注黃油，並以快乾水泥等止水填充材封堵；104 年 9 月 17 日下午 11 點水砂湧入量增大，故於湧水砂處堆置砂包，並以千斤頂加壓減少泥砂湧入，並連繫地盤改良廠商即時進場灌漿後湧砂量略有減緩，惟至 9 月 18 日上午 1 時 30 分湧砂量又開始增大，滲流速度已大至無法灌漿，改以砂包堆置，因湧出水砂已掏空潛盾機前胴底部地層，於上午 2 時 20 分潛盾機頭下沉 20mm，環片快速接頭處陸續出現滲水情形；由於潛盾機下沉及上方土層崩解擠壓環片，使環片位移增加，3 時 15 分大量土砂湧入洞道內，3 時 20 分環片塌陷，3 時 30 分人員撤離至地面；土砂大量湧入洞道內後引發洞道上方路面大規模崩塌，管線損壞部份計有中華電信、自來水、污水及 11 條石化油氣管線，中林路二側中油及中鋼公司發生地面龜裂及廠房受損現象。

事故發生後由於二側均為中油、中鋼公司廠房，為避免其災害擴大，於廠房佈設監測沉陷點，密集監測，並於廠房周遭進行低壓灌漿，填充地層流失後的孔隙。中油、中鋼廠房沉陷點監測歷時如圖 7、8 所示。

由圖 7 或 8 可看出中油、中鋼廠房有 2 階段較為明顯的沉陷發生，但經低壓灌漿後，沉陷狀態均趨於穩定。

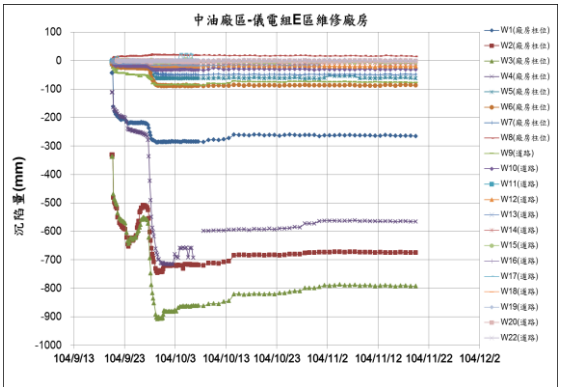


圖 7　中油廠房沉陷監測點歷程

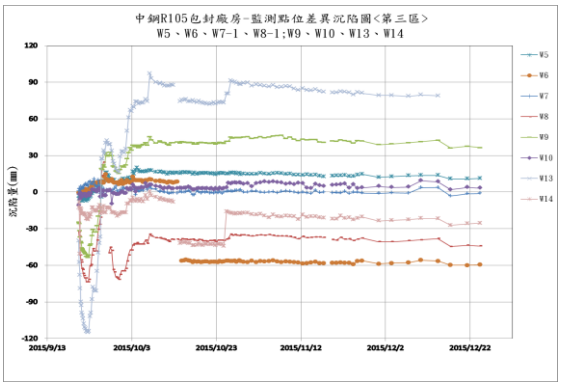


圖 8　中鋼廠房沉陷監測點歷程

參、急曲線

台北或高雄捷運之潛盾隧道線形受制於列車的車行速度，一般曲率半徑均較大，約在 300 公尺左右。而輸工系統之潛盾洞道線形常因無法規劃於主要道路而受到次要道路寬度限制，或因須轉入變電所等因素，而使曲線半徑較小。一般市區道路若要直角轉彎，其轉彎半徑約 40~50 公尺，道路越狹小半徑即越小，而轉彎半徑越小施工困難度越高。在此以砂土地層之高港~五甲~高雄 345kV 線(凱旋路段)及卵礫石地層之霧峰~德義 161KV 線來說明。

一、高港~五甲~高雄 345kV 線(凱旋路段)

(一) 基址條件

本工程潛盾洞道內徑為 4.625 m[3]，環片厚度為 0.275 m，容納 345kV 電纜 4 回線、161kV 電纜 8 回線及冷卻、通風系統等附屬機電設備。潛盾機由五甲變電所#5 直井出發後，沿自強路、五甲路、三誠路、瑞南街、凱旋路至中華路與凱旋路交叉口附近之#6 直井為止，潛盾洞道總長為 2,594 公尺。地層為第四紀之全新世沖積層，主要以砂、粉土、粘土及砂礫石所組成。潛盾洞道深度主要以粉土質砂、粉土質粘土及局部礫石層之地層分佈為主，並呈交互出現，平縱斷面如圖 9 所示。

圖 9　高港-五甲-高雄 345KV 線(凱旋路)平縱斷面圖

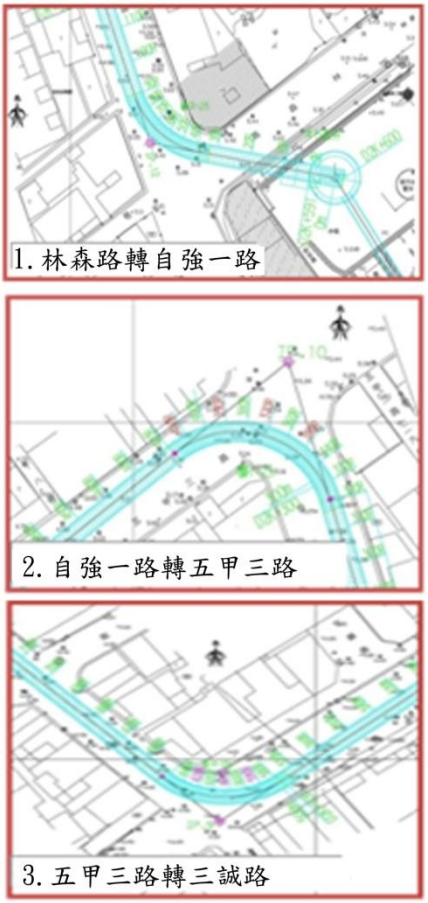


圖 10　急曲線段平面示意圖

(二) 遭遇狀況與解決方式

高雄市五甲地區特色為建物老舊、道路狹窄與人口稠密。本工程出發井位於變電所內，因此不致影響交通，在施工作業上尚屬單純。唯潛盾洞道路徑道路非常狹窄，並鄰近既有建築物，施工風險極高，且有3處曲率半徑為25m之急曲線(圖10)。本工程為大口徑急曲線之高度技術工程，為克服曲率半徑 25 公尺之急轉彎，於搭配潛盾機機型選擇、異型環片設計、掘進管理等小心翼翼施工下，方能順利完成。

本工程使用泥土加壓潛盾機，潛盾機照片詳(圖 11)，潛盾機構造詳(圖 12)，潛盾機規格詳(表 1)。潛盾機運轉時將鑽頭切割之土砂注入作泥材，以切翼後方之混合攪拌翼進行強力拌合後，將被切割之土砂轉變成具塑性、不透水性之流動泥土，再將此泥土充滿於泥土艙室與螺旋輸送管內，並調整潛盾機千斤頂之推進速度與螺旋輸送管的轉速，使泥土壓與開挖面之『靜止土壓+地下水壓』保持相等，一邊排土、一邊推進詳(圖 13)。潛盾機需配置中折裝置以避免過度超挖，而導致地盤沉陷與周邊地盤難以提供適度之反力供潛盾千斤頂推進。經核算環片通過潛盾機盾尾端部之間隙及環片組裝時之餘裕量，設計潛盾機中折角度為 8.7 度。另針對此等急曲線段鋼環片寬度由正常之1公尺縮減為50公分，環片厚度由正常之 27.5 公分，經採加勁設計後減為 26.5 公分；異型鋼環片最大寬度 56.5 公分、最小寬度 43.5 公分，異型量 13 公分，以符合轉彎半徑 R=25m 線形需求。潛盾機掘進施工時，依陀螺儀掘進操控管理系統顯示之掘進偏差量，適時調整潛盾中折角度、超挖量及超挖範圍，藉以修正潛盾機掘進方位。另每一環鋼環片組裝完成後，採即時背填灌漿及特殊粘土灌漿工法回補孔隙增加土體安定，並經現場多次施灌漿後，再採定壓或定量管控背填量，隨時依監測結果調整背填灌漿之壓力，兼顧安全與經濟性。

掘進管理包含開挖面管理、背填灌漿管理、線形管理及潛盾機管理等，詳(圖 14)。急曲線施工最重要之成敗關鍵為線形控制，確保潛盾機依原規劃線形行進，避免侵入私有土地。本工程潛盾機掘進及洞道線形測量採用陀螺儀及電腦自動控制管理系統，其佈設如圖(15)及圖(16)所示。

圖 11　潛盾機照片

表 1　潛盾機規格

製造廠商	日立造船株式會社	**千斤頂總推力**	24,000 kN (16 支)
潛盾機型式	泥土加壓式潛盾機(中折式)	**中折最大角度**	H= ±8.7°，V= ± 0.5°
潛盾機外徑	Ø 5325 mm	**超挖刃最大長度**	175 mm
潛盾機長	6530 mm	**切削盤正常扭力(100%)**	2,611 kN-m
潛盾機全裝備重量	約 209.05 ton	**螺旋運輸機排土量**	130 m^3/hr
推進千斤頂頂伸速度	0~6.0 cm/min		

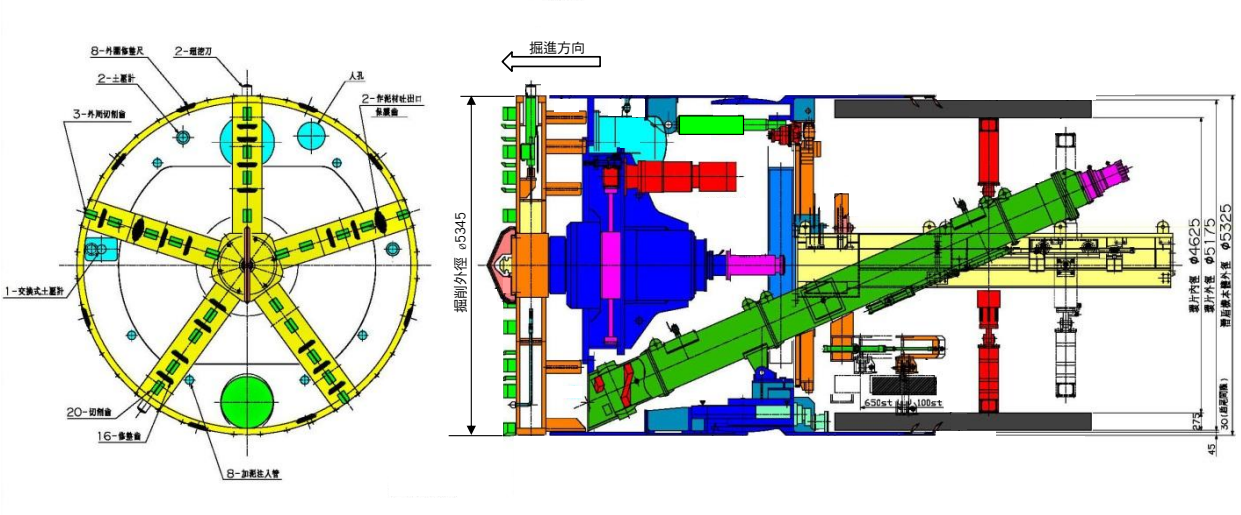


圖 12　潛盾機構造

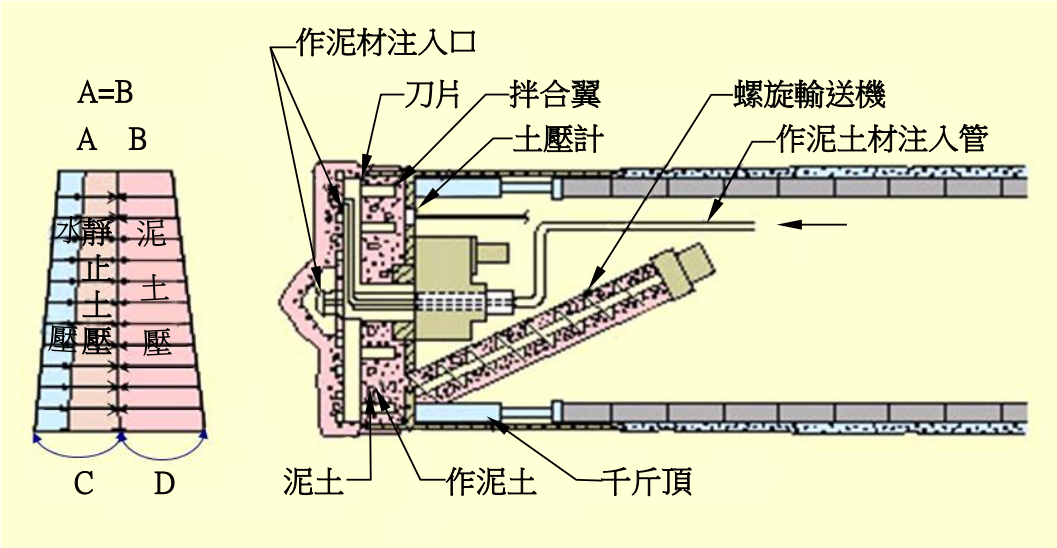


圖 13　泥土加壓潛盾工法

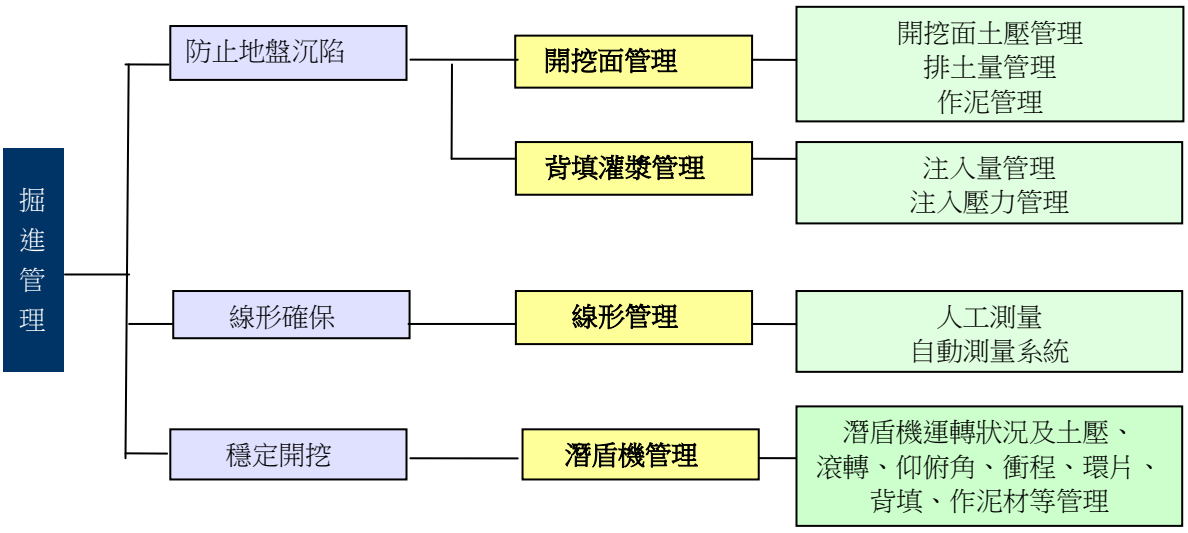


圖 14　掘進管理示意圖

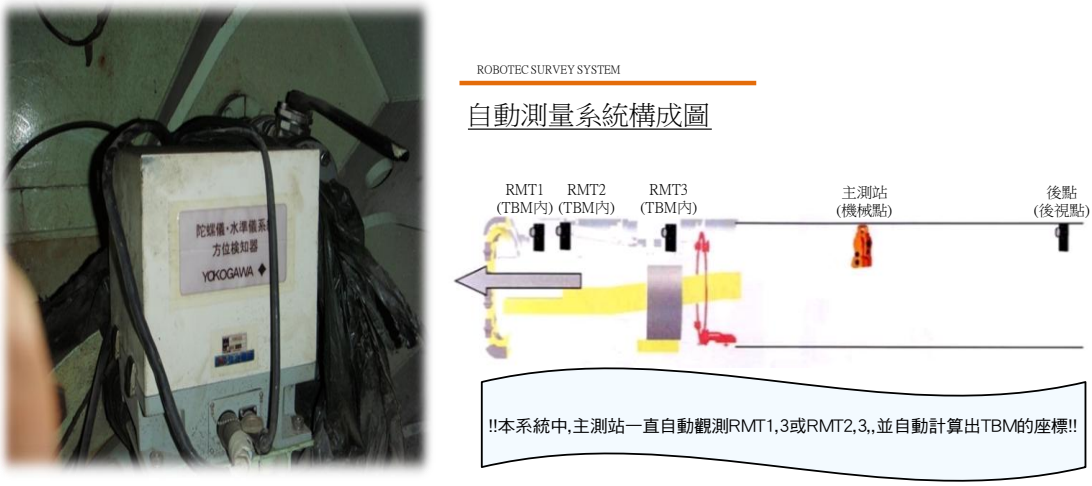


圖 15　電腦自動控制管理系統(一)

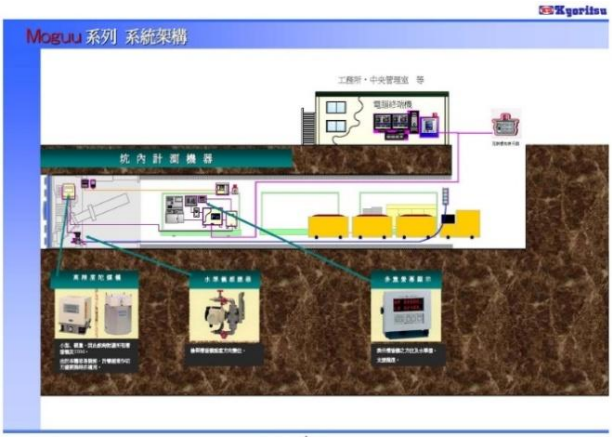


圖 16　電腦自動控制管理系統(二)

二、霧峰-德義 161KV 線

(一) 基址條件

本工程[4]採用內徑 3.2 公尺之潛盾洞道以容納 2 回線 161kV 電纜複導體，以#1 井為發進井，#2 井為到達井，總長為 1,157 公尺。因應洞道冷卻通風、人員進出、維修與逃生等需求，另設置#3 人員進出口一處，潛盾機所經之路線地質為卵礫石地層且含地下水，平縱斷面如(圖 17)所示。

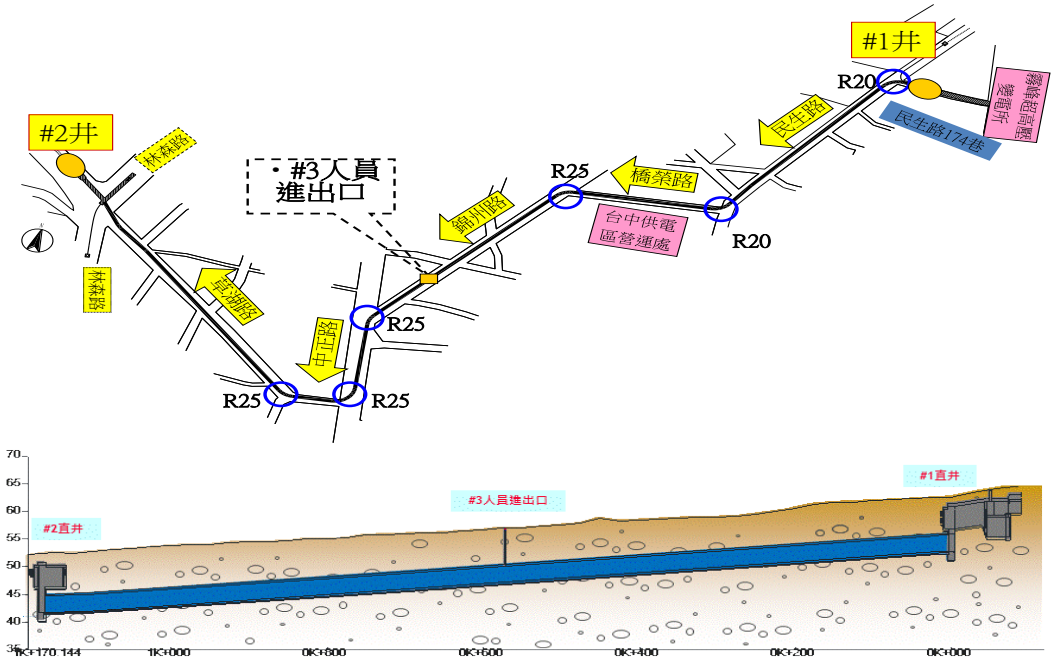


圖 17　霧峰-德義 161KV 線平縱斷面圖

(二) 遭遇狀況與解決方式

本工程共有 6 處急曲線，曲率半徑 20m，2 處及 25m，4 處之急曲線，覆土深度約 7 公尺，施工困難度非常高，且由於地層為卵礫石層，潛盾洞道又位於地下水位以下，因此潛盾機之選擇非常重要。本工程採用開口率大且具中折裝置之密閉式泥土壓潛盾機，潛盾機照片詳(圖 18)，潛盾機構造詳(圖 19)，潛盾機規格詳(表 2)。

於急曲線施工，須採用鋼環片(圖 20)並加大環片的異形量以順利過彎。於轉彎半徑 R=25m 時採用鋼環片寬度為 35 公分，異形鋼環片最大寬度 38.34 公分、最小寬度 31.66 公分，異形量 6.68 公分；於轉彎半徑 R=20m 時採用鋼環片寬度為 30 公分，異形鋼環片最大寬度 33.58 公分、最小寬度 26.42 公分，異形量 7.16 公分，以符合線形需求。雖然小口徑潛盾洞道對急曲線施工是有幫助的，但有限之空間除供人員進出外，尚需考量通風、照明、消防、出土、環片運送等，空間較為狹隘，施工功率較低。

圖 18　潛盾機照片

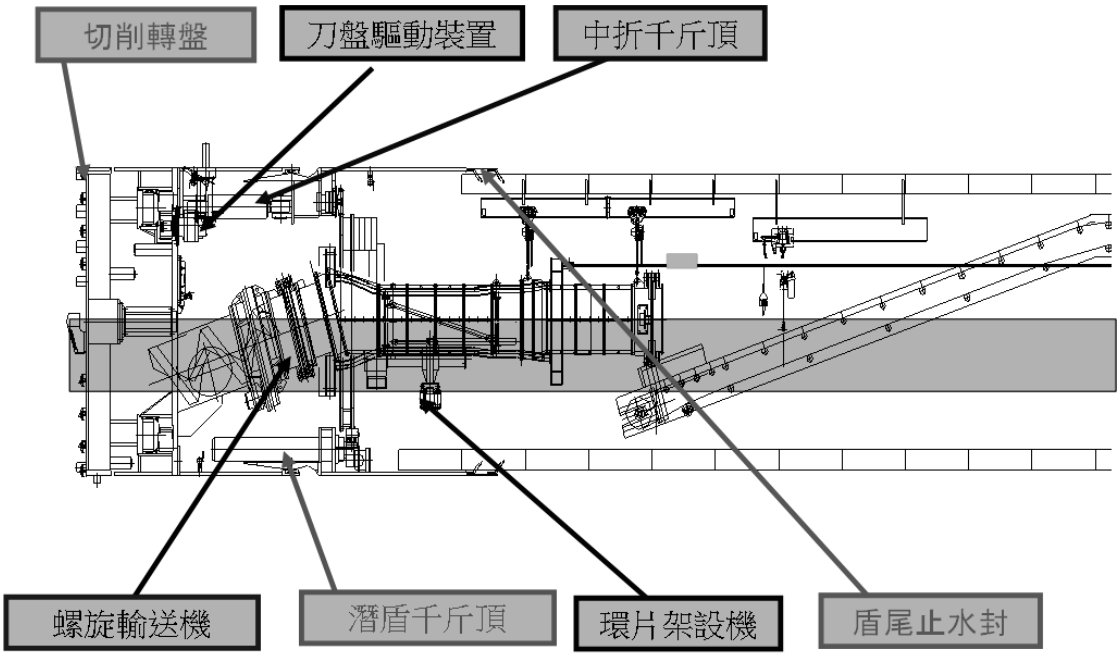


圖 19　潛盾機構造

表 2　潛盾機規格

型式名稱			φ3840 泥土壓潛盾機	
製造廠商名稱			奧村機械製作株式會社	
主要尺寸			**切刃齒**	
潛盾機外徑	3840mm		**名稱**	**數量(個)**
潛盾機長度	6500mm		鑽掘牙	52
潛盾機主體長度	5570mm		先行切刃齒	11
盾尾部板厚	40mm		周邊切刃齒	6
材質	SS400		棍子式切刃齒	18
推進裝置			中央切刃齒	1
總推力	14000KN		撥入切刃齒	12
單位面積的設備推力	1208KN/m2		周邊保護切刃齒	6
潛盾千斤頂伸長速度	6.73cm/min 全數工作時		**超挖裝置**	
中折裝置			配備數量	2 座
中折機構	V 中折機構		超挖量	120mm
中折角度	左右 11.4 度	上下 1 度	**螺旋運輸機**	
中折數	1 處		型式	編帶式螺旋運輸機
切刃盤裝置			驅動方式	油壓馬達驅動
型式	輪幅類型,分層形狀		螺旋徑	850mm
支撐方式	中間支撐方式			
扭力	常用 1080KN-m(α=19.0)			
	最大 1770KN-m(α=31.2)			
面版開口率	50%			

本工程施工時因潛盾機須在緊鄰民房且於覆土深僅 7 公尺的礫石層中掘進，所產生低頻振動造成當地居民困擾，經多次協商終獲諒解。潛盾到達時，因路證延遲致#2 工作井尚未開挖完成，經緊急應變檢討結果決定採用潛盾機棄殼方式到達。因#2 工作井採用鋼襯板擋土，於潛盾機掘進到達時工作井暫停開挖，先將潛盾機掘進至井內既定位置再繼續開挖工作井，同時配合潛盾機切刃盤拆解至開挖完成，最後將軸承及機內剩餘部份拆除運出，順利完成到達作業。

施工過程發現部分卵石長軸超過 60 公分(圖 21)，唯潛盾機到達後，其切削盤磨損狀況尚可(圖 22)，鑽掘過程亦無更換切刃齒，表示事先詳細調查地質狀況，並據以設計及製造潛盾機非常重要。

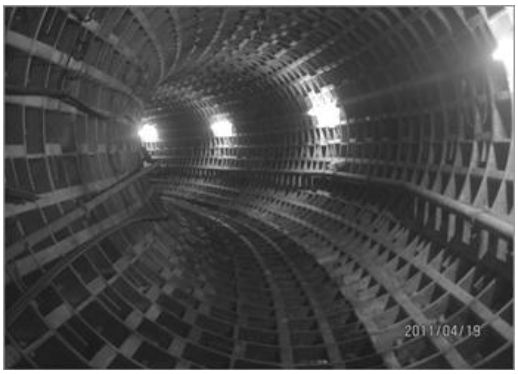


圖 20　急曲線鋼環片洞道

圖 21　大於 60 公分之卵石

圖 22　潛盾機先到達再開挖工作井

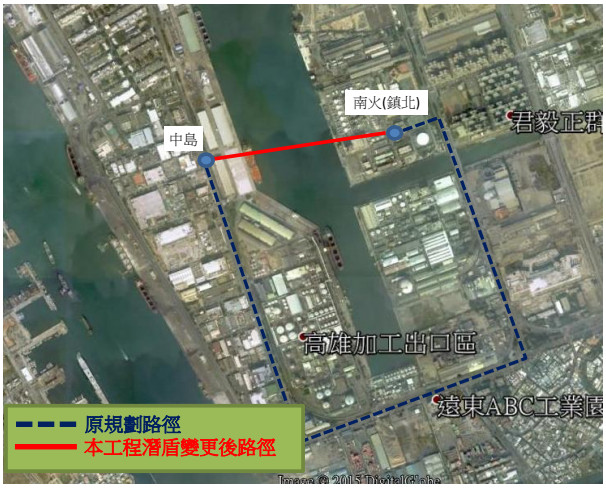


圖 23　原規劃與變更後路徑比較

肆、大深度大水壓

位於高雄市之鎮北~中島 161kV 線為輸工系統唯一穿越高雄港的潛盾洞道，因考量碼頭版樁與航道深度，故其覆土深度相當深，相對水壓非常高，對環片間的止水是很大的挑戰。另輸工系統潛盾洞道，於都會區常會遭遇既有道路橋梁之基樁，以及相當多的既設地下管線與捷運隧道，而使得潛盾洞道深度須配合加深，在此以高港~五甲~高雄 345KV 線(中華路段)案例說明。

一、鎮北~中島 161KV 線

(一) 基址條件：

高雄加工出口區內之中島變電所位於高雄港航道西側，電源由南部火力發電廠內之鎮北變電所提供，線路若依傳統思維僅能沿既設道路埋設地下電纜，但成功路為出入高雄港要道，交通流量甚高且貨櫃車進出頻繁，另線路路徑總長約 4 公里。後經通盤考量，並積極與高雄港務局協商，最終改採直線，以潛盾工法穿越高雄港航道下方，如圖 23 所示。如此，雖採潛盾工法土木工程費用較高，然縮短電纜長度，以及減少對環境及交通衝擊，使得總工程費用及社會成本大幅降低。

本工程潛盾洞道[5]全長為 799 公尺，佈設 4 回線 161kV 電纜，包含附屬機電等設施，需求斷面為 2.7 公尺，唯考量係位於海水下方，為降低滲水的風險，另採用二次襯砌厚 0.2 公尺，故潛盾洞道內徑為 3.1 公尺。本工址地層以疏鬆砂土為主，偶夾粉質粘土，平縱斷面如(圖 24)所示。

(二) 遭遇狀況與解決方式

本工程穿越高雄港航道下方，故覆土深度之決定最為重要，為確認航道深度，本工程於設計前先進行海床地球物理探測。縱斷面規劃時除需考量航道吃水深度及貨櫃船拋錨深度以外，尚須考量航道兩側護岸版樁長度，最終決定最大覆土深度約 30 公尺，承受之水壓亦大於 30t/m^2，設計時以 40t/m^2 進行估算。

為避免施工中海水之入侵，於潛盾機設計時，採『土壓艙內添加加泥材阻絕水路』、『潛盾機螺旋出土器增添密閉式加壓幫浦』、『採用三道盾尾刷並塗佈盾尾油灰防止地下水由盾尾侵入』等來克服，如(圖 25)所示。而環片之設計亦比照東京灣海底隧道防水防蝕規格，採『高爐水泥』、『外側塗佈煤焦環氧樹脂』、『環片間採非離子型水膨脹性止水條』、『二次襯砌混凝土』等，如(圖 26)所示。

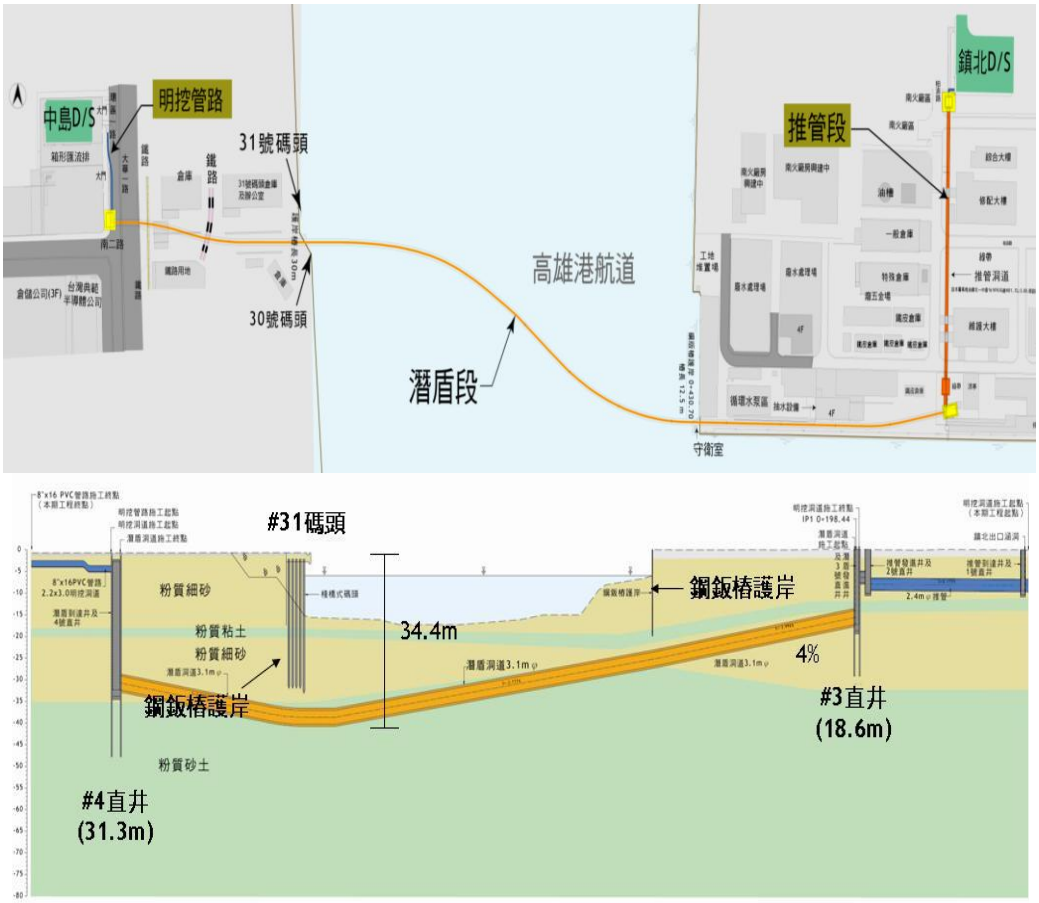


圖 24　鎮北~中島 161kV 線平縱斷面圖

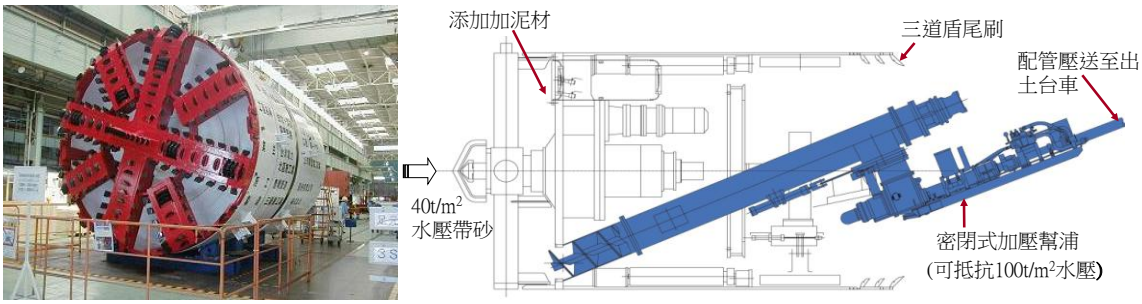


圖 25　潛盾機設計理念

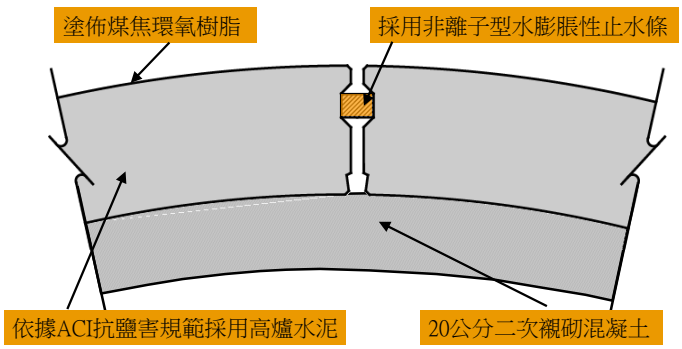


圖 26　環片設計理念

二、高港~五甲~高雄 345kV 線　(中華路段)

(一) 基址條件：

本工程位於高雄市精華路段[6]，全長 6,332 公尺，由南而北需穿越金鞏橋、高雄捷運橘線潛盾隧道、中華橋、台鐵鐵路地下化等工程下方，最高水壓約達 41t/m^2。規劃容納 345KV*四回線及 161KV 四回線，另考量冷卻管及相關附屬機電設備空間，潛盾洞道內徑為 4.625 公尺。本工址地層以砂土層為主，偶夾粉質粘土層。本案共採用三部潛盾機，其平縱斷面如(圖 27)所示。

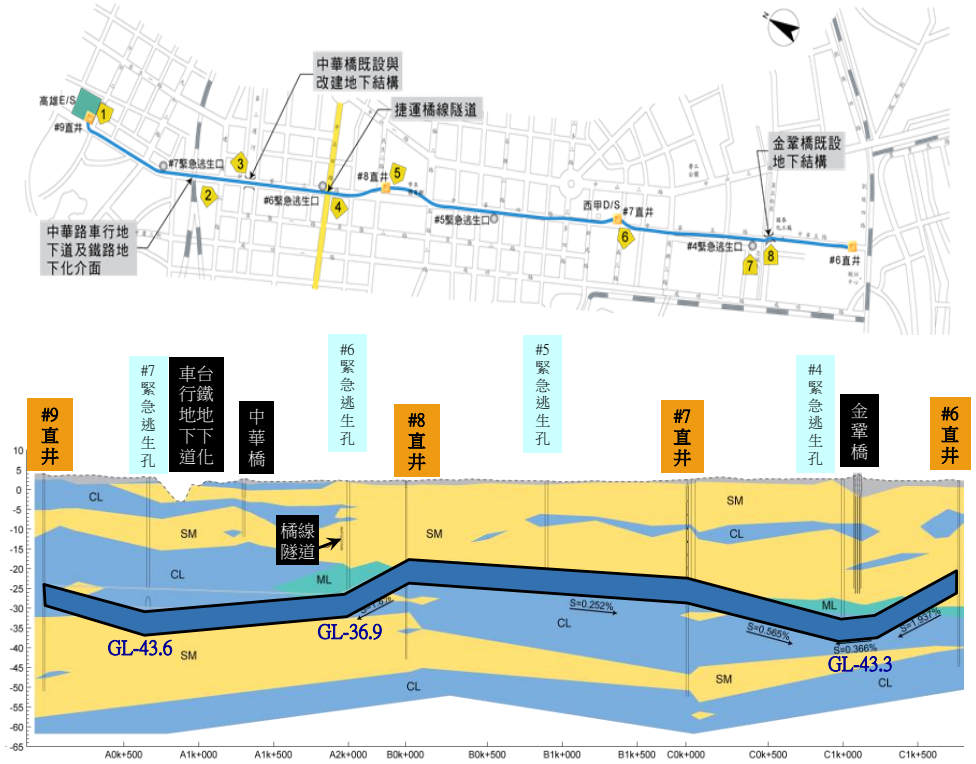


圖 27　高港~五甲~高雄 345kV 線(中華路段)平縱斷面圖

(二) 遭遇狀況與解決方式

都會區之潛盾洞道除需避開既有結構物外，更須仔細探查未來將興建之構造物，並與其他管線單位協商，以使地下空間共享。本路線於規劃階段得知高雄捷運橘線潛盾洞道即將施工，且本工程未來將穿越其下方，故緊急先行發包地盤改良工程，於捷運隧道尚未通過前先進行地盤改良，使本工程穿越時能確保已完工之捷運隧道安全無虞。金鞏橋係跨越高雄港五號船渠，經詢問主管機關並無改建計畫，故僅能由其基樁下方通過，且須與基樁保持一倍潛盾機外徑(5.3m)之距離，如(圖 28)所示。穿越鐵路地下化工程部份，由於本工程設計階段鐵路地下化擋土壁體尚未施工，故與其協商，將原有連續壁變更為全套管切削樁，底部並與潛盾洞道上方保持 3.38 公尺的淨間距，如(圖 29)所示，如此本工程即免再降深。

本工程針對高水壓力，環片厚度由一般慣用之 25 公分，增加為 27.5 公分，並以高爐水泥加強混凝土抗鹽防蝕能力。發

進到達鏡面地盤良採用 S-RJP 超高壓噴射灌漿，試灌驗證後設計樁徑達 2.6mϕ；到達鏡面設置隔艙系統，可有效封塞控制突然湧水及湧砂災變。

本工程 4 座連絡橫坑中有 3 座深度達 36.9~43.6m，施工風險非常高，故首創以冰凍工法應用於聯絡橫坑，取代常用之高壓噴射灌漿工法，增加施工安全性。

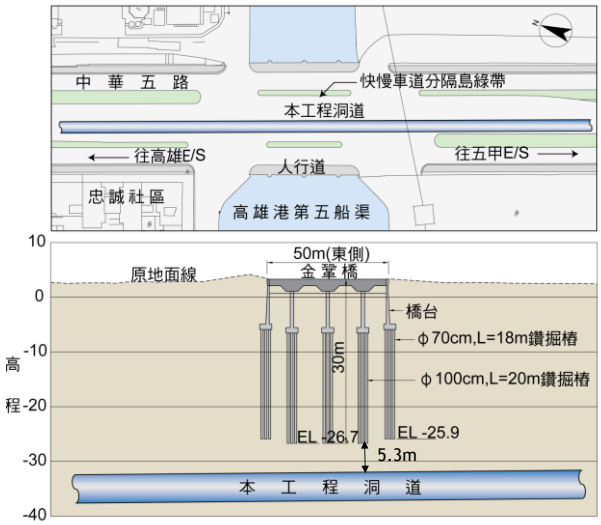


圖 28　穿越金鞏橋下方

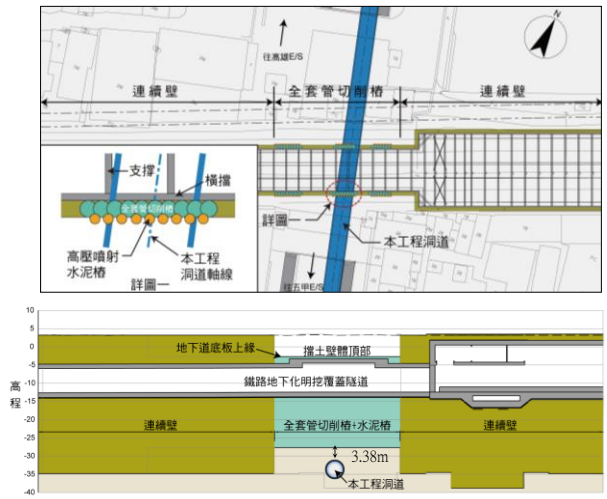


圖 29　穿越鐵路地下化下方

伍、大卵石/複合地層

台灣地區西部麓山帶北起林口，南至嘉義，於此區域施工常遭遇卵礫石地層，但由於卵礫石地層不同於沖積層，亦無法以岩層的方式對待，故潛盾等地下工程遭遇到卵礫石都是不易解決的，在此以新工~湖北 161KV 線於湖口台地之卵礫石地層施工案例來說明。另潛盾機之切削刃設計係依據地質條件而定製的，單一地質條件當然最佳，若是差異不大的也不會有太大困難，但若是極軟弱瞬間變為極堅硬時，則其潛盾機之切削刃設計最為重要，在此以核一、汐止~松湖 345KV 線說明，由於台北市區地層主要為軟弱粘土層，唯附近周遭山區則可能會變為砂岩或砂頁岩互層的地層，本案例即是先在軟弱黏土鑽掘，後進入堅硬砂岩，困難度極高。

一、新工~湖北 161KV 線

(一) 基址條件

本工址位於湖口交流道附近[7]，由湖北變電所發進沿工業二路穿越高速公路到仁和路，經過新工派出所右轉進入文化路到達新工變電所，潛盾洞道內徑為 3.9m，全長約 543m。此區域屬湖口台地，地勢高程約 82m，掘進路線地質為卵礫石層夾粉質細砂及黏土，水位約位於地表下 7~11m，平縱斷面如(圖 30)所示。

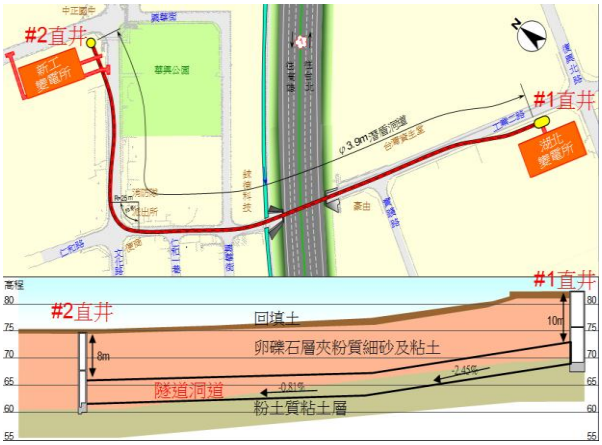


圖 30　新工~湖北 161KV 線平縱斷面圖

(二) 遭遇狀況與解決方式

本工程潛盾掘進施工範圍大多為卵礫

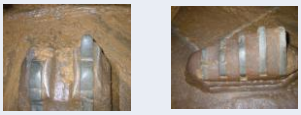
石層，採加泥式礫石對應型土壓平衡潛盾機施工克服此地質，潛盾機相片如(圖 31)所示。本工程於潛盾鑽掘過程中遭遇大卵石及卵石含量高，故數度開艙整修切刃盤，摘錄施工過程及遭遇狀況詳表 3。

圖 31　潛盾機面盤

首先探討是地質資料的差異，原本以數孔「鑽探」成果研判卵礫石地層的相關資訊，但因鑽孔口徑遠小於現場卵石尺寸，故採鑽探成果應無法正確研判卵礫石地層的卵石大小、單壓強度及其排列組成狀態。本工程潛盾洞道鑽掘過程中並無遭遇地下水，故於開艙時即是辦理試坑的最佳時機，且取出的卵石亦是最真實的，惟若於訂製潛盾機前能實際辦理鑽掘位置之試坑，當然更佳。

本工程遭遇大卵石的處理方式為每隔約 50 公尺即開艙檢視切刃與面盤等之磨損狀況，若已嚴重磨損則予以更換，以免影響工進。另於卵礫石地層中之急曲線則須將超挖範圍再予以擴大。

表 3　施工過程及遭遇狀況

施工階段	遭遇狀況	輔助相片
0R~138R	掘進至110m時發現出土礫徑變大、硬度較高，造成掘進速度緩慢。經開艙取樣送驗，礫石單軸抗壓強度達1680~1977 kgf/cm2。掘進至138R處，停機開土艙清土，清開切刃盤後發現原有切刃及面盤均嚴重磨損，且開挖面之含礫比高。辦理潛盾機整修。整修後約每50環開艙檢視一次。現階段掘進過程中加強注泥潤滑切刃與地層之摩擦力，保護切刃避免過度磨耗。	
139R~189R	掘進至189R時開艙檢視，發現少許切刃開始磨損，其餘大致磨損情況良好。	
190R~241R	掘進至241R時開艙檢視，發現切刃均已磨損。預計掘進至303R時進行磨損切刃切除更新並檢查預埋孔位置。	
242R~295R	掘進至295R時開艙檢視觀測孔位置及切刃磨損情形，發現Roller Cutter及切刃均磨損，隨即進行Roller Cutter及面盤磨損補強。	
296R~371R	掘進至367R時開艙檢視切刃磨損情形並更換磨損之Roller Cutter及切刃，此時機頭剛進入R=28m急曲線轉彎段。為了順利轉R=28m之急轉彎，負責擴挖之360 3山型Roller Cutter必須抬高30mm，擴挖直徑達 ψ 4630mm(原先為ψ 4600mm)。	
372R~451R	掘進至451R時開艙檢視觀測孔位置及切刃磨損情形，發現切刃磨損良好且觀測孔位置與設計相符。	
452R~473R	掘進至471R時因中心軸注泥管螺絲斷裂退縮，造成加泥材無法注入至開挖面，臨時將中心軸注泥管歸位後，加泥材改從機身及土艙注入。	

二、核一、汐止~松湖 345KV 線

(一) 基址條件

本案例由西湖變電所內之#1 直井出發，沿基湖路向北掘進，穿越內湖路後再沿環山路向北行，至德明財經科技大學以曲率半徑 45m 右轉環山路一段，在經過環山路一段 136 巷後以曲率半徑 80m 左轉入山區，銜接#32 連接站豎井下方之擴挖段[8]。

本工程地形高程變化由南往北漸高，潛盾洞道起點至通過環山路一段 136 巷前，沿線地表高程約由 EL.6.6m 漸增至 EL.20.8m，潛盾洞道設計坡度為 0.77%，洞道線於轉入環山路一段北側路塹上方之山坡地範圍後，地勢出現明顯變化，地表高程急劇陡昇至 EL.109.2m ~112.0m 之間，潛盾洞道坡度為 3.65%。位處於台北盆地邊緣，沿線出露地層包括五指山層、木山層、大寮層及現代沖積層等。現代沖積層涵蓋潛盾洞道前段約 830m，均屬青灰至灰色粉質黏土，中間偶爾出現灰色粉質細砂或粉土；後段則開始進入第三紀沉積岩地層，因地質節理發達，岩層強度變異相當大。一般土層段之地下水位約位於地表下 2.5m~3.8m 左右，於洞道轉入山坡地範圍，地下水位則隨地勢變化，約位於地表下 28.2m~74.7m 左右，平縱斷面如(圖 32)所示。

(二) 遭遇狀況與解決方式

為適應沿線軟弱黏土層、土岩界面複合地層及堅硬岩盤的複雜地質狀況，未能有足夠工期於潛盾機進入岩盤前先進行面盤改造更換切刃，因此面盤切刃設計採複合型刀盤，於輪輻型面盤的輪輻上同時配置可掘削土層及切削岩盤的切刃。潛盾機本體外徑 5.3 公尺、長度 6.94 公尺，由切削驅動部、前胴、中胴、後胴等四部分組立而成，潛盾機設計的總推力為 27,000kN，設計最大扭矩為 5283kN-m，而為因應平面線形曲率半徑 45 公尺之急轉彎，配置有油壓式中折千斤頂及可以調整任意位置、超挖量的油壓千斤頂式超挖刃設備 2 套，潛盾機照片如圖 33 所示。

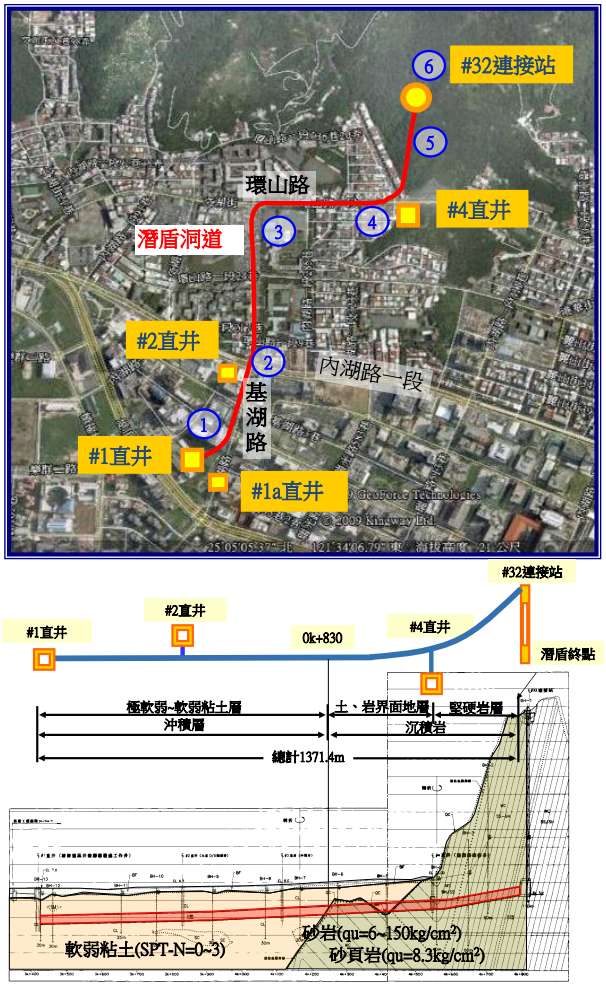


圖 32　核一、汐止~松湖 345KV 線平縱斷面圖

圖 33　複合型面盤潛盾機

本工程於設計時需同時考慮隧道穿越軟弱黏土層、複合地層及堅硬岩盤之多樣地層，相關潛盾機面盤及切刃設計之考量及對策如表 4 所示[9]。

表 4　潛盾機面盤及切刃設計考量及對策表

考量重點	潛盾機裝置	對策
黏性土壤之考量	中心軸支撐+輪幅型結構	採用中心軸支撐及輪幅結構減少土壤附著而降低掘進速度，並使用加泥材使土艙內土砂產生塑性流動性。
複合土層安定考量	超硬先行切削刃+刀套式切刃齒	因應地層層面位置之不確定性，依掘進及地質情況，視狀況採用地盤改良。
		以有高低差之強化先行切削刃與刀套式切刃齒保持切削面安定。
軟岩層單壓強度考量	刀套式切刃齒	於軟岩的掘進，考慮因岩體破碎後的黏性附著的影響，根據岩體的單壓強度選擇刀套式切刃齒。

1.土岩界面位置之調查，了解岩盤層面或弱面之走向、傾角、岩性等以妥予準備良好之因應對策。
2.考慮土岩界面是否採用地盤改良，讓潛盾機於掘進過程中能因應均勻地質而順利完成。
3.良好之掘進姿態管理，避免因開挖面應力不均而造成隧道線形偏離。
4.減緩掘進速度，以減少切刃齒之磨損及避免環片之扭轉變位。
5.切刃齒之磨損及更換檢討，考慮是否事先換齒或補強。
6.加泥材及背填灌漿是否因應岩盤而有所改變，避免切刃齒附著泥土導致切削效率降低。

本案例在掘進至里程約 830m 處首度遭遇土、岩界面，此土岩界面與設計調查之位置相近，經檢視切削刃狀況良好，故研判無需在層面前更換切削刃，且因為掘進姿勢保持良好，研判不需進行層面之地盤改良工作。掘進土岩界面後切刃盤因遇風化岩盤，扭力急速提升，而掘進速度由 20~45mm/min，降到 10mm/min，由於本複合段施工先行切削刃磨損將近 18mm(磨耗界限 20mm)，為避免磨耗過快，初步在下一次(里程約 1k+060)之土、岩界面段時掘進速度再降為 5mm/min。

掘進進入土岩界面後約 120m 處(里程約 1k+182 左右)，由於刀套切削齒多數已磨損超過 6mm 之界限而進行第一次的切削刃更換，經回饋計算先行切削刃磨耗係數在黏土小於設計值，而在軟岩回饋值則遠大於設計值，顯示先行切削刃在進行岩盤段後磨損加劇，另外刀套切刃齒實際在本次回饋風化軟岩小於設計值。

通過一般土層與軟岩複合土層段後，在岩盤面掘進途中調查刀頭的磨耗狀況，發現切削刃的損傷嚴重，在進行開艙調查後，發現有超出設計值之高強度岩盤出現，砂岩最大單壓強度高達 1560kg/cm^2，岩盤堅硬程度超出預期。處置對策主要採用下列三點：

1.掘進速度的抑制：由於岩盤單壓強度太高，且岩層變異性大，本工程在岩盤段掘進速度儘量仰制降為 5~10mm/min 左右，磨耗也跟著下降。另外也因岩盤單壓強度高於

預期，岩層之強度變異性大，需增加更換切刃齒次數。

2. 最外周增加切削刃補強：在刀套切削齒輪幅的最外周部配置切削刀頭，3線變6線，配置 2 倍的切削刃，新增的切削刀頭由原高度 160mm 提高到 170mm 做段差之配置，此段差配置是一種延長刀頭壽命的技術。
3. 中心部切削刃鋼板補強：中心部切削刀頭是一塊突出基座裝上刀套焊接而成的支撐形狀，在左右各裝置切削的切削刀頭，所以形成單臂支撐，因岩盤過於堅硬造成刀套發生脫落，必須增強刀套，在刀套下部新增鋼板加強基座，使刀套不再是單臂支撐而是兩面支撐，能減少刀套的脫落。

陸、結論與建議

一、輸工系統潛盾工程分佈於台灣各都會區，每一個工程都有其特色及困難點，從規劃、設計、監造到施工，都是台電人員與承攬商努力及相互合作的成果。本文謹歸納『長距離』、『急曲線』、『大深度大水壓』、『大卵石及複合地層』等輸工系統特有之工程案例，期使工程界對輸工系統潛盾工程技術有更進一步的了解。

二、於都會區興建地下電纜工程愈來愈困難，採用潛盾工法將日益增加。而都會區土地取得不易，且道路寬度不一，故長距離及急曲線亦是往後工程常出現之課題。

三、台北及高雄都會區已興建多條潛盾隧道，由於較晚施做者通常只能由已完成隧道下方穿越，故覆土深度將會越來越大，另一方面潛盾洞道穿越橋梁基樁亦無法避免。於大深度高水壓之狀況下，潛盾出發、到達及分歧為潛盾工程風險最高之工項。面對困難的挑戰，相關的輔助工法也相繼引用，如將冰凍工法直接使用於人員出入口，不同以往係應用於災變後之修復；採壓入式沉箱作為工作井，取代傳統之連續壁並免除深開挖之內支撐，除安全性較高外，亦減少開挖面積；以 FRP 構件取代工作井擋土壁之鋼筋，避免掘進前破除壁體可能造成之湧砂、湧水災變發生。

四、台灣西部麓山帶之卵礫石地層分佈極廣，且變異性甚大，故仍不易為工程界所充分瞭解，而傳統的鑽探並無法詳盡表達卵礫石地層情況，建議應輔以試坑開挖，方能初步了解卵礫石層分佈狀況；而面對軟弱瞬間轉為堅硬之複合地層，潛盾機之切削刃設計及土/岩交界面位置確認最為重要。輸工系統潛盾工程分佈於台灣各地，所遇地層較為多樣性，而潛盾工法係於地底下施工之高風險工程，故應事先以適當之方法調查地質狀況並據以設計及製造潛盾機，方能降低風險，確保工程順利完成。

柒、參考文獻

[1] 台灣電力公司輸變電工程處南區施工處，安南~府城 161kV 線金質獎簡報，民國 99 年 10 月。

[2] 台灣電力公司輸變電工程處南區施工處，大林~高港 345kV 線(第一工區)經濟部查核簡報，民國 103 年 10 月。

[3] 台灣電力公司輸變電工程處南區施工處，高港-五甲-高雄 345kV 線(凱旋路段)經濟部查核簡報，民國 97 年 1 月。

[4] 台灣電力公司輸變電工程處中區施工處，霧峰~德義 161KV 線經濟部查核簡報，民國 100 年 5 月。

[5] 台灣電力公司輸變電工程處南區施工處，鎮北-中島 161KV 線金質獎簡報，民國 95 年 10 月。

[6] 台灣電力公司輸變電工程處南區施工處，高港~五甲~高雄 345kV 線(中華路段)金質獎簡報，民國 99 年 10 月。

[7] 台灣電力公司輸變電工程處中區施工處，新工~湖北 161KV 線經濟部查核簡報，民國 95 年 5 月。

[8] 台灣電力公司輸變電工程處北區施工處，核

一、汐止~松湖 345KV 線金質獎簡報，民國 101 年 10 月。
[9] 蔡英聖、朱清泉、陳文通、廖吉雄、江承家，「複合地層潛盾洞道施工案例之探討」，第十一屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會，2012 年 11 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

回至目錄頁

應用地面光達監測輸電鐵塔結構物之精度分析

Precision Analysis for Laser Scanner to Structure Monitoring

楊金石*** Yang, Jin-Shyr
沈政毅*** San, Chen-Yi
鄭忠國** Cheng, Chung-Kuo
黃建民** Huang, Chien-Min
蕭宇能** Hsiao, Yu-Neng
黎文龍* Li, Wen-Lung
張哲豪* Chang, Che-Hao
陳煜文* Chen, Yun-Wen

(104 年度研究計畫論文)

摘　要

基於台灣地理位置於板塊交界處，屬於島嶼類型，經常會受到颱風與地震的侵襲，往往這些外力都會對結構體造成隱藏損耗，經長時間累積，這些潛在因素皆會造成受損；結構體大部分為廠房、大樓、橋樑、鐵塔、其他金屬建築結構等等。在台灣地區有許多結構體因自然災害影響，導致損毀，這些都可能讓社會產生損失，因此監測結構之穩定，是非常重要的。通常結構監測是以原始設計圖進行結構分析，透過專業工程師判斷後，再評估安裝監測傳感器放置的位置，後續以接收監測資料來判斷結構物是否穩定；但此無法對結構體全面監測。研究中考量全面性與高精度之監測需求，故採用地面光達進行監測，因地面光達測距精度高，且可對目標物進行全面掃描紀錄三維坐標。研究中於監測時加入許多實驗，來判斷地面光達監測結構體之精度，是否能達到，偵測結構變化之需求。

Abstract

An island located at the junction of tectonic plates, Taiwan frequently suffers from typhoons and earthquakes. Those external forces tend to pose invisible threats to the building structure. As time goes by, these forces will result in damages to the structure. The structures affected include such ones as: factories, buildings, bridges, towers and other metal-material buildings. In Taiwan, many structures are susceptible to natural disasters, leading to damages to the building and causing losses of property. Thus, monitoring the stability of the building structure is considered very important to protect property. In general, structural monitoring is made through structure analysis based on the original structure design. The places suitable for installation of the monitoring sensors should be evaluated according to the engineer's professional judgment. After that, it will be evaluated whether the structure remains stable or not with the monitoring data. However, the process could not be able to monitor the soundness of the entire structure. In this research, the laser scanner is adopted to take into account the building structure as a whole with high measuring accuracy. This kind of analysis can achieve distance measurement of high accuracy, scan the entire target, and record the three dimensional coordinates.

*國立台北科技大學土木與防災研究所
**台灣電力公司輸供電事業部供電處
***台灣電力公司綜合研究所

關鍵詞(Key Words)：地面光達(Laser Scanner)、點雲資料(Point Cloud Data)、結構監測(Structural Monitoring)。

壹、前言

臺灣位於地震活躍區環太平洋火山帶中，菲律賓海板塊和歐亞板塊交界上，因此地震非常頻繁。除了地震頻繁外，也經常受到颱風侵襲，加上近年來氣候變遷越來越劇烈，颱風帶來的暴雨讓台灣災情頻頻發生。臺灣在每年夏季轉秋季時都會有大量颱風來襲，必定會帶來強風與豐沛雨量，尤其是在山區特別顯著。而強風豪雨會對山區的邊坡造成侵蝕，往往會引起邊坡滑動事件發生，即可能造成坡地結構物的隱性傷害。特別是負責供應全台主要電力的輸配網路，經過山坡區域的輸電鐵塔，經長時間累積，這些潛在因素或是微小外力，皆可能導致結構物疲勞或是坡面受損。假設結構物重要部位出現受損現象，如未提早發現，讓結構物失去原有機能，即會引發重大災難。提前預防的觀念，正是定期監測結構物穩定的重要思考基礎。

目前結構物監測有很多方式，就安全監測常用的儀器有地滑計、沉陷計、應變計、傾斜管、傾斜度盤、加速度計、應力計、風速計、光纖感測器、全測站經緯儀、GPS 全球衛星定位系統等[1](林家如，2012；蔡伯中，2002[2-3])。不難發現，這些監測儀器所獲取的監測資料，都只能呈現單一位置的變動情況。

有別於前述單一位置的描述，地面光達(Laser Scanner)可在短時間內，高速而密集的施測結構物表面各點坐標，整體記錄結構物當下的幾何形狀與顏色。

由於地面光達施作快速，測距誤差可到達厘米等級(Boehler W, 2001[4])，近年來常應用於各式測量工程(曾義星與史天元，2003[5])。在監測上的使用也有相當多元的應用，例如：古蹟監測、隧道變形與落石監測、大型建築物監測、地形變遷監測、橋梁監測等等。[6](Stuart Gordon, 2014[7-8])特別是建立多時期-點雲模型(Point Cloud model)(Girardeau Montaut, 2005[9])，可相互套疊比對，協助查驗結構物變化趨勢，進而與其他單一位置監測量相互比對，確認結構物健康狀態。

研究中以厘米級高精度，與極高量整體結構物記錄數據的特性，擬採用地面光達，建置輸電鐵塔結構物之多時期點雲模型；經由點雲模型的識別與量測，建立輸電鐵塔各期特定點位的變位。擬以此量測技術，在輸電鐵塔健康監測的用途上，評估其精度與實務可行性。

貳、研究方法與內容

各種結構物特性不同，健康監測的應用方法原本就有必要因地制宜，也可能是多種方法的綜合判斷；特別是應用方法的精度，自然就決定其適用範圍。本研究將針對輸電鐵塔，透過多時期資料的比較，評估地面光達與點雲量測的綜合能力。研究中擬搭配多種短時間距監測，作為輸電鐵塔無變化之比對基準，率先定出輸電鐵塔結構物之點雲量測精度，以討論長時間距的變化程度。

研究區為嘉埔輸電鐵塔，作為監測之實際案例。本實驗區域位於山區，監測目標物建置於邊坡上。監測方式預計以兩種模式進行，分別為短時間距監測，約間隔 12 小時各施做一次地面光達掃描；以及長時間距監測，約間隔 4-6 月各施做一次地面光達掃描。經由兩種不同時間的監測，假設鐵塔在 12 小時內未變化的情況下，短時間距監測的前後比較，可用於觀測精度的評估分析；另一方面，長時間距監測之比較，則可期望評估經常性，或是受到外力影響後，輸電鐵塔之結構物變位量。結合此兩者數據，更可以短時間距監測之精度，驗證長時間距監測之變位成果是否具有顯著性。

目前嘉埔鐵塔正執行自動化監測方案，藉由此機會更可以利用相關監測儀器來交互輔助。有別於即時監測的成果，地面光達著重於全尺寸的整體結構物記錄，但是取樣頻率多半適用於以季或是年為時間解析度的經常性檢視。因此，搭配作業型式的巡視任務，以及即時監測儀器所反應的可能變動，來作為相互獨立觀測與檢核，都是在實務上很可以嘗試的組合。

研究中所採用地面光達儀器為 FARO LASER SCANNER FOCUS 3D[10-16]，其反射稜鏡以垂直掃描方式掃描，而水平方向則以轉動機身方式使稜鏡能夠 360 度方式掃描。垂直方向範圍是從天頂距 0 度到-65 度的掃描區間，掃描速度高達每秒近百萬點，短時內即產生巨量密集的觀測點雲資料。

本研究的嘉埔輸電鐵塔案例，為台灣電力公司 345KV 50m 高之大型輸電鐵塔[17]。所採用之多時期監測方面[18-20]，設計為三種方式之實驗。實驗設計目的分別敘述如下：

一、長時間距監測：約間隔 4-6 月執行地面光達掃描一次，主要是監測與量測鐵塔在間隔 4-6 個月期間的變位情況，利用長時累積，觀察鐵塔是否有承受外力因素影響。

二、短時間距監測：兩次地面光達掃描約間隔 12 小時再次掃描，使用點雲模型建立方法，與長時間距監測方式完全相同。

三、極短時間距監測：施作兩次地面光達掃描之時間差距僅 3-4 小時，並增加採用現場額外佈設控制點，建立最佳點雲模型量測能力，確認其精度範圍。

前後兩時段掃描，將使用相同控制點來套疊點雲模型；進而於模型中，識別出相同之鐵塔桿件點位，量測其前後兩時段的變位。

因應現場實務與資源限制，在輸電鐵塔周圍 1 公里範圍內，未能架設永久型的固定點作為多時期點雲模型的無變動基準。研究中以嘉埔輸電鐵塔 4 支基樁(A、B、C、D)，如圖 1，視為不動點，作為前後期點雲模型之套疊基準。

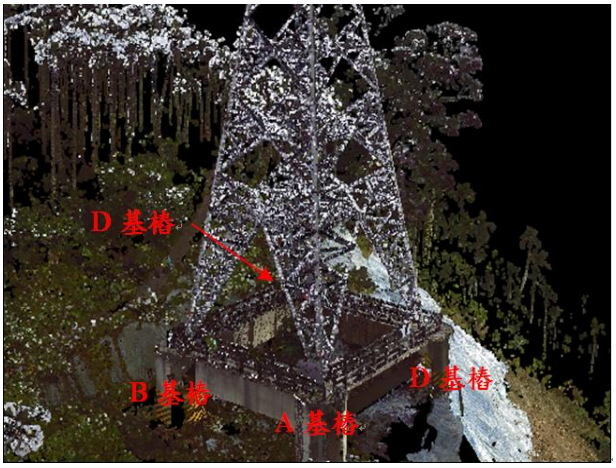


圖 1　輸電鐵塔點雲模型(103/1/13)初始值

首次監測時段在 103/1/13 號，將此次掃描建立為初始值，間隔約 4-6 個月後再次掃描。第二期監測時間為 103/6/23，當次量測包含兩筆監測資料，另一次為間隔 12 小時。第三期監測時間為 103/11/22，當次包含兩筆監測資料，控制在 3-4 小時完成兩次監測，除了圖 1 的基樁作為控制點之外，並加設控制點。

研究中將上述所有點雲資料個別稱為：第一期監測：PC1、第二期兩次監測分別為：PC2-1 與 PC2-2、以及第三期兩次監測：PC3-1 與 PC3-2 (如表 1)。

表 1　多時期掃描監測記錄表

點雲資料名　稱	實驗項目	掃描時間
PC1	設立為初始值	103/1/13 掃描
PC2-1	第二期監測	103/6/23 掃描
PC2-2	間隔 12 小時後掃描	103/6/24 掃描
PC3-1	第三期監測	103/11/22 掃描
PC3-2	相同控制點同時段掃描	103/11/22 掃描

研究中設計三種實驗，包含長時，短時，與極短時三種間距。長時間距監測取三時期的點雲模型進行套疊。但套疊前必須先將各期的多站點雲資料，識別出多處共軛點，經過內部接合程序，產生成為點雲模型。各期點雲之內部接合精度分別為 PC1：1.3 mm、PC2-1：1.0 mm、PC3-1：0.9 mm，由數據中可以發現，由於單期的點雲接合

中，佈設加入了許多容易辨識的共軛點，使得精度都能保持相當高，達到 mm 等級。

再將 PC2-1 與 PC3-1 的點雲模型套疊至 PC1 點雲模型上，在點雲模型套疊時都以 PC1 做為比對基準，檢視鐵塔前後期變化。如圖 2 所示，PC2-1 與 PC3-1 點雲模型套疊於 PC1 點雲模型上。如圖 1 之 ABCD 四個位置附近，以輸電鐵塔基樁視為不動點，做為三期資料的套疊基準。

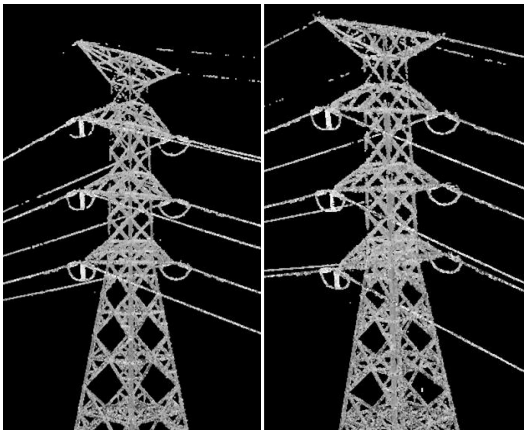


圖 2　PC1 套疊 PC2-1(左)與 PC1 套疊 PC3-1(右)
(黃色為 PC1 點雲模型)

在基樁選 10 個控制點(如圖 3)，各控制點的差值”△P”(如表 3.1)，但 PC3-1 點雲模型中，因雜草過長遮蔽了 Point5，但是為求三時期資料套疊方法的一致性，並無多設置新控制點，所以 PC1 點雲模型套疊 PC3-1 點雲模型只有使用 9 個控制點。

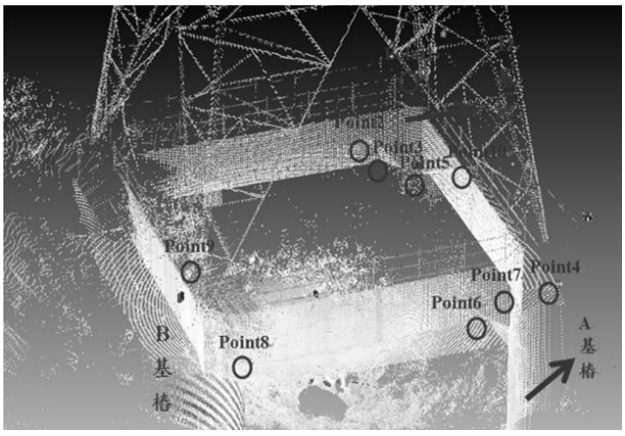


圖 3　輸電鐵塔控制點位置(紅色圈為控制點位置)

應用這 9-10 個基樁上的控制點，進行 PC1 與 PC2-1，以及 PC3-1 的坐標轉換；平差後所得中誤差分別為 4.0 與 4.4mm，如表 2 所示。相較於各時期內部接合精度 0.9-1.3mm 而言，都有顯著較高的情況。說明多次監測中，整體測設環境中仍有許多隱含的不確定性，將會影響單次接合的高精度。

表 2　三期點雲模型套疊控制點差值“△P”
(單位：mm)

控制點編號	PC1 套疊 PC2-1 各控制點 ”△P”	PC1 套疊 PC3-1 各控制點 ”△P”
Point1	3.9	1.4
Point2	2.3	2.5
Point3	5.7	2.1
Point4	3.8	5.0
Point5	2.9	遮蔽(剔除)
Point6	2.0	6.6
Point7	1.9	3.6
Point8	8.7	2.9
Point9	7.6	8.5
Point10	1.6	7.1
點雲模型套疊誤差平均	4.0	4.4

第二期監測中，包含短時間距兩次監測的進行。第二期監測時間隔 12 小時，進行兩次掃描，分別為 PC2-1 與 PC2-2 共建置兩個模型點雲資料，作為短時間距監測的比較。本實驗以 PC1 長時間距相同的內部接合方法，分別將各次點雲資料建置為 PC2-1 與 PC2-2 兩式模型。然後，將兩模型套疊，其方式同樣利用輸電鐵塔四基樁處視為不動點，作為套疊基準，各控制點的差值”△P”可表示如表 3，平差後所得控制點中誤差為 3.3mm。相較於各時期內部接合精度 0.9-1.3mm 相對較高，說明外部套疊的量測過程中，仍存在高於內部接合的不確定性。比較長時間距中，外部套疊誤差 4.0 - 4.4 mm，短時間距外部套疊誤差 3.3 mm 略小，但兩者數量級距差異不多。

表 3　第二期短時間距點雲模型套疊控制點差值“△P”
(單位：mm)

控制點編號	PC2-1 套疊 PC2-2 各點差值 ”△P”
Point1	4.9
Point2	6.5
Point3	2.2
Point4	6.7
Point5	2.3
Point6	2.8
Point7	1.1
Point8	1.1
Point9	0.5
Point10	3.0
點雲模型 套疊誤差平均	3.3

長時與短時間距的外部套疊精度接近，且都明顯低於內部接合精度，顯見各次間距中，外部套疊過程存在有較多影響因素，使得中誤差都高於內部接合過程。

第三期監測部分，則考量前述原因，縮短兩次掃描間距到 3-4 小時以內，並加強佈設控制點方式：保持人工佈設共軛點兩次掃描間距中不動，利用這些相同共軛點，增加當作多時期的控制點進行外部套疊，產生成為點雲模型 PC3-1 與 PC3-2。平差後，各控制點差值”△P”可表示如表 4 與圖 4。

表 4 相同控制點雲模型套疊控制點差值 “△TP”
(單位：mm)

控制點編號	PC3-1 套疊 PC3-2 各點差值 ”△TP”
TPoint1	0.5
TPoint2	1.5
TPoint3	2.6
TPoint4	1.1
TPoint5	1.7
TPoint6	1.7
TPoint7	1.3
點雲模型 套疊誤差平均	1.5

加入了更為可靠的共軛點之後，PC3-1 與 PC3-2 的外部套疊，各控制點中誤差降低到 1.5mm。說明了如果在良好的不動點控制下，多時期鐵塔量測精度，可以達到 1-2mm 等級。但如果受限於現場狀況，無法配置理想控制點，單就鐵塔本身基樁來作為外部套疊依據，也能達到在控制點上精度 4mm 的量測等級。

綜合三期比較，其變位量方向與施測當日風向頗有相關。細部比較內容，可參考陳煜文(2015)[21]著作。

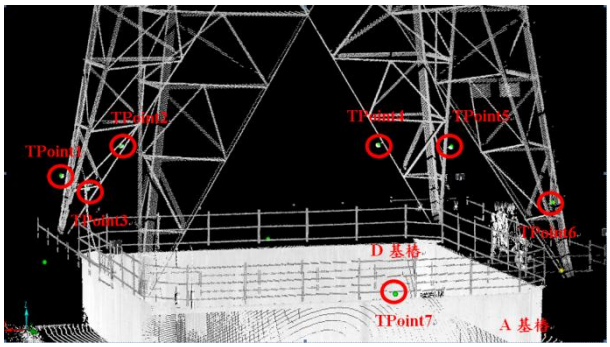


圖 4　PC3-1 套疊 PC3-2 控制點位置

參、研究成果

由於鐵塔高聳特質與地面光達的站位配置，隨著塔高增加，誤差有可能也隨之變大。研究中將每時期鐵塔點雲模型依照框架劃分為 8 節，框架編號由底至頂分別設定為 D1 – D8 (如圖 5)。在測量鐵塔整體變位時，共量測 8 個節點，每個框架只取一點量測，在 D5 – D8 的測量點是取框架的中心點，D1 – D4 框架的中心是中空的所以測量點選在框架周圍，紀錄各節點坐標，在計算坐標距離，觀察鐵塔每一節的變位” △t” ，三期監測共測量 24 個節點(如表 5)。實驗中也對短期套疊量測與同控制點套疊量測進行相同的測量方式(如表 6 與 7)。選點方式是依照桁架邊角當作記錄，因鐵塔並無明顯特徵處，量測較不易。實驗中將各量測節點繪製成變位曲線，並對照鐵塔觀察其變化(如圖 6 至 8)。

觀察表 6 與 7，可以認定沒有明顯環境外力變化的情況下，短時與極短時間距的量測中，都顯示了隨著框架高度增加，確實誤差有比較增加，D6 到 D8 框架處，大約有 15-20mm 左右的誤差。因此，在表 5 數據中 PC1 與 PC2-1 比較，D6 到

D8 框架五個月下來，差值來到 35 mm 左右，與表 6 與 7 這些量測數據相比，顯然有明顯變位。

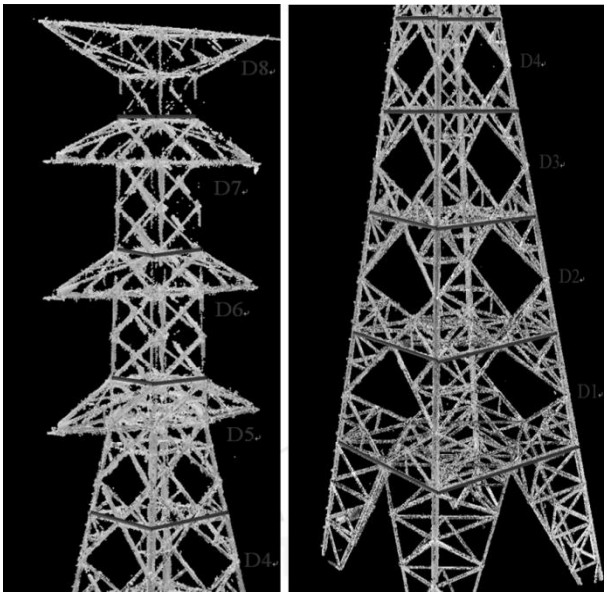


圖 5　框架劃分

表 5 輸電鐵塔點雲模型套疊量測各節點變位△t

(單位：mm)

點號	距離基樁高度	PC1 減 PC2-1(△t)	PC1 減
(D1)	13m	1.018	6.120
(D2)	18m	1.754	7.520
(D3)	22m	4.998	10.698
(D4)	26m	10.349	20.291
(D5)	30m	23.879	21.532
(D6)	35m	35.501	17.500
(D7)	40m	38.889	22.340
(D8)	45m	37.560	18.664

表 6 輸電鐵塔點雲模型套疊各節點變位△t

(單位：mm)

點號	距離基樁高度	PC2-1 減 PC2-2(△t)
(D1)	13m	0.549
(D2)	18m	7.441
(D3)	22m	6.083
(D4)	26m	7.149
(D5)	30m	8.054
(D6)	35m	14.308
(D7)	40m	16.241
(D8)	45m	19.896

表 7 輸電鐵塔相同控制點套疊各節點變位△t

(單位：mm)

點號	距離基樁高度	PC3-1 減 PC3-2(△t)
(D1)	13m	7.631
(D2)	18m	2.055
(D3)	22m	12.143
(D4)	26m	13.973
(D5)	30m	16.281
(D6)	35m	12.007
(D7)	40m	23.032
(D8)	45m	15.056

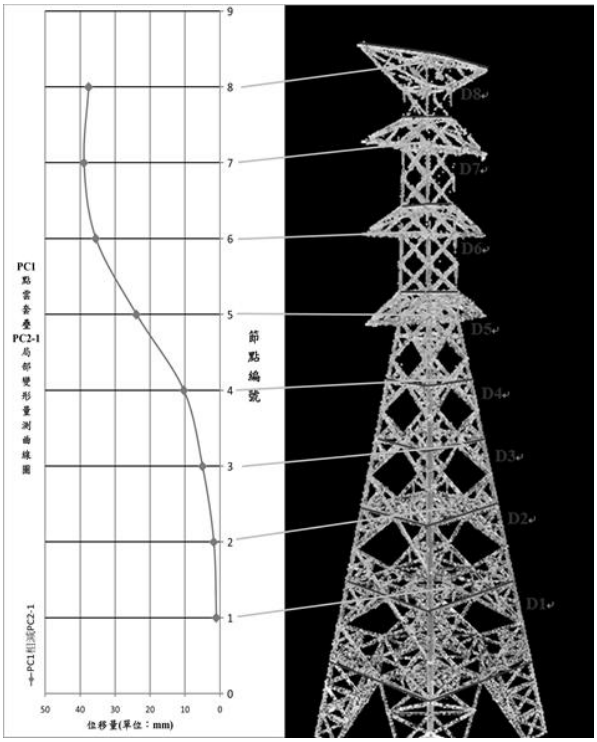


圖 6　輸電鐵塔 CP1 點雲模型套疊 CP2-1 局部變形量測

在間隔 10 個月後，取 PC1 與 PC3-1 比較，D6 與 D8 框架節點差量減少，約為 15 mm。目前推測除人為測量誤差以外，塔架高處受風力影響，略有彈性範圍內的變位產生，因此，隨時期不同，因而變位略有增減變化。

經由上述的三種實驗都有偵測出鐵塔節點之差值；統計 4 張曲線圖的變化趨勢上，觀察可發現較大差量位置都是 D4 框架節點之後，有較大之差異。此外，由於輸電鐵塔監測中，是選取

框架角度或是中心桿件交叉處進行量測，人工判識點位或有差異，在 mm 等級的精度下，造成了些許誤差。目前初步數據配合結構數值分析可顯示，嘉埔輸電鐵塔在 2014 年間無明顯持續變位情況，且未發現結構異常變形。

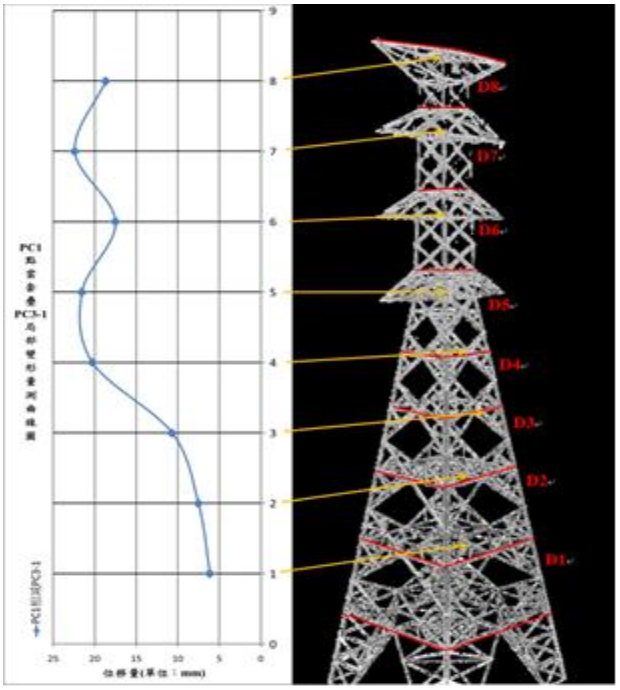


圖 7　輸電鐵塔 CP1 點雲模型套疊 CP3-1 局部變形量測

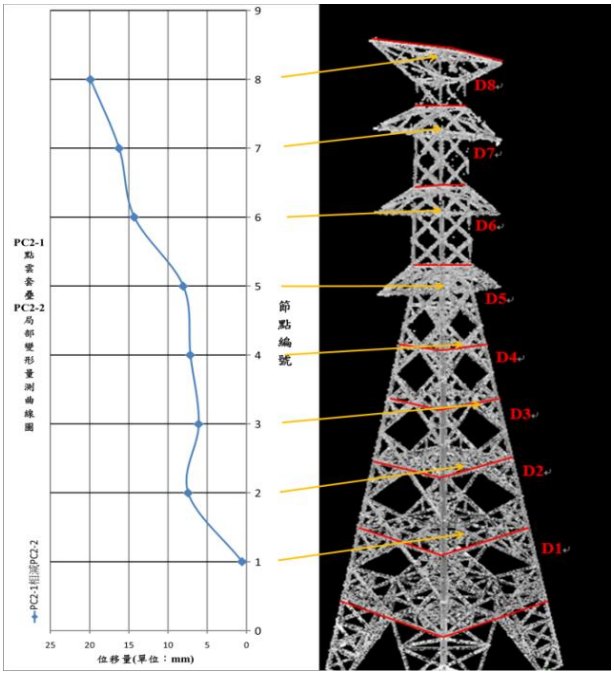


圖 8　輸電鐵塔 CP1 點雲模型套疊 CP3-1 局部變形量測

肆、結論與建議

研究中利用地面光達監測輸電鐵塔結構，透過長時，短時，以及極短時監測試驗，說明在良好控制點配置下，量測精度可達 1.5mm。即使控制點受限於地形與場地，以輸電鐵塔基樁部位當作比較基準，仍可以達到中誤差 4mm 左右的成果。說明地面光達監測，對於結構物健康監測上，可作為經常性且全尺寸的 mm 等級查驗，並與其他感測器可相互獨立檢核。

隨著塔高影響，觀測誤差有較大的可能，從短時與極短時的試驗可知，於理想監測狀況下，應無明顯外力造成變形，仍能看到 D6-D8 框架具有 15-20mm 之變位，證明量測精度確實因塔高而有降低。此外，由第一期與第二期，第一期與第三期的比較中可以看到，輸電鐵塔上部有彈性變位的可能，在第一期與第二期[22-23]比較中，有 35mm 的變位出現，但在第一期與第三期比較中，變位量減少，落在誤差範圍內。變位程度隨時間略有增減，顯示其可能的彈性變化性質。若只能配置地面光達從基樁高度來設置的話，在 50m 高的輸電鐵塔上部，偵測精度大約只能維持在 cm 等級。

受限於現場實務，沒有考慮在嘉埔輸電鐵塔設立覘標，人為識別所造成的測量誤差必然存在。但由第三期的極短時間距試驗可知，加強佈設控制點確實提高了精度，比起第三期的短時間距試驗的中誤差 3.3 mm，降低到 1.5mm。

執行監測期間，綜合相關問題，提出下列幾項建議，提供後續研究討論。如下依序說明：

一、光達掃描容易遭到遮蔽，在 PC3-1 點雲資料中，因雜草過長遮蔽了 Point5，導致 PC1 點雲模型套疊 PC3-1 點雲模型只使用 9 個控制點。在每次監測時期，應事前進行踏勘與規劃，且監測時要注意儀器架設位置，如此將有助於監測完整性。

二、多時期的輸電鐵塔監測實驗，常受限環境因素，無法佈設理想控制點時，輸電鐵塔基樁

做為基準套疊仍可以保持相當精度。如要確保 mm 等級高精度性質，則建議必須規劃設立較為完整之控制點。

三、三次監測中，沒有考慮在嘉埔輸電鐵塔設立覘標。實驗補強方式是採用重複測量三次，建立每一個節點標準偏差，來改善沒有覘標的缺陷。但依然會存在人為判識點位之誤差。

四、研究中將輸電鐵塔劃分為 8 個區塊，各個區塊選定一個節點測量其變位，若利用組成實體模型方式，以面的方式來進行計算，觀察整體變位量，或許可更深入討論。

伍、誌謝

本文承蒙台灣電力公司研究計畫『輸電鐵塔及塔基安全監測即時預報系統之研究』支持，以及主持人臺北科技大學黎文龍教授所帶領研究團隊鼎力相助，特此致上最深謝意。

陸、參考文獻

[1] 姜紹飛，結構健康監測導論，科學出版社，2013 年。

[2] 陳國永，「3D 雷射掃描技術應用於隧道變形量測之研究」，碩士論文，國立中興大學土木工程學系，台中，2004 年。

[3] 蔡伯中，「應用寬頻網路於結構監測系統之可行性研究」，碩士論文，國立中央大學，土木工程研究究所，中壢，2002 年。

[4] Boehler, W, Heinz, G., and Marbs, A, "THE POTENTIAL OF NON-CONTACT CLOSE RANGE LASER SCANNERS FOR CULTURAL HERITAGE RECORDING," *Proceeding of CIPA International Symposium*, 2001.

[5] 曾義星、史天元，「三維雷射掃描儀新一代測量利器」，科學發展專題報導，365 期，第 16-21 頁，2003 年。

[6] 吳偉豪，「應用三維雷射監測懸索橋變形之可行性探討」，碩士論文，清雲科技大學，中壢，2008 年。

[7] Stuart Gordon, Derek Lichti, and Mike Stewart "APPLICATION OF A HIGH-RESOLUTION, GROUND-BASED LASER SCANNER FOR DEFORMATION MEASUREMENTS," *The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements*, 2001.

[8] Stuart Gordon, Derek Lichti, Mike Stewart, and Maria Tsakiri "METRIC PERFORMANCE OF A HIGH-RESOLUTION LASER SCANNER," *Proceedings of SPIE*, vol. 4309, 2001.

[9] D. Girardeau-Montaut, Michel Roux, Raphaël Marc, and Guillaume Thibault, "CHANGE DETECTION ON POINTS CLOUD DATA ACQUIRED WITH A GROUND LASER SCANNER," ISPRS Workshop - Laser scanning, 2005.

[10] 訊聯光電有限公司，FARO Laser Scanner Focus 3D 規格說明書。

[11] 楊俊志，地面激光掃描儀的測量原理及其檢定，測繪出版社，2012 年，第 1-1~2-1 頁。

[12] 蔡佳琳，「不同共軛覘標尺寸對於三維點雲模型套疊精度影響之研究－以 FARO Photon 120 地面光達為例」，碩士論文，國立金門大學防災與永續研究所，金門，2011 年。

[13] 賴志凱，「地面雷射掃描儀的精度分析與檢定」，碩士論文，國立成功大學測量及空間資訊學系，台南，2004 年。

[14] Abellán, J.M. Vilaplana, and J. Martínez c "Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain)," *Engineering Geology*, vol 88, pp. 136-148, 2006.

[15] Diego González-Aguilera, and Javier Gómez-Lahoz, and José Sánchez "A New Approach for Structural Monitoring of Large Dams with a Three-Dimensional Laser Scanner," *Sensors*, vol. 8, pp. 5866-5883, 2008.

[16] Dongling Ma, Jian Cui, and Shiyan Wang "Application and Research of 3D Laser Scanning Technology in Steel Structure Installation and Deformation Monitoring," *Applied Mechanics and Materials*, vols. 580-583, pp. 2838-2841, 2014.

[17] 台灣電力公司，輸電線路災害防救業務計畫，2010 年。

[18] Fanis Moschas, and Stathis Stiros, High accuracy measurement of deflections of an electricity transmission line tower," *Engineering Structures*, vol 80, pp. 418-425, 2014.

[19] Géraldine Camp, Pierre Carreaud, and Hervé Lançon "LARGE STRUCTURES: WHICH SOLUTIONS FOR HEALTH MONITORING?," *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. e XL-5/W2 , 2013.

[20] Guangming Xu, Li Chen1, and Xin Gao1 "Some Key Issues And Challenges of Building the Structural Health Monitoring System of Bridges," *Engineering Materials*, vol. 619, pp 91-98, 2014.

[21] 陳煜文，「應用地面光達監測結構物之精度分析」，碩士論文，國立臺北科技大學土木與防災研究所，台北，2015 年。

[22] 台灣電力公司，輸電鐵塔及塔基安全監測即時預報系統之研究第二次期中報告 v1-3，2013 年。

[23] 林家如，「多次掃描套疊分析系統誤差之影響因素探討-以邊坡間測模式為例」，碩士論文，國立金門大學防災與永續研究所，金門，2012 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

校園配電系統升級整合技術之研究

Study of Integration Techniques for Upgrading Distribution Systems in Campus

楊念哲* 曾威智* 李偉豪*
Yang, Nein-Che Tseng, Wei-Chih Li, Wei-Hao

張文睿* 魏榮宗** 陳文瑞*** 吳建明***
Chang, Wen-Jui Wai, Rong-Jong Chen, Wen-Ruei Wu, Chien-Ming

摘 要

本研究旨在開發校園配電系統之運轉與耗能評估分析技術，主要係根據大專院校所建構之能源管理系統，進一步將所欲分析場域之配電系統數位化，接著彙整資訊與分析系統結構、系統參數、充電站與負載需求，透過配電系統分析之元件建構與驗證系統數學模型，再利用電力潮流演算法評估系統損失、穩態電壓變動、三相電壓不平衡、饋線電流等進行分析，進而決定合理的充電站裝設容量。以確保電動機車充電站所提供之電力品質穩定性及供電安全性，除此之外，本研究亦開發校園建築照明系統升級改造工程之成本效益評估技術，執行所研提之成本效益評估後，即可擬定照明改善工程之最適行動方案及其回收年限。本文將以北部某大學之配電系統為實驗場域，用於評估和解決電力損失等問題。研究結果將有助於設計出最適合校園配電網之規劃設計技術，達到提升整體供電品質、安全性與經濟效益之目的。

Abstract

This study aims to develop energy loss and operation evaluation analysis techniques applied in a campus distribution system. According to the characteristics of the energy management system to be stablished in a campus, the distribution systems of our research are digitized for the purpose of analysis. Accordingly, the system structures and parameters of distribution systems, and the measurements of charging station and load demand are analyzed and organized. For distribution system analysis, the mathematical models of system components are established and verified, in which the continuous three phase power flow is used to evaluate the whole system energy losses, voltage variations, three-phase voltage unbalances, and feeder currents. As a result, the proper installed capacity of charging station can be determined, aiming to ensure the stability and quality of the power services. In this study, some specific distribution systems are adopted as benchmarks for evaluating and solving energy loss problems. Besides, a cost and benefit evaluation technique is developed in order to upgrade the lighting systems in campus buildings. After evaluation of the projected cost and benefit, the optimal action plans and their economic payback periods of upgrading the light

*元智大學電機工程學系
**國立台灣科技大學電子工程系
***財團法人資訊工業策進會

systems can be determined. The outcome of this research would contribute to a suitable planning and design for power distribution systems in a campus, and improve the power quality, system security and economic benefits.

關鍵詞(Key Words)：建築照明系統(Lighting System in Campus Buildings)、能源管理系統(Energy Management System)、充電站(Charging Station)、三相電壓不平衡(Three-phase Voltage Unbalance)、電壓變動(Voltage Variation)、最大併網量(Maximum Allowable Capacity)。

壹、前言

隨著現今全球暖化現象日益嚴重，因此「節能減碳」刻不容緩。節能即是節約能源，減少能源損耗、提升能源效率，以及推動再生能源，減少傳統石化能源的消耗等，以達到減少溫室氣體排放，減緩溫室效應。各大專院校為配合未來政府節能減碳計畫的發展，積極執行校園節能減碳策略，不遺餘力推廣綠色能源發電系統，以國內既有校園優質電力監控與節能管理系統為基礎，透過監控設備的升級與管理策略的優化，尋找適合於台灣之校園節能減碳運行系統，並得以提升國內對智慧型電網之分析能力，以作為未來規劃智慧型電網之試驗及測試標準。

經濟部能源局近年來對商用大樓建築物的抽樣調查發現，從我國商業辦公大樓全年設備用電量耗能比率來看，空調系統占總用電量的40%~48%，照明及插座系統約 40%~43.7%[1]，因此建築物的節能通常會以減輕空調系統或照明及插座系統的用電量為目標。在各種建築物節能工程中，照明系統的更換是最容易進行且成效相當顯著，因此照明系統的更新係目前業界進行節能評估時，重要且不可忽略的項目之一，而新型態燈具的推陳出新，更有利於節能工程的實施。新型態光源除了在性能上面有所提升之外，隨著商品週期的演進，新型態燈具在價格上也越來越具有優勢，而受到消費者的青睞，逐漸淘汰原本相對耗能的舊型態光源。

除照明、空調等高耗電量設備之外，供電設備亦是造成系統耗能的主因之一，任何電機設備，一定會有所損耗，變壓器也不例外，且損失也會因負載變動而改變，因此，這些無法避免也無法利用的損失，加總合約占總耗能的 4%左右，其中變壓器損失更佔總損失約 96%。由於電能成本高，M.A Kashem 與 S.Civanlar 等人在研究中表示配電自動化的研究都集中在最低損耗的配置問題，並提出用開關切換改變配電系統配置以饋線重組方式達到降低損耗[2-3]。Metodija Atanasovski、Carmen L.T. Borges 與 Víctor H. Méndez Quezada 也提到在適當的位置設置分佈式發電(DG)，能有效地降低能源損失並改善電力品質[4-6]。為確實能夠了解負載狀態 AMI 佈建規劃也是不可或缺，A. Pasdar 也指出 AMI 自動抄表系統，可讓電力業者與使用者了解能源損耗並做有效率的調度[7]。

另外，為發展綠色交通、打造低碳城市為目標，亦針對微電網最大裝設充電站容量評估關鍵技術進行研發。由於電動機車充電站的設置在微電網中，屬於大型重負載，且傳統電網之規劃設計，並未考量電動機車充電站併網運轉情境，因此，電動機車充電站裝設容量是否合理，將直接影響微電網之電力品質穩定性及供電安全性。為配合校園或其它場域增設電動機車充電站以提供租賃服務，設置充電站前應先進行合理裝設容量評估，以有效限制日後同一區域所有充電站進行充電所造成電網衝擊[8]-[12]。然而，市售配電系統分析軟體雖可準確評估電動機車充電站所造成之系統衝擊，但其評估模式過於複雜，且系統環境皆屬於封閉性系統，無法與未來新開發物聯

網雲端系統互相連結。為推廣電動機車租賃服務，將迫切需要可行、謹慎且快速的最大裝設電動機車充電站容量評估模式。

本研究以大專院校為主，開發一系列校園電力監控與節能管理系統之配電系統分析程式，用於評估和解決電力損失等問題。研究結果將有助於設計出最適合校園配電網之規劃設計技術，達到提升整體供電品質、安全性與經濟效益之目的。

貳、能源管理系統

隨著大數據時代的來臨以及資訊科技的快速發展，能源管理已是建築物不可缺少的技術。使用智慧型電表可使終端用戶掌握即時電價，亦可將即時用電狀態回傳至能源管理系統，進行資料分析並擬定合適的對策，即為能源管理系統的功能。當電力系統出現不穩定的情況時，也可及時做出合適之操作應對。透過能源管理系統，亦可分析各場域的用電情形，相對於過去無法對建築物各場域進行資料蒐集與分析，此刻更有機會掌控各種無效的耗能，對其進行用電效率改善與節能策略施作。一般能源管理系統架構如圖 1 所示，透過能源管理系統廣泛的收集建築耗能負載之使用行為模式與能源使用效率狀態資訊，並考慮台灣電力公司時間電價機制，發展商用耗能評估模擬程式，進而開發出一套適用於校園微電網改善工程之決策評估方法。

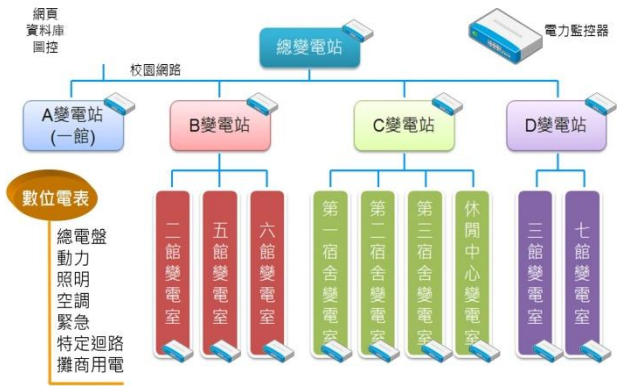


圖 1　一般能源管理系統架構

參、校園配電系統耗能評估

本小節以北部某大學實際作為案例，利用本研究提出之配電系統電力耗能損失分析法進行校園耗能分析，根據收集之資料，建構以下資訊，(a)系統單線圖、(b)系統資料、(c)匯流排資料、(d)饋線資料、(e)變壓器資料及(f)負載資料，並進行數據分析與提出建議。

一、系統單線圖

將各區域單線圖繪製出全校系統單線圖，如圖 2 所示，該大學從台電責任分界點下，大略可分為 A、B、C 及 D 共 4 個變電站，各變電站分別負責輸電到各館變電室，各館變電室再依照各館所需負載電壓經由配電變壓器變電，將電能輸送到各個用戶端。

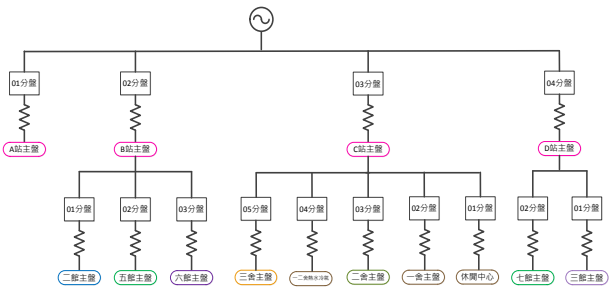


圖 2　全校系統單線圖

二、系統資料

系統資料中包含：系統收斂容許誤差、系統功率基準值、系統減速因子及最大疊代次數如表 1 所示。

表 1　系統資料

系統資料	數值
系統收斂容許誤差	0.0001
系統功率基準值	10MVA
系統減速因子	1.0
最大疊代次數	20

三、匯流排資料

匯流排資料中包含：匯流排名稱、匯流排型

式、匯流排相別型式及匯流排電壓等級。

四、饋線資料

饋線資料包含：起訖匯流排編號、饋線編號、導線長度及饋線電壓，饋線編號的阻抗值。

五、變壓器資料

變壓器資料中包含：變壓器型式、一次側電壓、二次側電壓、阻抗 R、X、其容量及變壓器位置。

六、負載資料

負載集總式三相負載連接成定功率型負載 Y 接，本研究亦可連線至資料庫，選取特定時間做負載資料更新與分析。

七、測試結果

測試結果如圖 3 所示，圖中左上角有特定時間內系統平均總負載量、特定時間內系統總損失、總損失占比、系統總耗能(負載+損失)及系統功率因數，除此之外，還可計算出各館內各盤、各迴路與各變壓器之損失、各變壓器利用率以及負載率。

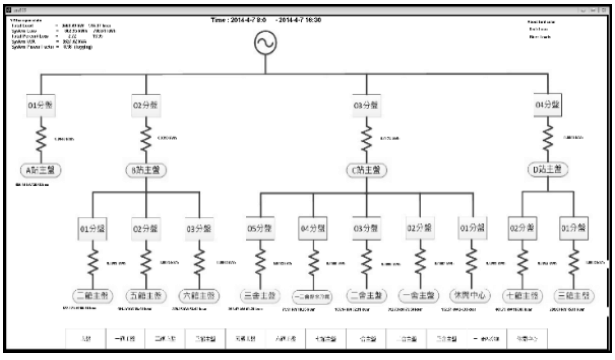


圖 3　全校系統單線圖模擬結果

本研究制定之策略係先針對電力變壓器資訊做全盤彙整，將各電力變壓器損失做一統計列表，電力損失趨勢呈現電力變壓器裝置容量較高之電力變壓器損失偏高，深入研究發現，因裝置容量較高之電力變壓器鐵心損失較高，而變壓器鐵心損失直接影響變壓器的總損失，固有這一趨勢，因此並不能斷定該變壓器效率較差，本研究提出將變壓器損失與變壓器裝置容量之比值計算出單位容量損失作為優先改善參考依據，如表 2 所示。

表 2　全校變壓器模擬結果

館院	電表	二次側電壓	最大負載量(kW)	平均負載量(kW)	負載因數	裝置容量(kVA)	利用因數	變壓器損失(度)	單位容量損失(度/裝置容量kVA)
'二館	'二館照明電表	0.38	157.40	61.26	0.39	400	0.39	12,600	0.360
'二館	'二館動力空調電表	0.22	298.20	62.58	0.21	1000	0.30	28,428	0.325
'二館	'二館緊急照明電表	0.22	311.10	88.35	0.28	500	0.62	16,535	0.378
'二館	'二館插座電表	0.208	159.10	89.88	0.56	400	0.40	13,331	0.380
'二館	'二館7樓實驗室用電電表	0.22	284.60	35.06	0.12	500	0.57	14,252	0.325
'三館	'三館照明電表	0.38	328.50	72.13	0.22	1000	0.33	28,562	0.326
'三館	'三館插座電表	0.19	91.70	44.98	0.49	500	0.18	14,758	0.337
'三館	'三館動力電表	0.22	25.80	3.56	0.14	750	0.03	14,350	0.218
'三館	'三館動力空調電表	0.22	514.90	109.11	0.21	750	0.69	23,019	0.350
'五館	'五館照明插座電表	0.38	286.20	110.66	0.39	750	0.38	23,554	0.359
'五館	'五館緊急照明電表	0.38	164.50	59.09	0.36	750	0.22	21,618	0.329
'五館	'五館動力空調電表	0.38	604.20	214.27	0.35	750	0.81	34,828	0.530
'六館	'六館照明插座電表	0.38	177.90	71.86	0.40	1000	0.18	28,262	0.323
'六館	'六館緊急照明插座電表	0.38	110.90	10.50	0.09	750	0.15	20,936	0.319
'六館	'六館動力空調電表	0.38	451.90	102.25	0.23	1000	0.45	29,289	0.334
'七館	'七館照明插座電表	0.38	257.70	122.42	0.48	1000	0.26	29,469	0.336
'七館	'七館緊急照明電表	0.38	145.10	65.65	0.45	1000	0.15	28,255	0.323
'七館	'七館動力空調電表	0.38	741.60	172.27	0.23	1250	0.59	38,907	0.355
'一館	'一館動力空調電表	0.22	363.20	68.86	0.19	750	0.48	22,858	0.348
'一館	'一館插座電表	0.19	171.00	94.57	0.55	750	0.23	22,165	0.337
'一館	'一館動力電表	0.38	102.60	22.46	0.22	500	0.21	14,277	0.326
'一館	'一館照明電表	0.38	232.50	60.50	0.26	750	0.31	21,766	0.331
'休閒中心	'休閒中心總電表	0.38	263.30	91.85	0.35	1000	0.26	28,809	0.329

以該大學三館的變壓器為例，如圖 4 所示，利用所開發之電力潮流分析結果，三館動力盤所連接之變壓器利用率約為 0.03，為全校利用率最低的變壓器，故從該變壓器著手進行改善措施，成效會較為彰顯。

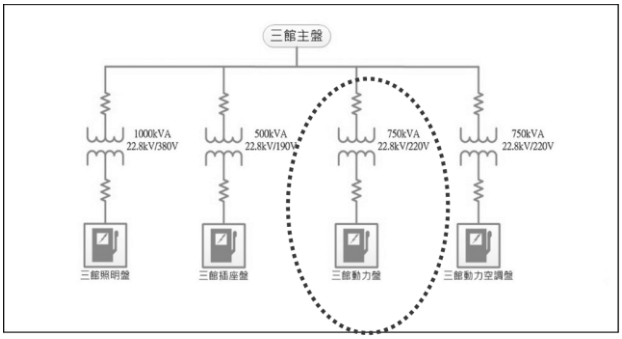


圖 4　三館變壓器接線圖(變壓器併聯前)

利用上述之方法進行改善工程，如汰換變壓器或負載轉供等方法，以三館 TR-2 變壓器

(750kVA)的動力盤負載(4.5kW)轉供至 TR-3 變壓器(750kVA)的動力空調盤(124.24kW)為例，如圖 5 所示，整年度節省電量約為 18,031 度，年度 CO_2 減量可達 9.59 公噸；同理推估其它標的變壓站，若將變壓器損失排序前四名再進行汰換，整年度節省電量約為 85,401 度，年度 CO_2 減量可達 45.43 公噸。

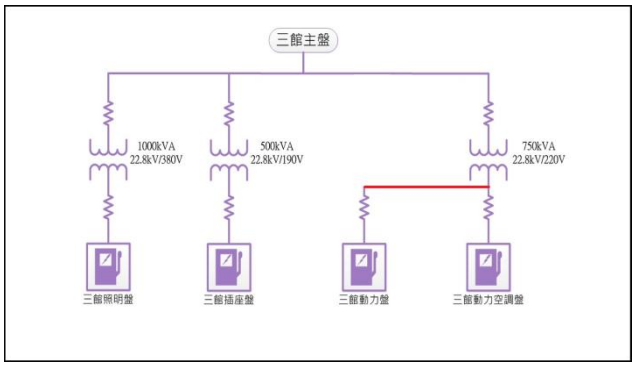


圖 5　三館變壓器接連圖(變壓器併聯後)

以上研究結果將有助於設計出最適合校園節能管理系統之運轉模式，達到提升整體供電效率與經濟效益之目的，期望將成果未來能結合能源地圖並擴散至其他校園或企業單位，可視其他校園或企業個別需求開通不同節能服務模組，創造計畫後續產業效益。

肆、校園建築照明系統升級改造工程之成本效益評估

本研究建立一套經濟效益評估的步驟流程圖，讓建築物擁有者在進行工程評估時，可按照圖 6 流程圖進行，再搭配前述之回收年限評估，便可有效進行工程經濟效益之評估。

本小節針對校園建築照明系統節能工程的經濟效益進行評估，透過照明系統的經濟效益評估，可使業主得知更換照明系統所需要投入的成本，以及回收成本的年限，能有效強化企業主投入資金更換建築物耗能設備之意願，達到節約能源和節省電費成本雙贏的目的。本研究將室內照度納入考量，不會影響到使用者在使用照明設備時的使用體驗。

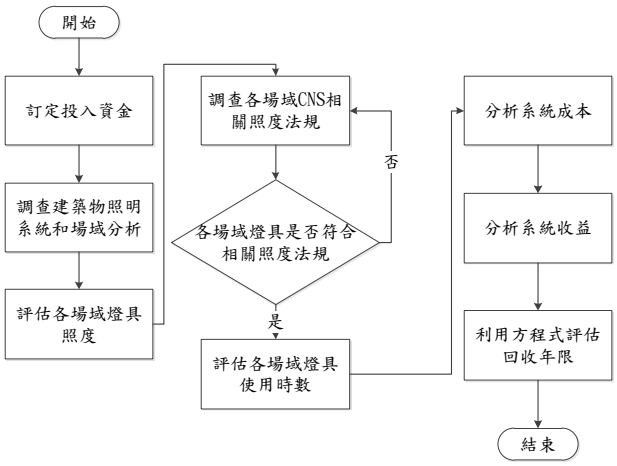


圖 6　節能工程評估流程

一、照明系統經濟效益評估實例

本節將針對上一節所述之方法提出實際的工程評估實例，進行節能工程的經濟效益分析，而本研究以北部某大學教研大樓為評估對象，評估此棟建築物內所有可改善之燈具。

本研究以教研大樓為測試對象，由於本建築物內的場所繁多，因此針對特性相似的場所進行分類，進而將本建築物概分為五種場域，依照明系統使用習慣特性進行分類，而這五種場域分別為教室、實驗室/研究室、一般辦公室、教師研究辦公室/研討室和公共區域，如圖 7 所示。

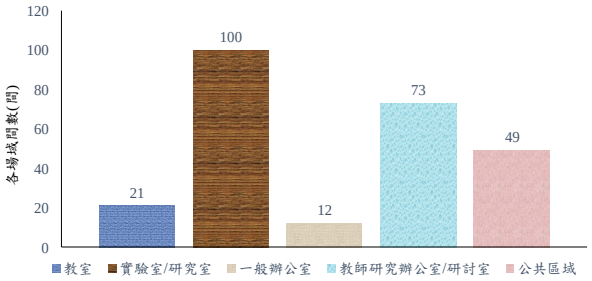


圖 7　教研大樓場域數量統計

二、建築物耗能燈具介紹

本建築物共有六種主要耗能燈具，分別是教室吊管日光燈、黑板燈、嵌燈、吸頂日光燈、吊管燈和 T-BAR 燈。每種燈具的耗能瓦數皆不相

同，圖 8 為本建築物主要燈具之額定瓦數規格。

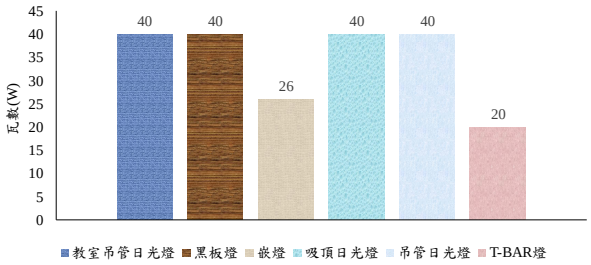


圖 8　主要燈具使用瓦數

從圖 8 可知，六種燈具中有四種燈具的瓦數高達 40 瓦，這四種燈具皆是使用 T8 日光燈，此種日光燈屬於耗能較高的舊型日光燈。

三、T5 型燈管與 T8 型燈管之比較

由於本建築物在興建時大量使用 T8 日光燈管做為照明系統之基礎，但是新型態的 T5 型日光燈管效能遠遠勝過舊型的 T8 日光燈管，因此本節將針對 T5 型日光燈管和 T8 型日光燈管進行效能及價格上的分析和比較，以做為後續汰換工程評估之依據，如表 3 所示。

表 3　新舊型態燈管比較

燈管	T5 型日光燈管 (110V)	T8 型日光燈管 (110V)
光效(lm/W)	100	70
瓦數(W)	28	40
亮度(lm)	2800	2800
價格(NTD)	200~250	30~100
備註	價格較為昂貴	啟動器耗能

由表 3 可知在亮度方面，T8 型日光燈管的流明數和 T5 型日光燈管的流明數相當，同樣為 2800 流明，但在耗能瓦數方面，T5 型日光燈管遠遠優於 T8 型日光燈管，但是 T5 型日光燈管和 T8 型日光燈管的價格比較相對較為昂貴，但是單位時間省下的電費卻是相當可觀的，原因在於 T8 型日光燈管必須使用傳統的啟動器和安定器，其耗能相較於 T5 型日光燈管的電子式安定器耗能許多。

(一) T8 型日光燈管使用每月使用電費估算如下：

(燈管+安定器)　時間+啟動器x次數　　(1)

(二) 安定器使用瓦數：

(110V/22W)x0.8(功率因數)　　(2)

(三) 一支 T8 型日光燈管每天點燈 12 小時一個月電費計算：

(((40W+17W)x12hr+150W(啟動器))x30 天/1000W)　電價 3(NTD)=75 元　　(3)

(四) T5 型日光燈管使用每月使用電費估算如下：

(燈管+安定器)x時間　　(4)

(五) 電子安定器使用瓦數：9W

(六) 一支 T5 型日光燈管每天點燈 12 小時一個月電費：

((28W+9W)x12hrx30 天/1000W) x電價 3(NTD)=40 元　　(5)

若將 T8 型日光燈管換成 T5 型日光燈管，每個月省下 35 元的電費以(燈管 28W T5 型)為例，T5 單支一組市售 200x24 支，成本共 4,800 元。

若改採 T5 型約 5.7 個月可以回收，一支燈管保固兩年為限。回本後，可省電費 640.5 元，若以一組產品有 24 根燈管為例，則兩年共可省 15,372 元。

四、系統成本及架設成本之評方法

(一) 系統成本 C_{sys} ：

在估算系統成本時，首先必須調查產品型錄，評估價格，本研究以東亞照明的產品型錄為調查對象，調查若要更換教研大樓的燈具的單位燈具成本。

接著調查建築物內需要更換的燈具，在前面的步驟中有將本建築物各場域的燈

具情形繪製成圖表，以利進行系統成本分析時之統計。綜合上述資訊後，可計算出系統成本，如表 4 所示。

表 4　系統成本統計

七館總計	數量
教室吊管日光燈 2*40W(組)	488
黑板燈 1*40W(組)	76
吸頂日光燈 1*40W(組)	235
吊管日光燈 1*40W(組)	2,173
總計數量(組)	2,972
系統成本(NTD)	5,944,000

(二) 架設成本C_{set}：

首先，必需調查工人工資及其每日工作量，經調查發現，本地工人每日工資粗估約為新台幣 3,000 元，而每日工作量為更換 12 組燈具如吊頂日光燈和吸頂日光燈。接著請電機技師測量基線，測量基線的目的在於評估此工程是否符合 CNS 國家標準和相關法規。調查發現，電機技師的工資約佔工程總價的百分之一到百分之二，如表 5 所示。

表 5　架設成本總計

架設成本種類	架設成本(NTD)
電機技師測量工資	100,000
安裝工人工資	743,250
架設成本總計	843,250

(三) 變動成本估算方法

本研究對建築物所進行的變動成本評估包含燈具更換維護成本，能源管理系統維護成本和定期維護系統成本。

1. 燈具更換維護成本：指每年汰換燈具所需付出的代價，約佔最初購買耗材總價的 5%~10%。
2. 能源管理系統維護成本：依照系統規劃不同有不同的維護費用，以本建築物為例，每年系統維護成本約為 10 萬元。
3. 定期維護成本：指維護照明系統所需付出的代價，每年約佔工程總價的 0.5%~3%。
4. 變動成本：變動成本相較於固定成本較難估算，每年照明系統皆會有不同的狀況，使用者須審慎評估變動成本，如表 6 所示。

表 6　變動成本總計

變動成本類型	成本(NTD)
定期維護燈具成本	250,000
燈具更換維修成本	25,000
每年電力監控系統成本	100,000
變動成本總計	375,000

五、系統收益評估及回收年限

系統收益評估需透過系統前述之系統收益函式來計算，系統收益函式如下：

$$S_{total} = \sum_{i=1}^{m} E_i T_i P_i \tag{6}$$

其中 S_{total} 為場域每年可節省的電費價值(NTD/year)；E 為比較新舊燈具規格後，單位時間節省度數(度/hr)；T 為該場域每年使用時數(hr)；P 為每度電價(NTD)。調查以上參數後，代入程式中，進行模擬。

(一) 各場域每年點燈時數

本研究根據該校能源管理系統的資料判讀後，將各場域每年使用時數製作成圖 9，從圖表中可以判讀，各個場域間的使用時數相差甚大，其中以研究生實驗室為使用時數最高的區域，年點燈時數約在 4,320 小時左右，換算成日點燈時數約為 11.8 小時，同時又以一般辦公室年點燈時數最低，年點燈時數約在 2,280 小時左右，換算成日點燈時數約為 6.24 小時左右。

判讀此圖表的意義在於，當經費有限要判斷更換燈具的優先順序時，便可從使用時數長的場域優先更換燈具，以達到降低使用時數的效果。

(二) 各區域 T8 燈管照明用電電費比例

比較圖 9 和圖 10 可知每年點燈時數和用電電費比例成現正相關，電燈時數最高

的實驗室和研究室用電電費佔建築物 T8 照明系統的 58%，其餘依此類推。

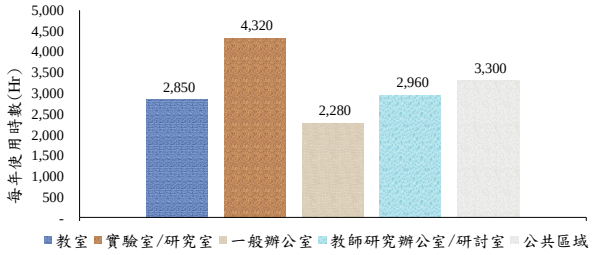


圖 9　各場域年點燈時數

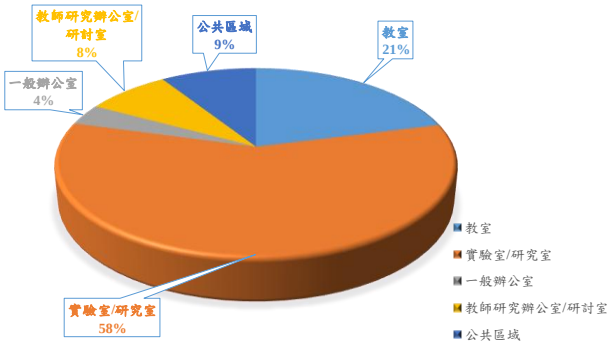


圖 10　各區域 T8 燈管照明用電電費比例

(三) 各場域系統收益

彙整上述的參數之後，可比較得知，各場域每年的電費差距，亦即所謂的系統收益。

由表 7 可知各場域的系統收益和點燈時數有關，點燈時數越高的場域，系統收益就會越明顯，經模擬分析顯示，此類場域的汰換工程可較有效的降低回收年限。

表 7　系統收益計算

場域 \ 燈具	T8 燈管每年電費總計(NTD)	T5 燈管每年電費預測(NTD)	系統收益(NTD)
教室	609,898	296,104	313,794
實驗室/研究室	1,690,360	897,661	792,698
一般辦公室	104,936	47,926	57,010
教師研究辦公室/研討室	232,090	113,745	118,346
公共區域	2,64,434	132,952	131,482
總計	2,901,717	1,488,387	1,413,330

(四) 模擬節能工程前後電費比較

圖 11 為各項系統因子分析後，模擬電費比較圖，本建築物原本採用 T8 日光燈管照明系統的電費為 2,901,717 元，經程式模擬分析，若逐步汰換為 T5 日光燈管，則可將電費有效降低至 1,488,387 元。每年節省電費為 1,413,330 元，約佔原本電費的 48.7%。

(五) 回收年限計算

從表 6 的計算結果可知，若該教研大樓實施 T8 日光燈管的改善工程，則在考慮各項因素後，每年雖然可以省下大量電費，但施工成本偏高，計算出來的回收年限為 6.5 年，回收年限偏長。

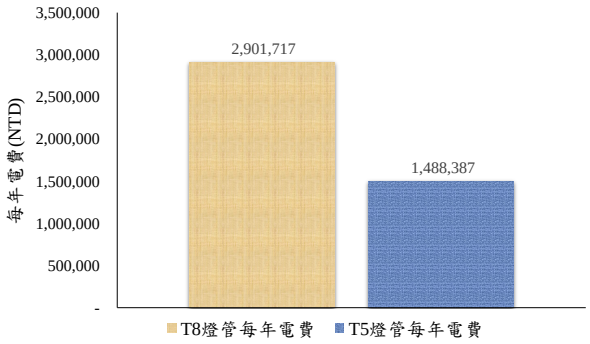


圖 11　節能工程實施前後電費模擬

本小節成果主要應用於校園建築照明系統，預期照明系統升級改造後實際節費量可達 30%以上，透過照明系統節能，期達成政府節能減碳、加速全球邁向低碳社會與全世界的永續經營發展等目標

伍、校園微電網最大裝設充電站容量評估

本小節利用微電網配電系統衝擊分析用元件穩態數學模型，搭配所開發之微電網配電電力潮流分析程式，以及智慧型電動機車混合式充電模型，並分析電動機車充電站與市電系統併聯運

轉時是否有影響市電系統供電品質與運轉安全之虞，考量因素包括系統電壓等級、系統短路容量、變壓器規格、饋線尺寸、饋線長度與充電站運轉情境探討其對市電系統之衝擊程度，並針對穩態電壓變動、三相電壓不平衡、饋線是否過載等進行分析，進而決定合理的充電站裝設容量。以確保電動機車充電站所提供之電力品質穩定性及供電安全性。本研究成果讓使用者僅需輸入充電車數量，即可取得併網點合理的最大可裝設充電站容量，以有效限制日後同一區域所有充電站進行充電所造成電網衝擊。

針對北部某大學已建置完成之電動機車充電站，進行長時間耗能行為監測，將作為後續負載數學模型開發之有效性驗證基礎。詳細充電站規格如表 8 所示，圖 12 與圖 13 分別為使用電壓等級 220V 與 110V 充電之電壓與電流曲線圖。

表 8　充電站規格

充電站規格	220V	110V
額定輸出電壓	36~72V	110V
額定輸出電流	6~30A	6A
無熔絲開關規格(七館)	60A	50A
無熔絲開關規格(宿舍區)	40A	40A
充電功率	P=0~700W，Q=0~210 Var	
充電方式	CC-CV	
工作頻率	60Hz	
纜線規格	XLPE 2.0mm^2(R=9.42 Ω /km)	

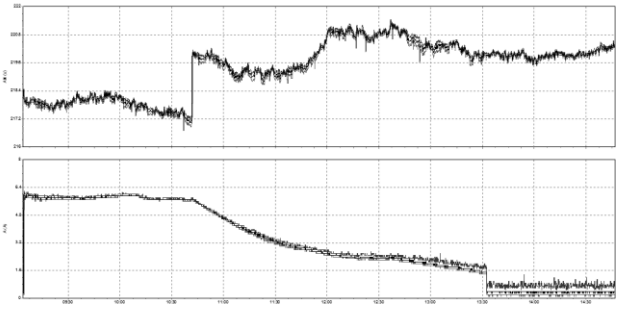


圖 12　單台電動機車充電電壓與電流曲線(以 220V 充電)

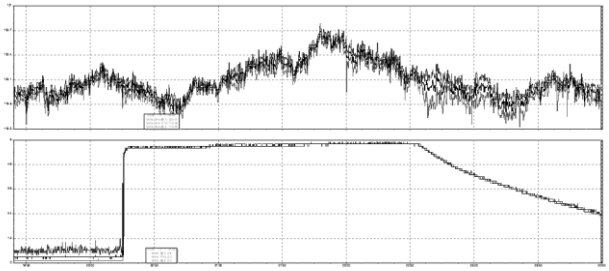


圖 13　單台電動機車充電電壓與電流曲線(以 110V 充電)

一、配電系統衝擊評估指標

本節將探討電動機車充電對校園配電系統之相關電力品質，包含穩態電壓變動、三相電壓不平衡與饋線是否過載進行探討，以確保電動機車充電站所提供之電力品質穩定性及供電安全性。

(一) 電壓變動率分析

電壓變動分析係依據電動機車基本資料，如表 8 所示，計算穩態電壓變動率及併聯瞬間電壓變動率，在穩態電壓變動分析方面，其分析方法係先利用公式(7)，檢討電動機車充電，對配電系統電壓變動率之影響。

$$|d|\%=\frac{|\text{併網前電壓}|-|\text{併網後電壓}|}{|\text{併網前電壓}|}\times 100\% \qquad (7)$$

(二) 過載分析

過載分析分成兩部分，一為饋線過載，二為變壓器容量過載。

1. 饋線過載：利用電力潮流分析所求得的匯流排電流值，判斷是否有超過饋線安培容量限制。
2. 變壓器過載：計算總負載量是否超過變壓器的額定容量限制。

(三) 三相電壓不平衡率分析

電力公司之系統電壓理論上為理想之三相無限匯流排，但實際的電力系統往往受負載型態與配電方式影響，造成系統三相電壓或電流大小與相角不相同之現象，稱之為電力系統不平衡。

$$VUR = \frac{Max(\left|V_i^a - V_{avg}\right|, \left|V_i^b - V_{avg}\right|, \left|V_i^c - V_{avg}\right|)}{V_{avg}} \quad (8)$$

$$V_{avg} = \frac{V_i^a + V_i^b + V_i^c}{3} \quad (9)$$

其中 V_i^a 為第 i 個匯流排 A 相電壓，V_i^b 為第 i 個匯流排 B 相電壓，V_i^c 為第 i 個匯流排 C 相電壓。

二、電動機車充電之配電系統衝擊分析與模擬

利用微電網配電系統衝擊分析用元件穩態數學模型，搭配所開發之微電網配電電力潮流分析程式，以及智慧型電動機車混合式充電模型，並分析電動機車充電站與市電系統併聯運轉時是否有影響市電系統供電品質與運轉安全之虞，探討其對市電系統之衝擊程度，進而決定合理的充電站裝設容量。

(一) 教研大樓系統參數介紹

圖 14 與圖 15 為北部某大學教研大樓充電站場域圖與配電單線圖，該場域包含 5 座充電座，2 台配電變壓器，分別提供 220V 與 120V 供電電壓，變壓器容量分別為 1000kVA 與 400kVA，百分比阻抗值分別為 5.79%與 3.8%，無熔絲開關最大限流值分別為 60A 與 50A。

圖 14　教研大樓電動機車充電場域

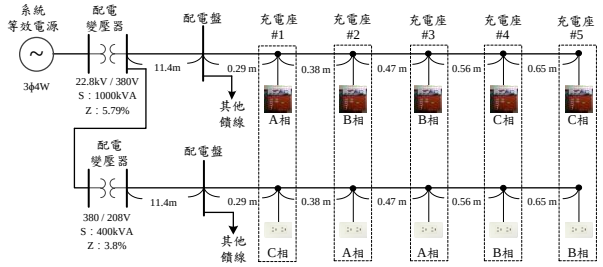


圖 15 教研大樓充電站單線圖

電動機車充電實地量測與模擬結果，圖 16 為四台電動機車於 A 相充電站同時充電電壓與電流曲線圖，於末端所量測之電壓變動率為 0.286%，三相電壓不平衡率為 0.0254%。如圖 17 為電力潮流分析結果。

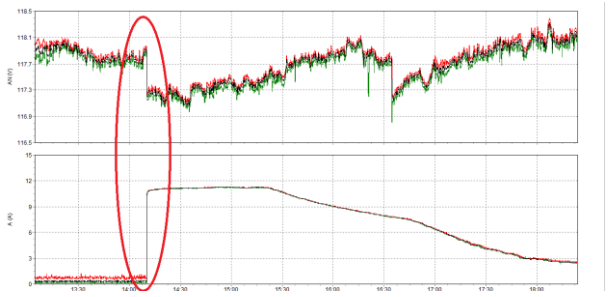


圖 16　四台電動機車於 A 相充電站同時充電電壓與電流曲線圖

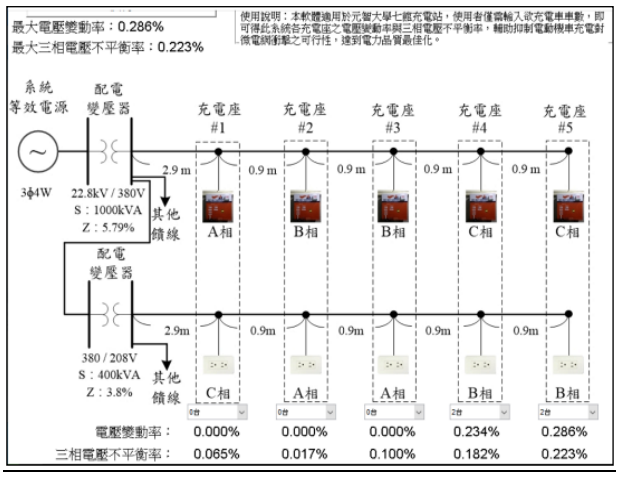


圖 17 四台電動機車同時充電對配電系統衝擊分析

(二) 宿舍區系統參數介紹

圖 18 與圖 19 為北部某大學宿舍區充電站場域圖與配電單線圖，該場域包含 10 座充電座，2 台配電變壓器，提供 220V 與 110V 供電電壓，

變壓器容量分別為 1500kVA 與 400kVA，百分比阻抗值分別為 5.79%與 3.8%，無熔絲開關最大限流值為 40A。

圖 18　宿舍區電動機車充電場域

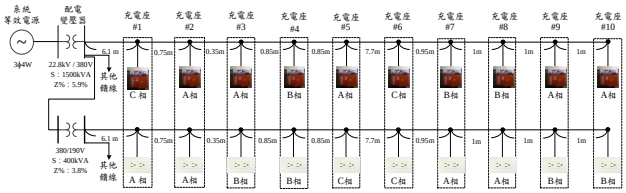


圖 19　宿舍區充電站單線圖

電動機車充電實地量測與模擬結果，圖 20 為併網點量測八台電動機車於 B 相充電站同時充電電壓與電流曲線圖，當八台電動機車同時充電時，電流總安培數為 49A，已超過配電盤上的無熔絲開關限流值，將造成宿舍區所有充電座無法充電。若未即時排除，則隔天電動機車無法營運。圖 21 為線路末端量測八台電動機車於 B 相充電站同時充電電壓與電流曲線圖，電壓變動率為 2.86%，三相電壓不平衡率為 2.088%。

圖 22 為電力潮流分析結果，電壓分析結果，電壓變動率 2.86%與三相電壓不平衡率 2.081，已超過電壓變動率 2.5%與三相電壓不平衡率 2%之規範。故在充電座#10 減少一台電動車機車充電重新分析，得電壓變動率為 2.241%、三相電壓不平衡率 1.628%，有效降低充電對電網之衝擊，如圖 23 所示。

由結果顯示，使用者僅需輸入欲充電車車數，即可得此系統各充電座電壓變動率與三相電壓不平衡率，並可取得最大可併網量。若再加上充電排程最佳化，輔助抑制電動機車充電對微電網衝擊之可行性，達到電力品質最佳化。

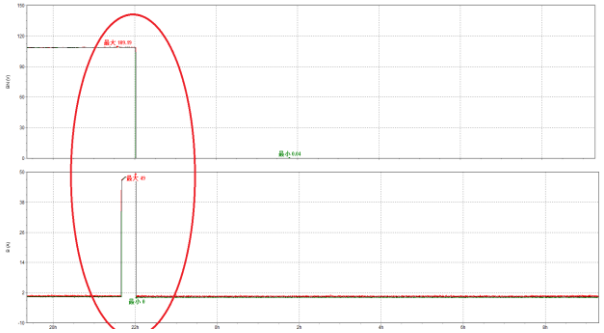


圖 20　八台電動機車於 B 相充電站同時充電電壓與電流曲線圖 (併網點量測)

圖 21　八台電動機車於 B 相充電站同時充電電壓與電流曲線圖 (末端量測)

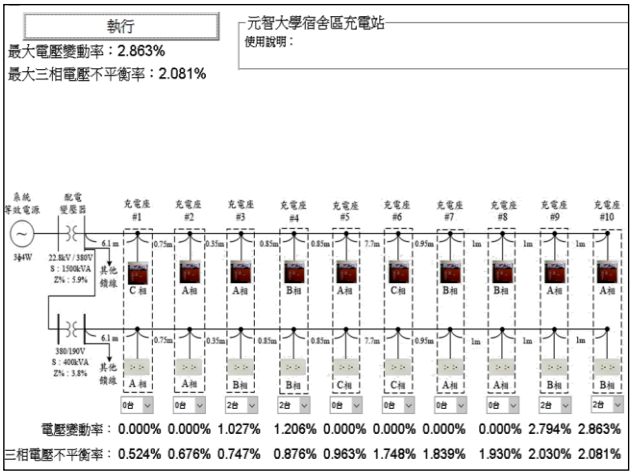


圖 22　八台電動機車同時充電對配電系統衝擊分析

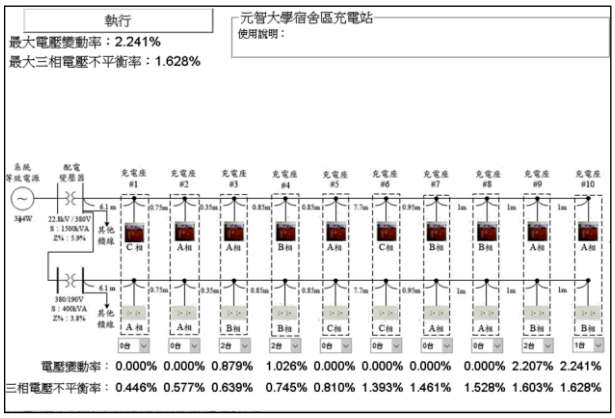


圖 23　七台電動機車同時充電對配電系統衝擊分析

陸、結論

本研究針對校園配電系統進行分析，利用已建構校園能源監控系統，透過監控設備可輕易將資料回傳彙整，再利用電力潮流演算法，針對全校配電系統之傳輸線損失與變壓器損失，作為後續能源使用效率改善之依據，進而提出汰換優先順序建議，有效地減少不必要的電力損失之目的，降低校園用電量，以達到節能減碳之目標等優點。

另外亦針對校園建築物照明負載之耗能狀況進行分析，本研究所建構之回收年限方程式，可供更多不同的建築物使用，進行工程評估和分析。進而推廣至企業和政府機關，應用於大型商辦大樓，此外透過能源管理系統，不但能有效監控建築物的設備耗能狀況，亦可針對上述研究成果進行詳細的分析與探討，據之提出建築照明系統汰換順序規劃準則。依使用者使用習慣與需求，提供建築照明系統汰換順序建議，不需建置能源管理系統，亦可獲得可觀之節能成效，每年亦可為校園降低大筆的經費支出。

此外，本研究亦對校園微電網進行最大裝設充電站容量評估，針對穩態電壓變動、三相電壓不平衡、饋線是否過載等進行分析，以確保電動機車充電站所提供之電力品質穩定性及供電安全性，本研究成果讓校園能管員僅需輸入充電站電動機車數量，即可取得併網點合理的最大可裝設充電站容量，以有效限制日後同一區域所有充電站進行充電所造成電網衝擊。

柒、參考文獻

[1] 台灣電力公司，「建築物節約能源手冊」，2012年。

[2] M. A. Kashem, G. B. Jasmon, and V. Ganapathy, "A new approach of distribution system reconfiguration for loss minimization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 22, pp. 269-276, 2000.

[3] S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Yin, and S. S. H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, pp. 1217-1223, 1988.

[4] M. Atanasovski and R. Taleski, "Energy Summation Method for Loss Allocation in Radial Distribution Networks With DG," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, pp. 1433-1440, 2012.

[5] C. L. T. Borges and D. M. Falcão," Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, pp. 413-420, 2006.

[6] V. H. M. Quezada, J. R. Abbad, and T. G. S. Roman," Assessment of energy distribution losses for increasing penetration of distributed generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, pp. 533-540, 2006.

[7] A. Pasdar and H. H. Mehne, "Intelligent three-phase current balancing technique for single-phase load based on smart metering," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, pp. 693-698, 3, 2011.

[8] G. T. Heydt, "The Impact of Electric Vehicle Deployment on Load Management Strategies," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, pp. 1253-1259, 1983.

[9] 藍弋丰，「電動車進駐大樓，Charge Point 推廣公寓大樓用電動車充電座」，科技新報，2015年。

[10] 數位時代，「創新視野的雲端時代 串連電動車

能源服務新體驗」，科技新報，2015 年。
[11] DIGITIMES，「扶植電動車產業 公共充電站設置成為發展關鍵」，2015 年。
[12] 江榮城，「電力品質」，全華圖書，2011 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

分類技術應用於高壓 AMI 資料之研究

Research on High Voltage AMI Data Applying Data Classification Technology

吳承翰* Wu, Chen-Han
劉大鳴** Liu, Da-Ming
林建宏* Lin, Chien-Hung
張正彥** Chang, Cheng-Yen
呂宜芸** Lu, I-Yun
蒲冠志* Pu, Guan-Chih

摘　要

智慧型電表基礎建設（Advanced Metering Infrastructure, AMI）為台灣電力公司近年重要工作之一，於 101 年 7 月完成高壓 AMI 建置，全台高壓以上用戶之用電資料均儲存於資料庫，善加利用巨量資料分析技術，將能創造出許多附加價值。如運用於用電分析，可歸納用戶用電行為及產業負載特性，做為規劃需量反應負載管理措施之參考。

本研究探討高壓 AMI 用戶用電行為的分類，以 104 年系統尖峰日之 24 小時負載曲線為基準，找出與基準型態差異的負載類型，並探究各類型之用戶特性。另外，亦探討用電曲線標準化方式，以及運用 R 統計語言與視覺化工具呈現結果。

Abstract

Building an island-wide Advanced Metering Infrastructure (AMI) is an important task for Taiwan Power Company. By now, all of our high voltage customers have been installed with AMI. All these AMI data have been transferred to and stored in a data base system. By using AMI data properly, there is a good chance of bringing about many benefits such as classification of customers loads patterns, identification of industry loads characteristic and establishment of demand response strategies.

This project aims to study high voltage customers load pattern and compare customers load patterns with the power system characteristics based on the twenty-four-hour peak load pattern during the year 2015. The main purpose is to find out the difference between customers and the system, then make classification, proceed to discuss the load pattern standardization method, and finally, present the study result using the R statistic language and visualization software.

關鍵詞(Key Words)：智慧型電表基礎建設(AMI)、分類技術(Classifying Technique)、資料探勘(Data Mining)、需量反應(Demand Response)。

壹、前言

根據 2013 年 eMeter 之研究結果顯示[1]，電力公司數據分析最大的效益在於需量反應管理、電價機制最佳化、輸電瓶頸舒緩、停電管理

*台灣電力公司綜合研究所
**台灣電力公司配售電事業部業務處

及用戶參與等議題，而提供最適於巨量資料分析數據的資料來源包括輸配電網、電表、智慧家電及溫度感測器。另外，未來兩年資料分析最佳實現機會在於用戶用電分析 、 事故分析及電力品質分析等應用。

Oracle 公司與相關合作之電力公司認為，利用廣泛布建的 AMI，經巨量資料分析系統已達到下列效果[2]：

一、電表事故發生至修復時間從 90 天縮短至 30 天，電費帳單重新開票率減少 50%。

二、零電力使用電表辨識率達四倍的改善，同數量電表故障維修派工率減少 75%。

三、發現了數以千計的竊電事件，並追討回數百萬美元的收入損失。

四、藉由主動識別問題電表，減少了 70%需要現場解決糾紛的事件。

五、主動偵測變壓器是否過載，降低了設備故障和停電事件。

由此可知，大量的 AMI 資料若有效的分析，將可使電力公司更有效地管理配電系統及用電需量，以及提供加值的用戶服務。台電公司目前已完成高壓以上用戶裝設 AMI，並致力應用 AMI 資料，以發揮效益。本文即是運用高壓 AMI 資料，進行用戶用電分析，發掘用戶負載特性予以分類，並探討分類方法。

由於高壓用戶用電量占系統整體用電量約六成，對於系統負載型態具有相當的影響；且依據調度處負載即時資料可以發現，7 月份負載平日之負載特性差異不大。故本研究運用 104 年 7 月份之高壓 AMI 資料，利用曲線標示(Curve Mapping)方式，比較各高壓用戶與系統平日負載曲線的異同，並以 7 月 2 日全年尖載日之全系統負載曲線[3]為基準進行分類，7 月 2 日負載曲線如圖 1。

由於全系統與單電號間之負載大小差異甚大，需要先將所有曲線標準化，方能進行比較。本研究探討兩種不同的標準化方法，比較其差別，並選擇較適合之方法進行分類。

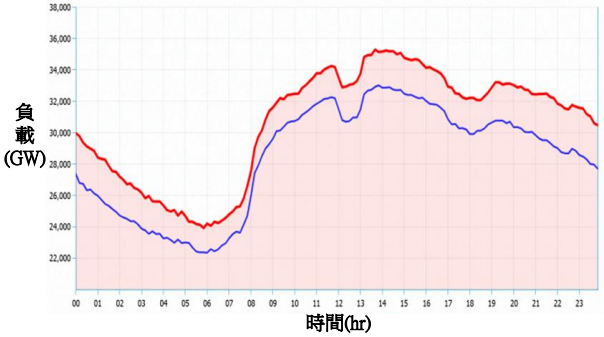


圖 1　104 年 7/2 日之全系統負載曲線(紅線)

本文使用之開發工具為 R[4]以及視覺化軟體 Tableau[5]。R 為統計計算及圖形顯示軟體，屬自由軟體程式語言可撰寫程式對各類型資料進行分析與結果呈現。其內建許多函式可直接套用，有助於加速開發所需之功能。R 雖具備強大的運算功能，也具靈活之圖形功能，但顯示稍嫌簡略。故本文加入另一視覺化軟體，以呈現較佳視覺化結果，有利於進一步分析。

利用 R 將資料完成前處理，並匯入 Tableau 後，可依需求調整橫軸與縱軸之資料類型，並自動判斷可呈現之圖形類別，如折線圖等。將所需之結果繪出後，可拖曳更多的限制條件於圖形上，或點選圖形取得更多資訊進行分析。

貳、AMI 用戶用電曲線標準化方法

一、方法 1：

標準化公式如下式(1)，標準化後之系統負載曲線如圖 2。其中 X_n 為每個時段之用電量平均，例如 X_1 為某用戶由 0 點至 1 點之用電量平均。Xmax 及 Xmin 則為該用戶整天 24 個時段中，用電量平均最大值與最小值[6]。

$$X_{std} = \frac{X_n - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, n = 1,2,3..,24 \qquad (1)$$

此方法可以將所有用戶整天之負載曲線以 0~1 表示，為了尋找與系統用電行為正相關之用戶，將所有用戶每天的用電曲線均標準化後，與

系統曲線逐一比對。以用戶單日標準化後的曲線，與系統標準化後的曲線相減找出誤差量，誤差量越小代表越接近系統曲線。由於單日每小時相減會有 24 筆誤差量，而又以尖峰時段之誤差量較重要，故比對分為尖峰誤差以及離峰誤差，尖、離峰誤差之比對結果如表 1。

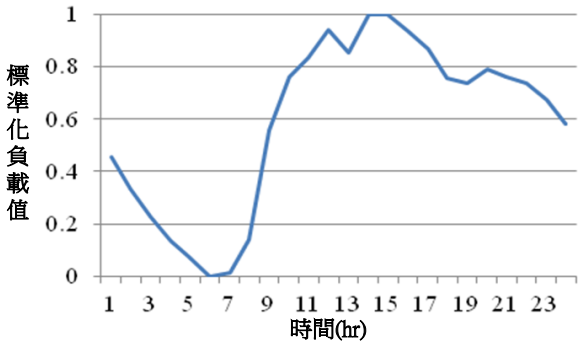


圖 2　方法 1 標準化後之系統負載曲線

表 1　方法 1 分類結果

尖峰＼離峰		誤差				
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
誤差	0.1	0	24	**269**	363	2655
	0.2	0	329	3510	12506	36173
	0.3	0	524	6299	23203	67200
	0.4	0	628	8391	31133	86913
	0.5	0	676	9866	37197	102714

以尖峰誤差 0.1，離峰誤差 0.3 為例，比對結果共 269 筆，如圖 3，而還原標準化後之圖形如圖 4，可以發現當負載基準值還原後，有些負載的意義性將會大幅下降。

進一步分析此 269 筆資料，細分每個電號出現的次數，發現有些電號出現 5 次以上，代表一個月 31 天中，有 5 天之負載曲線均相似於系統用電曲線，相關性較高；而有些電號只出現 1 次，代表其相關性較低。

由於尖、離峰之誤差分別設定為 0.1 與 0.3，條件較為嚴苛，故相似之筆數僅 269 筆。若僅需針對尖峰時段相似之用戶進行分析，可將離峰誤差放寬，以找出更多的相關用戶。

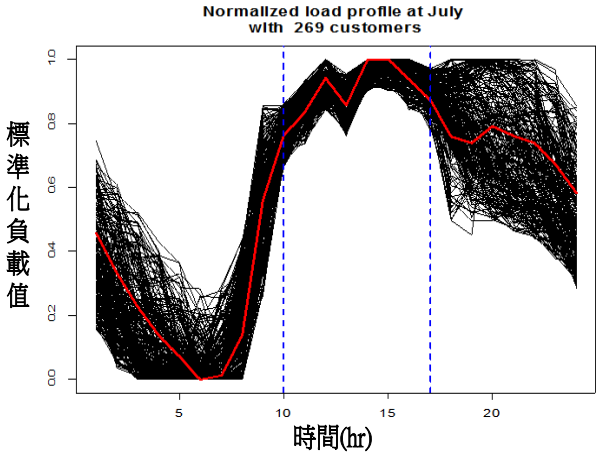


圖 3　方法 1 標準化後與系統相似之用戶用電曲線

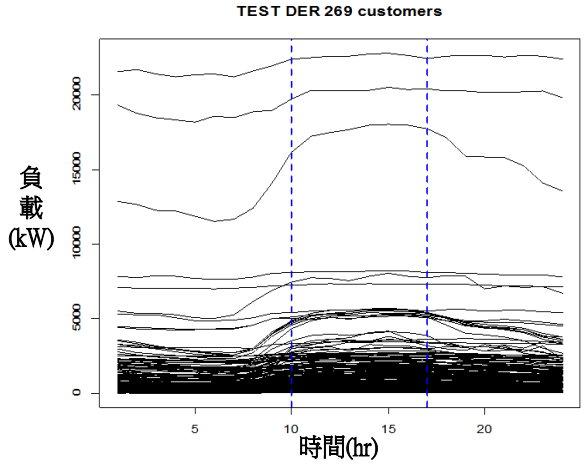


圖 4　方法 1 所找出與系統相似之用戶用電曲線

二、方法 2：

使用方法 1 可以將用戶整天的負載轉換於 0~1 之間，明確的顯示出趨勢的變化，但也可能會過分的將趨勢扭曲，例如，當用戶於一天中用電量變動不大，類似於水平曲線，方法 1 仍會將曲線差異擴大至 0~1。故本研究比較另一方法，其公式如下式(2)，將每個小時之平均用電量除上整天的用電量平均值。

$$X_{std} = \frac{X_n}{\left(\sum_{1}^{24} X_n\right)/24}, n = 1,2,3,..,24 \qquad (2)$$

利用此方法，同樣將尖峰誤差以及離峰誤差分開比較，結果如表 2。以尖峰誤差 0.1，離峰誤差 0.3 為例，搜尋結果共 30895 筆，曲線如圖 5，而還原標準化後之圖形如圖 6。

可以明顯的發現，使用方法 2 所搜尋出之結果筆數會遠遠超出方法 1。原因在於方法 1 之標準化法較嚴苛，會找出趨勢近乎完全吻合目標曲線的用戶。但方法 2 不會這麼嚴苛，由於其計算之意義為取小時用電量與日用電平均之比值，標準化後的數值大約落於 1 附近，故於比較時，趨勢接近就屬於用電模式類似。

比較圖 4 以及圖 6，方法 2 除了搜尋到的筆數較多，用電量之峰值較大。不僅可分類出較多用戶，且趨勢也符合本研究之需求，搜尋相同用電特性之能力較佳，故選擇以方法 2 進行後續之分類。

表 2　方法 2 分類結果

離峰 / 尖峰		誤差				
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
誤差	0.1	1625	24791	**30895**	32230	32759
	0.2	2691	87873	164162	176710	181137
	0.3	2795	98591	208963	242059	255415
	0.4	2823	101047	223434	273122	298070
	0.5	2831	101826	228743	287769	323479

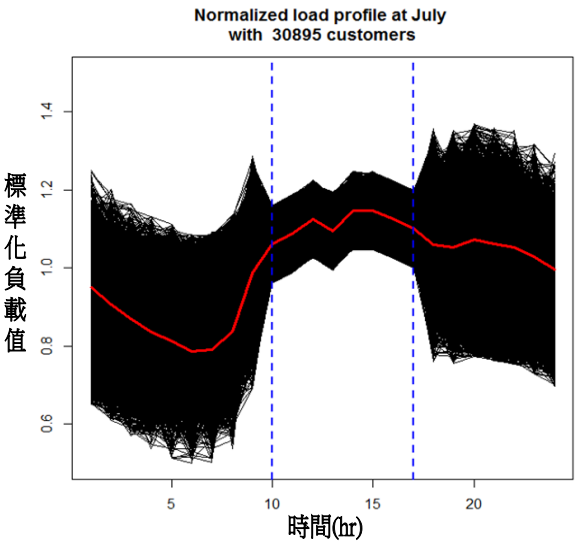


圖 5　方法 2 標準化後與系統相似之用戶用電曲線

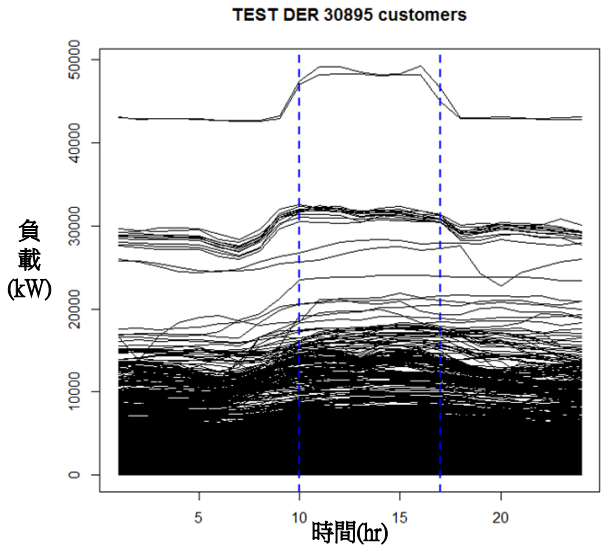


圖 6　用方法 2 所找出與系統相似之用戶用電曲線

參、高壓用戶分類

上述運用標準化方法將高壓用戶之用電曲線與 104 年 7 月 2 號系統曲線比對，僅標出與系統負載型態相似之用戶。為進一步做更細部之分類，本研究將高壓用戶分為 4 類，第一類為負載穩定類，第二類為尖峰較高類，第三類為尖峰較低類，第四類為不規則類。

利用方法 2 將用戶及系統曲線標準化後，分析 104 年 7 月 2 號各高壓用戶所屬之類別。分類規則如下：第一類為整天用電曲線 24 小時均於 0.9 至 1.1 區間內之用戶，第二類為尖峰時段(採 10 點至 12 點與 13 點至 16 點共 5 個小時)用電量均高於系統曲線之用戶，第三類為尖峰時段用電量均低於系統曲線之用戶，第四類為不屬以上三類之未歸類用戶。

圖 7 至圖 10 依序為第一類、第二類、第三類與第四類用戶之負載曲線以及於分類時之標準化曲線。圖中每一條線都屬於某用戶一天 24 小時之用電曲線，利用標準化過程，使不同用負載基礎之曲線可互相比較。本研究將此分類結果以視覺化軟體呈現，可以更簡單、快速的看出哪些用戶具較高之重要性，或進行不同屬性之分類，結果如圖 11。

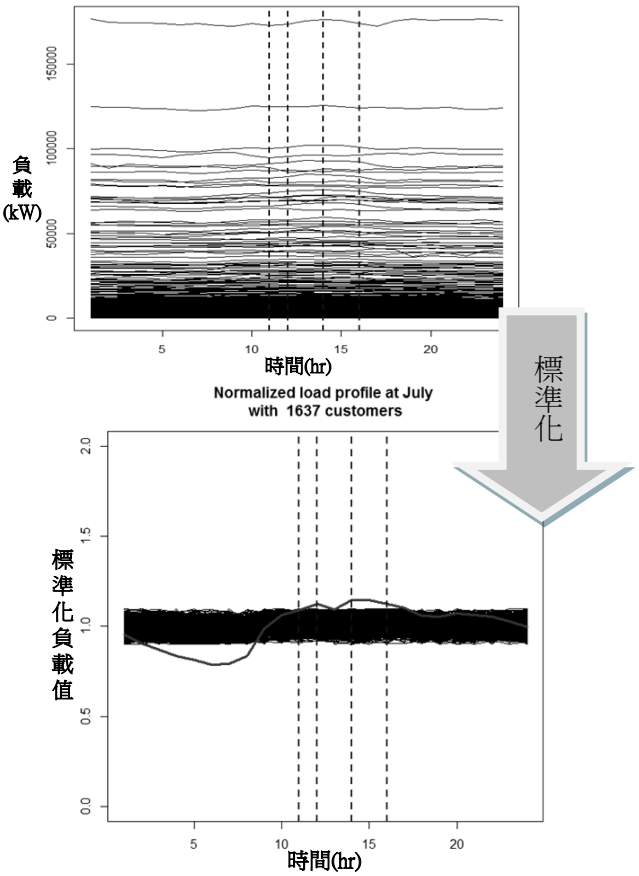


圖 7　第一類用電曲線與標準化後之曲線

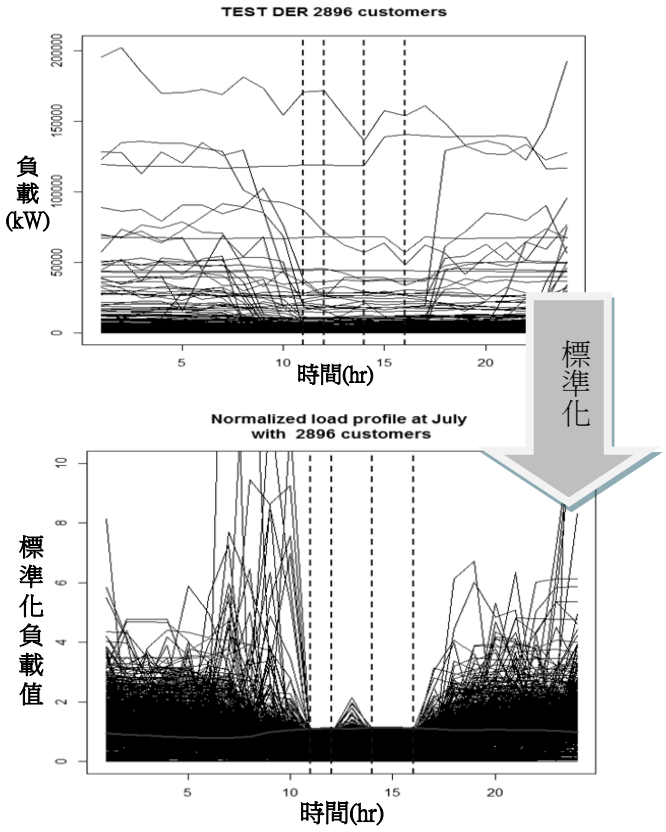


圖 9　第三類用電曲線與標準化後之曲線

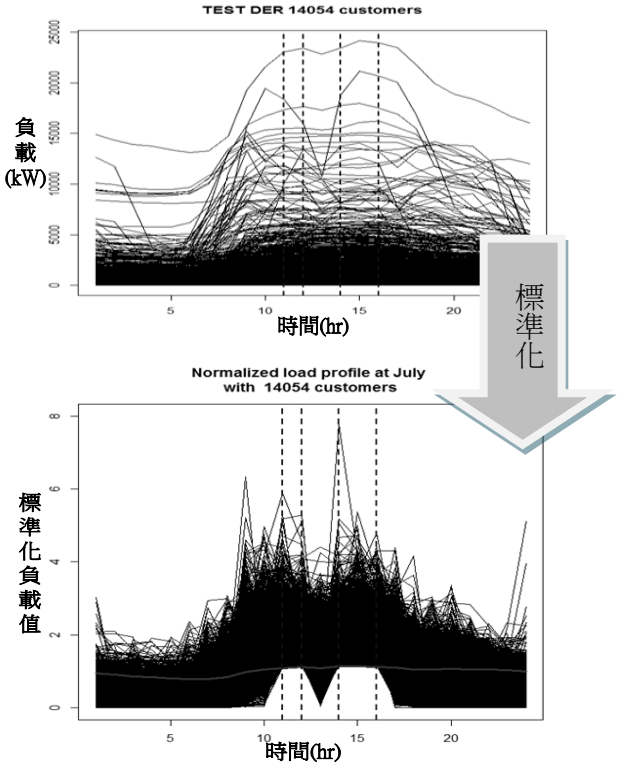


圖 8　第二類用電曲線與標準化後之曲線

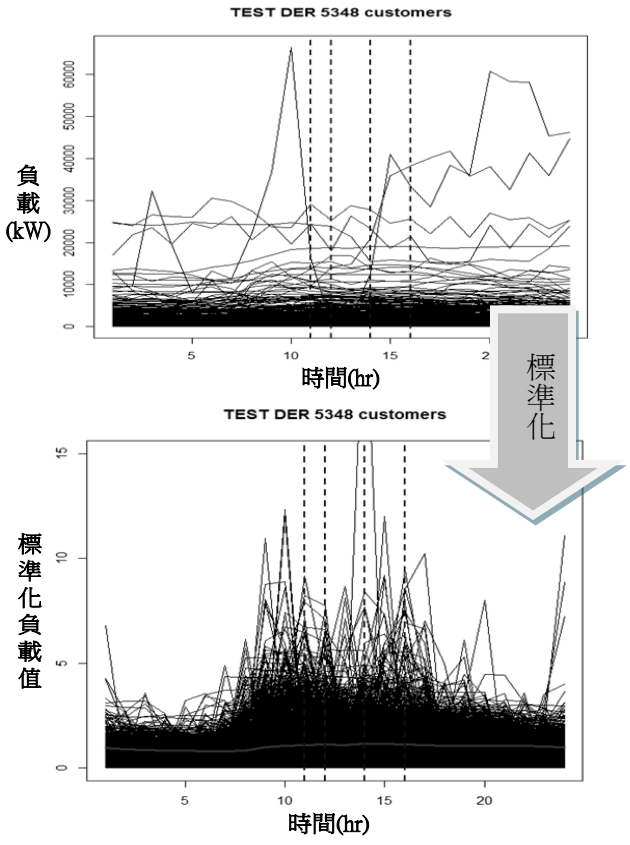


圖 10　第四類用電曲線與標準化後之曲線

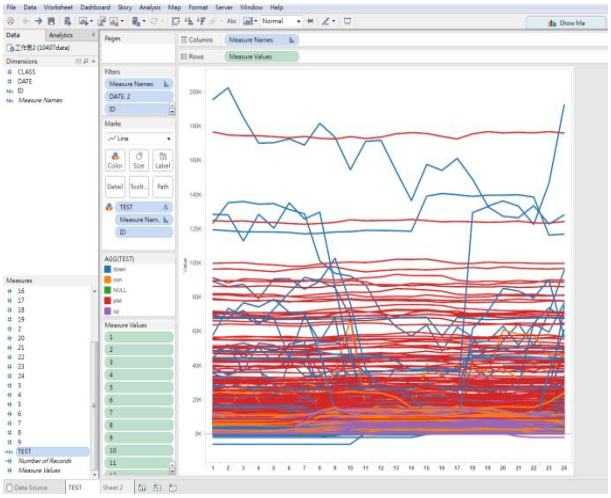


圖 11　以 Tableau 呈現分類結果

應用分類方式區分用戶行業特性：

一、負載穩定類：

此類用戶於全部高壓用戶占比約 8.2%，負載全日起伏穩定如圖 12，不同行業別之每小時用電量如圖 13。當中用戶數最高者為電子零組件製造業，占此類用戶 22.5%，且多為電子零組件製造業中的半導體連續製程。製程略述如下：原料矽經長晶、切晶後成為矽晶圓，而後進行磊晶、氣相或化學沉積，再進入薄膜、光阻、顯影、蝕刻、去除光阻等製程，重複數次之後封測，最終完成成品。製程各有專業，各製程有專精廠商進行製作，但所有製程中均完全仰賴機械設備運作，各廠商均追求高良率及經濟生產，因此具有上述製程之用戶多為 24 小時運作，故負載曲線穩定平緩。

次高用戶數行業別為塑膠製品製造業，占此類用戶 10.6%，製程為將石化原料經流水線連續生產成為塑膠製品，原料經過製模、擠壓、射出成型等方法製造，或以真空成型及壓克力反應成型及發泡成型等製程生產塑膠製品，製程中的有加熱或化學反應，由原料至成品時間短，製程連續程度高，較不易配合調度抑低用電。

第三高用戶數的行業別為電信業，占此類用戶 4.8%，電信業用戶的資通訊設備機房，設備多為電腦主機、伺服器及維持其運轉溫度的空調設備為主，為維持其提供之服務，用電 24 小時均無法中斷。

負載穩定類的用電型態主要為產品製程及實際用電需求造成，台電公司依據用戶調整用電能力，推行各類需量反應措施。其中，臨時減少用電的措施對負載穩定類的用戶較難以適用，少部份廠商能夠以調整訂單及生產線的方式適用計畫性減少用電措施當中之月減 8 日型。以 104 年實際申請情形來看，此類用戶參加需量反應措施比例較低約 3%，其中以參與計畫性減少用電措施一(105 年改為月減 8 日型)占比最高，約占參加用戶之 40.7%，此類用戶可每月以排程方式減少用電，或利用其他方法，如鼓勵用戶改善製程以降低整體之用電量。

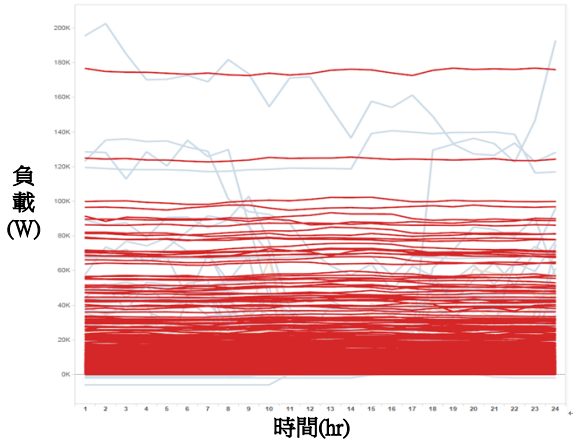


圖 12　第一類之負載曲線-紅色曲線

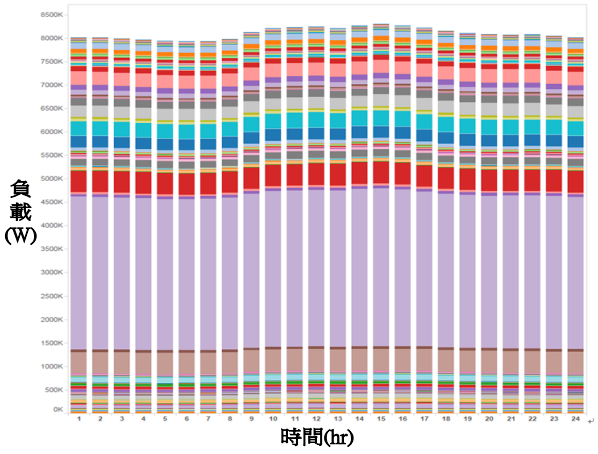


圖 13　第一類之行業別之組成

二、尖峰較高類：

此類用戶最多占全部高壓用戶 58.7%，用戶用電較集中於尖峰時段如圖 14，不同行業別之每小時用電量如圖 15。當中用戶數最多的行業別為教育訓練服務業，占此類用戶 9.3%。此行業別當中多為學校用戶，在系統 7、8 月用電高峰時，雖適逢學校暑假期間用電量相對較少，但其用電型態仍為夏月的平均需量高且需量高低起伏較大，非夏月負載曲線平均需量較低且起伏較小，主要耗能設備為空調器具及各類教學設備。

次高用戶數的行業別為金屬製品製造業，用戶從事金屬鍛造、粉末冶金、手工具、結構及建築構件、容器、表面處理、熱處理及其他金屬製品製造。由於金屬製品業涵蓋面較廣，其中較重要的行業別為手工具業、螺絲螺帽業、表面處理業及模具業等 4 類，此類行業別產程特徵多為人工與機械協作，由於產程仍以依賴人力介入生產流程，故排班多為常日班或二班制，每日於尖峰及半尖峰時段生產 8 至 16 小時。

第三高用戶數的行業為公務機構，亦以尖峰及半尖峰時段用電為主，此三種行業別的用戶數占尖峰較高類約 21%。

尖峰較高類的用電型態有幾項特性，離峰時段用電少，尖峰時段用電大，負載與系統負載形狀相似，如能針對此類用戶，抑低其尖峰用電或移轉尖峰至離峰用電，可助益抑低系統負載，分散尖載時供電壓力。用戶於尖峰用電係因其生產型態或營業時間所致，此類用戶多僅能配合短期(如 2 小時)抑低用電。104 年此類用戶近 5%參加需量反應措施，其中 76%參與計減三(105 年改為日減 2 時型)，7%參與臨時通知方式之需量競價措施，反映此類用戶若誘因充足，可配合短期抑低用電。

三、尖峰較低類：

尖峰較低類的用戶占全部高壓用戶 11%，負載型態為系統尖峰時用電較少如圖 16，不同行業

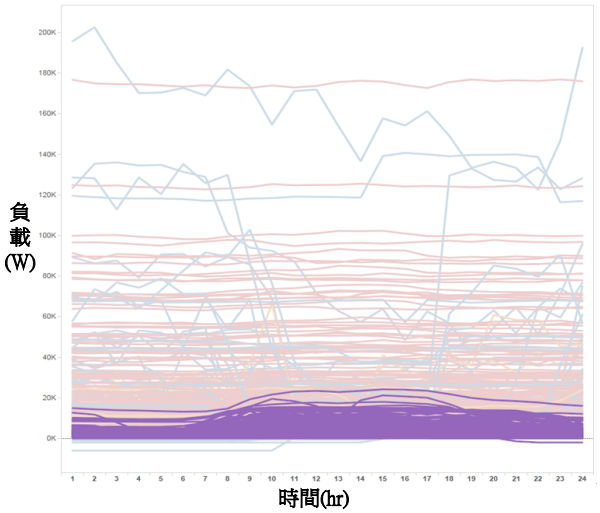


圖 14　第二類之負載曲線-紫色曲線

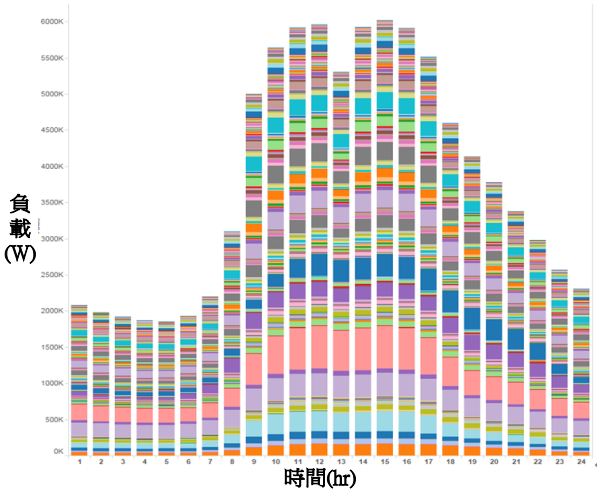


圖 15　第二類之行業別組成

別之每小時用電量如圖 17。其中重要行業有鋼鐵業、水泥業及人造纖維製造業，此 3 種行業之戶數約僅占此類用戶 5%，但契約容量卻占 42%，為契約容量占比最高的三種主要行業別。

104 年此類別需量反應措施參與率為 6%，較其他三種用電類別為高，究其原因，用戶若確實執行抑低用電，用電型態即會歸類於尖峰較低類的負載型態，為確實有能力配合抑低的行業，因此針對分類中的重點行業再加以分析。

鋼鐵業用電多已移轉至系統離峰時段，負載型態為系統尖峰時段用電較低，離峰時段較高。製程種類分為高爐煉鋼、電弧爐煉鋼及軋鋼等三

種，軋鋼又可分為熱軋鋼及冷軋鋼製程。高爐煉鋼及熱軋鋼製程為一貫化作業，不適合臨停，但高爐煉鋼有汽電共生設備，具自產電力能力，可調配於系統尖峰時段發電，替代台電公司供電，計畫性及臨時性減少用電措施皆適用。電弧爐煉鋼製程中，一次熔冶完成約 2 至 3 小時，可隨接單情形調控至離峰使用。冷軋製程用電設備主要為軋鋼馬達，亦可配合用電調度。綜上，計畫性減少用電措施及需量競價方案皆可適用於鋼鐵業，且此產業設備用電及契約容量較大，若能移轉尖峰用電，對抑低系統尖峰負載將有顯著貢獻，因 105 年需量競價措施實施期間較計畫性減少用電措施長，可推廣用戶搭配選擇。

水泥業主要用電於系統離峰時段，尖峰時段用電較低。水泥業主要產程分為生料製備、熟料燒成及水泥製備三階段，生料製備為磨碎及混合原料，設備為磨碎機及混料機，製出之生料可暫存於生料倉中等待燒結。熟料燒成過程主要使用能源為煤，亦具備汽電共生設備可自產電力，於尖峰時段替代台電公司電力使用。水泥製備階段冷卻的熟料與石膏混合後，再研磨成標準細度，即成為水泥，可由水泥車直接運送或由分袋包裝後加以出售，此階段主要耗能設備為滾壓機及水泥磨。以產業負載特性考量適合此產業之負載管理措施，因生產階段有明顯區隔，各階段之半成品亦可加以暫存，系統用電尖峰時段，亦具有自產電力之能力，應可推廣參與計畫性減少用電措施及需量競價方案。

人造纖維製造業整體製程多以自動化機械取代人力製作，排程式生產設備使行業負載可移轉至離峰，較不易以臨停製程方式抑低用電。以產業負載特性考量適合此產業之負載管理措施，可推廣用戶選用計畫性減少用電措施中之月減 8 日型或日減 6 時型，經由規劃每月生產排程，可避開平日尖峰時段用電，取得計減優惠，並兼顧接單生產與電費扣減，以降低用電成本。

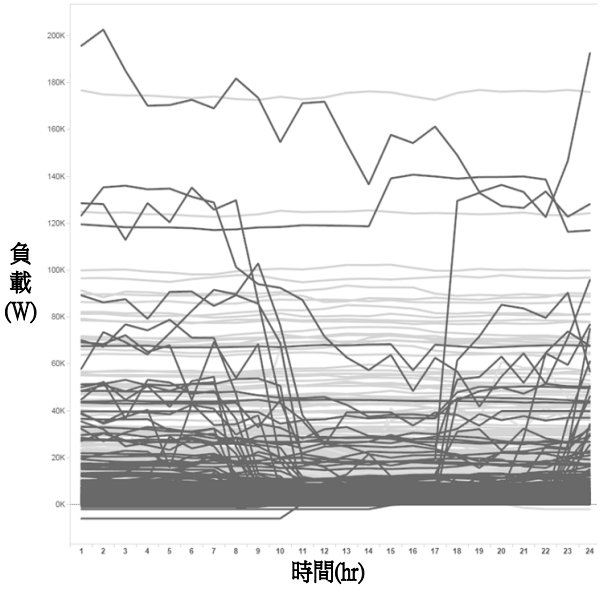


圖 16　第三類之負載曲線-藍色曲線

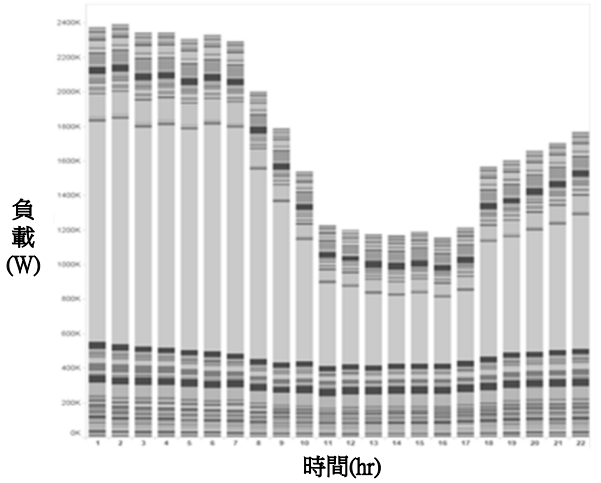


圖 17　第三類之行業別組成

四、不規則類：

此類用戶行業別組成較無特定特徵，其 104 年負載管理措施參加比例亦與整體相似，於本研究分類結果中，此類用戶用電特性較不明顯，104 年參與負載管理措施約 3.7%，僅略高於負載穩定類用戶。本研究分類方法對此類用戶特性未能歸納，須另尋方式加以細分，並探究其用電型態代表之意義。

肆、結論

以 AMI 資料分析用戶用電型態是目前電業數據分析的重要發展方向，相關應用仍亟待開發。由於各個用戶的用電型態，隨著設備、製程、生產排程等因素而有各種變化，傳統研究方法針對某產業，以抽樣方式取得的負載曲線，轉變為 AMI 提供的每 15 分鐘 1 筆負載的精確資料，研究方法亦須配合改變。

本研究運用 R 語言，實現高壓 AMI 用戶之用電行為分類，並發現進行資料探勘時，標準化的方法相當的重要，如方法 1 直接將資料標準化於 0~1 之間，或方法 2 將標準化於 1 左右，不同的標準化方法會有不同的特性，宜適當選擇使用於不同的分類目標。

利用本研究標準化方法 2 進行詳細的資料探勘，依不同之用電特性及行業別，將用戶分為 4 類，並探討用電特性。透過此分類技術將可發掘直接影響系統的用戶，以及可將各類用戶之行業或製程特性，做為訂定需量反應負載管理措施之參考。未來可進一步將標準化方法與演算法(如 K-mean 等技術)結合，進行程式及數值簡化與修訂，發展用戶用電之分群技術，將有助於 AMI 資料運用或演算法修正等探討。

伍、誌謝

本研究承蒙台電公司業務處胡副處長忠興指導及協助，謹此致謝。

陸、參考文獻

[1] EMeter, “Utility Data Analytics Survey,” 2013, [Online]. Available: http://www.emeter.com/.

[2] Oracle Utilities, “Utilities and Big Data：Accelerating the Drive to Value,” 2013, [Online]. Available: http://www.oracle.com/.

[3] 台灣電力股份有限公司，台電調度處即時資訊，2015 年，http://10.5.200.5/sodhome/RealTime.htm/.

[4] WN Venables, “An Introduction to R,” 2016, [Online]. Available: https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/R-intro.html#Introduction-and-preliminaries/.

[5] Tableau, “The Power of R and Visual Analytics,” 2016, [Online]. Available: http://www.tableau.com/learn/whitepapers/power-r-and-visual-analytics?ref=wc&signin=22dbcf60afebc019144d412b02ab0178.

[6] 盧展南、葉家宏等，「巨量資料在電力事業的應用研究」，完成報告，2016 年。

回至目錄頁

用戶月計費及氣溫資料與台電需量反應成效分析

Monthly Billing and Temperature Data to Review the Effectiveness of Taipower's Demand Response

林素真*
Lin, Su-Chen
(103-104 年度研究計畫論文之一)

摘　要

台電已建立龐大的用戶計費資料庫，大量資料如何分析以協助資料應用加值，是各界關注的焦點。本篇利用每月開票計費資料(NBS)，檢視用戶需量反應措施(DR)，找出各類用戶對系統的用電比例、月用電差異、月份氣温負載相關性，推論空調負載行為，協助台電需量反應決策。

Abstract

Taipower has established a massive customer accounting database. How to effectively use the big data to make it more value-added is increasingly a public concern. This article utilizes the customer' monthly billing data to review their existing demand response measures, to help identify among various types of users, system power ratios, distinctions of monthly power consumption, monthly correlation between temperature and load, and to help derive inference about users' air conditioning load behavior. This could assist Taipower to make a proper demand response decision.

關鍵詞(Key Words)：需量反應(Demand Response)、大數據(Big Data)、新開票計費系統(New Billing System)、統計分析 (Statistical Analysis)。

壹、緒論

全球熱帶地區因氣候變遷而逐漸擴張，有研究指出2050年前全球半數人口將住在熱帶地區。台電供電系統形態最主要受氣温及生活作息影響而變化，台灣地處亞熱帶，夏季潮濕炎熱，高温是形成電力系統尖峰負載的主要因素。高温形成的「空調負載」，亟需積極瞭解與面對。

需量反應(DR)被視為可抑減系統尖峰用電減緩電源開源，符合電力系統彈性調度的需求目標，台電自民國 76 年起實施誘因需量反應，截至民國 102 年已有近 2 千戶參與。預期未來的電力系統，亟需仰賴有效率的需量反應措施以推持電力供需的平衡，本文以台電 DR 為主軸，整合、調度系統、業務用戶參與需量反應名單等資料，進行收集、整理、整合多元資料，歸類分析，做視覺化的詮釋，檢討現行需量反應措施，供 DR 新設計或修改、市場潛力、目標設定及行銷推廣參考，應該可以協助台電公司，對需量反應措施做有效的決策[1]。

*台灣電力公司綜合研究所

貳、以月資料尺度檢視系統用電特性

台電有 1 千 3 百多萬戶用戶，AMI 系統沒有建立之前，侑於抄表與收費採人工作業方式，用戶按用電及供電大小一年抄表計費12次或6次，分為高壓以上、低壓、及表燈三大類。

上述三類 NBS 資料庫建立時間已悠久，資料頻率不一，欄位內容、計費資料尺度、用戶抄表計費期間不一致，如表 1。大用戶高壓以上用戶用電占全系統 61.1%、小用戶為表燈用戶戶數占全系統 97.6%，大小用戶的抄表頻率與用戶占比呈反比，與用電占比呈正比。

表 1　計費系統分類

項目	表燈	低壓	高壓及以上
抄表計費頻率	2 個月	每個月	每個月
戶數占全系統	97.6%	2.2%	0.2%
用電度數占比	27.7%	11.2%	61.1%

資料來源：參考文獻[1]

註：本文以下圖表資料來源除另有標示，未標示均來自[1]及本文製造

一、每月開票資料只解釋系統用電 7 成

本文為瞭解各類用戶使用空調負載，所取得的低壓用戶及高壓用戶的總用電度數來自台電綜合研究所用戶服務資料倉儲的 NBS 系統，與企劃處統計年報、業務處營業月報數據不完全一致。

每個月抄表計費的用戶，如高壓及低壓用戶，用電與供電之間的表計時間落差不大，以 NBS 資料的可參考性較佳。高壓及低壓每月 NBS 用電資料，對系統的月用電變化的資料解釋能力只佔 61.1%及 11.2%(如表 2)，在夏季尖峰月二者合計占 69%，完整詮釋整個電力系統的用電需要再結合表燈用電。

表 2 表燈每月用電度數對系統的占比，採企劃處資料。1 千多萬表燈用戶每二個月抄讀電表及計費，全年用電約占系統的 27.7%，按 2012 年用電資料推估每月用電，氣溫負載相關度不如低壓或高壓用戶類別高。二個月抄表一次，每月用電度數，需要前後二個抄表日之間的計算與比例分攤，以獲得比較合理數據。表燈用戶可選用時間電價(TOU)，選用 TOU 約 52,121 戶的用戶已納入低壓 NBS 範圍，採每個月抄表計費。

表 2　各類用戶對系統每月的貢獻度(萬度)

102 年	系統 (萬度)	高壓	低壓	表燈
1 月	1,615,493	65.3%	9.3%	25.5%
2 月	1,308,466	60.0%	12.5%	27.5%
3 月	1,545,745	63.4%	10.5%	26.1%
4 月	1,569,086	65.2%	12.1%	22.7%
5 月	1,695,163	64.3%	11.3%	24.4%
6 月	1,793,303	63.8%	12.6%	23.6%
7 月	1,874,159	58.4%	11.7%	29.9%
8 月	1,914,065	57.5%	11.5%	30.9%
9 月	1,874,733	55.6%	10.8%	33.7%
10 月	1,794,144	58.9%	10.7%	30.4%
11 月	1,672,920	59.1%	10.0%	30.8%
12 月	1,537,211	64.0%	11.0%	25.0%
全年	20,194,488	61.1%	11.2%	27.7%

資料來源：企劃處及[1]

二、各類用電的氣温負載關聯性

為了確定一個變數的變異量，有多少可以被另一個變數的變異量解釋，利用皮耳森積差相關係數的平方，以判定氣温與用電量 2 個變數之間的相關性。就高壓、低壓、及電燈用戶在各月份的有效用電總度數變化、及全台北中南每小時氣温資料，找出在全年各月份用戶的空調使用的可能變化。

以北部、中部及南部之當月最高温度、當月冷氣度(CDD)、及當月冷氣時(CDH)計算氣温負載判定係數(氣温 rsq)，為簡化以及突顯關聯性，月用電與氣温以南部 CDH 作分析。

表 3 全年每月用電與氣温相關性，高氣温是形成本國電力系統尖峰負載的主要因素，且氣温影響用電容量大於用電能量，每個月電力系統的小時尖峰負載(MW)，與每月最高氣温的判定係數高達 0.95；就電力能量，每月氣温與系統供電

度數相關性為 0.69；就高壓用戶每月用電度數與氣溫相關性不大，只有 0.48。

再比較高壓、低壓和表燈用戶對系統尖峰負載(容量或需量)的貢獻度，表 4 為例，以 NBS 的有效用電度數(kwh)資料進行資料標準化，比較分析系統供電度數、每月用電度數與氣溫關聯性。102 年的資料分析結果，電力系統尖峰用電度數月份在 7～9 月，次尖峰在 6 及 10 月；溫度負載相關係數計算結果，中小型用電規模的低壓用戶最高，次為高壓。

表 3　全年每月用電與氣溫相關性

102年	系統(MW)	系統(萬度)	高壓(萬度)
1月	26,342	1,615,493	1,054,438
2月	26,665	1,308,466	784,722
3月	27,461	1,545,745	980,330
4月	28,175	1,569,086	1,022,637
5月	31,698	1,695,163	1,089,790
6月	32,998	1,793,303	1,144,511
7月	33,444	1,874,159	1,093,604
8月	33,957	1,914,065	1,101,353
9月	32,217	1,874,733	1,042,256
10月	29,812	1,794,144	1,056,214
11月	27,770	1,672,920	989,310
12月	26,641	1,537,211	983,897
南 部 cdh	0.95	0.69	0.48

表 4　全年用電每月占比與氣溫相關性　　度%

102年	系統	高壓	低壓	表燈
1月	8.0%	8.5%	6.6%	7.4%
2月	6.5%	6.4%	7.3%	6.4%
3月	7.7%	7.9%	7.2%	7.2%
4月	7.8%	8.3%	8.4%	6.4%
5月	8.4%	8.8%	8.5%	7.4%
6月	8.9%	9.3%	10.0%	7.6%
7月	9.3%	8.9%	9.7%	10.0%
8月	9.5%	8.9%	9.8%	10.6%
9月	9.3%	8.4%	8.9%	11.3%
10月	8.9%	8.6%	8.6%	9.7%
11月	8.3%	8.0%	7.4%	9.2%
12月	7.6%	8.0%	7.5%	6.9%
佔系統	100%	61.1%	11.2%	27.7%
氣 温 RSQ	0.69	0.48	0.89	0.40

三、主動選用 TOU 大用戶群全年每月用電平均

高壓以上用戶全年用電度數頗平均，用電最多在 6 月、其次為 7、8 及 5 月。依電價表分類，經常契約 100kw 以上一律適用時間電價，用戶可選用二段式或三段式 TOU，不選用者概適用二段式 TOU[2]。102 年高壓以上採用三段式時間電價用戶，用電度數佔系統的 47.4%，全年用電分佈平均，用電最多在 6 月、次為 8、5、及 7 或 1 月。高壓以上採用二段式時電價用戶，用電度數佔系統的 13.8%，使用分布集中在夏天，最高為 6 月、次為 7、8、5 月份(表 5)。

主動選用三段式 TOU 計價的用戶群，對電力價格敏感度高，全年的負載率高，用電度數與氣溫相關係數低(氣溫 RSQ 為 0.38)，用戶的用電負載管理執行效率較好。高溫形成供電系統尖峰負載，為了抑低電力系統尖載需求，集中在夏月使用的二段式時間電價用戶(氣溫 RSQ 為 0.65)，是空調需量反應方案(AC　DR)的潛在目標用戶。

低壓用戶全年用電占系統的 11.2%，可選按 2 段式 TOU 計費(除了經常契約 100~499kw)，然而選用或不選用時間電價，並沒有月用電的顯著差異，各類低壓用戶對氣溫負載需求高。顯示是 AC DR 的主要目標群。

表 5　時間電價別用電每月占比與氣溫相關性
(有效用電　度%)

102 年	系統%	高壓			低壓		
		高壓	2TOU	3TOU	低壓	2TOU	非 TOU
1 月	8.0%	8.5%	8.0%	8.7%	6.6%	6.5%	6.7%
2 月	6.5%	6.4%	5.6%	6.6%	7.3%	7.3%	7.3%
3 月	7.7%	7.9%	7.7%	8.0%	7.2%	7.1%	7.3%
4 月	7.8%	8.3%	7.9%	8.4%	8.4%	8.4%	8.4%
5 月	8.4%	8.8%	9.0%	8.8%	8.5%	8.5%	8.5%
6 月	8.9%	9.3%	9.8%	9.1%	10.0%	10.0%	10.0%
7 月	9.3%	8.9%	9.4%	8.7%	9.7%	9.7%	9.8%
8 月	9.5%	8.9%	9.3%	8.8%	9.8%	9.8%	9.8%
9 月	9.3%	8.4%	8.7%	8.4%	8.9%	9.0%	8.9%
10 月	8.9%	8.6%	8.7%	8.5%	8.6%	8.6%	8.5%
11 月	8.3%	8.0%	8.0%	8.0%	7.4%	7.5%	7.4%
12 月	7.6%	8.0%	7.8%	8.0%	7.5%	7.5%	7.6%
系統(度)	100.0%	61.1%	13.8%	47.4%	11.2%	5.3%	5.8%
氣温 rsq	0.69	0.48	0.65	0.38	0.89	0.88	0.89

四、高壓經常契約小用戶氣温負載相關高

台電需量反應方案的設計，計畫性減少用電(計減)或臨時性減少用電(臨減)方案適用門檻，概以經常契約容量 500kw 做區隔。將高壓以上用戶以契約容量 500kw 劃分，大用電規模(>500)的用戶約 9,018 戶(佔 0.068%)，全年用電度數佔全系統的 55.8%，最多用在 6 月，次為 8、7 及 5 月，較小規模(<500)用戶的用電平均如表 6。

高壓契約容量 500kw 以下的用戶約 15,602 戶(佔 0.118%)，全年用電度數只佔系統的 5.4%，7 月尖峰需量(NBS)加總佔高壓以上 15.2%。表 6，可看出集中在夏月使用，最多在 6 月、次為 7、8、及 5 月，以此推論高壓以上的用戶，小規模用戶的空調負載需求占比比例較大規模用戶多。

表 6　高壓用電規模別月用電與氣温相關性(度)%

102年	系統	高壓	高壓>500	高壓<500
1月	8.0%	8.5%	8.5%	8.5%
2月	6.5%	6.4%	6.4%	6.1%
3月	7.7%	7.9%	8.0%	7.7%
4月	7.8%	8.3%	8.3%	8.1%
5月	8.4%	8.8%	8.8%	9.0%
6月	8.9%	9.3%	9.2%	9.7%
7月	9.3%	8.9%	8.8%	9.3%
8月	9.5%	8.9%	8.9%	9.2%
9月	9.3%	8.4%	8.4%	8.5%
10月	8.9%	8.6%	8.6%	8.5%
11月	8.3%	8.0%	8.0%	7.8%
12月	7.6%	8.0%	8.0%	7.7%
佔系統	100.0%	61.1%	55.8%	5.4%
氣温rsq	0.69	0.48	0.46	0.63

五、非生產性質用戶空調負載高

台電需量反應方案設計的適用門檻，除了以經常契約容量 500kw 為界，另一區隔變數：「生產性」，例如計減一及臨減一，只限生產性用戶。現行中央空調暫停用電的法規，依據 86 年經濟部核准修訂的「中央空氣調節系統及箱型空氣調節機週期性暫停用電辦法」，以「綜合用戶」為對象。現行電價表已將綜合用戶併入電力用戶，本文以「非生產性」用戶取代「綜合用戶」分析。

台電各類電價適用範圍按用戶用電場所性質及用電器具而定。有關規定，於營業規則的營業手冊第二章。用電場所分為住宅、生產性質場所、及非生產性質場所。

高壓以上「生產性」佔高壓以上戶數 65.48%，經常契約 76.4%，全年度數 82.8%，7 月尖峰需量(NBS)加總的 75.8%，全年用電度數分佈最高在 6 月，其次在 5、8、7 及 1 月(表 7)。顯示除了受生產訂單排程的影響，生產性的空調負載的需求仍然存在。

「非生產性」佔高壓以上戶數 30.86%，經常契約 21.5%，全年度數 15.9%，全年用電度數分佈最高在 6 月，其次在 7、8、5 及 9 月，和「住宅其他」用戶同樣地，夏季空調負載的需求顯著。

表 7　高壓生產別月用電與氣温相關性(度)%

102 年	高壓	生產性	非生產性	住宅其他
1 月	8.5%	8.7%	7.7%	7.6%
2 月	6.4%	6.4%	6.0%	5.9%
3 月	7.9%	8.1%	7.4%	7.3%
4 月	8.3%	8.4%	7.7%	7.7%
5 月	8.8%	8.8%	9.2%	9.0%
6 月	9.3%	9.1%	10.3%	10.2%
7 月	8.9%	8.7%	9.5%	9.9%
8 月	8.9%	8.8%	9.5%	9.9%
9 月	8.4%	8.3%	9.0%	9.0%
10 月	8.6%	8.5%	8.6%	8.6%
11 月	8.0%	8.1%	7.7%	7.7%
12 月	8.0%	8.1%	7.3%	7.2%
佔系統	61.1%	50.6%	9.7%	0.8%
氣温 rsq	0.48	0.33	0.83	0.87

參、以每月計費資料檢視誘因 DR

整理台電公司 102 年電價、用戶及用電結構

分佈如表 8 及表 9。北美電力可靠度協會(North American Electric Relibility Council, NAERC)對需量反應(DR)的分類，按是否提供電力系統的調度，時間電價(TOU)類屬不可調度類的電價 DR，電價 DR 是用電用戶必需擇一以計算電費；誘因 DR 屬於用戶視用電可配合方式選用對其有利的的方案，台電誘因 DR 中臨減一~四屬可調度類誘因 DR，有參與用戶，除臨減四外並未執行啓動；計減一~四、儲冷空調離峰用電優惠、及空調週期性暫停用電屬不可調度類。

本章節以 NBS 每月計費資料，分析比較誘因需量反應在民國 102 年執行情形。

表 8 供電、電價用戶分佈　　102 年

供電方式	表燈(包、單、三相)		低壓		高壓 3.3~22.8kv		特高壓 69kv~	
經契容量	-	1~99	1~99	100~499	100~499	500~2000	500~1000	1000~
戶數	97.2%	0.4%	2.1%	0.08%	0.12%	0.06%	0.004%	
全年度數	27.7%	11.2%			5%	25%	30%	

表 9　需量反應(DR)分類用戶分佈

價格 DR								
非 TOU		*	257,728	*	*	*	*	*
二 TOU	*	5212	66801	9900	13535	4523	12	102
三 TOU	*	*	*	*	1913	3376	5	424
尖變 TOU*	*	*	*	*	*	?	?	?
誘因 DR								
生產性	計減一(可五)					199	0	41
	計減二(可一)					78	0	50
	計減三(可二)					69	0	14
	計減四(可六)					35	0	19
	臨減二(可三)					20	0	3
	臨減四(需量)					0	0	1
	臨減一*可四						*	0
	臨減三(區域)				0			*
電力		儲冷空調離峰用電 6 折 282 戶						
非生產性	?	空調週期性暫停用電(非生產性質用戶)168 戶						
	計減二*可一					14	0	0
	計減三*可二					4	0	0
	計減四*可六					0	0	11
	臨減二*可三					2	0	2
	臨減四*需量					0	0	0
	臨減三區域				0			*
學校(高壓)1463 戶	計減三*	7						
	計減四*	600						

一、誘因ＤＲ方案集中大用戶且參與率低

高壓以上用戶沒有參加誘因式需量反應的用戶總數 23,185 戶，佔高壓以上用戶的 94.18%，經常契約佔高壓以上的 81.0%。全年用電度數佔全系統的 49.4%。從表 8、及表 9 可看出 DR 適

用範圍偏重在高壓經常契約 500kw 以上用戶。

民國 102 年 8 月高壓以上誘因式需量反應的用戶總數 1,365 戶，佔高壓以上的 5.54%。

高壓參與計減/臨減措施(扣除 AC DR)1080 戶，參與率 4.4%。縮小用戶範圍至高壓 500Kw 以上有 9018 戶,其中參與誘因 DR 措施 883 戶，參與率 9.8%；再縮小方案範圍，參與計減/臨減措施 670 戶，參與率 7.4%，用戶參與率低，仍具有推廣的潛力。

二、大用戶誘因ＤＲ執行成效佳

誘因型 DR 措施最主要的目標在抑低電力系統尖峰，移轉高成本的尖峰負載至系統低成本離峰時使用；高壓以上參與誘因 DR 的用戶用電占系統的 11.7%，全年用電度數分佈平均，用電最多的月份在不是電力系統尖峰的 1 月及 6 月，以月資料尺度衡量，參與用戶的用電總度數與氣溫高低無關，夏月高溫時沒有增加用電度數，推論執行誘因 DR 成效良好，如表 10。

各項誘因 dr 方案的比較,以圖形檢視全年的用電變化，如圖 1，各項誘因型 DR 措施在 102 年各月用電度數占比分析(詳表 11)，計劃性減少用電一、二、三、四的夏季用電除計減四外，均有顯著的成效。而三項空調有關的ＤＲ，儲冷優惠方案內容需有尖離峰時段、空調暫停需有每 15 分鐘或每 8 分鐘的資料，月資料尺度不夠精確，看不出執行的成效，需另依不同的分析方法以再確認評估方案成果。

(一) 計減三，每年夏月(6~9)每月抑低 8 日，每日低 7 小時(10~17)星期二至星期五，此類用戶充分利用全年非夏月的電力，用電不受外氣溫度的影響，負載管理執行成效最顯著。

(二) 臨減二，限制用電前 2 小時、4 小時或前一天下午 4 時前通知，每次抑低時間不低於 4 小時，參與的用戶，月用電度數的氣溫負載相關性低，惟系統已多年未執行啓動臨時減少用電二的調度，無法看出臨減二措施的執行成效。

(三) 計減一，每年 4 月至 11 月，每月抑低 4 日，每週抑低 1 日，每日抑低 7 小時(10~17、週一~週五)，月用電度數的氣溫負載也相關性低，非夏月用電度數高於夏月的用電度數。

(四) 計減二，年 5 月 11 日至 9 月，每日抑低 6 小時(10~12、13~17，週一~週五)，參與的用戶，月用電度數的氣溫負載相關性低，非夏月用電度數高於夏月的用電度數。

表 10　誘因 DR 月用電與氣温相關性

102 年	系統	高壓		低壓	
		DR	非 DR	DR	非 DR
1 月	8.0%	9.0%	8.4%	5.8%	6.6%
2 月	6.5%	6.6%	6.3%	6.3%	7.3%
3 月	7.7%	8.3%	7.8%	6.6%	7.2%
4 月	7.8%	8.6%	8.2%	7.9%	8.4%
5 月	8.4%	8.7%	8.9%	8.9%	8.5%
6 月	8.9%	8.8%	9.4%	11.0%	10.0%
7 月	9.3%	8.1%	9.0%	10.9%	9.7%
8 月	9.5%	8.5%	9.0%	10.9%	9.8%
9 月	9.3%	8.3%	8.5%	9.6%	8.9%
10 月	8.9%	8.7%	8.5%	8.6%	8.6%
11 月	8.3%	8.1%	8.0%	7.0%	7.4%
12 月	7.6%	8.3%	7.9%	6.4%	7.5%
佔系統	100.0%	11.7%	49.4%	0.02%	11.1%
氣温 rsq	0.69	0.06	0.56	0.95	0.89

圖 1　102 年高壓誘因 DR 各月用電變化

三、低壓誘因ＤＲ方案少且執行成效待改善

民國 102 年低壓供電用戶約 35 萬戶，全年總用電量約佔系統的 11.2%(表 8 及表 9)。計減三及計減四方案，開放低壓供電的「學校」用戶選

用，低壓 NBS 沒有相關欄位供識別是否參與誘因 DR，在資料取得與研究範圍限制下，未列入分析。

除了學校，低壓僅只有空調需量反應(AC DR)可以參與，含空調週期性暫停用電(85 戶)[3]、[4]、及儲冷空調離峰用電 6 折優惠(48 戶)[5]。表 12 低壓用戶按生產性、非產性、或住宅其他分類，已參與誘因 DR 用戶的氣溫負載高於未參與用戶，以月資料尺度檢視，並沒有減少夏月用電度數的成效，低壓供電的需量反應方案待檢討改善。

表 11　高壓以上，已參與誘因型 DR　　度數%

102 年	計一	計二	計三	計四	臨二	AC cycling	AC_A	AC_B
1 月	9.8%	9.8%	9.4%	8.6%	9.0%	7.2%	6.1%	8.3%
2 月	7.0%	6.7%	6.7%	6.5%	7.6%	5.5%	5.1%	6.6%
3 月	8.7%	8.9%	8.6%	8.0%	8.4%	7.1%	6.5%	7.7%
4 月	8.7%	9.1%	8.6%	8.4%	8.5%	7.6%	6.8%	8.3%
5 月	8.6%	8.8%	8.5%	8.4%	8.9%	9.4%	9.5%	8.9%
6 月	8.1%	8.1%	8.4%	9.1%	8.7%	10.8%	11.8%	9.6%
7 月	7.5%	7.3%	8.3%	8.2%	7.4%	10.1%	11.8%	9.2%
8 月	8.2%	8.0%	8.3%	8.6%	8.7%	10.0%	11.8%	9.1%
9 月	7.9%	7.7%	8.1%	8.8%	8.4%	9.4%	10.1%	8.6%
10 月	8.6%	8.5%	8.9%	8.9%	8.9%	8.7%	8.4%	8.5%
11 月	8.3%	8.3%	8.3%	8.0%	8.8%	7.5%	6.9%	7.8%
12 月	8.6%	8.6%	8.0%	8.5%	6.6%	6.8%	5.2%	7.6%
佔系統(度)	3.63%	4.12%	1.06%	3.37%	0.24%	0.07%	0.05%	2.64%
戶	242	145	97	697	27	72	27	206
氣溫 rsq	0.15	0.17	0.001	0.22	0.01	0.89	0.97	0.71

註：儲冷空調離峰優惠措施：AC_A(設戶)、AC_B(分表)、AC_F(設戶)，其中 AC_F 1 戶列入設戶分析

表 12　低壓「生產」與「非生產性」每月用電度數占比分析

102 年	未參加誘因 DR 用戶			參加誘因 DR 用戶		
	生產性	非生產性	住宅其他	生產性	非生產性	住宅其他
1 月	6.9%	6.3%	7.0%	6.0%	6.0%	4.7%
2 月	7.2%	7.2%	7.7%	6.2%	6.6%	5.3%
3 月	7.4%	7.0%	7.3%	6.8%	6.9%	5.7%
4 月	8.5%	8.3%	8.5%	8.3%	8.0%	7.3%
5 月	8.4%	8.7%	8.3%	9.0%	8.9%	9.1%
6 月	9.7%	10.4%	9.6%	11.9%	10.6%	12.3%
7 月	9.5%	10.1%	9.4%	11.3%	10.5%	12.1%
8 月	9.5%	10.1%	9.5%	11.0%	10.7%	11.8%
9 月	8.7%	9.2%	8.8%	9.8%	9.4%	10.7%
10 月	8.6%	8.5%	8.5%	7.8%	8.6%	8.9%
11 月	7.7%	7.2%	7.6%	5.9%	7.1%	6.8%
12 月	7.9%	7.0%	7.9%	6.0%	6.7%	5.4%
系統(度)	4.4%	4.9%	1.9%	0.001%	0.013%	0.003%
戶數	191,104	101,225	47,179	6	106	21
氣溫 rsq	0.83	0.92	0.82	0.94	0.93	0.97

四、小規模、非生產性質用戶 DR 潛力大

從 NBS 每月抄表計費的有效用電總度數中，沒選用誘因ＤＲ各分類用戶，都有空調負載的需求。

(一) 台電系統的需求面管理目標，為抑低空調負載，可以優先設定在非生產性、二段式 TOU、經常契約小於 500kw 的用戶。低壓用戶分析，全部低壓夏月空調負載高，尤其小規模、非生產性的低壓用戶(表 13)。

表 13　低壓未參與誘因 DR

102 年	經常契約容量		TOU		生產性質			學校
	大於 100kw	小於 100kw	二段	無	生產	非生產	住宅其他	
1 月	6.5%	6.5%	6.6%	6.7%	6.9%	6.3%	7.0%	5.8%
2 月	7.1%	7.1%	7.3%	7.3%	7.2%	7.2%	7.7%	6.4%
3 月	7.1%	6.9%	7.1%	7.3%	7.4%	7.0%	7.3%	7.5%
4 月	8.4%	8.2%	8.4%	8.4%	8.5%	8.3%	8.5%	9.2%
5 月	8.5%	8.7%	8.5%	8.5%	8.4%	8.7%	8.3%	10.0%
6 月	10.0%	10.4%	10.0%	10.0%	9.7%	10.4%	9.6%	10.4%
7 月	9.7%	10.2%	9.7%	9.8%	9.5%	10.1%	9.4%	7.1%
8 月	9.8%	10.2%	9.8%	9.8%	9.5%	10.1%	9.5%	8.1%
9 月	9.0%	9.2%	9.0%	8.9%	8.7%	9.2%	8.8%	10.2%
10 月	8.7%	8.4%	8.6%	8.5%	8.6%	8.5%	8.5%	9.3%
11 月	7.6%	7.1%	7.5%	7.4%	7.7%	7.2%	7.6%	7.9%
12 月	7.6%	7.1%	7.5%	7.6%	7.9%	7.0%	7.9%	8.1%
系統度	2.5%	0.9%	5.3%	5.8%	4.4%	4.9%	1.9%	0.1%
戶	9,946	329,562	81,839	257,669	191104	101225	47179	618
氣溫 rsq	0.87	0.94	0.88	0.89	0.83	0.92	0.82	0.23

夏月與非夏月的用電需求差異，按用電契約規模與是否生產性質區隔，並不顯著，各類都對夏季空調的用電需求存在。再依氣溫相關性排序，高壓小規模非生產性、高壓大規模住宅其他、高壓大規模非生產性、高壓小規模住宅其他類空調需求較高(表 14)。

表 14　高壓未參與誘因 DR 用電規模與生產性別

102 年	經常契約大於 500kw			經常契約小於 500kw		
	生產性	非生產性	住宅其他	生產性	非生產性	住宅其他
1 月	8.5%	7.8%	7.7%	9.1%	7.4%	7.8%
2 月	6.4%	6.1%	6.0%	6.3%	5.8%	5.8%
3 月	8.0%	7.4%	7.4%	7.9%	7.2%	7.2%
4 月	8.3%	7.7%	7.7%	8.4%	7.6%	7.7%
5 月	8.8%	9.1%	9.0%	8.8%	9.2%	8.8%
6 月	9.2%	10.1%	10.1%	9.3%	10.6%	10.2%
7 月	8.9%	9.6%	9.8%	9.0%	10.0%	9.8%
8 月	8.9%	9.5%	9.8%	8.9%	9.9%	9.9%
9 月	8.4%	9.0%	8.9%	8.1%	9.2%	9.0%
10 月	8.5%	8.6%	8.6%	8.4%	8.6%	8.6%
11 月	8.1%	7.7%	7.7%	7.9%	7.5%	7.8%
12 月	8.1%	7.3%	7.2%	8.0%	6.9%	7.4%
佔系統	36.9%	6.7%	0.6%	3.5%	1.5%	0.2%
戶	5577	2280	278	10056	4475	520
氣溫 rsq	0.45	0.84	0.87	0.35	0.89	0.84

低壓用戶未參與誘因 DR，按用電規模與生產性質別分類分析，氣溫負載相關性差異並不顯著，夏月用電多高於非夏月。惟低壓非生產性、規模愈小夏月用電愈集中(表 15)。

表 15　低壓未參與誘因 DR 用電規模與生產性質別

102 年	經常契約大於 100kw			經常契約小於 100kw		
	生產性	非生產性	住宅其他	生產性	非生產性	住宅其他
1 月	6.7%	6.3%	6.5%	6.9%	6.3%	7.1%
2 月	6.9%	7.3%	7.2%	7.3%	7.2%	7.8%
3 月	7.4%	7.0%	7.0%	7.4%	7.0%	7.4%
4 月	8.6%	8.4%	8.3%	8.5%	8.3%	8.5%
5 月	8.4%	8.7%	8.4%	8.3%	8.7%	8.2%
6 月	9.6%	10.3%	10.0%	9.8%	10.4%	9.5%
7 月	9.4%	9.9%	9.9%	9.6%	10.1%	9.2%
8 月	9.6%	10.0%	9.9%	9.5%	10.1%	9.4%
9 月	8.7%	9.2%	9.1%	8.7%	9.2%	8.7%
10 月	8.8%	8.6%	8.6%	8.5%	8.5%	8.5%
11 月	7.9%	7.2%	7.5%	7.6%	7.1%	7.6%
12 月	8.1%	7.1%	7.7%	7.9%	7.0%	8.0%
佔系統	1.1%	1.0%	0.4%	3.3%	3.8%	1.4%
戶	3827	3995	2124	187277	97230	45055
氣溫 rsq	0.74	0.90	0.89	0.85	0.92	0.78

(二) 現行高壓用戶得以選用 3 段式時間電價，高壓以上三段式時間電價用戶、生產性用戶較其他類用戶在各個月份平均使用(表 16)。

(三) 低壓用戶經常契約 100kW 以下可以選用時間電價(2 段式 TOU)。未參與誘因 DR 用戶，依時間電價別與生產性質別交叉分析，高壓選用 2 段 TOU、低壓選用非 TOU 且非生產性質用戶用戶，夏月用電愈集中(表 17)。

表 16　高壓未參加誘因 DR 用戶　　度數%

102 年	2 段 TOU			3 段 TOU		
	生產性	非生產性	住宅其他	生產性	非生產性	住宅其他
1 月	8.3%	7.5%	7.5%	8.7%	8.0%	8.0%
2 月	5.5%	5.8%	5.7%	6.6%	6.3%	6.4%
3 月	8.0%	7.2%	7.2%	7.9%	7.5%	7.6%
4 月	8.1%	7.5%	7.4%	8.4%	7.9%	8.0%
5 月	8.9%	9.1%	9.0%	8.8%	9.1%	8.9%
6 月	9.4%	10.5%	10.3%	9.1%	10.0%	9.8%
7 月	9.3%	9.9%	10.1%	8.8%	9.4%	9.5%
8 月	9.1%	9.9%	10.1%	8.8%	9.4%	9.5%
9 月	8.4%	9.2%	9.1%	8.4%	8.8%	8.8%
10 月	8.7%	8.7%	8.6%	8.5%	8.6%	8.5%
11 月	8.1%	7.6%	7.7%	8.0%	7.8%	7.8%
12 月	8.1%	7.1%	7.2%	8.0%	7.4%	7.3%
佔系統(度)	8.7%	3.8%	0.4%	31.8%	4.4%	0.3%
戶	11749	5347	682	3884	1408	116
氣溫 rsq	0.47	0.88	0.88	0.42	0.82	0.82
占高壓%(經契)	21.5%	10.2%	1.3%	39.8%	7.6%	0.6%

(四) 表燈用戶有 5 萬多戶選用時間電價，按用戶用電場所營業與非營業區隔，二類別的夏月氣溫負載不明顯(表 17)。

表 17　低壓未參加誘因 DR　　度數%

102 年	2 段 TOU			無 TOU			表燈 TOU	
	生產性	非生產性	住宅其他	生產性	非生產性	住宅其他	非營業	營業
1 月	6.8%	6.4%	6.6%	6.9%	6.1%	7.2%	9.6%	9.5%
2 月	7.1%	7.4%	7.2%	7.2%	7.0%	8.0%	9.5%	9.6%
3 月	7.4%	7.0%	7.1%	7.4%	6.9%	7.5%	8.7%	8.8%
4 月	8.6%	8.4%	8.3%	8.4%	8.2%	8.6%	8.1%	8.2%
5 月	8.3%	8.6%	8.4%	8.4%	8.8%	8.2%	6.9%	7.0%
6 月	9.5%	10.2%	9.9%	9.8%	10.6%	9.3%	7.2%	6.9%
7 月	9.3%	9.9%	9.8%	9.6%	10.3%	9.1%	9.6%	9.5%
8 月	9.5%	10.0%	9.8%	9.6%	10.3%	9.3%	9.5%	9.6%
9 月	8.7%	9.2%	9.0%	8.7%	9.3%	8.6%	8.7%	8.8%
10 月	8.8%	8.6%	8.6%	8.5%	8.5%	8.4%	8.1%	8.2%
11 月	7.8%	7.2%	7.5%	7.6%	7.0%	7.7%	6.9%	7.0%
12 月	8.0%	7.1%	7.7%	7.9%	6.8%	8.1%	7.2%	6.9%
佔系統(度)	1.5%	3.0%	0.8%	2.9%	1.9%	1.1%	0.1%	1.7%
戶	15,674	55,655	10,510	175,430	45,570	36,669	3,172	48,929
氣溫 rsq	0.76	0.90	0.88	0.86	0.93	0.73	0.009	0.004

五、較大規模學校的空調負載較多

一般人認為學校在夏季 7、8 月暑假中應該沒有用電，參與計減或臨減 DR 措施是屬於搭便車的類群。上述的“假設”想法，較適用於小規模的學校，對經常契約大於 500kw 的較大規模的學校月用電，於 7、8 月用電需求仍然高於非夏月(表 18)。

表 18　高壓以上未參加誘因 DR 用戶各月用電

102 年	經常契約大於 500kw			經常契約小於 500kw		
	2TOU	3TOU	學校	2TOU	3TOU	學校
1 月	8.1%	8.5%	7.1%	8.6%	8.0%	7.4%
2 月	5.6%	6.5%	4.6%	6.1%	5.5%	4.8%
3 月	7.8%	7.9%	7.3%	7.7%	7.7%	7.6%
4 月	7.9%	8.3%	7.6%	8.1%	7.8%	7.9%
5 月	9.0%	8.8%	10.3%	8.9%	9.0%	10.2%
6 月	9.7%	9.3%	11.8%	9.7%	9.9%	11.5%
7 月	9.4%	8.9%	9.0%	9.3%	9.6%	7.8%
8 月	9.3%	8.9%	8.7%	9.2%	9.5%	7.9%
9 月	8.7%	8.4%	9.7%	8.5%	8.7%	10.1%
10 月	8.7%	8.5%	9.2%	8.4%	8.7%	9.2%
11 月	8.0%	8.0%	7.7%	7.8%	7.9%	7.9%
12 月	7.8%	8.0%	7.1%	7.7%	7.7%	7.7%
佔系統	8.88%	35.27%	0.68%	5.23%	4.00%	0.15%
戶	4,648	3,487	290	13,130	1,921	552
氣溫 rsq	0.64	0.51	0.61	0.63	0.69	0.37

低壓用戶排除 AC DR 用戶，按經常契約容量大小進行分類分析，低壓用戶小容量用戶較集中在夏月用電，惟學校用戶規模愈小暑期用電愈少(表 19)。

表 19 低壓未參與誘因 DR 低壓用戶用電規模與 TOU 別

102 年	經常契約大於 100kw			經常契約小於 100kw		
	2TOU	無 TOU	學校	2TOU	無 TOU	學校
1 月	6.5%	5.9%	5.6%	6.5%	6.3%	6.3%
2 月	7.1%	6.8%	6.1%	7.1%	7.0%	6.8%
3 月	7.1%	6.9%	7.3%	6.9%	6.9%	7.8%
4 月	8.4%	8.4%	9.1%	8.2%	8.2%	9.3%
5 月	8.5%	8.5%	10.2%	8.7%	8.8%	9.5%
6 月	10.0%	10.5%	10.8%	10.4%	10.4%	9.7%
7 月	9.7%	10.0%	7.2%	10.2%	10.3%	6.9%
8 月	9.8%	9.9%	8.3%	10.2%	10.3%	7.8%
9 月	9.0%	8.9%	10.4%	9.2%	9.3%	9.7%
10 月	8.7%	8.5%	9.3%	8.4%	8.5%	9.3%
11 月	7.6%	7.8%	7.7%	7.1%	7.1%	8.3%
12 月	7.6%	8.0%	7.9%	7.1%	7.1%	8.6%
佔系統	2.5%	0.01%	0.04%	0.9%	0.3%	0.02%
戶	9,862	84	246	71,977	257,585	372
氣溫 rsq	0.87	0.81	0.30	0.94	0.94	0.09

學校用戶高壓及低壓供用電比較(表 18 與表 19)，低壓供電的學校用戶夏月的暑假期間，用電明顯較少。以此推論，大規模(經常契約大於 500kw)的學校用戶是空調 DR 的潛力目標族群。

肆、結論與建議

每月用電及每小時氣溫資料，經整理、統計及區隔分析，可提供 DR 方案豐富的判斷資訊。

以 102 年 8 月 NBS 開票資料，高壓、低壓、及表燈對系統的有效用電度數(kwh)貢獻度分別為 57.5%、11.5%、及 30.9%。台電新計費開票系統(NBS)表燈用戶(每 2 個月抄表一次)，受制於電腦設備與分析軟體，本文只蒐集高壓及低壓 NBS 用戶詳細資料，對系統的詮釋力達 70%。

表燈用戶用電的計算，以系統總量扣除低壓、及高壓後的用電度數推估值，表燈用戶的用電行為分析，需另行大規模收集、整合歸類後，才能進行較有意義分析。

102 年誘因 DR 方案特性屬計劃性，執行期間固定且多數用戶已連續多年甚少改變。選用用戶未參與前的合理基準負載不易取得，以同類型負載做基準，較切符現實。本文以月資料尺度衡量有效用電總度數變化、及氣溫負載相關係數，是可以找出不同類型用戶用電的變化。

一、台灣各類用戶用電受氣溫影響顯著

(一) 「每月用電度數」溫度相關係數，屬中小型用電規模的低壓用戶氣溫負載相關系數最高，次為高壓。高壓以上排除已參加誘因 DR 的「生產性」或「非生產性」的用戶，各類空調負載需求更明顯，其中「非生產性「及「住宅其他」對夏月用電需求尤其顯著，呈現用電愈少者夏月用電愈集中。

(二) 大用戶參與誘因 DR 群，氣溫與用電呈高度負相關，負載管理執行成效佳、且全年用電型態固定。

(三) 整理資料過程中，NBS 用戶屬性欄位，尤其與每月電費計費開票無關的資料內容，缺乏

維護機制，無法提供有效區隔空調用戶用電行為分析、瞭解、空調 DR 措施設計、措施成效評估的使用。台電各類電價適用範圍按用戶用電場所性質及用電器具而定。用電場所分為住宅、生產性質場所、及非生產性質場所。惟現行相關資料庫沒有明確欄位供辨識運用。

二、月資料尺度評估 AC DR 結果，儲冷離峰優惠措施、及空調週期性暫停用電措施，大多數參與用戶抑減用電度數執行成效不佳，就減少能量目標而言，現行方案應予修改。AC DR 方案的主要目標在減少尖峰時段的用電容量以減少供電設備的投資及系統限電的發生，資料尺度的限制，以月資料尺度無法量測一天內尖離峰時段或每小時的用電變化，是本文應用的限制。

三、運用大數據技術，跨系統整合業務、調度、會計、及氣象資料

資料需儲存得下、能夠及時看得到、讓人看得懂、最重要的要能夠用得出來的，才能形成為智慧。本公司擁有 1 千多萬戶的用戶，各單位已經蒐集建置大量的供電、及用戶數據資料及資料庫，若能夠經適當的整理、整合及運用，將可以開發資料的價值。

四、現有用戶結構化資料庫的欄位管理機制建立

(一) 現有 NBS 用戶屬性的某些欄位，與每月電費計費開票無關者，缺乏維護機制，資料欄位多空置或不正確，無法提供以有效區隔用戶用電行為分析、瞭解、空調 DR 措施設計、措施成效評估的使用。

(二) 為因應未來供電備轉容量偏低趨勢，需求面管理方案必需經濟有效地替代供給缺口，建議檢討改善現有用戶相關結構化資料庫(AMI、NBS、DR 參與內容)欄位的管理機制，並檢討公司 DR 相關單位的關鍵指標一致性，以管理用戶端需量反應資源。

五、積極推廣現行誘因 DR，減少夏季尖峰負載高壓以上參與各式誘因需量反應(含空調需量反應)的戶數參與率低，只佔全高壓的 5.5%，扣除空調需量反應措施後參與率只佔全高壓的 4.9%，顯示仍有推廣的潛力。預期近年電力系統備用容量低，建議用戶資料與供電成本整合分析，並進行及檢討未來電力系統每小時預測，設計符合供需情境的DR，並積極推廣具有成效的誘因式 DR(除 AC DR)方案，以舒解供電壓力。

伍、參考文獻

[1] 林素真、張文奇，「空調冷氣需量反應措施之研究」，台電公司，4840-0302，民國 104 年。

[2] 台灣電力公司電價表，http://www.taipower.com.tw/index.aspx.

[3] 許永明等，「中央空調系統尖峰時間暫停用電可行性研究」，台電公司，民國 80 年。

[4] 楊正光、蔡芳燦等，「中央空調暫停用電實施效益評估」，台電公司，民國 82 年。

[5] 蔡芳燦等，「儲冷式中央空調系統效益評估」，台電公司，民國 81 年。

開放圖台應用於配電圖資地理空間資料網路服務研究

A Study of the Application of an Open Mapping Platform in Distribution Mapping Information for Providing Geospatial Data Network Services

蔡森洲* Tsai, Sen-Chou
荊玫** King, Mei
林佩敏** Lin, Pei-Ming
張文奇* Jhang,Wun-Ci
高國峰*** Kao, Kuo-Feng
張世勳*** Chang, Shyh-Shyum
黃智穎*** Huang, Chi-Ying
高洪維*** Kao, Hung-Wei
葉原宏*** Yeh, Yuan-Hung

(104 年度研究計畫論文)

摘　要

台灣電力公司電腦圖資發展已逾十年，早期系統規劃採商業用的電腦輔助繪圖(CAD)平台及商業用資料庫，以 Client-Server 方式建構，硬體部署則分散於各區營業處，並以配電圖資管理系統(DMMS)同一系列的繪圖軟體平台，發展多項配電圖資應用軟體，但由於近年來開放標準架構之地理資訊系統(GIS)應用蓬勃發展，開放原始碼(Open Source)的 GIS 圖台已日益茁壯並趨成熟，在考量不同的地理圖資平台(例如內政部國土資訊系統)亦要求以開放標準格式進行資料交換，因此考量 DMMS 未來地擴充性及延展性。

本案目標包括分析評估現有開放式標準圖台於台電配電圖資的相容性及延展性、以開放式標準介面建構台電地理圖資系統之單機與網頁繪圖平台、台電配電地理圖資行動應用圖台軟體開發。

Abstract

Taiwan Power Company has been developing the computer graphics system for over a decade. In the early days, the management system was establish, adopting a structure of Client-Server, commercial computer-aided-designed-software (CAD) platform, and commercial database system, while the system hardware was deployed at each of Taipower's district branches using DMMS CAD platform to develop sequential distribution map software. In recent years, open standards of geographic information systems (GIS) applications have been flourishing. Open sources of GIS and database are increasingly becoming popular and mature. Different geographic information platforms (such as National Geographic Information System) are also required to meet the open standard format for exchanging data, making it necessary to consider the scalability and extensibility of DMMS.

The objective of this research is to analyze and evaluate the compatibility and

*台灣電力公司綜合研究所
**台灣電力公司配售電事業部配電處
***極簡科技股份有限公司

extensibility of open source GIS platform to be applied in Taipower distribution map application on PC, web and mobile environment.

關鍵詞(Key Words)：電腦輔助設計(Computer Aided Designed, CAD)、地理資訊系統(Geographic Information Systems, GIS)、配電圖資管理系統(Distribution Mapping Management System, DMMS)、開放原始碼(Open Source)、國土資訊系統(National Geographic Information System, NGIS)。

壹、前言

近年來網路環境的快速變遷，設備虛擬化技術、開放標準架構之地理資訊系統(GIS)應用蓬勃發展，各項應用軟體功能趨向網頁化及行動化發展，為能將地理圖資資訊於網頁上顯示，並與不同地理圖資平台(例如內政部國土資訊系統)完成資料交換，皆必須以開放標準介面建構地理圖資系統；另外，現今各家開放原始碼 GIS 圖台已日益茁壯並趨成熟，研究評估適用於業務單位之繪圖平台，加以客製化符合應用系統需求，發展台電公司業務單位相關圖資應用系統專用之繪圖平台，可降低商業用平台採購成本。

本案主要目標是分析台電公司業務單位所使用之繪圖平台與相關應用需求，測試、挑選出較合適之開放原始碼圖台，研究如何利用開放原始碼圖台架構，開發業務單位專用之網頁圖台、單機圖台及行動應用軟體，提出相關建議方案。

貳、研究計畫執行

一、系統建置規劃

根據本案系統整體規劃架構如圖 1 所示，單機標準繪圖平台與網頁標準繪圖平台所需圖形資料及屬性資料，分別由關聯式資料庫(Oracle)及空間資料庫(PostGIS)所提供。其中單機標準繪圖平台由空間資料庫取得圖形資料提供地圖顯示;網頁標準繪圖平台及配電地理圖資行動應用軟體，由網頁標準繪圖平台取得圖形資料及屬性資料透過網頁方式提供地圖顯示及設備查詢。

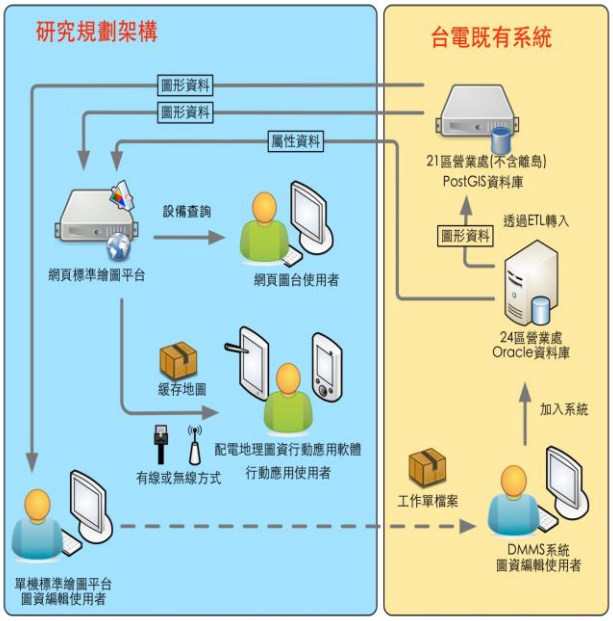


圖 1　系統整體規劃架構圖

二、系統使用人員角色

對於此三種圖台所設定的使用者角色說明如下：

(一) 網頁標準繪圖平台：

此網頁平台使用對象設定為區處一般使用者。提供目前台電圖資基本查詢之用，透過網頁方式可大幅降低目前在各區營業處單機平台的安裝，並可減少區處資訊人員系統安裝工作。

(二) 單機標準繪圖平台：

單機繪圖平台使用對象為區處圖資編輯人員。針對圖資編輯提供設備維護工具，進行日常之設備圖資異動維護及資料更新。

(三) 配電地理圖資行動應用軟體：

行動應用軟體使用對象為現場人員。系統規劃以圖資下載功能，目前網頁上之台電圖資透過緩存地圖的方式存放至行動裝置上，以供現場人員離線覽圖使用。

三、分析整合業務單位地理圖資需求

台電配電運轉系統由於涵蓋範圍廣泛，總饋線數超過 8,500 條，饋線長度超過 32 萬公里，配電變壓器超過 120 萬具，其用戶數更高達 1,200 萬戶以上，並隨著逐年負載成長而必須加以擴充以維持用戶穩定供電。如何有效管理此數量龐大之配電設備極為困難，因此台電公司於各區營業處建置配電圖資管理系統(DMMS)，從變電所之主變壓器、饋線主幹線及分歧線、高壓用戶、配電變壓器及低壓用戶等設備皆納入圖資電腦化管理，並能隨工程之推動與系統運轉作業更新相關圖資，以有效達到設備管理需求，亦可作為基礎圖資支援其他相關應用功能。

本案依據台電公司業務單位需求開發專用標準之繪圖平台，以作為基礎圖台之相關應用功能開發。以下針對硬體規格及部署建議方案、選用開放原始碼 GIS 圖台、自由軟體選用之評估方法做說明。本節提出規劃設備及功能模組部署方式，包含資料庫伺服器、網頁平台伺服器、單機平台主機、行動應用平台設備。

(一) 資料庫伺服器：

架設本案伺服器，提供基礎設施即服務(IaaS)解決方案，其設備部署方式架構如圖 2 所示：

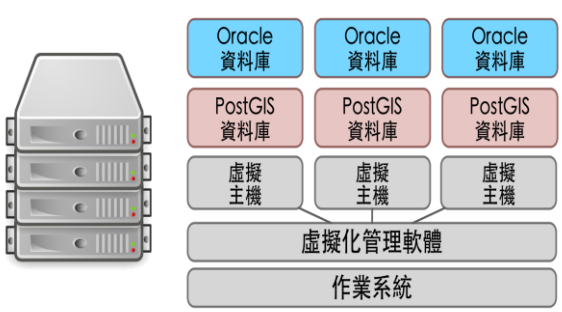


圖 2　圖資雲部署架構

1. 作業系統：

實體主機運作所安裝之作業系統。

2. 虛擬化管理軟體：

虛擬化管理軟體 (Kernal-based Virtual Machine, KVM)是適用於 Linux 架構下虛擬化擴展的解決方案，另外在 Windows 作業系統下也有 VisualBox、Virtual PC、VMware 等軟體達到虛擬化主機管理，使用 KVM 架構可以架設多台虛擬主機，並可分別設定各虛擬主機之硬體，如網路卡、硬碟、光碟機等，以充分利用伺服器運作效能。

3. 虛擬主機：

虛擬主機(Virtual Machine, VM)，主要是建立一種虛擬環境架設如同實體主機之環境，使虛擬機器可以像真實機器一樣執行程式的電腦的軟體實作。

4. 資料庫：

於虛擬主機上進行資料庫伺服器架設，透過多台虛擬主機環境以模擬多主機使用情形。

(二) 網頁平台伺服器：

規劃網頁伺服器上架設所選用之網頁標準繪圖平台，提供 WFS/WMS/WCS/WPS/KML 等服務，達成與其他平台資料分享及交換之共通性，網頁平台伺服器部署架構如圖 3 所示。

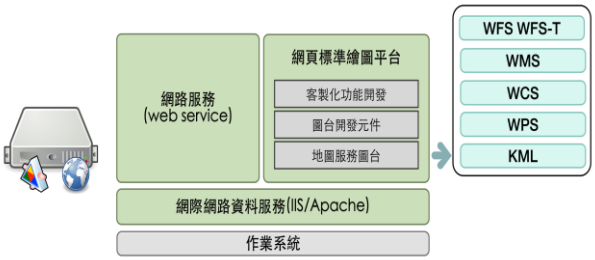


圖 3　網頁平台伺服器部署架構

針對網頁平台伺服器部署架構分為以下幾點說明：

1. 作業系統：

依據規劃圖台所支援平台進行部署架設工作，分別安裝於 Linux 及 Windows 平台進行測試作業。

2. 網際網路資料服務(IIS/Apache)：

依所測試作業系統環境架設網際網路資料服務(如 IIS、Apache)。

3. 網路服務(web service)：

提供資料更新與查詢之相關服務，透過網路服務進行圖台與資料庫間溝通。

4. 網頁標準繪圖平台：

針對網頁繪圖平台可分為三大部分，包含地圖服務圖台、圖台開發元件及客製化功能開發。

5. 地圖服務圖台：

目前地圖服務圖台，有商用圖台及開放式圖台，本案規劃選用開放式圖台，作為台電圖資平台的開發基礎。

6. 圖台開發元件：

對於台電配電圖資查詢系統的開發，利用地圖服務圖台所支援的 WMS，連接傳統的關聯式資料庫使用大量的地理資料與設備設施資料轉換為地圖/圖片(maps/images)的資料格式，以獲得圖資查詢的統一性、簡單性、相容性。網頁用戶端的開發元件如表 1 所示，其選用首先考量其授權方式為免費的有，WMS-Map、Openlayers、QuickWMS、CivicMaps Tile Engine，其中 OpenLayer 支援比其他三項多支援 WFS 格式，優先採用作為開發元件[1]。

7. 客製化功能開發：

依台電公司圖資需求，客製化所需網頁配電圖資平台基礎功能。

表 1　圖台開發元件支援表

名稱	語言	WMS	WFS	GeoRSS	授權方式(是否付費)
ArcGIS Server APIs	JavaScript, Flex, Silverlight, .NET, Java	是	否	是	是
WMS-Map	JavaScript	是	否	否	否
OpenLayers	JavaScript	是	是	是	否
QuickWMS	JavaScript	是	否	是	否
CivicMaps Tile Engine	JavaScript	是	否	否	否
SpatialFX	Java and JavaScript	是	否	是	是
SpatialRules	Java	否	否	是	是

資料來源：維基百科

(三) 單機平台主機：

單機平台主機上部署圖資編輯工具，透過 WebService 與網頁標準繪圖平台所提供之 WMS 與 WFS-T 溝通，於單機標準繪圖平台上呈現圖資，透過客製化功能開發，以達到本案所需之編輯功能。單機平台主機部署架構如圖 4 所示。

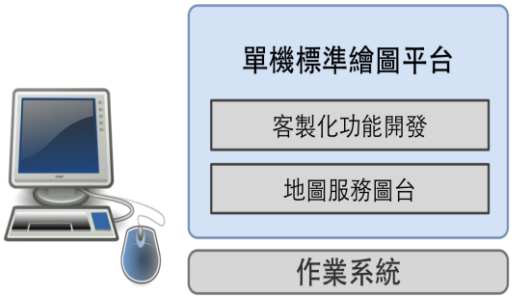


圖 4　單機平台主機部署架構

針對單機平台主機部署架構分為以下幾點說明：

1. 作業系統：

依據選用圖台進行部署架設工作，安裝於一般人員較習慣之 Windows 平台。

2. 單機標準繪圖平台：

針對單機繪圖平台可分為兩部分，包含地圖服務圖台及客製化功能開發。

3. 地圖服務圖台：

目前地圖服務圖台，有商用圖台及開放式圖台，本案規劃選用開放式圖台，作為台電圖資平台的開發基礎。

4. 客製化功能開發：

依台電公司圖資需求，客製化所需單機配電圖資平台基礎功能。

(四) 行動應用平台設備：

隨著持有智慧型手持行動裝置的人們愈來愈多，促使個人與企業都積極思考，如何利用行動裝置來提升競爭力與生產力，因此導入平板或智慧型手機，為個人或企業跨入行動化辦公時代，已是必然之趨勢。表 2 為手持裝置系統市佔率分析表。行動設備上規劃透過 WebService 與網頁標準繪圖平台所提供之 WMS 服務，讀取所需資料進行緩存地圖，並提供資料輸入等基本功能，行動應用平台部署架構如圖 5 所示[2]。

表 2　手持裝置系統市佔率分析表

智慧型手持裝置作業系統	台灣	全球
Android	54.3%	56.1%
Apple iOS	25.2%	22.9%
Symbian	2.4%	8.6%
Windows Mobile(Microsoft)	9.2%	1.9%
Research In Motion (BlackBerry)	0.3%	6.9%
其他	1.1%	3.6%

資料來源：資策會 FIND、Gartner
資料整理：資策會 FIND(2012/8)

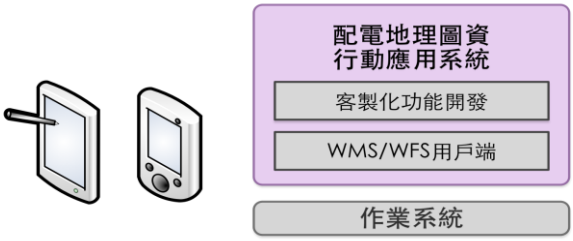


圖 5　行動應用平台部署架構

1. 作業系統：

依據表 1 伺服器端地圖服務圖台支援格式表所示，建議由目前在台灣較多人使用的三種平台(Android、iOS、Windows Mobile)中選用，以進行系統開發及設備購置。

2. 配電地理圖資行動應用系統：

由於行動裝置所使用之作業系統與系統開發語言息息相關，其開發語言說明如表 3 所示。手持裝置作業系統與開發工具一覽表如表 3 所示。

表 3　手持裝置作業系統與開發工具一覽表

作業系統	開發工具	開發語言	是否開放原始碼
Android	Eclipse	Java	是
Apple iOS	Xcode	Object C	否
WindowsMobile (Microsoft)	Visual Studio	.NET	否

3. WMS/WFS 用戶端：

開發架設 WMS/WFS 用戶端程式，用以接收網頁標準繪圖平台所提供之圖資。

4. 客製化功能開發：

依台電公司圖資需求，客製化所需行動運用配電圖資平台基礎功能。

參、研究計畫現況分析

一、台電圖資系統及使用情形分析

台電公司發展電腦圖資應用系統已逾十

年,在配電圖資管理上已建立標準主題圖(含高低壓管路圖、高壓管路圖、低壓管路圖、11.4KV 高壓線路圖、11.4KV 高壓架空線路圖、11.4KV 高壓地下線路圖、22.8KV 高壓線路圖、22.8KV 高壓架空線路圖、22.8KV 高壓地下線路圖、低壓線路圖、低壓架空線路圖、低壓地下線路圖、高低壓架空線路圖、配電系統圖(OMS)、路燈系統圖、路燈台帳系統圖、光纜系統圖等),並開發相關應用軟體,建立一套可供配電系統運轉、調度及相關部門人員使用之停限電運轉圖資系統(OMS),利用並整合網路環境運轉資料及配電室(場)卡等相關資料,提供系統使用者藉由通訊網路在電腦上作圖資查詢、圖資編輯、圖資運轉操作、事故停電管理、工作停電管理、限電作業管理等作業功能,以達到資料分散處理及資源共享之目的,並提高用戶服務品質。已開發的配電圖資應用軟體架構說明如下圖 6 及圖 7 所示。

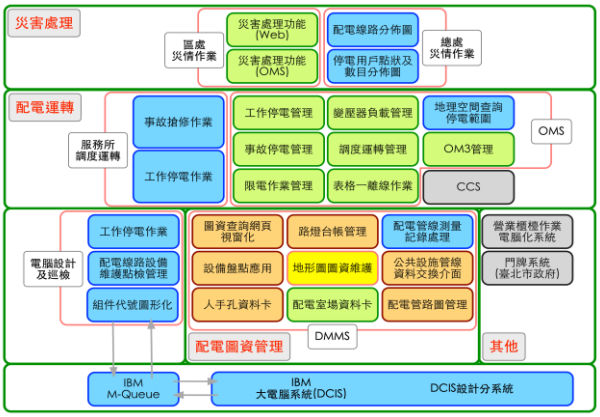


圖 6　DMMS 應用系統功能分類

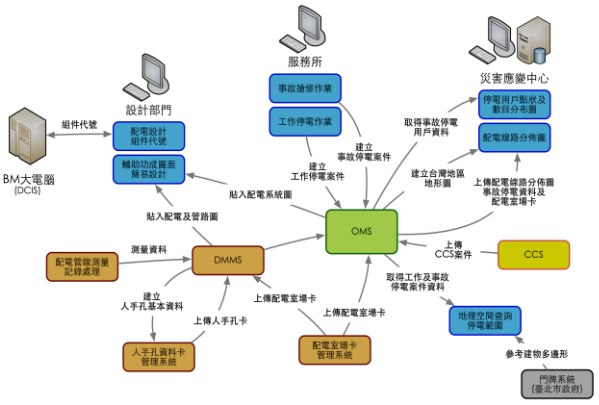
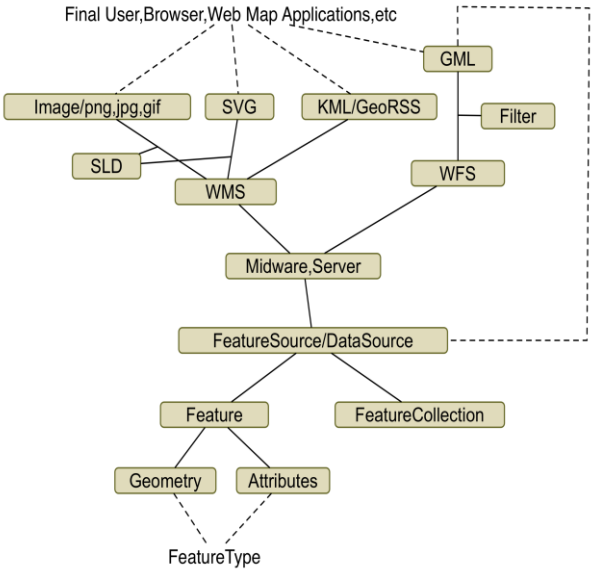


圖 7　既有應用系統及資料流關聯圖

二、開放式地理資訊系統協會相關標準發展現況

開放式地理資訊系統協會(Open GIS Consortium, OGC)是於 1994 年由軟體廠商、政府機關和民間機構所共同成立的,OGC 提供軟體和資料供應廠商一個可共享的架構,以促成共通性地理空間資料及系統的發展,這些年來,OGC 最主要的成就,就是致力於標準化的活動,且正與其他標準如 ISO/TC211 , CEN TC/287 , GeoConnections , ISO/IECJTC1 SC32 合作,同時 OGC 和 ISO/TC211 對於標準的一致性、軟體系統元件間之開放及介面共同制定規格。

其成立的宗旨是希望每個人都能從任何一個網路、應用程式或電腦平台中,方便地獲得地理資訊和服務所帶來的好處,藉由共同的介面規格讓資料供應者、應用系統開發者和資訊整合者,能在短時間內花最少的費用,透過此介面讓使用者容易取用資料及使用系統功能,目前 OGC 在地理空間方面提供的標準,可支援的領域與技術包括農業、電信、災害管理、運輸,及影像座標轉換、地勢分析、位相關係、區位服務、路網分析等。圖 8 為 OpenGIS 架構是 OGC 所建議的開放式系統架構[3][4][5][6] 。

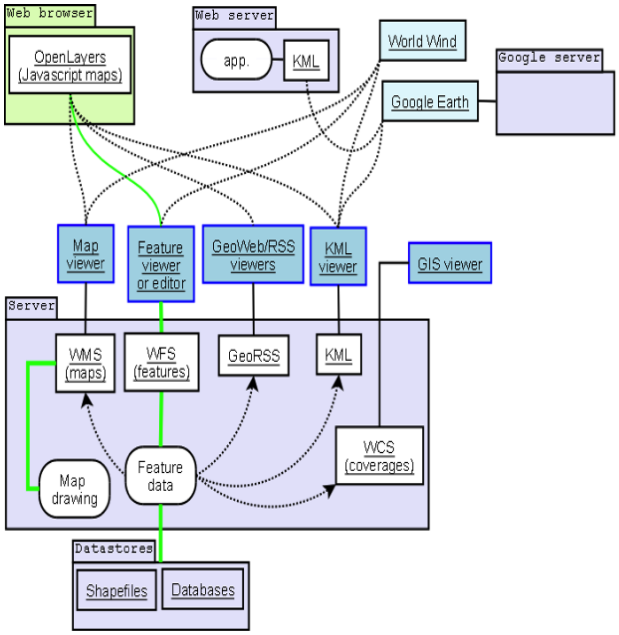


資料來源：開放式地理資訊系統協會(OGC)

圖 8　OpenGIS 架構

三、開放式網頁圖資服務架構

近年來網路服務已成為地理資訊系統重要的發展趨勢，為建構一個有效率、無隔閡的空間資訊標準，OGC 已積極投入開放介面標準規範的制訂工作，透過共通的技術基礎，供大眾使用、分析及處理的開放架構，達成異質地理資料流通共享之主要目標。OGC 所制訂的相關標準於伺服器與客戶端之應用關係如圖 9 所示。



圖片來源 https://en.wikipedia.org/wiki/Open_Geospatial_Consortium

圖 9　開放式地理資訊系統架構圖

肆、圖台評估與選用

一、選用開放原始碼 GIS 圖台之評估方法

市面上常見的開放圖台如表 4、表 5 所示，藉此選出幾項圖台進行後續選用評估作業，其中免授權費用的有 MapServer、Deergee、GeoServer、Basic-wms2.py 等 4 項，但 Basic-wms2.py 因支援格式較少故予以排除，另外 Deergee、GeoServer 同樣為 Java 語言開發架構，故選用較多支援格式的 GeoServer 以及 C 語言開發架構的 MapServer 進行後續比較測試[1]。

表 4　伺服器端地圖服務圖台支援格式表(1)

名稱	語言	WMS	WFS	WFS-T
Spatial Fusion Server	Java/C++	是	是	否
ERDAS APOLLO	Java/C++	是	是	是
ArcGIS Server	.NET/Java	是	是	是
MapServer	C	是	是	是
Deegree	Java	是	是	是
GeoServer	Java	是	是	是
Basic-wms2.py	Python	是	否	否
Manifold System	ASP C#	是	是	否
MapLarge API	C#	是	是	否
SpatialFX	Java	是	否	否

資料來源：維基百科

表 5　伺服器端地圖服務圖台支援格式表(2)

名稱	WCS	WMC	WPS	KML	授權方式(是否付費)
Spatial Fusion Server	否	否	否	是	是
ERDAS APOLLO	是	是	是	是	是
ArcGIS Server	是	否	是	是	是
MapServer	是	是	否	是	否
Deegree	是	否	是	是	否
GeoServer	是	是	是	是	否
Basic-wms2.py	否	否	否	否	否
Manifold System	否	否	否	是	是
MapLarge API	否	否	否	是	是
SpatialFX	否	否	否	是	是

資料來源：維基百科

市面上常見的開放圖台如表 6、表 7 所示，本案選用之圖台最重要的考量點為開發社群的支援性與是否持續發佈更新(若無人持續性的支援該圖台常會無疾而終)；選用圖台時從開發語言分類大致可分為 Java、C++、.Net 等 3 類，其中 Java 類別有提供支援圖資編輯的有 OpenJUMP GIS、Kosmo、uDig、gvSIG 等 4 項，因 uDig 支援性較多，故選擇 uDig 作為測試項目；在 C++ 類別中大多著重在圖形資料分析使用，僅 QGIS 有提供支援圖資編輯，故選擇為測試項目，.Net 類別的 MapWindows GIS 雖然俱有支援圖資編輯，但開發社群支援性較少故予以排除[1]。

表 6　用戶端地圖服務圖台一覽表(1)

名稱	語言	Linux	Mac	Windows
Geopublisher	Java	是	是	是
SAGA	C++	是	否	是
OpenJUMP GIS	Java	是	是	是
Kosmo	Java	是	否	是
uDig	Java	是	是	是
gvSIG	Java	是	是	是
OSSIM	C++	是	是	是
Marble	C++	是	是	是
GRASS	C/C++	是	是	是
Quantum GIS (QGIS)	C/C++	是	是	是
MapWindow GIS	.Net	否	否	是

資料來源：維基百科

表 7　用戶端地圖服務圖台一覽表(2)

名稱	授權方式 (是否付費)	支援圖資編輯	開發社群支援性
Geopublisher	否	無	較少
SAGA	否	無	較少
OpenJUMP GIS	否	有	一般
Kosmo	否	有	一般
uDig	否	有	較多
gvSIG	否	有	一般
OSSIM	否	無	較少
Marble	否	無	較多
GRASS	否	無	較多
Quantum GIS (QGIS)	否	有	較多
MapWindow GIS	.Net	否	否

資料來源：維基百科

本案從目前眾多 OpenSource 圖台中分別於網頁與單機各選 2 項較多人使用之圖台進行分析作業，分別安裝架設後進行評估，其評估的方式採用定性與定量方式進行，以選出何者為較適合台電公司應用於業務單位，其評估流程及說明如圖 10 所示：

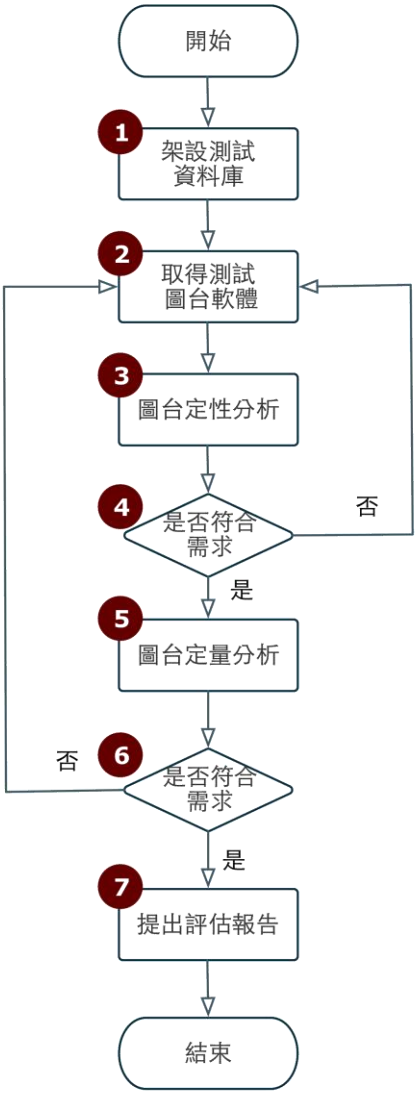


圖 10　圖台評估流程圖

二、圖台定性分析方式

為持續提供台電配電圖資發展之需要，因此必須審慎評估、選用自由軟體圖台的特性是否符合台電之需求，本案圖台特性的評估方式包括台電既有圖資功能的支援性、未來持續發展的支援性及技術移轉的便利性，說明如下:

(一) 台電圖資既有系統功能的支援性：

圖台選用過程中，應先分析台電既有系統圖台所需功能，進而確認圖台是否具備各項繪製功能。

(二) 自由軟體維護的持續性與未來性：

自由軟體有最令人擔憂的問題，就是

計畫無人持續進行功能開發擴充而告終結。因此對於本案所使用的自由軟體圖台，必需先了解是否有持續性的維護與未來性。

(三) 技術轉移的便利性：

在技術移轉上首先須瞭解所選用圖台，使用的開發語言與開發架構，應考量較多人使用的開發工具與技能，以免增加開發過程學習難度，以及未來當需要功能擴充時，開發人員不容易訓練。

三、圖台定量分析方式

圖台定量分析方式是以北南區處較密集之處(板橋火車站附近)各取 16 個圖幅作為資料測試之基礎，預計以 1/600、1/3600、1/1200 與 1/6000 等資料範圍進行測試。為求測試數據的客觀性，每個測試腳本反複測試 10 次取得平均值呈現於圖表上，經由測試過程發現其圖台特性與相關問題，並提供既有 DMMS 下載速度作為比對依據，測試流程如圖 11 所示。

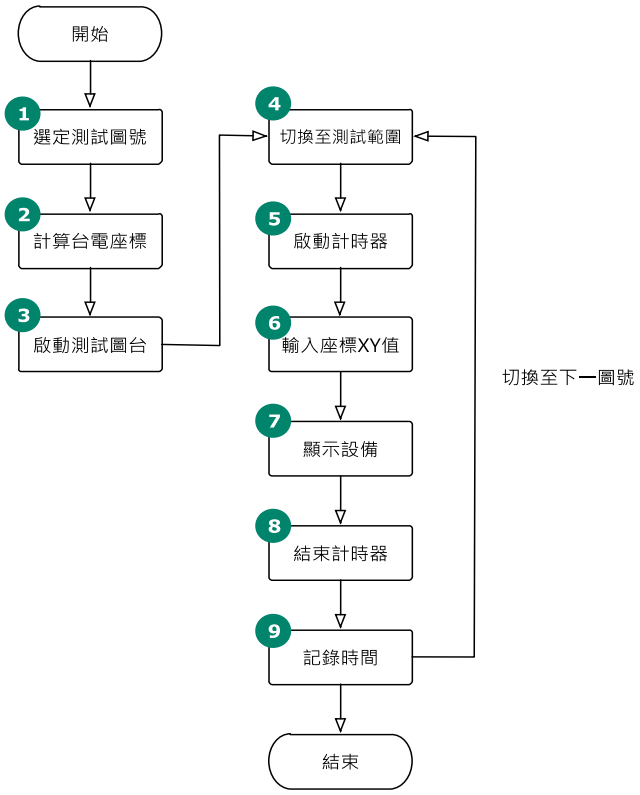


圖 11　定量測試流程圖

(一) 選定測試圖號：

以板橋火車站附近選取 16 個圖幅作為本次測試範圍。

(二) 計算台電座標：

透過計算程式計算出各圖號之四角及中心 XY 值。

(三) 啟動測試圖台：

開啟需測試圖台。

(四) 切換至測試範圍：

依據測試腳本切換至測試範圍 1/600、1/1200、1/3600、1/6000 等比例尺。

(五) 啟動計時器：

點選啟動計時。

(六) 輸入座標 XY 值：

輸入計算後的 XY 值，切換至測試點。

(七) 顯示設備：

確認圖台已顯示完成圖資。

(八) 結束計時器：

點選結束計時。

(九) 記錄時間：

填寫測試時間。

四、定性分析結果

根據定性分析方式，進行分析圖台系統功能，自由軟體維護更新頻率、開發語言與後續移轉的便利性，說明如下：

(一) 台電圖資既有系統功能的支援性：

台電公司既有系統有關單機圖台功能有 DMMS、DCAD 等資訊系統；有關網頁圖台功能有 GeoDMMS，若考量未來將 DMMS、DCAD 及 GeoDMMS 移植至本案開發之圖台，本案圖台必須能夠支援 DMMS、DCAD、GeoDMMS，有關圖台功能說明如下：

1. 配電圖資管理系統(DMMS)：

系統功能主要是將各設備圖層及屬性資料項目與內容、圖形符號、文字註記、大小、定義、樣式、配置方式等作

為繪製規則，以供數化人員繪製作業之軟體工具，雖然 DMMS 系統功能多達 243 項，但其中有部分是用來查詢或修正資料庫之功能與圖台並無相關，有關圖台功能可分為配置、圖層顯示、圖元及視窗資訊等四類。配置功能方面有配置文字、配置設備圖例、配置線段及標示電流方向；圖層顯示功能有清除圖層資料、新增圖層資料及圖層管控；圖元功能有選取設備、標示設備與取得圖面圍籬；視窗資訊功能有取得視窗範圍、取得圖面座標及列印等，因此，經整理分析後對於單機圖台上使用到圖台功能僅 13 項功能。

2. 配電工程輔助設計系統(DCAD)：

主要是應用於配電設計方面，利用既有配電圖資管理系統(DMMS)所繪製的電氣設備與管路設備，結合配電設計所需之組件代號與組件庫存資訊，提供輔助工程圖面設計規劃整合功能，以整合電力系統的配電設計圖、施工竣工圖、圖資維護及工作管理等電腦化作業流程之應用功能，並建立小型化之離線配電設計系統，雖然 DCAD 系統功能多達 148 項，其中有關圖台功能可分為配置、圖層顯示、圖元及視窗資訊等四類。配置功能方面有配置文字、修改文字、配置線段、配置圓形、配置設備圖例、配置矩形、配置多邊形、清除設備圖例、清除多邊形、標示電流方向及移動設備圖例；圖層顯示方面有新增圖層資料、圖層控制、新增圖層資料、刪除參考圖資、新增參考圖資、清除圖層資料；圖元功能有選取設備、標示設備；視窗資訊功能有列印、顯示視景範圍、取得圖面圍籬、取得圖面座標、取得視窗範圍，因此，經整理分析後對於單機圖台上使用到圖台功能僅 27 項功能。

3. 地理配電圖資管理系統(GeoDMMS)：

由於台電公司的配電圖資應用需求廣泛，除原 OMS 及 DMMS 應用系統外，更大量的需求為配電圖資查詢，為考量降低使用者應用軟體之授權費用，因此對於台電配電圖資查詢系統的開發，採用 WebGIS 的系統架構規劃，此架構是建構在 GeoServer 軟體架構上，將台電公司既有關聯式資料庫(Oracle)的圖形資料，轉入空間資料庫(PostGIS)，並利用 GeoServer 連接空間資料庫，將大量的地理資料與設備設施資料轉換為地圖/圖片(Maps/Images)的資料方式呈現，並提供標準主題圖資及設備屬性標示等功能，在 GeoDMMS 系統功能有 29 項，經整理分析後對於網頁圖台上使用到圖台功能僅 7 項功能。

4. 綜合說明：

整合上述 DMMS、DCAD 及 GeoDMMS 的圖台功能，且評估本案選用測試之網頁圖台(MapServer、GeoServer)和單機圖台(QGIS、uDig)圖台功能支援性，網頁圖台 MapServer 和 GeoServer 具備可開發 GeoDMMS 圖台功能，單機圖台 QGIS、uDig 具備可開發 DMMS、DCAD 圖台功能，因此本案選用測試之圖台皆符合需求。

(二) 自由軟體維護的持續性與未來性：

自由軟體在多人協同開發系統程式的過程中，每一個程式碼或文件都必須集中管理，以確保資料版本的完整與一致性，在軟體開發過程中，除了透過所支持組織的網站公佈相關訊息，其程式碼的管理通常透過開放式的託管主機，目前 GitHub 為最多專案數與使用者的專案託管地點，本案擬採用四項圖台軟體均有在 GitHub 上，因此透過更新頻率與參與者了解圖台軟體是否有持續維護與未來性。(查詢時間

至 2014 年 3 月 2 日止)[7][8]

1. MapServer 軟體維護狀態：

已有超過 10,000 次提送更新(Commit)、15 個分支(Branches)、140 次發佈版本(Releases)、42 個貢獻者(contributoes)。

2. GeoServer 軟體維護狀態：

已有 2,856 次提送更新、21 個分支、34 次發佈版本、80 個貢獻者。

3. QuantumGIS(QGIS)軟體維護狀態：

已有超過 10,000 次提送更新、40 個分支、31 次發佈版本、109 個貢獻者。

4. uDig 軟體維護狀態：

已有 2,993 次提送更新、17 個分支、14 次發佈版本、20 個貢獻者。

5. 綜合說明：

依據 GitHub 網站顯示，在網頁圖台方面，由於 MapServer 自 2000 年起就已經開始發展，相對於 GeoServer 則是於 2011 年起才開始發展，所以在軟體更新與版本發佈上 MapServer 較多，但由於 GeoServer 較晚起步，所以開發者較多，開發頻率也較活躍；在單機圖台方面，QGIS 不論在軟體更新、版本發佈與開發者都比 uDig 來的多，但此四項圖台仍各自有擁護的開發者，至今均已發展超過 3 年，仍持續發佈新版本中。

(三) 技術轉移的便利性：

對於開發及技術移轉來說，最主要是要先了解其開發語言，以及開發架構，使開發人員能快速進行開發工作，以下概述各圖台基礎架構，以利評估後續開發及技術移轉之便利性。

1. MapServer 開發架構簡介：

MapServer 基本上可透過兩種操作模組(CGI 和 MapScript)，進行軟體開發作業，Mapscript 可以透過開發程式語言(例如 C#、java、TCL、PHP 等)進行開發，另外，在 CGI 的環境下，Apache 透過瀏覽器傳遞給 MapServer，在 MapServer 產生供瀏覽器所需的地圖和網頁，在 CGI 環境下的主要需要先定義 Mapfile 和 HTML 的初始化文件，Mapfile 文件定義了地圖對象和對象的表現形式是地圖的配置文件[9][10]。

2. GeoServer 開發架構簡介：

建構 GeoServer 開發環境需要安裝 GeoServer、Java JDK、Tomcat，就像 Apache Web 服務器，提供了文件和 HTTP 服務，因此，允許標準的網頁開發技術進行開發(如 Javascript)，並透過空間資料庫來呈現空間資料的功能集合，並支援多種格式(如 KML，GML，GeoJSON)[11][12]。

3. QuantumGIS 開發架構簡介：

Quantum GIS 提供了嵌入的介面，讓程式開發人員將因應各項功能不足之處自行開發整合，在使用上功能更充足更符合需求。QGIS 的擴充功能(Plug-in)是使用 Python 所開發的，Python 是一套直譯式的程式語言，其通常用來做大量運算，而 QGIS 的 UI 部分是使用 Qt Design，設計所需的 UI 介面之後，利用 Python 程式將 Qt Design 所產生的 UI 檔案轉換為 Python 的程式檔案，即可用程式去呼叫該 UI 介面並實作操作功能的邏輯開發作業[13]。

4. uDig 開發架構簡介：

uDig 開發方式可利用一個 Java 集合開發環境(Eclipse)，由於 Eclipse 核心很小其它所有功能都以外掛程式的形式附加於 Eclipse 核心之上，Eclipse 基本核心包括：圖形 API(SWT/Jface)，Java 開發環境外掛程式(JDT)，外掛程式開發環境(PDE)等。Eclipse 本身具備資源管理和執行外部程式的功能，加上外掛程式的機制

(Plug-inDevelopmentEnvironment, PDE)，構成一個豐富的工作環境。當在開發 uDig 圖台時可透過 uDig SDK 建立一個開發環境，用以開發其套件(Plug in) [14]。

5. 綜合說明：

在平台選用的過程中，應考量避免使用較少人使用之開發工具，以避免後續維護上的困難，因此檢視所評估的圖台使用之開發語言，uDig 是使用 Java、QGIS 是使用 C/C++、MapServer 是使用 C、GeoServer 是使用 Java，都屬於較普遍之開發語言，若未來需自行擴充功能時，應較容易找到開發及維護的人力。

五、定量分析結果

本案進行 MapServer、GeoServer、QGIS 和 uDig 定量分析測試時，是採用當時最新的發布版本進行測試，測試版本分別為 MapServer 6.4、GeoServer 2.3、QGIS 2.2 和 uDig 1.4。

根據圖台定量分析方式，依測試範圍比例尺分別進行各圖台測試工作，其數據為 10 次測量平均值，測試案例為單一使用者連接測試資料庫所得之測試數據。

(一) uDig 1.4、QGIS 2.2 效能測試：

此項數據為透過 uDig 與 QGIS 連接 PostGIS 進行測試，且將台電現行地理圖資系統(DMMS)加入測試比較(DMMS 連接 Oracle 資料庫)，硬體測試環境為 32bit 作業系統的記憶體為 4GB、64bit 作業系統的記憶體為 8GB，軟體測試環境為 DMMS 32bit、uDig 32bit(軟體分配記憶體 1GB)、64bit(軟體分配記憶體 1GB 及 3GB)、QGIS 32bit(無法軟體分配記憶體)、QGIS 64bit(無法軟體分配記憶體)。依資料量大小使用對數刻度排列繪製圖形如圖 12 所示。

移除 DMMS 測試下載項目後繪製資料如圖 13 所示，uDig 圖台在範圍為 1/3600 及 1/6000 比例尺等較多資料顯示時，螢幕顯示圖元會有延遲顯示現象，紅色區塊為標示發生此情形之區段資料。

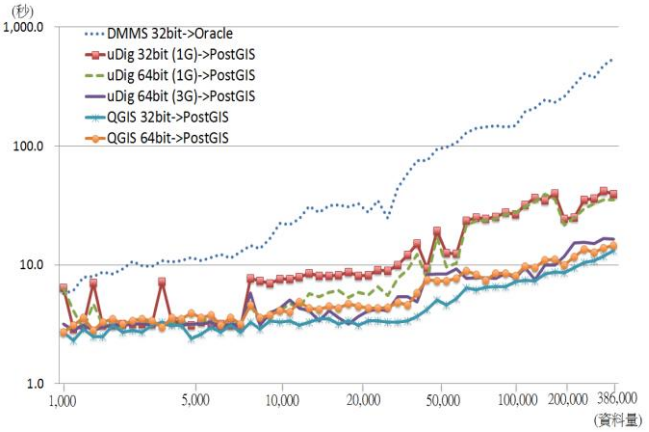


圖 12　測試數據圖(1)

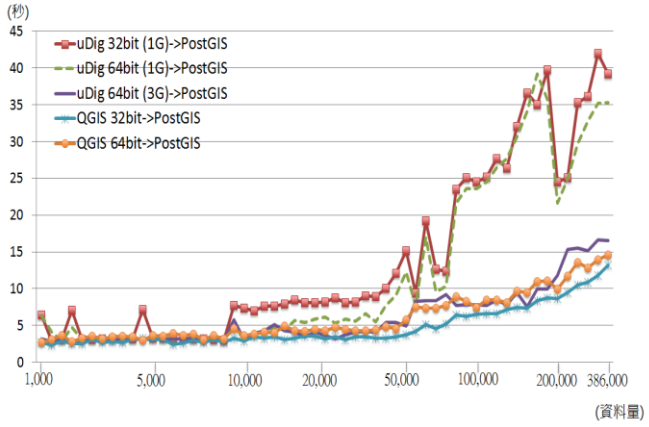


圖 13　測試數據圖(1)不含 DMMS

(二) GeoServer 2.3 效能測試：

此項數據為透過 uDig 與 QGIS 呼叫 GeoServer 的 WMS 服務，以連接至 PostGIS 進行測試；且將台電現行地理圖資系統(DMMS)加入測試比較(DMMS 連接 Oracle 資料庫)。硬體測試環境為 32bit 作業系統的記憶體為 4GB、64bit 作業系統的記憶體為 8GB，測試環境為 DMMS 32bit、uDig 32bit(軟體分配記憶體 1GB)、64bit(軟體分配記憶體 1GB 及 3GB)、QGIS 32bit(無法軟體分配記憶體)、QGIS 64bit(無法軟體分配記憶體)；測試瀏覽器為 Google

Chrome。依資料量大小使用對數刻度排列繪製圖形如圖 14 所示。

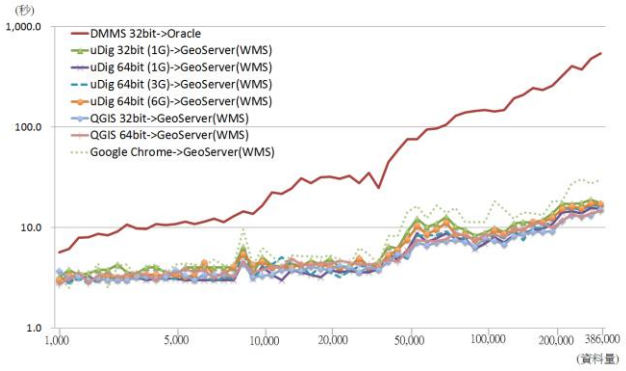


圖 14　測試數據圖(2)

移除 DMMS 測試下載項目後繪製資料如圖 15 所示：

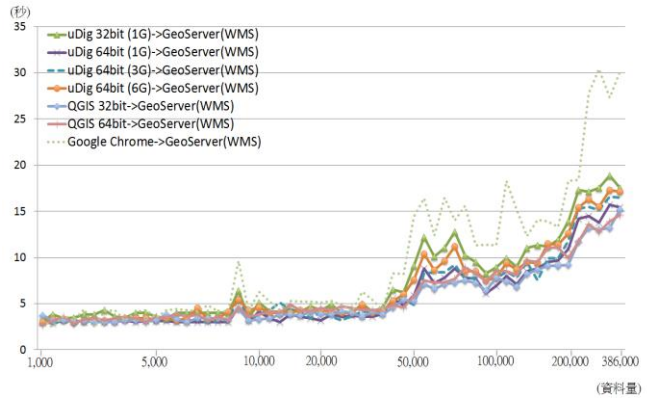


圖 15　測試數據圖(2)不含 DMMS

(三) MapServer 6.4 效能測試：

此項數據為透過 uDig 與 QGIS 呼叫 MapServer 的 WMS 服務，以連接至 PostGIS 進行測試，且將台電現行地理圖資系統(DMMS)加入測試比較(DMMS 連接 Oracle 資料庫)。硬體測試環境為 32bit 作業系統的記憶體為 4GB、64bit 作業系統的記憶體為 8GB，測試環境為 DMMS 32bit、uDig 32bit(軟體分配記憶體 1GB)、64bit(軟體分配記憶體 1GB 及 3GB)、QGIS 32bit(無法軟體分配記憶體)、QGIS 64bit(無法軟體分配記憶體)；測試瀏覽器為 Google Chrome。依資料量大小使用對數刻度排列繪製圖形如圖 16 所示。

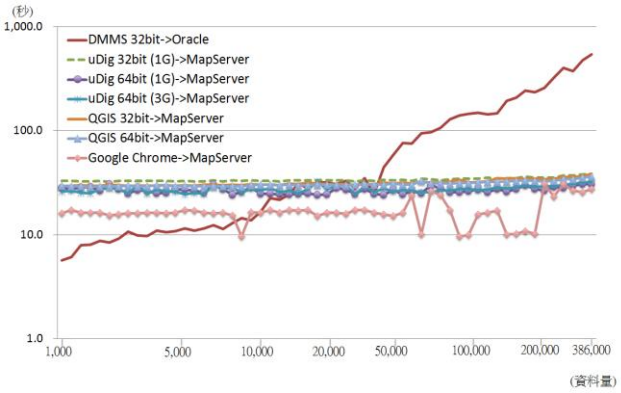


圖 16　測試數據圖(3)

移除 DMMS 測試下載項目後繪製資料如圖 17 所示。uDig 圖台在範圍為 1/3600 及 1/6000 比例尺等較多資料顯示時，螢幕顯示圖元會有延遲顯示現象，紅色區塊為標示發生此情形之區段資料。

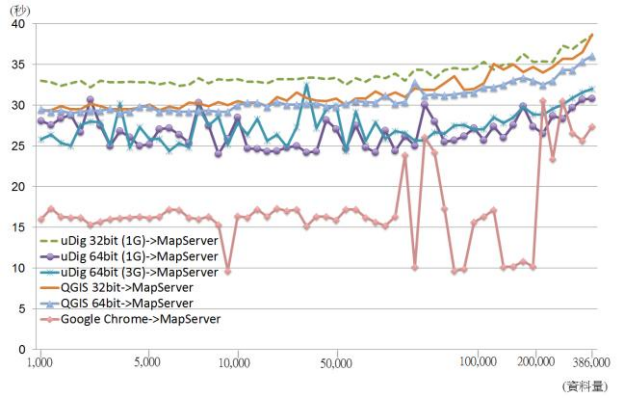


圖 17　測試數據圖(3)不含 DMMS

(四) MapServer6.4 圖層數量測試:

透過測試數據 3 得知使用 uDig 與 QGIS 測試數據均落在 24~39 秒之間，為了解其原因故增加以圖層數量 1,5,10,50,100 層進行測試。依圖層數量測試結果如圖 18 所示。

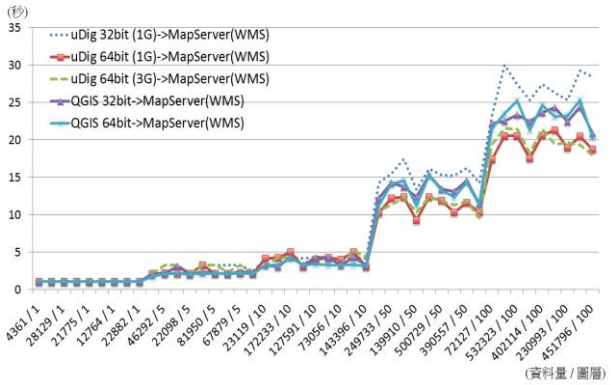


圖 18　測試數據圖(4)

根據圖 18 得知圖層數量對 MapServer 有極大的影響，為確認是否為主要影響效能因素，故另加測試取一個 1/6000 圖號範圍，測試於 5,10,50 圖層時若資料大小相當時，是否也會影響效能，其結果如下圖 19 所示。

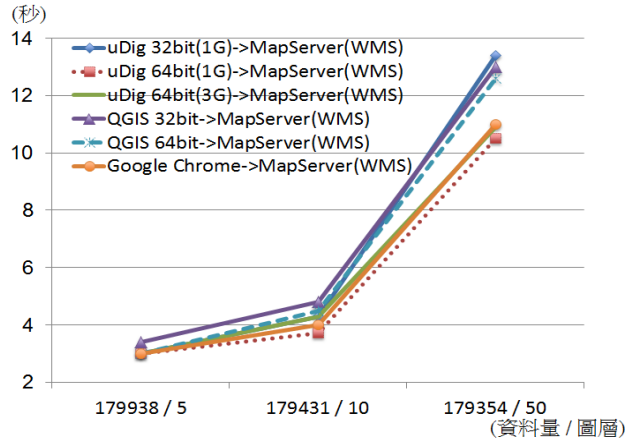


圖 19　測試數據圖(5)

(五) TGOS 效能測試：

此項數據為透過 uDig 與 QGIS 連結至 TGOS 的 WMS 服務，以取得內政部國土測繪中心所提供之通用版地形圖進行測試，硬體測試環境為 32bit 作業系統的記憶體為 4GB、64bit 作業系統的記憶體為 8GB，測試環境為 uDig 32bit (軟體分配記憶體 1GB)、64bit(軟體分配記憶體 1GB 及 3GB)、QGIS 32bit(無法軟體分配記憶體)、QGIS 64bit(無法軟體分配記憶體)。測試過程發現，QGIS 在引用 TGOS 資料時，QGIS 必須將欲顯示之地理圖資資訊完整下載後，一次性地將下載之地理圖資資訊於畫面顯示，過程中無法取消該程序，因此當下載資料量較大時，會讓使用者感覺系統停頓或當機；uDig 引用 TGOS 資料時，會在欲顯示之地理圖資資訊下載過程中，逐一將下載的圖資資訊於畫面顯示，且在下載過程中，使用者也可調整顯示範圍，或取消執行程序並執行下一動作。針對圖號範圍測試結果如圖 20 測試數據圖(6)所示。

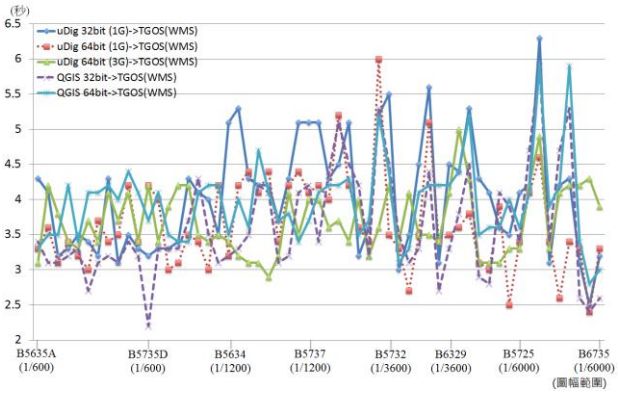


圖 20　測試數據圖(6)

六、圖台選用說明

目前所列入選用之單機繪圖平台與網頁繪圖平台，雖然經過定性與定量分析結果，均可適用於未來台電公司所需，但仍須以不同實用面向進行考量，以選出較適合、較經濟之圖台進行功能開發。

首先考量系統架構中主要共用的網頁繪圖平台，提供使用者以網頁方式查詢圖資及單機圖台透過 WMS 服務查詢圖資，根據測試數據結果得知，MapServer 效能較受圖層數多寡限制、GeoServer 效能較受資料量大小限制，若使用者以瀏覽器開啟網頁，較願意等待的時間設定 5 秒鐘為條件，MapServer 必須於 10 層以下之圖層，GeoServer 必須處理少於約 23,000 筆資料量，才能發揮較好之效能。然而台電公司配電圖資共有

17 個主題圖，每個主題圖約有 100 個圖層，使得 MapServer 較難有效發揮效能；另台電公司配電圖資實務上常用之比例尺為 1/600 及 1/1200，資料量不會超過 23,000 筆，唯有顯示光纜圖和管線圖時，才可能使用到 1/3600 比例尺，但平均資料量亦不會超過 23,000 筆。根據上述要件，網頁繪圖平台宜選擇 GeoServer。

QGIS 與 uDig 單機繪圖平台之選擇，除了需考量要連接至台電現行使用之空間資料庫(PostGIS)外，應用功能介面仍需透過網頁繪圖平台及 TGOS 的 WMS 服務查詢相關圖資。在目前候選圖台來說，各方面都有其優劣，故以測試結果在選用單機圖台尚無明顯決定性的優缺點，依單機圖台整體測試結果，QGIS 以 C++核心架構開發，具有較好之效能，uDig 系統為 Java 核心架構開發，雖比 QGIS 反應效能稍慢，但在台電配電圖資常用顯示範圍(1/600、1/1200、1/3600)上，效能差異並不明顯。QGIS 目前已有中文化操作界面，uDig 尚無中文化操作界面，須由開發人員自行客製化選單，但其核心架構可與網頁繪圖平台 GeoServer 共用底層(GeoTools 開放原始碼的地理空間工具)模組，所以在客製化應用功能方面，可直接透過擴展 GeoTools 函數庫來達到網頁與單機圖台同時擴增對於空間處理的功能，並可共用顯示圖例模組，達到共用應用功能減少開發時程。

台電配電圖資應用系統發展，在圖台應用上不僅只是應用到 GIS 的功能，更多是有關 CAD 的繪圖功能，其主要差異在於 CAD 的圖形編輯功能是較適用於排版和製圖方面，而 GIS 則強調於呈現空間資訊，因此，在單機繪圖平台上目前 QGIS 及 uDig 都是以 GIS 作為基礎核心，若要應用於 DMMS 或 DCAD 等系統上，勢必需要開發或調整其相關繪圖功能及顯示方式，在這方面 QGIS 是利用外掛方式以圖台 API 開發相關功能，uDig 則除了可用圖台 API 進行開發之外，亦可整合其他利用 Eclipse RCP 架構發展之應用程式，具有較佳之擴充性。

綜合上述說明，單機圖資平台與網頁圖資平台在選用上，除需考量整體協同運行之整合性、系統移植之便利性、圖台擴充之延展性、系統開發之難易度等各方面之外，亦需考慮如何有效降低系統開發、維護與推廣之各項成本，因此選用網頁圖台 GeoServer 及單機圖台 uDig 作為系統開發圖台，應為較合適之選擇。

伍、配電圖資應用圖台開發

一、整體開發架構概述

台電公司依業務單位地理圖資特性與資料規模，透過定性定量分析測試所選出之單機圖台(uDig)及網頁圖台(GeoServer)，據以做為本案圖台開發之基礎，因所選用開放式圖台為 GIS 設計架構，無法滿足台電業務單位原有 CAD 圖台環境中所能呈現圖例之多樣性需求，且對於圖資編輯能力也不如既有 CAD 圖台，以至於在圖資編輯操作方式及 GIS 圖台呈現習慣上仍有許多差異。為使台電業務單位能夠順利的應用開放式圖台，故需要先設計一項能夠完整將台電圖例符號呈現於 GIS 圖台上的機制，使其具有能呈現台電圖例之能力，因此對於現今台電配電圖資約 125 種圖例進行檢視並重新建立，以期達到圖台顯示配電圖資之基本需求，另外參考現今業務單位使用編輯圖台習慣，制定設備編輯操作方式，以客製化方式設計台電繪製模組，並據此架構發展台電未來的配電圖資應用系統功能。

由於網頁圖台及單機圖台皆使用的 GeoTools 核心模組，是依據 OGC 標準所開發應用於地理資訊之函式庫，可透過擴充繪製模組可使兩個圖台均具備台電所需之圖例繪製功能；在單機圖台方面，uDig 所使用的 Eclipse RCP 平台架構，是依循開放服務閘道協議(Open Services Gateway Initiative, OSGI)標準所設計，其嵌入式(Plug in)的管理機制是最大的特點，基於 Eclipse RCP 所建構的應用系統均具有良好的擴展性，用

戶端只需要透過下載所開發的套件，即可簡單部署系統功能到應用系統中，開發時依循此架構開發系統功能，達到各項設備編輯需求；網頁圖台方面，運用圖資服務架構加上各項配電主題圖資顯示服務，使其能提供以 OGC 標準應用服務(如 WMS、WFS 等)來整合呈現各項台電配電圖資，並可支援外部單位交換資料使用；在行動應用圖台(Andorid)方面，透過網頁圖台所整合之圖資服務，擷取所需圖資範圍，並運用緩存技術及圖磚(Tile)架構下載離線圖資，以達到行動裝置離線覽圖需求。

為使各圖台間能有效協同運作，分別依其需求特性規劃功能架構進行說明，圖台開發過程可分為幾個階段進行，如圖 21 所示：

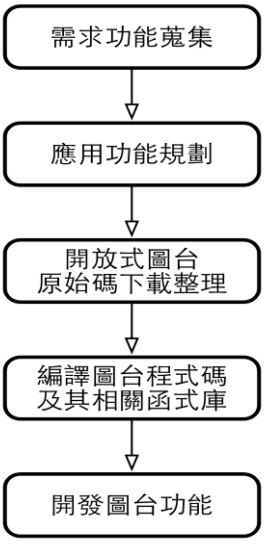


圖 21　圖台開發進行過程

(一) 需求功能蒐集：

對於圖台應具備功能，與使用者進行訪談討論蒐集需求。

(二) 應用功能規劃：

所蒐集之需求整理出圖台應達到之功能，與其功能使用介面。

(三) 圖台原始碼下載：

對其開發圖台至 GitHub 下載穩定之最新版本，並分支成本案開發版本。

(四) 編譯程式碼及其相關函式庫：

測試編譯所取得之程式碼均能夠成功編譯成為目的檔，以確保所取得之程式碼無誤。

(五) 開發圖台功能：

對所規劃之圖台功能逐一進行開發作業。

二、單機圖台介紹

(一) 單機圖台開發架構：

單機圖台所選用的 uDig 是以 Eclipse RCP (Eclipse Rich Client Platform)為開發平台，最初為 IBM 公司所開發的商業軟體 Visual Age for Java 下一代 IDE 開發環境，2001 年 11 月起貢獻給開放原始碼社群，現在由非營利軟體供應商聯盟 Eclipse 基金會(Eclipse Foundation)管理，大多數人聽到 Eclipse 的時候，常會聯想到的是一個 Java 整合開發環境(Integrated Development Environment, IDE)，但如果 Eclipse 中關於 IDE 的部分去除，剩下的就是一個提供基本功能的核心，而這個核心就是 Eclipse RCP，其架構如圖 22 所示[15]。

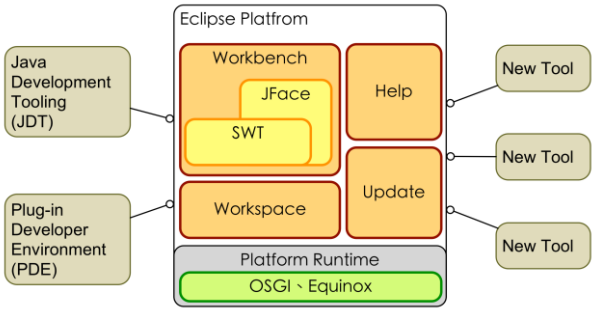


圖 22　Eclipse RCP 軟體架構圖

(二) 操作介面規劃說明(UI)：

本案的圖台功能遵循 Eclipse RCP 平台架構中系統外掛組件的機制進行開發，圖 23 為單機圖台軟體操作介面規劃圖，介面規劃說明如下：

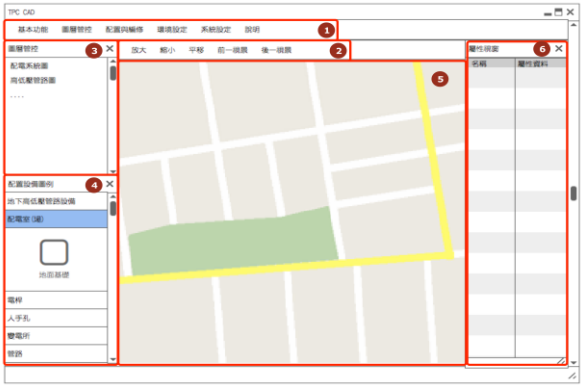


圖 23　單機圖台軟體操作介面規劃圖

1. 功能選單：

功能選單包括基本功能、圖層管控、配置與編修、環境設定、系統設定、說明等，使用者可透過功能選單進行圖台功能操作或相關設定。

2. 視景工具列：

放置圖台操作視窗功能。

3. 圖層管控視窗：

針對圖台所加入之主題圖與各項圖層，提供圖層開關顯示。

4. 設備圖例視窗：

提供所有可以配置於圖面上的各種圖例，只需點選一下便可放置於圖面上的任何位置。

5. 地理資訊視窗：

此區塊為真實地理位置區域，可在此進行定位及載入圖資與配置設備等動作。

6. 屬性視窗：

依據所點選查詢設備，呈現其屬性資料。

(三) 系統開發畫面：

將台電地理圖資資訊載入本案單機圖台後，使用者可依業務需求，選擇某地理空間，進行圖資編修，單機圖台圖資編修畫面如下圖 24 所示：

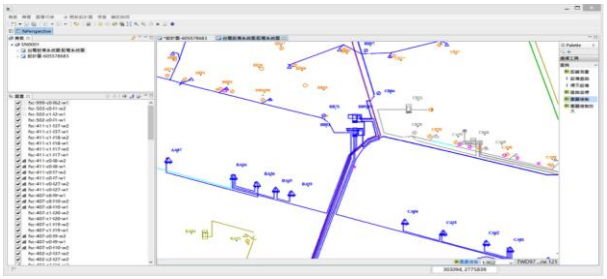


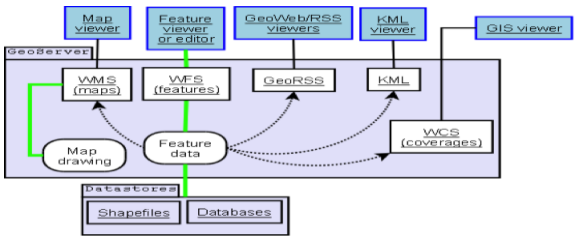
圖 24　單機圖台系統開發畫面圖

三、網頁圖台介紹

(一) 網頁圖台開發架構：

近年來由於地理資訊的演進，連帶使得地理資訊系統的應用也較以往更為廣泛，而對於空間資料(Spatial Data)的使用也已從早期必須經由專家學者處理才能發佈，到現在一般民眾只需要簡單的工具，甚至是透過行動裝置就有可能產生這些具有地理資訊的資料，然而空間資料的建立僅是提供服務最基本的一環，在建立地理資訊相關的資料時，往往都會需要使用編輯軟體以針對資料的空間資訊、屬性資料進行處理，透過軟體建立起對應的服務，才能夠讓使用者使用。

網頁圖台所選用的 GeoServer 是依據 OGC (Open Geospatial Consortium)所制定的規範，WFS(Web Feature Service)、WMS(Web Map Service)等標準實作而成，為網頁圖台系統的核心；GeoServer 可以方便的呈現、分享地理空間資訊，並允許對空間資料進行新增、修改、刪除等資料異動作業。其架構如圖 25 所示。



圖片來源　http://www.resc.rdg.ac.uk/twiki/bin/view/Resc/ GeoServer

圖 25　GeoServer 架構

以下簡介較常用之實作規格：

1. WMS(Web Map Service) Specification：

使用者可透過 HTTP 介面，以網路地圖服務(WMS)取得所需的地圖影像，其格式為常用的圖片格式，如 JPG、GIF 與 PNG。在 2005 年時，OGC WMS 實作規格被 ISO 採納，成為「ISO 19128:2005 Geographic Information - Web Map Server Interface」標準[16]。

2. WFS(Web Feature Service) WFS-T (Web Feature Service Transaction)：

使用者可透過 HTTP 介面，以網路圖徵服務(WFS)取得向量式的地理圖徵資料，甚至可進一步進行資料編修，目前採用的資料格式為 GML，透過網路服務取得不同來源的 GML 地理資料，依照所提供的操作(Operation)方式，透過交易(Transaction)管控可讓客戶端遠端修改地理圖徵[17]。

3. GML(Geography Markup Language)：

GML 是一種以 XML 為基礎的編碼方式，用來塑模(Modeling)、傳遞及儲存地理資訊，GML 的圖徵資訊可以透過自訂的屬性來進行描述物件資訊，像是幾何屬性(區位、形式以及範圍…)或是非幾何屬性(顏色、速度、密度…)等資訊，而 GML 的核心綱要(Core Schema)提供了不同類別的物件，用來描述地理資訊，包括圖徵、座標系統、幾何、位相關係、時間、度量單位以及概括值(Generalized Values)[18]。

4. WPS(Web Processing Service)：

網路程序服務(WPS)是爲了讓 GIS 分析運算功能能夠透過網際網路執行而設計的標準。可以將圖徵資料(通常是 GML 格式)與分析運算所需的參數透過網路傳送給 WPS 伺服器，再從服務器取得分析結果[19][20]。

5. WCS(Web Coverage Service)：

透過網路覆蓋服務(WCS)是為了讓使用者取得所需的網格式影像資料，而不是靜態地圖，這些影像可能包含多個波段，例如多光譜遙感影像。使用者可以透過參數來限定，取得某空間範圍或某幾個波段的影像資料[21][22]。

6. KML(Keyhole Markup Language)：

KML 是一種基於 XML 語法標準的標記語言，採用標記結構(含有元素和屬性)用於顯示地理數據(包括點、線、面、多邊形、多面體以及模型)，目前 OGC 已經採納 KML 格式作為實作標準之一，而現在很多 GIS 相關廠商開始採用此種格式進行地理數據的交換[23]。

(二) 操作介面規劃說明(UI)：

本案的網頁功能遵循 GeoServer 平台架構及客製化網站進行開發，圖 26 為網頁圖台軟體操作介面規劃圖，介面規劃說明如下：

1. 視景操作：

使用者利用地圖視景操作，進行地圖視景的移動與比例尺的縮放等操作。

2. 設備查詢：

透過使用者點選圖面設備方式，取得各項設備的 FSC 與 UFID，且利用 FSC 與 UFID 進行各設備的詳細屬性資料查詢。

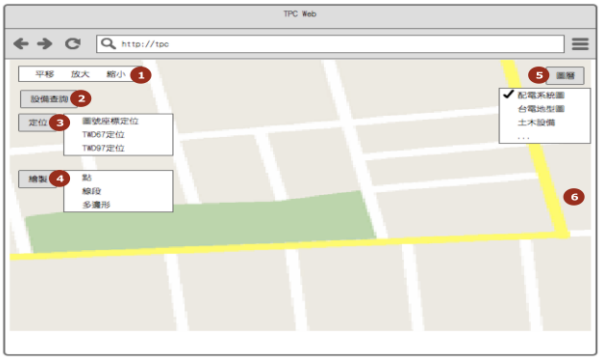


圖 26　網頁圖台軟體操作介面規劃圖

3. 定位：

提供使用者輸入台電座標、TWD67、TWD97 定位方式，移動視景至所需位置。

(1) 圖號座標定位：

藉由輸入台電座標換算取得圖面對應的位置。

(2) TWD67 定位：

提供使用者輸入 TWD67 座標進行圖面定位。

(3) TWD97 定位：

提供使用者輸入 TWD97 座標進行圖面定位。

4. 繪製：

提供使用者在地圖視窗圖面上進行繪製圖形，包含繪製點、線段與多邊形。

5. 圖層：

提供控制選單簡易的切換主題圖層，包含高低壓管路圖、高壓管路圖、低壓管路圖、11.4KV 高壓線路圖、11.4KV 高壓架空線路圖、11.4KV 高壓地下線路圖、22.8KV 高壓線路圖、22.8KV 高壓架空線路圖、22.8KV 高壓地下線路圖、低壓線路圖、低壓架空線路圖、低壓地下線路圖、高低壓架空線路圖、配電系統圖(OMS)、路燈系統圖、路燈台帳系統圖、光纜系統圖等 17 項主題圖。

6. 地圖視窗：

台電設備分佈資訊以地圖的方式呈現，經過主題圖層的套疊後同時顯示於地圖上，可清楚的呈設備所在位置。

(三) 系統開發畫面：

圖 27 為網頁圖台系統圖，當開啟網頁圖台十，系統會透過 WMS 服務讀取通用版地形圖，並顯示於操作畫面上，使用者可於操作畫面上選擇想要查詢的主題圖資訊，且於主題圖上進行放大、縮小、平移、查詢、定位，和繪製點、線、面等功能。

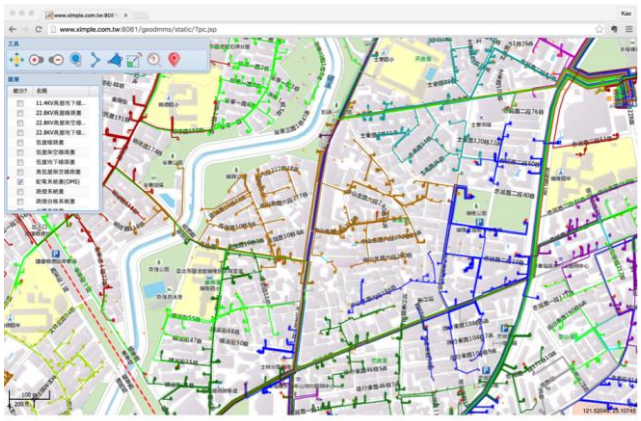


圖 27　網頁圖台系統圖

四、行動應用圖台介紹

(一) 行動應用圖台選用說明：

目前行動裝置最多人使用是以 Android 系統為主，且設備選擇的種類較多，價格也較便宜，但適用於 Android 之行動圖台開放原始碼專案，僅找到 Mapbox 符合有地圖顯示及下載圖資功能，故本案以 Android 及 Mapbox 為基礎，進行行動應用圖台功能的開發。

(二) 操作介面規劃說明(UI)：

本案的行動應用功能遵循 Android 及 Mapbox 平台架構及客製化進行開發，圖 28 為行動應用圖台軟體操作介面規劃圖，介面規劃說明如下：

圖 28　行動應用圖台軟體操作介面規劃圖

1. 圖資下載：

使用者透過無線或有線方式連結網頁圖台的地圖，下載離線圖資。

2. 圖資清除：

清除下載離線圖資。

3. 設備查詢：

透過使用者點選圖面設備方式，取得各項設備的 FSC 與 UFID，且利用 FSC 與 UFID 進行各設備的詳細屬性資料查詢。

4. 視景操作：

使用者利用地圖視景操作，進行地圖視景的移動與比例尺的縮放等操作。

5. 定位：

提供使用者可以 GPS 定位方式，移動視景至所需位置。

(三) 系統開發畫面：

圖 29 為行動應用圖台軟體圖，使用者開啟單機圖台時，若當時網路通訊良好，單機圖台會透過 WMS 服務下載網頁圖台之路燈台帳主題圖資訊。另行動應用圖台亦提供離線地圖下載功能，人員出勤前，可於辦公室下載路燈台帳主題圖資訊，且緩存於行動應用圖台，供人員帶至現場查詢，以達到離線覽圖目的。

圖 29　行動應用圖台軟體圖

陸、結論

本案所研究評估採用開放式標準介面建構地理圖資系統，藉以整合業務單位地理圖資，研發業務單位各應用系統專用的標準繪圖平台，惟開放原始碼圖台相較於商用圖台，不論在使用或開發上都較不方便，不但對使用者或開發者的要求相對要高，往往需要具有 GIS 概念基礎，且對系統、資料庫、檔案格式的維護，要有一定程度的技術能力，因此資訊人員相關技能培養較不易，但開放原始碼不須支付版權費用，且有很好的開發性及擴展性，不斷吸引著越來越多的學者和研究人員加入至開發社群中來，使得開放原始碼 GIS 圖台已日益茁壯並趨成熟，故本計畫所研究評估採用開放式標準介面建構地理圖資系統，藉以整合業務單位地理圖資，研發業務單位各應用系統專用的標準繪圖平台。

本案依台電公司配電業務的資料規模及地理圖資之需求，透過定性與定量的測試分析，遴選出開放標準架構的單機圖台(uDig)與網頁圖台(GeoServer)，以供配電圖資單機與網頁標準繪圖平台開發，而單機與網頁標準繪圖平台開發過程中，可分為需求功能蒐集、應用功能規劃、開放式圖台原始碼下載整理、編譯圖台原始程式碼及其相關函式庫及圖台功能開發等五個程序，並參考現行業務單位使用商業圖台的編輯習慣，經需求訪談彙整歸納單機圖台及網頁圖台基礎功能。在行動應用圖台軟體(Andorid)開發方面，透過網頁圖台所提供之地理圖資服務，擷取所需圖資範圍，運用緩存技術及圖磚(Tile)架構下載配電圖資，以達到行動裝置離線覽圖之需求。

柒、參考文獻

[1] 「GIS 軟體比較」，2013 年 12 月，http://zh.wikipedia.org/wiki/GIS%E8%BD%AF%E4%BB%B6%E6%AF%94%E8%BE%83.

[2] "Gartner," Dec.2013, [Online]. Available: http://www.gartner.com/technology/home.jsp.

[3] 「開放式地理資訊系統協會(OGC)所提出的網路服務標準」，2015 年 3 月，http://www.

opengeospatial.org/.
[4] “OpenGIS,” [Online]. Available: http://www.cnblogs.com/Nimeux/archive/2010/07/10/1774989.html.
[5] 黃永忠，「導入 OpenGIS 模組實例研究」，碩士論文，中山大學海洋環境及工程研究所，2001 年。
[6] 周家慶，「開放式地理資訊系統之研究探討與實作」，2005 年 3 月，http://ngis2.moi.gov.tw/storage/moi_ngis/journal/42/005.htm.
[7] 「自由軟體」，http://zh.wikipedia.org/wiki/自由軟體。
[8] “Google Trends,” [Online]. Available: http://www.google.com/trends/.
[9] “MapServer Documentation,” [Online]. Available: http://mapserver.org/documentation. html.
[10] 江宗展、史天元，「由自由軟體 MapServer 探討 WebGIS 建置」，地籍測量第廿三卷第 4 期，2002 年。
[11] “GeoServer SLD Cookbook,” [Online]. Available: http://docs.geoserver.org/stable/en/user/styling/sld-cookbook/index.html.
[12] SEWilco, “Geoservices server with interfaces and applications sketch ,” Mar.2007, [Online]. Available: https://zh.wikipedia.org/wiki/File:Geoservices_server_with_apps.png.
[13] “QGIS Tutorials and Tips,” [Online]. Available: http://www.qgistutorials.com/en/.
[14] “uDig User Guide,” [Online]. Available: http://udig.github.io/docs/user/.
[15] “Eclipse RCP (Rich Client Platform)-Tutorial,” [Online]. Available: http://www.vogella.com/tutorials/EclipseRCP/article.html.
[16] “OGC-Web Map Service,” [Online]. Available: http://www.opengeospatial.org/standards/wms.
[17] “Web Feature Service,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Web_Feature_Service.
[18] “OGC-Geography Markup Language (GML),” [Online]. Available: http://www.ogcnetwork.net/GML.
[19] Min Min, Nengcheng Chen, Liping Di, Genong Yu and Jianya Gong, “Augmenting the OGC Web Processing Service with Message-Based Asynchronous Notification,” Proceedings of 28th IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, vol. 2, pp. 1337-1340, Feb. 2009.
[20] “Web Processing Service,” [Online]. Available: http://www.opengeospatial.org/standards/wps.
[21] Evans, J. D., "Web Coverage Service (WCS), Version 1.0.0," Open Geospatial Consortium Inc, 2003.
[22] Benedict ,K. K., The Open Geospatial Consortium Web Map, “Web Feature and Web Coverage Service Standards - an Overview,” A Workshop Presented at the ESIP Federation Meeting, June 2005.
[23] “KML Tutorial,” [Online]. Available: https://developers.google.com/kml/documentation/kml_tut.

需量交易最佳化之研究

Studies on Demand Bidding Optimization

姚立德* 林韋宏*
Yao, Leeh-Ter Lim, Wei-Hong

蘇聖煌* 陳文瑞** 陳建翔**
Su, Sheng-Huang Chen, Wen-Ruei Chen, Chien-Hsiang

(105 年度研究計畫論文)

摘 要

隨著電業自由化逐步實施，類似於需量交易等『負能源』概念在電力市場逐漸扮演重要角色。本研究探討一項在非自由化電力市場內實施的需量競價措施以及其需量收購價格制定的方法。其中壟斷型電力公司可透過需量競價系統蒐集各方用戶的競標資料，經由競價最佳化機制選擇與收購電力之用戶。需量競價問題在於探討競價最佳化用戶的抉擇，除了考慮負載總收購價格的成本問題，同時所收購之負載能源亦須滿足每小時的收購能源下限。在本研究中，需量競價模組透過一套改良型基因法則來搜尋各個用戶最佳卸載方式。此近似最佳解除了能最小化需量收購總成本以外，同時亦確保各個時段實際卸載量滿足其對應的目標卸載量。

Abstract

Due to the deregulation of the electricity industry, the concept of “negative energy” such as demand exchange gains popularity in the energy market. This research focuses on a demand bidding mechanism introduced in a regulated electricity market and the associated approach to determining the optimal demand bid purchase prices. Particularly, a monopoly utility company is able to collect all bidding information submitted by the customers via its demand bidding system and utilize the optimal bid purchase strategy to determine the amount of load curtailment to be purchased from each customer. The problem with demand bidding lies in how to find the optimal set of customers to participate in the load curtailment when considering the total bidding cost and the constraint in satisfying the minimal amount of load curtailment at each bidding period. In this research, an optimal bid purchase strategy is formulated using an improved genetic algorithm, aiming to determine the optimal load curtailment strategy for each participating customer. The near-optimal solution obtained is expected to minimize the total bidding cost, while ensuring that the actual load curtailment produced at each bidding slot will satisfy the associated target value.

關鍵詞(Key Words)：需求面管裡(Demand Side Management)、需量交易(Demand Exchange)、需量競價(Demand Bidding)、基因法則(Genetic Algorithm)、最佳化(Optimization)。

*國立台北科技大學
**財團法人資訊工業策進會

壹、前言

近年來全球電力市場自由化對於傳統電力管理造成了很大的衝擊與改變，再者人們仰賴電力的供給日益提升，因此各個國家不斷的開發新能源，以求電力能供需平衡。然而在環保意識提高與新能源開發成本提高的影響之下，各國電力公司逐漸從以往著重能源開發及輸配電系統規劃轉而強調與積極推廣各項需求面管理措施稱為需量反應[1-2]。需量反應包含多種需量管理措施，其中包括『即時電價』、『負載直接控制』、『需量交易』、『緊急可停電力』、及『自願性卸載』等計劃。不同機構可依其轄區內的實際狀況設計不同層面之需量反應措施，以服務其用戶。需量反應措施由於卸去用戶之負載，且具備適應性，可處理負載尖峰時的問題、解決發電公司發電不足之窘境，亦可作為輸電公司舒緩輸電線壅塞之代替方案之一，亦可調節購買電力之電價，防止電價過高。

所謂需量交易就是當電力公司供電吃緊時，在一定時間以前通知用戶，徵求其在某一段起迄時間內降低負載量。用戶可以決定是否讓出手中擁有的需量，並且決定每度卸載量之收購價格。電力公司將依據電力系統需求選擇部分用戶，要求其依約降載，並依據競標之需量價格付給用戶回饋金。若用戶無法依約出售需量，即與所承諾出售之需量有約定固定比例之容許誤差，不足的部分將被要求付給與競標價格成正比的罰款。此措施藉由用戶自報需量反應方式，而競標價格的制定則從傳統供給端轉變為需求端，以賦予用戶更多自主權來激發起抑低用電潛能。有別於傳統的供電模式(正能源)，需量交易可被視為『負能源』概念以提供電力。

因應近年來電業自由化的逐步實施，需量交易亦逐漸受重視。本文規劃一套主要針對非自由電力市場內電力公司所提出的需量交易進行競價最佳化。電力公司可蒐集來自各方用戶競標資料，經由需量競價機制，選擇欲收購電力之用戶，而被選取用戶則需履行合約進行卸載。需量競價問題在探討競價最佳化用戶的抉擇，除了考慮負載總收購價格的成本問題，同時所收購之負載能源亦須滿足每小時的收購能源下限。本研究提出的需量競價問題可透過改良型基因法則來搜尋最佳卸載方式。此最佳解除了確保應支付的需量收購總成本最小化以外，同時亦滿足各個時段實際收購總需量高於各時段目標卸載量的條件。

貳、國內外需量反應實施

美國需量反應實施最為悠久，相關系統與措施也發展的最完善。美國加州三大公司包括南加州愛迪生電力公司(Southern California Edison, SCE)、太平洋瓦斯電力公司(Pacific Gas and Electric Company，PG&E)、聖地亞哥瓦斯電力公司(San Diego Gas & Electric，SDG&E)皆提供包括容量競價方案(Capacity Bidding Program, CBP)及能量競價方案(Demand Bidding Program, DBP)兩種激勵型(Incentive-based)需量反應措施[3-5]。其中容量競價方案(CBP)在每年夏季實施，是電力公司預期電力供需出現失衡時，為維持電力系統之可靠度所實施的可靠型方案。能量競價方案(DBP)則全年實施，是電力公司在供電成本過高是所實施的經濟型方案。PG&E 在 2013 年實施六次 DBP 事件，每次事件執行八個小時、其中針對所有用戶執行的三個事件平均每小時卸載了 36 千瓩。SCE 在 2013 年實施五次 DBP 事件，每次事件執行八個小時、其中針對所有用戶執行的三個事件平均每小時卸載了 99.5 千瓩。

除美國之外，日本在福島第一核電廠爐心熔毀事件後，亦開始積極推動需量反應措施，以有效降低用戶端尖峰負載，亦可大幅降低電廠投資，增加系統調度的彈性及可靠度，並為電力公司、用戶及設備與工商產業帶來互利多贏的效益。其中，日本產業經濟省以美國自動需量反應

標準-OpenADR 2.0 為範本制定精簡版規範-Demand Response Interface 1.0, 並提供大量預算以補助商業及工業用戶導入符合 Demand Response Interface 1.0 之建築能源管理系統(Building Energy Management System, BEMS), 以參加各地電力公司需量反應措施[6]。

英國是歐洲需量反應市場發展相對較早的國家，大多數的需量反應容量潛力是來自於工業和商業部門。英國政府於 2011 年提出策略型備用機制(Strategic Reserve)以解決未來預期的電力供應缺口[7]。其做法是當預期未來數年內將發生電力供應短缺時，中央單位將規劃一目標備用容量，並負責購買不同類型的容量達到此目標值。所購買的容量包括了非發電技術或措施，例如電力儲存、需量反應及跨國電網。當電力供應吃緊造成電價飆升到調度價格(Dispatch Price)時，這些策略型容量便啟動，該中央單位可以此價格販售所生產電力。

台灣電力公司於 2015 年參酌國外創新做法，在國內推出需量競價方案，希望給予用電端的參與降載以降低尖峰電力的使用，減少機組的興建與發電成本[8]。台電公司推出的需量競價方案適用於高壓以上經常電力用戶，最低抑低契約容量不得低於 50 瓩。用戶得選擇每次執行抑低時數為 2 小時或 4 小時，一日為單位，每日視為抑低用電一次，每月抑低用電時數不超過 28 小時。台電公司為此需量競價推出兩項獎勵方案：即為經濟型及可靠型。經濟型方案是以減少台電燃料成本為目的，僅依用戶報價提供能量優惠(流動電費口減)，違約不罰。而可靠型方案則以提供系統可靠容量為目的，除依用戶報價提供能量優惠外，另給容量優惠(基本電費扣減)，但違約有罰。

參、需量交易於電力市場的角色扮演

在電力自由化市場下，傳統的壟斷式電業結構對發、輸、配、售電業進行分離，以提升經濟效率、安全與可靠的電力生產，並以最低廉的成本供給電力與電力相關服務以滿足電力系統所需。而需量交易對於各個電業者亦扮演著不同的角色。舉例而言，輸電業者與配電業者個別需維持輸送電網安全性與可靠性。在電力需求過高時段，輸、配電業者可透過需量交易讓電力使用者降低電力使用，以舒緩輸配電網的壅塞狀況，並提升供電品質。而售電業者由於需透過電力批發市場以現貨價格(Spot Price)購買電力並以固定價錢(Fixed Tariff)售賣給用戶，因此常面臨基於現貨價錢波動而造成的市場風險。為了覆蓋以上風險，售電業者可在電價飆升的情況下，透過需量交易措施給予用戶特定的誘因鼓勵他們在用電尖峰時段內自願性進行卸載，以避免購電成本過高的問題。

由於需量交易在自由化電力市場可根據不同電業者的需求扮演彈性的角色，所以文獻中亦提出各種類型的機制。為了解決再生能源間歇性問題，Parvania 與 Fotuhi-Firuzabad[9]提出一項以卸載為基礎的需量交易機制用於重塑系統負載曲線。此交易機制運用一套基於混合整數線性規劃(Mixed Integer Linear Programming, MILP)的市場出清(Market Clearing)策略根據現有的需量在日前決定卸載排程。類似的以四種不同卸載方式為基礎需量交易架構也被 Parvania、Fotuhi-Firuzabad 與 Shadidehpour[10]提出，運用 MILP 決策各個用戶群代表(Aggregator)在電力批發市場內所需提供的需量。Nguyen[11]提出的一個需量交易(DRX)市場視需量為一種可讓賣家(輸、配、售電業者)與買家(用戶群代表)進行交易的虛擬商品。因應著 DRX 市場的推出，Nguyen、Negnevitsky 與 Groot[12]從 DRX 操作者角度開發一套以微經濟學為基礎的市場出清機制以達到所有 DRX 市場參與者利益最大化之目的。分散式 DRX 市場出清機制[13]則假設每個市場參與者為只考慮自我利益的個體。其中，每個參與者可參考市場操作者廣播的價格信號，並通過 Walrasian 競標策略對其競標信息不斷進行更新

以達到市場均衡之目的。Gkatzikis、Koutsopoulos 與 Salonidis[14]提出的多層次架構則利用一組用戶群代表作為電力公司以及住宅區用戶之間的中介來達到需量交易目的。此多層次需量交易架構假設所市場參與者皆為只考慮自我利益的個體，例如用戶群代表是以利潤最大化作為目標，而電力公司則以成本最小化做目標。

以上根據電力自由化市場所提出的需量交易機制皆可透過供需之間的相互競爭關係以決定需量成交價格的制定，而此競爭性價格的形成必然會保證以最低的成本提供需量，並確保需量能流向最需要的用戶。傳統非自由化電業國家的電力公司為一獨占市場型態，無市場競爭性，因此在進行需量交易時無法根據以上文獻提及的方式達到需量成交價格制定。然而，這類型壟斷式的電力公司在某些服務區域內仍有可能會面臨供電不足的窘境，所以在關鍵時期仍然有透過收購用戶需量的必要性，以解決供電不足問題。雖然無法透過以競爭模式為基礎的市場出清策略制定需量收購價格，這些壟斷式電力公司仍可設計一個適當的平台，並利用競價方式來達到需量交易在自由化電力市場所扮演的部分角色。

舉例而言，台灣電力公司在民國 104 年推出需量競價措施以應對其備轉容量率不足問題。在此措施中，用戶可在不同時段提出其願意卸載的量以及相應的收購價格。另外，為了不讓需量收購成本過於昂貴，電力公司亦需衡量一個最高收購價格讓用戶進行競標。目前台電公司亦積極對需量競價措施進行用戶得標最佳化的研究，以期望可為此措施達到最大的經濟效益。

有鑑於此，本研究擬提出一項競價最佳化策略，一方面可幫助上述的需量競價措施發揮其最大經濟效應，另一方面也可以提供其他擁有類似於台灣電力市場的國家做為良好的參考。本文提出的競價最佳化策略需要電力公司在實施需量競價措施的前一天決定所有缺電區域在每個時段所需達到的目標卸載量。另外，此競價最佳化策略也考慮各個競標用戶的卸載特性，即其得標後所需進行最低卸載的時段。針對以上兩點，本文提出的競價最佳化策略可透過改良型基因法則搜尋各個競標用戶的最佳卸載策略。透過改良型基因法則求出的近似最佳解除了能最小化電力公司需量收購總成本以外，同時以確保各個時段的實際卸載量能滿足其對應的目標卸載量。

肆、需量競價問題描述

本研究假設需量競價以日前交易方式進行。電力公司在日前預估各個區域負載情形，以評估各個區域是否有進行卸載的必要性。在確定某區域必須進行需量交易以預防電力不足以及應付緊急需求時，電力公司將提供接下去 24 小時每卸載時段之目標卸載量。控制中心端亦發送卸載通知訊息詢問此區域的 N 個用戶是否參與此競標活動。其中卸載訊息包括：(1)需量交易起迄時間，個別以 t^s 與 t^e 表示、(2)每度電之最高競標價格，以 $\sigma_{\max}$ 表示、(3)用戶回應截止時間，以 t^d 表示。為了方便描述需量競價問題，交易起迄時間及每個卸載時段皆以小時為單位。假設 M 為此需量交易可卸載時段，則 $M = t^e - t^s + 1$。

若用戶未於截止時間 t^d 結束前告知該次競標意願，將視為主動放棄，表示該用戶不願意參與此次競標活動。有意願參與該次競標活動的用戶則可通過網絡平台提交競標訊息。每 n 個用戶所需提交的訊息包括：(1)所能參與卸載起迄時間，個別以 $\hat{\tau}_n^s$ 與 $\hat{\tau}_n^e$ 表示，$n = 1,...,N$ 、(2)每 m 個時段之卸載量，以 $\hat{P}_{nm}$ 表示，$m = 1,...,M$ 及(3)每 m 個時段每度電收購價格，以 $\hat{\sigma}_{nm}$ 表示。每 n 個用戶所提交其參與卸載起迄時間 $\left[\hat{\tau}_n^s, \hat{\tau}_n^e\right]$ 僅限於電力公司所公佈需量交易起迄時間 $\left[t^s, t^e\right]$ 範圍內，即

$$\left[\hat{\tau}_n^s, \hat{\tau}_n^e\right] \subset \left[t^s, t^e\right],\ n = 1,...,N \tag{1}$$

另外，每 n 個用戶在每 m 個卸載時段提出每度電收購價 $\hat{\sigma}_{nm}$ 不得高於電力公司公佈之最高收

購價格 $\sigma_{\max}$ ，即

$$\hat{\sigma}_{nm} \le \sigma_{\max},\ n=1,...,N,\ m=1,...,M \tag{2}$$

為了簡易描述需量競價問題，定義 $\hat{\beta}_n^s$ 與 $\hat{\beta}_n^e$ 為第 n 個用戶參與卸載起迄時段索引子，個別從 $\hat{\tau}_n^s$ 與 $\hat{\tau}_n^e$ 推導出。由於每個用戶不一定在所有可卸載時段提出競標，在用戶 n 沒參與之卸載時段，其 $\hat{P}_{nm}$ 及 $\hat{\sigma}_{nm}$ 皆設為空值，即

$$\hat{P}_{nm}=0,\ \hat{\sigma}=0,\ \forall m \in \left([1,M] \backslash \left[\hat{\beta}_n^s, \hat{\beta}_n^e\right]\right) \tag{3}$$

除此之外，每 n 個用戶通過網絡平台進行競標時，在各個時段提出的卸載量 $\hat{P}_{nm}$ 亦不得大於其最高卸載量 $P_{\max}^n$ ，即

$$\hat{P}_{nm} \le P_{\max}^n,\ n=1,...,N,\ m=1,...,M \tag{4}$$

當用戶上回覆參與意願時間截止後，控制中心將匯集所有參與該次競標活動用戶之卸載起迄時段、各個時段可出售之負載量及各個時段之競標價格。根據所需之負載總需求量，經由競標策略篩選出最佳得標用戶，此結果最終目的在於需量收購成本最小化，同時滿足每 m 個時段之目標卸載量 Γ_m 。定義 $h_{nm} \in \{0,1\}$ 為第 n 個用戶於第 m 個卸載時段之得標狀況。其中 $h_{nm}=1$ 表示第 n 個用戶在第 m 個時段競標成功，反之 $h_{nm}=0$ 則表示用戶競標失敗。假設 P_{nm} 與 σ_{nm} 個別為電力公司對第 n 個用戶於第 m 個時段所收購負載量以及其每度電收購價格。本研究擬開發一套競價最佳化機制，求出各個用戶最佳得標狀態，即 h_{nm}^* ，$n=1,...,N,\ m=1,...,M$ ，以最小化最終支付總成本。定義

$$H^* = \left\{ h_{nm}^* \middle| h_{nm}^* \in \{0,1\}, n=1,...,N, m=1,...,M \right\}$$

為所有用戶最佳得標狀態之集合，則

$$H^* = \underset{h_{nm}, n=1,...,N, m=1,...,M}{\arg\min} \sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M} h_{nm}\sigma_{nm}P_{nm} \tag{5}$$

$$\text{subject to} \sum_{n=1}^{N} h_{nm}P_{nm} \ge \Gamma_m,\quad m=1,...,M \tag{6}$$

$$h_{nm}=0,\quad \forall m \in \left([1,M] \backslash \left[\hat{\beta}_n^s, \hat{\beta}_n^e\right]\right) \tag{7}$$

為了維護用戶權益，電力公司向用戶所收購負載量以及每度電收購價格需依用戶提出之可卸載需量及出售電價，即

$$P_{nm}=\hat{P}_{nm},\quad \sigma_{nm}=\hat{\sigma}_{nm},\ n=1,...,N,\ m=1,...,M \tag{8}$$

此外，每 n 個用戶被電力公司所收購卸載時段亦不可少於其最低卸載時段 δ_n 。此 δ_n 值是由電力公司根據各個用戶用電行為制定。因此

$$\sum_{m=1}^{M} h_{nm} \ge \delta_n,\quad n=1,...,N \tag{9}$$

由於參與此需量交易活動的用戶一般在進行卸載時需花費大量時間以及成本。因此電力公司承諾用戶在每次需量競價事件中只需進行一次卸載，而收購時段為連續時段。此考慮是為了不造成用戶啟動與卸載之間的空窗期。假設 $\mathrm{B}(\cdot)$ 與 $\mathrm{I}(\cdot)$ 各為二元運算子，當操作數為 1 時，其回傳值為 True。反之當操作數為 0 時， $\mathrm{B}(\cdot)$ 與 $\mathrm{I}(\cdot)$ 將回傳 False。定義 $\oplus$ 為互斥布林運算子,用戶在每次需量交易事件中只能進行一次連續卸載時段的限制式可被描述為

$$\sum_{m=1}^{M-1} \mathrm{I}\left(\mathrm{B}\left(h_{nm}\right) \oplus \mathrm{B}\left(h_{n(m+1)}\right)\right) \le 2 \tag{10}$$

依據式(5)至(10)所定義的需量競價為非凸性二元最佳化問題(Non-convex Binary Optimization Problem)。本研究將透過基因法則(Genetic Algorithm)的改良以及規劃來搜尋每個用戶之最佳卸載方式。

伍、基因法則最佳化應用

傳統二元規劃在解決涉及 N 個競標用戶與 M 個卸載時段的需量競價最佳化問題時需搜尋 $2^{N\times M}$ 個解。由於用戶數量 N 一般非常多，可預計所需運算量亦十分龐大，因此傳統二元規劃在此實際應用上並不可行。本文的需量競價問題為日前交易，無需牽涉及時運算，因此本研究將提出一套改良型基因法則作為更有效率的搜尋方式，以求得需量競價問題之最佳解。

一、染色體設計

在進行染色體編碼時，最直觀方式是將每 n 個用戶在每 m 個卸載時段的二元得標狀態 h_{nm} 合併為一組基因值，然後再將 N 組基因值整合為一條長度為 $N\times M$ 的染色體。此編碼方式雖然頗為簡單，不過產生的染色體長度太大，可造成運算與搜尋效率大幅度降低問題。另外，此傳統編碼方式亦無法保證染色體所產生的解能滿足限制式(9)與(10)。本研究提出一套更有效的編碼方式以克服傳統編碼方式面臨的困境。為更詳細解說本研究提出的編碼方式，圖 1 列出所有用戶在 M 個卸載時段內所涵蓋的有效卸載策略及其相應代碼 l，其中需量交易起迄時間 t^s 與 t^e 個別設為 13：00 與 17：00。定義 L 為 M 個卸載時段內所有有效卸載策略的總數量，則

$$L=\frac{M(M+1)}{2}+1 \tag{11}$$

圖 1 所示的每項有效卸載策略代碼可由 $g\in\Omega$ 表示，其中 $\Omega=\{l|l\in I,0\le l\le(L-1)\}$ 。

當第 n 個用戶提交所能參與卸載起迄時段，即 $\hat{\beta}_n^s$ 與 $\hat{\beta}_n^e$ ，可推導出其卸載時段總數為 $\hat{\chi}_n=\hat{\beta}_n^e-\hat{\beta}_n^s+1$。定義 Φ_n 為一集合，收集第 n 個用戶在 $\hat{\chi}_n$ 時段內所有 L_n 個有效卸載策略代碼，即

$$L_n=\frac{\hat{\chi}_n(\hat{\chi}_n+1)}{2}+1 \tag{12}$$

l	時段 1 (13:00)	時段 2 (14:00)	時段 3 (15:00)	時段 4 (16:00)	時段 5 (17:00)
0	$h_{i1}=0$	$h_{i2}=0$	$h_{i3}=0$	$h_{i4}=0$	$h_{i5}=0$
1	$h_{i1}=1$	$h_{i2}=0$	$h_{i3}=0$	$h_{i4}=0$	$h_{i5}=0$
2	$h_{i1}=0$	$h_{i2}=1$	$h_{i3}=0$	$h_{i4}=0$	$h_{i5}=0$
3	$h_{i1}=0$	$h_{i2}=0$	$h_{i3}=1$	$h_{i4}=0$	$h_{i5}=0$
4	$h_{i1}=0$	$h_{i2}=0$	$h_{i3}=0$	$h_{i4}=1$	$h_{i5}=0$
5	$h_{i1}=0$	$h_{i2}=0$	$h_{i3}=0$	$h_{i4}=0$	$h_{i5}=1$
6	$h_{i1}=1$	$h_{i2}=1$	$h_{i3}=0$	$h_{i4}=0$	$h_{i5}=0$
7	$h_{i1}=0$	$h_{i2}=1$	$h_{i3}=1$	$h_{i4}=0$	$h_{i5}=0$
8	$h_{i1}=0$	$h_{i2}=0$	$h_{i3}=1$	$h_{i4}=1$	$h_{i5}=0$
9	$h_{i1}=0$	$h_{i2}=0$	$h_{i3}=0$	$h_{i4}=1$	$h_{i5}=1$
10	$h_{i1}=1$	$h_{i2}=1$	$h_{i3}=1$	$h_{i4}=0$	$h_{i5}=0$
11	$h_{i1}=0$	$h_{i2}=1$	$h_{i3}=1$	$h_{i4}=1$	$h_{i5}=0$
12	$h_{i1}=0$	$h_{i2}=0$	$h_{i3}=1$	$h_{i4}=1$	$h_{i5}=1$
13	$h_{i1}=1$	$h_{i2}=1$	$h_{i3}=1$	$h_{i4}=1$	$h_{i5}=0$
14	$h_{i1}=0$	$h_{i2}=1$	$h_{i3}=1$	$h_{i4}=1$	$h_{i5}=1$
15	$h_{i1}=1$	$h_{i2}=1$	$h_{i3}=1$	$h_{i4}=1$	$h_{i5}=1$

圖 1　5 個卸載時段內所有有效卸載策略及其相應代碼

舉例來說，假設 $\hat{\beta}_n^s$ 與 $\hat{\beta}_n^e$ 個別設定為 14：00 與 16：00，圖 1 顯示在此卸載時段範圍內共有七種有效卸載策略代碼，即 $\Phi_n=\{0,2,3,4,7,8,11\}$ 。當每 n 個用戶提出其競標時段後，控制中心將產生相應的有效卸載集合 Φ_n ，並儲存於資料庫中。為了搜尋每 n 個用戶之最佳有效卸載策略代碼，每條染色體將由一串基因值 g_n 組成，其中 $g_n\in\Phi_n$ ， $n=1,...,N$ 。定義 ξ^{jk} 為基因法則在第 k 個迭代的第 j 條染色體，則

$$\xi^{jk}=g_1^{jk}\cup g_2^{jk}...\cup g_N^{jk} \tag{13}$$

其中， $g_n^{jk}\in\Phi_n$ ， $n=1,...,N$ 。

為了方便描述主要方法，本研究可在不失一般性情況下將染色體索引子 j 以及基因法則迭代索引子 k 忽略。而每 n 個基因值 g_n 所代表著用戶 n 有效卸載策略代碼則可從圖 3 做查表。定義 $Dec(g_n)$ 為有效卸載策略代碼之解碼運算子，可將基因值 g_n 解讀為用戶 n 在所有競標時段內得標狀態之集合，即 $H_n=\{h_{nm}|h_{nm}\in\{0,1\},n=1,..,N,m=1,...,M\}$ 。舉例來說，圖 1 對照表顯示從集合 $\Phi_n=\{0,2,3,4,7,8,11\}$ 內選擇出來的有效卸載策略代碼 $g_n=7$ 可被解讀為 $H_n=\{0,1,1,0,0\}$ 。

二、適應函數

本研究提出的基因法則根據式(5)至(10)決策出一組最適當的競標用戶以及相應的有效卸載策略，使電力公司最終支付總成本最小化，並確保每卸載時段所收購電力大於或等於其目標卸載量。假設 F 為基因法則適應函數(Fitness Function)以及 λ 為懲罰係數(Penalty Factor)，F 可被定義為

$$F=\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}h_{nm}\sigma_{nm}P_{nm}+\lambda\sum_{m=1}^{M}B_m \tag{14}$$

$$where\ B_m=\begin{cases}0,\ if\ \sum_{n=1}^{N}h_{nm}P_{nm}\geq\Gamma_m\\ \Gamma_m-\sum_{n=1}^{N}h_{nm}P_{nm},\ otherwise\end{cases} \tag{15}$$

適應函數 F 最小化可通過基因法則搜尋達成，而懲罰係數 λ 則用來懲罰沒滿足限制式(6)的染色體。由於適應函數(14)中的第一項式子代表收購需量所應支付的總成本，而第二項式子則表示實際與目標卸載量的差異。因此，本研究提出一套調整懲罰係數 λ 的指南。

定義 $\bar{\sigma}$ 為所有參與需量交易用戶之每度電平均競標價格，即

$$\bar{\sigma}=\frac{\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}\sigma_{nm}}{NM} \tag{16}$$

適應函數(14)中的第一項式子因此可表示為

$$\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}h_{nm}\sigma_{nm}P_{nm}\cong\bar{\sigma}_{nm}\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}h_{nm}P_{nm} \tag{17}$$

依據式(15)，當條件 $\Gamma_m>\sum_{n=1}^{N}h_{nm}P_{nm}$ 被滿足時，可假設

$$\Gamma_m=\kappa\sum_{n=1}^{N}h_{nm}P_{nm} \tag{18}$$

其中 $\kappa>1$ 被定義為一個常數。懲罰係數 λ 需調整至適應函數(14)內的第一與第二式子擁有相似比重。將式(15)、(17)與(18)帶入式(14)，可求得

$$\bar{\sigma}_{nm}\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}h_{nm}P_{nm}\cong\lambda(\kappa-1)\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}h_{nm}P_{nm} \tag{19}$$

因此，懲罰係數值 λ 可如下調整

$$\lambda=\frac{\bar{\sigma}}{\kappa-1} \tag{20}$$

三、交配與突變

根據式(13)所示，每 j 個染色體在第 k 個迭代的基因值 $g_n^{jk}\in\Phi_n$ 代表著每 n 個用戶的有效卸載策略代碼。染色體內的每個基因值可通過交配(Crossover)機制被新的基因值取代。然而，需注意的是透過交配機制產生出來的新基因值必須也是集合 Φ_n 的成員之一。所有基因庫內的染色體可根據其適應值由小到大進行排序。排序後百分之 q 的染色體將被選擇成為父代族群用來生產下迭代族群。交配機制在父代族群內隨機挑選兩個染色體進行交配，以產生新的子代基因。假設在第 k 個迭代時，第 j_1 與第 j_2 父代基因被挑選用來對基因值 $g_n^{j_1k}$ 與 $g_n^{j_2k}$ 進行交配。為確保交配結果為集合 Φ_n 內其中一員，本研究通過基因值 $g_n^{j_1k}$ 與 $g_n^{j_2k}$ 於集合 Φ_n 中相應的序號進行交配。定義 $\mathrm{S}(g_n)$ 為求出基因值 g_n 於集合 Φ_n 中相應序號的運算子。舉例來說，假設位於集合 $\Phi_n=\{0,2,3,4,7,8,11\}$ 的基因值為 $g_n=7$，其相應序號為 $\mathrm{S}(g_n)=5$。定義 $Round(x)$ 為四捨五入運算子，以求出與 $x\in R$ 相應的整數，即 $Round(x)\in I$。在每 $(k+1)$ 個迭代中，被挑選的兩個父代基因可透過以下交配機制產生新的子代基因，即

$$\mathrm{S}\left(g_n^{j(k+1)}\right)=Round\left(b\,\mathrm{S}\left(g_n^{j_1k}\right)+(1-b)\mathrm{S}\left(g_n^{j_2k}\right)\right) \tag{21}$$

$$\mathrm{S}\left(g_n^{(j+1)(k+1)}\right)=Round\left((1-b)\mathrm{S}\left(g_n^{j_1 k}\right)+b\mathrm{S}\left(g_n^{j_2 k}\right)\right) \quad (22)$$

其中 $b\in[0,1]$ 可從均勻分佈隨機產生。需注意的是雖然交配結果為新的序號 $\mathrm{S}(g_n)$，其相應的基因值可從 $\mathrm{S}(g_n)$ 與 Φ_n 推導出。

依據圖 1 的對照表所示，每 n 個用戶的有效卸載策略代碼集合 Φ_n 均有一稱為 $g_n=0$ 的代碼，表示用戶不被選擇做卸載。當所有用戶提供的可卸載量遠遠大於目標卸載量時，此代碼扮演極重要角色，以避免過量卸載情況出現。然而，以式(21)及(22)作為基礎的交配方式產生出序號為 $\mathrm{S}\left(g_n^{j(k+1)}\right)=1$，即其相應於 $g_n^{j(k+1)}=0$ 的交配結果難度頗高。定義需量使用率 α 為需量交易事件總目標卸載量對用戶可提供總卸載量之比例，即

$$\alpha=\frac{\sum_{m=1}^{M}\Gamma_m}{\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}P_{nm}} \quad (23)$$

因此，將序號直接設為 $\mathrm{S}(g_n)=1$(即不做任何卸載)之機率，可被設計成與需量使用率 α 成比例。當越多需量可被選擇做卸載時，α 值越低。假設 ν 為之間將序號直接設為 $\mathrm{S}(g_n)=1$ 之機率，而 $\nu_{\max}$ 與 $\nu_{\min}$ 各別為對應著最大使用率 $\alpha_{\max}$ 及最小使用率 $\alpha_{\min}$ 之不做任何卸載機率，則

$$\nu=\begin{cases}\nu_{\max}, & if\ \alpha<\alpha_{\min}\\ \nu_{\max}-\dfrac{\nu_{\max}-\nu_{\min}}{\alpha_{\max}-\alpha_{\min}}(\alpha-\alpha_{\min}), & if\ \alpha_{\min}\le\alpha\le\alpha_{\max}\\ \nu_{\min}, & if\ \alpha\ge\alpha_{\max}\end{cases} \quad (24)$$

因此，交配機制可重新被定義為以 ν 的機率直接對子代基因值設為 $\mathrm{S}(g_n)=1$。而利用式(21)與(22)產生新的基因值，即 $\mathrm{S}\left(g_n^{j(k+1)}\right)$ 與 $\mathrm{S}\left(g_n^{(j+1)(k+1)}\right)$，則以 $(1-\nu)$ 機率執行。本研究的基因法則採用含菁英政策(Elitism)，即把擁有最小適應值的染色體保留至下一迭代，其餘子代族群的成員則可通過上述交配機制產生。

另外，突變(Mutation)機制可用來對交配機制產生出的各個基因值以 ν_{mut} 的機率進行隨機擾動。定義 $|\Phi_n|$ 為集合 Φ_n 的大小。突變機制可對交配結果 $\mathrm{S}\left(g_n^{j(k+1)}\right)$ 添加一個稱為 $\mu_n\in[1,|\Phi_n|]$ 的隨機數。需注意的是此添加結果可大於 $|\Phi_n|$。因此，本研究採用以下循環機制(Cycling Operation)對突變後的 $\mathrm{S}\left(g_n^{j(k+1)}\right)$ 值進行更新，即

$$\mathrm{S}\left(g_n^{j(k+1)}\right)=\begin{cases}\mathrm{S}\left(g_n^{j(k+1)}\right)+\mu_n, & if\ \mathrm{S}\left(g_n^{j(k+1)}\right)+\mu_n\le|\Phi_n|\\ \mathrm{S}\left(g_n^{j(k+1)}\right)+\mu_n-|\Phi_n|, & otherwise\end{cases} \quad (25)$$

四、移民滅種

當基因法則進行搜尋若干迭代後，父代族群的差異性將逐漸變小，以致無法產生多樣性的子代族群。此現象在低需量使用率 α (即用戶有非常高機率不做任何卸載，$\mathrm{S}\left(g_n^{j(k+1)}\right)=1$)的環境下更為顯著。當基因庫內所有染色體的多樣性逐漸降低時可造成過早收斂(Premature Convergence)問題發生，而導致僅得到局部最佳化(Local Optimum)的解。本研究提出一項稱為移民滅種(Extinction and Immigration)機制，目的在於將最佳染色體保留於基因庫內，而其餘染色體則透過隨機方式被重新初始化。

個別定義 $F_{\min}^k$ 與 $F_{\max}^k$ 為基因庫內染色體族群的最小與最大適應值。每當條件 $\left(F_{\max}^k-F_{\min}^k\right)\le\varepsilon_1$ 於連續 G_{ext} 迭代都被滿足時，表示基因庫內染色體的適應值收斂或面臨停滯。此時，移民滅種機制將被啟動。如最佳染色體適應值在連續 G_{stp} 迭

代都沒被改善，表示基因法則或已搜尋出近似最佳解。在本研究內，當條件$\left(F_{\min}^{k}-F_{\min}^{k-1}\right)\le\varepsilon_2$於連續$G_{stp}$迭代都被滿足時，基因法則搜尋將被終止。

陸、實驗模擬與分析

一、實驗模擬設定

為了模擬基因法則解決需量競價問題的成果，本研究以兩項需量交易事件進行實驗與分析。各項需量交易事件中於第 m 個時段擬收購的目標卸載量如表 1 所示。其中，事件一假設共有 M = 5 個卸載時段，由 N = 500 個用戶參與；而事件二則有 1000 個用戶參與 10 個卸載時段競標。

本研究提出的改良型基因法則(IGA)將與傳統基因法則(RGA)進行搜尋效能比較。所謂 RGA 在進行交配時沒採用式(23)與(24)以適應性方式選擇不卸載策略代碼。基因法則在需量交易事件一與事件二中所需的族群數量各設為 500 與 1000。其它參數設定則如下所示

$$\kappa=1.1, q=10\%, \alpha_{\max}=0.05, \alpha_{\min}=0.05, \nu_{\max}=0.4,$$
$$\nu_{\min}=0.01, \nu_{mut}=0.05, \varepsilon_1=2\times10^4, G_{ext}=200,$$
$$\varepsilon_2=1\times10^4, G_{stp}=100$$

表 1　兩項需量交易事件各個時段之目標卸載量

競價時段 m	目標卸載量 Γ_m (kW)	
	事件一	事件二
1	1500	3700
2	2200	4200
3	3500	4600
4	2900	4900
5	2500	5500
6	-	5400
7	-	4700
8	-	4300
9	-	3900
10	-	3200

另外，本研究亦利用兩項指標比較基因法則應用於需量競價最佳化問題之效能。指標一可用於評估用戶得標卸載量以及目標卸載量的平均卸載差異值$\bar{\Delta}$，即

$$\bar{\Delta}=\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}\left(\Omega_m-\Gamma_m\right) \tag{26}$$

指標二則用來計算出透過基因法則求出的用戶最佳卸載策略所需花費的需量收購總成本η。

二、實驗模擬分析

表 2 顯示 RGA 與 IGA 在兩項需量交易事件中所產生的平均卸載差異值$\bar{\Delta}$與需量收購總成本η。實驗模擬結果顯示本研究提出的 IGA 在兩項需量交易事件所花費的收購總成本η小於 RGA，更具經濟效益。另外，表 2 與圖 2 顯示 IGA 產生的η值小於 RGA。此結果表示經由 IGA 搜尋出來的用戶最佳卸載策略在進行實際卸載時相較於 RGA 更能貼近各個時段的目標卸載量，可避免過量卸載狀況發生以及讓電力公司蒙受過多的經濟損失。

IGA 的搜尋能力在其它不同需量使用率的環境下做更進一步的驗證。假設表 1 內顯示的各個時段目標卸載量Γ_m所給予的需量使用率為α。依據式(23)所示，此需量使用率會隨著Γ_m以同樣的倍數增加。表 3 的模擬結果顯示 IGA 在不同需量使用率的情景下，皆可生產出比 RGA 更小的$\bar{\Delta}$與η值。圖 3 也顯示在不同需量使用率的情況下，經由 IGA 所搜尋出來的實際卸載曲線相較於RGA在大部分時段更為貼近目標卸載曲線。

表 2　平均卸載差異值$\bar{\Delta}$與需量收購總成本η比較

事件	RGA		IGA	
	$\bar{\Delta}$ (kW)	η (NTD'000)	$\bar{\Delta}$ (kW)	η (NTD'000)
一	1814.5	520	163.0	330
二	9067.9	3294	810.8	1253

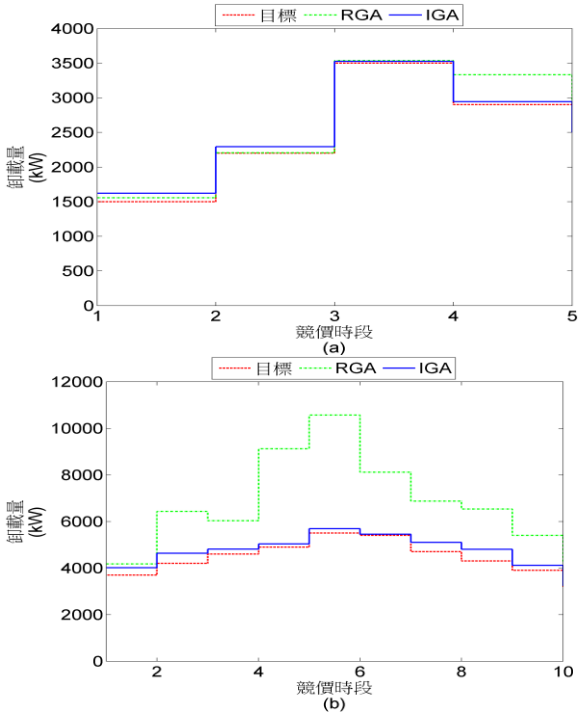


圖 2　RGA 與 IGA 於需量交易(a)事件一以及(b)事件二所產生實際卸載量曲線與目標卸載量的比較

表 3 與圖 3 的模擬結果顯示，在需量使用率稍低(即1.3α 、1.6α 以及 2.0α)的情況下，IGA 與 RGA 的搜尋能力有明顯的分別。在此情景下，用戶所能提供的卸載總和遠遠高於目標卸載量。這表示大部分用戶都將不被選擇做卸載，以避免卸載過量的情況出現。由於 RGA 並不具備由式(23)與(24)所示的適應性選擇不卸載策略代碼機制，僅依賴由式(20)與(21)所示的交配機制產生出用戶不卸載策略代碼(即 $S\left(g_n^{j(k+1)}\right)=1$ 或 $g_n^{j(k+1)}=0$)的難度頗高。反之，IGA 在需量使用率低的情況下可透過式(24)求出較高的不卸載機率 v 。這解釋了為何在需量使用率1.3α 、1.6α 以及 2.0α 的環境下，IGA 產生的 $\bar{\Delta}$ 與 η 值遠勝於 RGA。當需量使用率進一步提升至 2.5α 及 5.0α 時，可發現 IGA 與 RGA 的搜尋能力相近。在此高需量使用率的環境下，依據式(23)與(24)所求出的不卸載機率 v 偏低。由於大部分用戶所能提供的需量將被電力公司收購以滿足所設下的目標卸載量，因此高需量使用率環境下，IGA 內建的適應性選擇不卸載策略代碼機制的影響力甚微。這解釋了為何在需量使用率 2.5α 及 5.0α 的環境下，IGA 與 RGA 所產生的 $\bar{\Delta}$ 與 η 值相近。

表 3　平均卸載差異值 $\bar{\Delta}$ 與需量收購總成本 η 於需量交易事件二中不同需量使用率之比較

需量使用率	RGA		IGA	
	$\bar{\Delta}$ (kW)	η (NTD'000)	$\bar{\Delta}$ (kW)	η (NTD'000)
1.3α	8128.2	3389	1179.6	1681
1.6α	6530.1	3323	1158.8	2043
2.0α	6275.8	3711	2311.5	2767
2.5α	6023.4	4209	3535.8	3562
5.0α	5772.1	6941	3662.4	6412

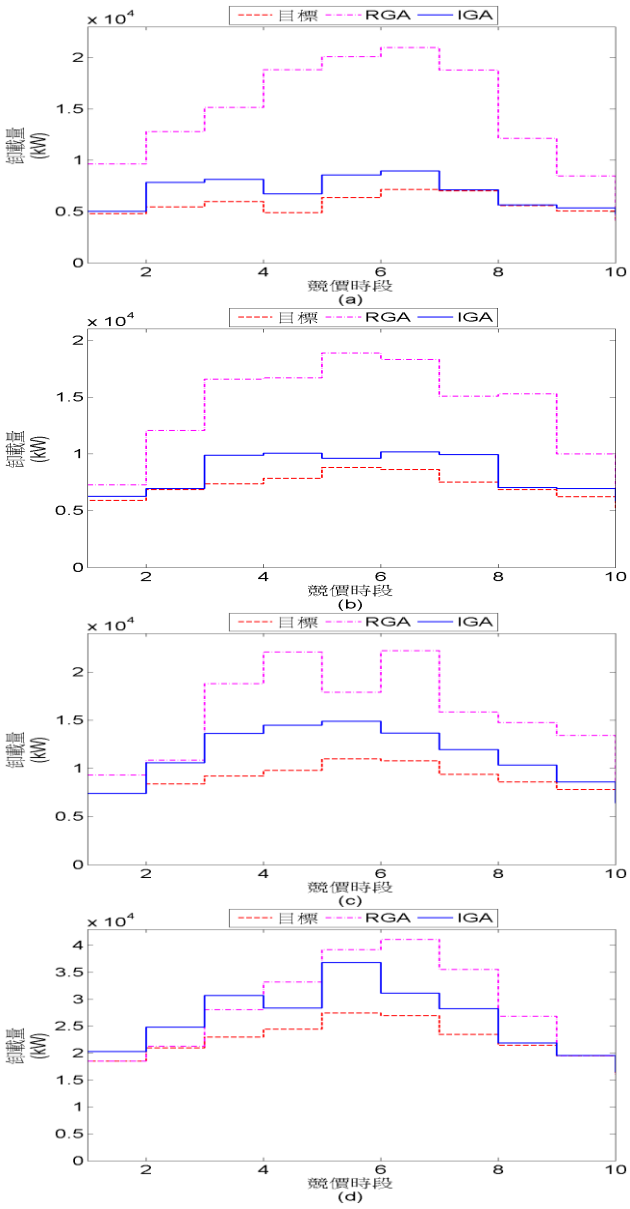


圖 3　RGA 與 IGA 於需量交易事件二中需量使用率為(a)1.3α 、(b)1.6α 、(c)、 2.0α 以及(d) 5.0α 時所產生實際卸載量曲線與目標卸載量的比較

柒、結論

因應近年來電業自由化的逐步實施，需量交易亦逐漸受重視。本文探討於非自由化電力市場的需量交易措施以及其競標價格的制定。另外，本文所探討的競價機制，不僅需達到收購成本最小化，同時亦須確保每個卸載時段所收購的需量亦達到相應的目標卸載量。針對以上目標及限制式，本研究提出一套改良型基因法則，透過更有效的編碼方式及更具適應性的交配機制來搜尋各個用戶之最佳卸載方式，以在最低成本及收購需量兩者之間取得最佳平衡。相較於傳統基因法則，改良型基因法則在不同需量使用率下能求出更低的需量收購總成本及其實際卸載曲線更貼近目標卸載曲線，因此後者可說擁有更為優越的搜尋能力。

捌、參考文獻

[1] M. Newborough and P. Augood, “Demand-side management opportunities for the UK domestic sector,” IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, vol. 146, no. 3, pp. 283-293, May 1999.

[2] A. H. Azit, S. B. Sairan, and G. B. Jasmon, “Feeder load analysis for utility demand side management, ” IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, vol. 136, no. 5, pp. 303-307, Sep. 1989.

[3] “Demand response programs,” Southern California Edison, Jul. 2016, [Online]. Available: https://www.sce.com.

[4] “Demand response programs options,” Pacific Gas and Electric Company, Jul. 2016, [Online]. Available: https://www.pge.com.

[5] “Demand response overviews,” San Diego Gas & Electric Jul. 2016, [Online]. Available: http://www.sdge.com.

[6] R. Toji, “Trends concerning standardization of OpenADR,” NTT Technical Review, vol. 11, no. 12, pp. 1-6, Dec. 2013.

[7] “Electricity market reform (EMR), ” Office of Gas and Electricity Markets, Jul. 2016 [Online]. Available: https://www.ofgem.gov.uk.

[8] 需量競價措施，台灣電力股份有限公司，2016年 7 月，http://www.taipower.com.tw.

[9] M. Parvania and M. Fotuhi - Firuzabad, “Integrating load reduction into wholesale energy market with application to wind power integration,” IEEE System Journal, vol. 6, no. 1, pp. 35-45, Mar. 2012.

[10] M. Parvania, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Shadidehpour, “ISO’s optimal strategies for scheduling the hourly demand response in day-ahead market,” IEEE Transactions on Power System, vol. 29, no. 6, pp. 2636-2645, Nov. 2014.

[11] D. T. Nguyen, “Demand response for domestic and small business customers: a new challenge,” in Proc. IEEE PES T&D Conf. Expo. 2010, Apr. 2010, pp. 1-7.

[12] D. T. Nguyen, M. Negnevitsky, and M. D. Groot, “Pool-based demand response exchange – concept and modelling,” IEEE Transactions on Power System, vol. 31, no. 7, pp. 1247-1257, Jul. 2013.

[13] D. T. Nguyen, M. Negvistsky, and M. D. Groot, “Walrasian market clearing for demand response exchange,” IEEE Transaction of Power System, vol. 27, no. 1, pp. 535-544, Feb. 2012.

[14] L. Gkatzikis, I. Koutsopoulos, and T. Salonidis, “The role of aggregators in smart grid demand response markets,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 31, no.7, pp. 1247-1257, Jul. 2013.

回至目錄頁

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2萬字爲原則（含圖、表，惟圖表篇幅以不超過全文20%爲原則），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。（列名作者至多以4位爲原則，其他協同參與者加註於文後）
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 *　　楊中旗 **　　蘇文華 ***
Yang, Shyh-Shyong　　Yang, George　　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
** 育碁數位科技公司
*** 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)……
……。

伍、誌謝

*本篇其他協同參與者：OOO、OOO、OOO

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。

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**

回至目錄頁

MONTHLY JOURNAL OF TAIPOWER'S ENGINEERING

Vol.820 December 2016

FOSSIL POWER GENERATION：

Short-term Unit Commitment of Steam-turbine……Lu, Tai-Ken et al.……(1)

TRANSMISSION AND TRANSFORMATION：

The Special Cases of Shield Tunneling Project Built by Dept. of Transmission & Substation Projects, TPC……Chu, Wen-Yen et al.……(11)

Precision Analysis for Laser Scanner to Structure Monitoring…… Yang, Jin-Shyr et al.…… (31)

DISTRIBUTION：

Study of Integration Techniques for Upgrading Distribution Systems in Campus……Yang, Nein-Che et al.……(40)

Research on High Voltage AMI Data Applying Data Classification Technology……Wu, Chen-Han et al.……(53)

ENERGY AND ENVIRONMENT：

Monthly Billing and Temperature Data to Review the Effectiveness of Taipower's Demand Response……Lin, Su-Chen……(62)

INFORMATION AND COMPUTER：

A Study of the Application of an Open Mapping Platform in Distribution Mapping Information for Providing Geospatial Data Network Services……Tsai, Sen-Chou et al.……(72)

OTHERS：

Studies on Demand Bidding Optimization…… Yao, Leeh-Ter et al.…… (93)

ISSN 0494-5468

GPN： 2003700005

定價：新台幣100元