



台電工程月刊

MONTHLY JOURNAL OF TAIPOWER'S ENGINEERING
 第815期 105年7月號 Vol.815 July 2016

核能發電：

含圓周向裂紋漸縮管之彈塑性破壞分析.....蔡柏軍 等.....(1)

輸 變 電：

FRP纖維筋在潛盾工程之應用.....王俊槐 等.....(15)

使用「3D分析圖台」進行架空輸電線路之規劃設計.....林東佑 等.....(24)

配 電：

配電線路因異常電壓引起用戶器具燒損之保護研究.....卓明遠 等.....(33)

電動車與充電站營運模式對電能補充影響分析研究.....左峻德 等.....(47)

能源與環境：

火力發電廠細懸浮微粒檢測及空污排放外部成本估算.....蔡顯修 等.....(61)

具自動需量反應之用戶能源控制器開發與研製.....林士允 等.....(70)

資訊與電腦：

售電業務及客戶服務相關系統整合可行性研究.....楊新全 等.....(82)

誠信 關懷 服務 成長
 Integrity Caring Service Growth



台灣電力公司編印



台電工程月刊

第 815 期
中華民國 37 年 9 月創刊
中華民國 105 年 7 月出版

【出版宗旨】

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

【發行人】：朱文成
【主任委員】：蒯光陸
【總編輯】：林正義
【副總編輯】：王金墩
【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 徐真明 郭政謙 王金墩 呂天泰 沈宗華
吳瑞賢 何錦洪 林蒼喬 花敬翰 涂秀錦 侯明亮 洪紹平
范振理 曾重富 楊金石 蒲冠志 廖鴻徹 蔡世育 劉建勳
劉至瑄 鄭錦榮 鍾年勉 鍾輝乾
【顧問】：王振勇 王耀庭 李清雲 李清課 吳士襄 陳永享 陳慰慈
陳建益 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 號執照登記為雜誌交寄

含圓周向裂紋漸縮管之彈塑性破壞分析

Elastic-Plastic Fracture Analysis for Circumferentially Cracked Reducers

蔡柏軍*
Tsai, Bor-Jiun

陳建忠*
Chen, Jien-Jong

張漢洲**
Chang, Han-Jou

謝楊正**
Xie, Yang-Zheng

(101~104 年度研究計畫論文)

摘要

本研究針對含有圓周向內表面(半橢圓形或等深度)或穿壁裂紋之漸縮管，使用有限元素分析計算該結構在彎矩與軸向拉力負荷下之裂紋驅動力—J 積分值。透過有限元素軟體 Abaqus 配合彈塑性破壞力學理論，並藉由參數化的程式輸入檔可快速建立不同案例的分析模型，經由這些案例的分析結果可知，管件與裂紋的幾何性質、材料特性以及外加負荷均會影響其 J 積分結果。利用本研究所建立的劣化漸縮管自動建模程序，設定將漸縮管兩側連接相同直徑與壁厚之直管，即可建立含裂紋直管之 1/2 分析模型，計算劣化直管沿裂紋前緣之 J 積分值，再與先前已驗證過的含裂紋直管之 1/4 分析模型的研究結果相互比對，其計算結果均相當吻合，驗證本研究所建立模型之正確性，並透過受負荷後裂紋的開閉行為研究，確立分析模型裂紋面設定接觸對(Contact Pairs)之必要性。

Abstract

In this study, a 3-D automatic elastic-plastic finite element model is established to accurately predict the J-integral value of an arbitrary reducer with an embedded circumferential internal surface (semi-elliptical or constant depth) crack or through-wall crack under bending and axial force. The contact pairs are used on the crack surfaces to simulate the actual contact behaviors of the crack model under load. In order to verify the accuracy of the proposed elastic-plastic finite element models, the cracked straight pipe models are created according to a special modeling procedure for a flawed reducer. The J-integral values along the crack front of surface crack or through-wall crack are calculated and compared with those of the straight pipe models which have been verified in the previous published studies. Based on the comparison of computed results, the accuracy of the numerical models established in this study is confirmed. Good confidence in using the 3-D elastic-plastic finite element analysis for circumferentially cracked reducers is established in this work.

關鍵詞(Key Words)：圓周向表面裂紋漸縮管(Circumferentially Surface Cracked Reducer)、圓周向穿壁裂紋漸縮管(Circumferentially Through-Wall Cracked Reducer)、J 積分值(J-Integral Value)、彈塑性破壞力學(Elastic-Plastic Fracture Mechanics)。

*原子能委員會核能研究所

**台灣電力公司核能發電事業部核能安全處

壹、前言

核能電廠經過多年運轉，結構組件開始老化、劣化。就管路系統而言，由於材質特性以及焊接熱影響，管路焊道附近最容易產生裂紋。在國內的運轉經驗中，過去也偶爾檢測出管路裂紋，例如：1999 年核二廠因九二一大地震停機，二日後啟動前的例行檢查發現冷凝系統交換器發生管路洩漏，經調查發現相關管路因地震引發的劇烈震動而產生位移，導致冷卻水洩漏；2002 年核二廠於第十五次大修期間檢查部份再循環管線焊道時，即發現部分焊道有圓周向晶間應力腐蝕龜裂現象；2007 年核三廠 2 號機的調壓槽噴灑管路，亦在處理「微漏」問題時，發現管路老化龜裂現象。此等案例顯示管路可能因使用經年導致材質劣化，或因突發性外力負荷增加而產生各種裂紋，尤其圓周向裂紋有造成斷管的疑慮，更是研究核電廠管路安全的重要課題。然而，裂紋雖然會損害結構強度，但不一定立即有安全上的顧慮。如何判斷裂紋安全性，進而決定劣化管路仍可繼續使用、必須修補或是換新，不僅影響電廠例行大修工期，更進而影響發電成本。

管路裂紋破壞主要有三種形式。一是裂紋如玻璃破裂般迅速成長，稱為線彈性破壞，以裂紋前緣應力強度因子(Stress Intensity Factor)為判斷因素；二是裂紋開始不穩定成長時，裂紋附近結構已有明顯塑性變形，必須考慮裂紋塑性行為影響，稱為彈塑性破壞，以環繞裂紋之 J 積分值為安全判定準則^[1]；另一則是管子材料有相當韌性，破壞機制為龜裂斷面完全塑性化，形成塑性鉸(Plastic Hinge)而導致結構喪失負荷承受功能，此種破壞評估方法稱為極限負荷法(Limit Load)。美國 ASME B&PV 法規 Section XI 即規範服役中電廠的劣化組件在前述三種破壞模式下的安全評估作法，以分別應用於碳鋼與不鏽鋼組件的安全分析。一般不鏽鋼組件因為材質特性的關係多以後兩種方式評估其安全性，而碳鋼材

質比起不鏽鋼雖較脆，但是實際經驗顯示傳統線彈性破壞力學過於保守，無法正確描述碳鋼管路破壞行為。為了確實掌握劣化管路安全，各核能工業國多年來致力於劣化管路研究^[2,3,4]。美國 NRC 則數次成立國際合作計畫^[5]進行管路裂紋行為研究，發展以 J 積分為基準的管路彈塑性破壞力學評估方法，並執行為期數年的大尺寸管路實驗以驗證其正確性。

J 積分法是由 Rice 於 1968 年首先提出，他在應用力學雜誌(Journal of Applied Mechanics)上發表文章：“A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks”，建立 J 積分的概念。J 積分是一個定義明確、理論嚴密的應力應變參量，它的實驗測定也比較簡單可靠。此外，J 積分還具有與積分路徑無關這一特點，故可避開裂紋尖端處極其複雜的應力應變場。而且它不僅適用於線彈性，也適用於彈塑性。近十幾年來，隨著計算機的迅速發展和日益普及，各種複雜的含裂紋結構的 J 積分都已經能夠計算。美國電力研究所(EPRI)對 J 積分理論進行了大量研究，於 1980 年代初提出了一種彈塑性破壞分析的工程方法，並提供了各種含裂紋結構 J 積分完全塑性解的塑性破壞手冊，解決了 J 積分的工程計算問題，從而推展了 J 積分的工程應用。進入 1980 年代中後期，國際上的壓力容器缺陷評定標準，紛紛採用以 J 積分理論為依據進行修訂。到 1990 年代初，J 積分理論在壓力容器彈塑性破壞分析中，已基本取代裂紋開口位移(Crack Opening Displacement)理論而成為主流。

一般管路裂紋在深度方面可分為表面裂紋(Surface Crack)及穿壁裂紋(Through-wall Crack)，表面裂紋可再分成半橢圓形(Semi-Elliptical)與等深度(Constant-Depth)兩類，而在方向上可分為軸向裂紋(Axial Crack)及圓周向裂紋(Circumferential Crack)，但是不論劣化管路具有何種裂紋，基本上無法以解析解方式得到裂紋 J 積分值，多半是利用如有限元素法等數值

方法計算 J 積分值，或進一步將計算結果整理成簡易數學公式方便工程師使用。例如 Kumar 等人^[6]針對含圓周向穿壁裂紋直管，以及 Zahoor^[7]考慮具有表面裂紋直管，兩者皆發展出 J 積分值計算公式。但是這些公式通常僅適用於某些尺寸管子或是材料性質，其他管子之 J 積分值則須利用現有資料內插得到，當現有資訊有限時，內插 J 值之準確度則有待商榷。

經過數十年的研究發展，有關含裂紋直管的 J 積分值工程計算式已大致發展完備，含裂紋肘管的彈塑性研究也獲致多項初步的成果，其中，Zahoor^[8]曾依據 Griffith^[9]的實驗結果分析並推導出含軸向及圓周向穿壁裂紋肘管的極限負荷計算公式；Chattopadhyay 等人^[10]也曾利用有限元素分析配合實驗的結果，探討含軸向與圓周向穿壁裂紋肘管在彎矩負荷下之結構行為；Saxena and Ramakrishnan^[11]也曾應用有限元素分析法，探討含軸向與圓周向穿壁裂紋肘管在彎矩負荷下，裂紋開始發生不穩定成長時的負荷狀況與 J 積分值。但針對含裂紋漸縮管的結構行為則尚在研究發展當中，目前尚未發現國內外的期刊雜誌或會議論文有討論漸縮管彈塑性破壞分析的相關文獻。

為確實明瞭含圓周向內表面裂紋(半橢圓形或等深度)或穿壁裂紋漸縮管在彎矩與軸向拉力負載下之結構行為，並應用彈塑性破壞力學理論計算裂紋驅動力(J 積分值)，本研究針對含圓周向裂紋漸縮管，發展 3D 有限元素分析模型以探討劣化漸縮管之結構行為並精確計算裂紋 J 積分值，利用本研究所建立的劣化漸縮管自動建模程序，設定將漸縮管兩側連接相同直徑與壁厚之直管，即可建立含裂紋直管之 1/2 分析模型，計算劣化直管沿裂紋前緣之 J 積分值，再與先前已驗證過的含裂紋直管之 1/4 分析模型的研究結果相互比對，其計算結果均相當吻合，驗證本研究所建立模型之正確性，並透過受負荷後裂紋的開閉行為研究，確立分析模型裂紋面設定接觸對(Contact Pairs)之必要性。

貳、含圓周向內表面裂紋漸縮管

本章節首先介紹含圓周向內表面裂紋漸縮管一些相關幾何參數之定義與管路材料應力-應變性質表示式，再介紹本研究針對此類劣化管路所發展的有限元素分析模型，以及模型之驗證方式與結果，最後說明在此分析模型之裂紋面設定接觸對的必要性。

一、含圓周向內表面裂紋漸縮管之幾何參數

圖 1 為本研究所要分析的劣化管路示意圖，左右兩側是兩支不同管徑與壁厚的直管，分別焊接在中間的漸縮管之左右兩端而形成連通的管道，漸縮管又可分為偏心與同心兩種形式，圖 1 所示為偏心漸縮管連接的管路，左管與右管的軸線有一高度差，若使用同心漸縮管則左管與右管的軸線會在同一直線上。

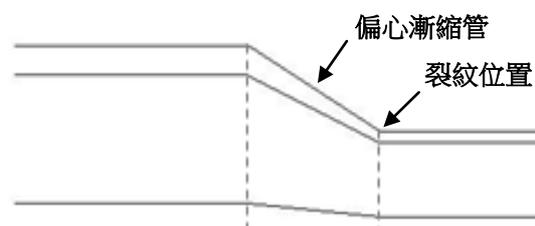


圖 1 含裂紋漸縮管連接管路示意圖

現假設漸縮管與其中一支直管銜接部位的內壁有一個半橢圓形或等深度圓周向內表面裂紋 (Semi-Elliptical or Constant Depth Circumferential Internal Surface Crack)，圖 2 為銜接部位含半橢圓形內表面裂紋沿圓周向剖開之斷面圖， R_i 為管子內半徑， t 為管壁厚度， r 為管子平均半徑， a 代表裂紋深度， $2c$ 為裂紋在管子內壁圓周方向延伸的長度。裂紋前緣是採用 Bergman^[12]提出的圓柱轉換橢圓(Cylindrically Transformed Ellipse)方式來描述，裂紋前緣任何一點的 x 座標與 y 座標(x 軸與 y 軸的定義方式請參考圖 2)可以利用下列公式計算：

$$x = (R_i + a \sin \phi) \sin \frac{c \cos \phi}{R_i} \quad (1)$$

$$y = (R_i + a \sin \phi) \cos \frac{c \cos \phi}{R_i} \quad (2)$$

參數 ψ 稱為表面裂紋前緣角(Surface Crack Front Angle)，當 $\psi = 0$ 或 π 代表裂紋兩端與管內壁的交接處，而 $\psi = \pi/2$ 則是裂紋最深的位置。

圖 3 為銜接部位含等深度內表面裂紋沿圓周向剖開之斷面圖，圖中斜線部分為裂開區域。管子內、外半徑分別為 R_i 、 R_o ，管壁厚度為 t ，裂紋在圓周方向涵蓋角度為 2θ ，裂紋深度為 a 。

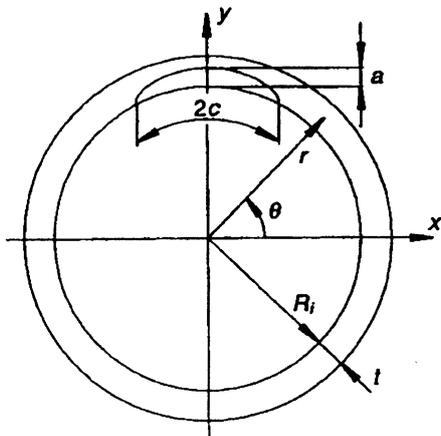


圖 2 半橢圓形圓周向內表面裂紋管路各項幾何參數示意圖

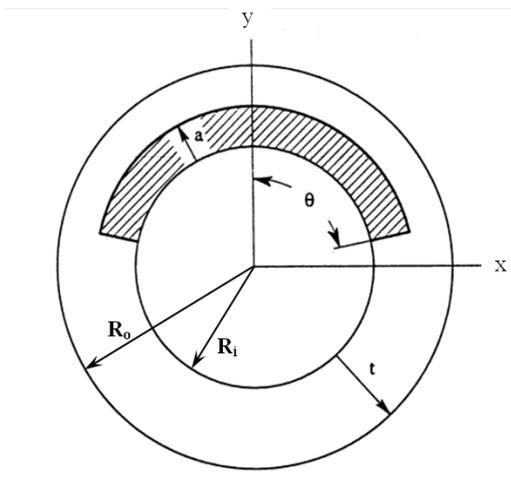


圖 3 等深度圓周向內表面裂紋管路各項幾何參數示意圖

裂紋 J 積分值大小主要與兩項因素有關，一

是裂紋大小，另一則是龜裂斷面所承受之負荷值。本研究目的在發展彈塑性有限元素分析模型以精確計算此類劣化管路在彎矩與軸向拉力負荷下之 J 積分值。

二、材料性質定義

不同材料特性會影響 J 積分值計算結果，主要與材料應力-應變性質有關。為了方便計算含裂紋管路之 J 積分值，一般使用下列式子表示材料應力-應變特性：

$$\varepsilon / \varepsilon_0 = \sigma / \sigma_0 + \alpha (\sigma / \sigma_0)^n \quad (3)$$

此式子稱為 Ramberg-Osgood 表示式。式中 σ_0 稱為參考應力，通常以材料的降伏應力(Yield Stress)作為參考應力； $\varepsilon_0 = \sigma_0 / E$ 為對應之參考應變，E 為材料彈性係數又稱為楊氏係數(Young's Modulus)； α 與 n 則為材料 Ramberg-Osgood 參數，n 又稱為材料的應變硬化指數 (Strain Hardening Exponent)。

三、有限元素分析模型簡介

本研究使用 Abaqus 有限元素程式模擬分析含半橢圓形或等深度圓周向內表面裂紋的漸縮管在彎矩與軸向拉力負荷下之行為，並計算裂紋 J 積分值。以 Abaqus 編號 C3D20R 的三維固體元素來模擬此類劣化漸縮管，此元素有 20 個節點，如圖 4 所示，該元素採用減化積分點的高斯積分且每個節點均有三個自由度，分別為 x、y 及 z 方向。基於管路結構的對稱性，分析模型僅需考慮 1/2 管路，再配合對稱邊界條件以模擬管路的對稱行為。圖 5(a)與圖 5(b)為本研究所建立的含裂紋偏心與同心漸縮管有限元素分析模型，右側直管的外直徑 $D_o^R = 2.375$ in，壁厚 $t^R = 0.218$ in，左側直管的外直徑 $D_o^L = 4.5$ in，壁厚 $t^L = 0.337$ in，漸縮管的長度為 4 in。

半橢圓形或等深度圓周向內表面裂紋發生於漸縮管與右管連接處，圖 6 所示為裂紋深度 $a =$

0.3t (即 $a = 0.0654 \text{ in}$)，半裂紋長度 $c = 6a$ (即 $c = 0.3924 \text{ in}$) 的半橢圓形圓周向內表面裂紋，其裂紋所在位置與裂紋前緣的元素分割情形，圖 7 顯示

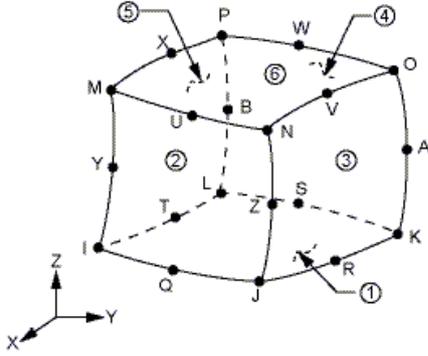


圖 4 Abaqus 編號 C3D20R 的三維固體元素

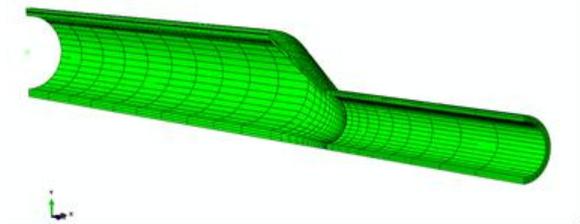


圖 5(a) 含圓周向內表面裂紋偏心漸縮管有限元素分析模型

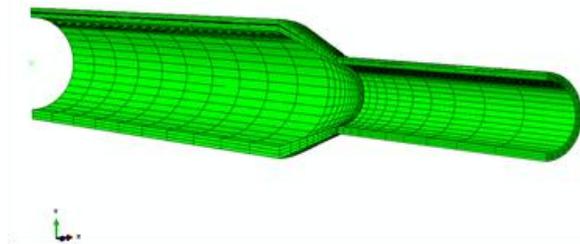


圖 5(b) 含圓周向內表面裂紋同心漸縮管有限元素分析模型

裂紋深度與半裂紋長度同樣為 0.3t 與 6a (對應之半裂紋角 $\theta = 23.2^\circ$) 的等深度裂紋其裂紋前緣的元素分割情形，比較圖 7 與圖 8 即可看出除了裂紋前緣節點位置稍有不同外(一為半橢圓形另一為等深度)，兩模型元素的分割方式完全相同，均是將三維固體元素排列成一圈一圈環繞裂

紋前緣且分布密集的元素環(Element Ring)，以精確地計算出裂紋前緣附近的應力狀態，進而正確地計算 J 積分值，再配合對稱邊界條件的設定，可以快速的建立裂紋深度 $a = 0.2t \sim 0.8t$ ，半裂紋長度 $c = 1a \sim 8a$ 的含半橢圓形或等深度圓周向內表面裂紋漸縮管的有限元素分析模型。例如，圖 8 與圖 9 分別顯示裂紋深度 $a = 0.2t$ 半裂紋長度 $c = 3a$ 的半橢圓形與等深度(對應之半裂紋角 $\theta = 7.7^\circ$) 圓周向內表面裂紋前緣有限元素分割圖；圖 10 與圖 11 分別顯示 $a = 0.5t$ 、 $c = 4a$ 的半橢圓形與等深度(對應之半裂紋角 $\theta = 25.8^\circ$) 圓周向內表面裂紋前緣有限元素分割圖；圖 12 與圖 13 分別顯示 $a = 0.8t$ 、 $c = 8a$ 的半橢圓形與等深度(對應之半裂紋角 $\theta = 82.5^\circ$) 圓周向內表面裂紋前緣有限元素分割圖。

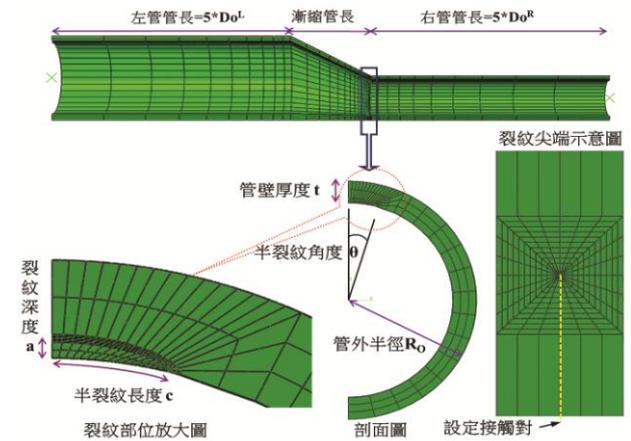


圖 6 $a=0.3t$ 、 $c=6a$ 半橢圓形圓周向內表面裂紋所在位置與裂紋前緣有限元素分割圖

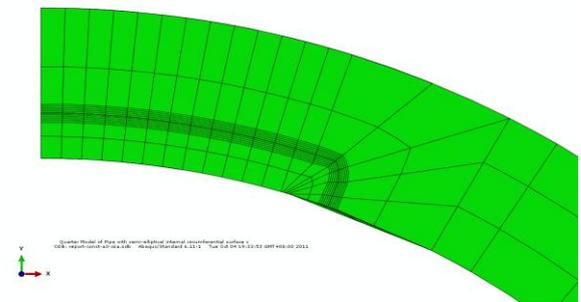


圖 7 $a=0.3t$ 、 $c=6a$ (對應之 $\theta = 23.2^\circ$) 等深度圓周向內表面裂紋前緣有限元素分割圖

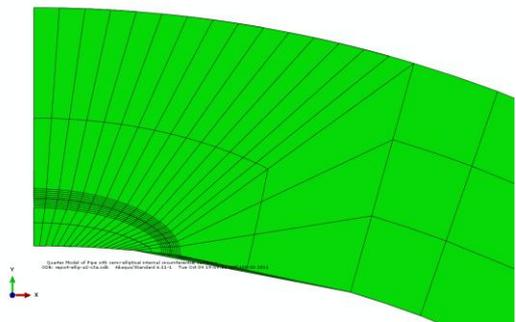


圖 8 $a=0.2t$ 、 $c=3a$ 半橢圓形圓周向內表面裂紋前緣有限元素分割圖

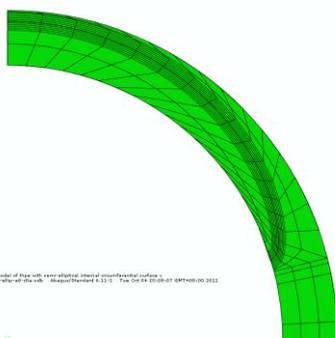


圖 12 $a=0.8t$ 、 $c=8a$ 半橢圓形圓周向內表面裂紋前緣有限元素分割圖

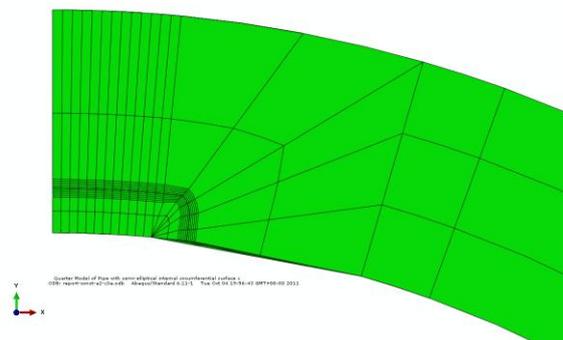


圖 9 $a=0.2t$ 、 $c=3a$ (對應之 $\theta = 7.7^\circ$)等深度圓周向內表面裂紋前緣有限元素分割圖

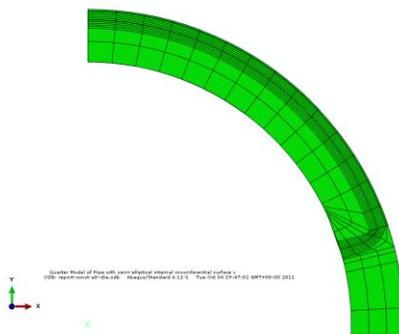


圖 13 $a=0.8t$ 、 $c=8a$ (對應之 $\theta = 82.5^\circ$)等深度圓周向內表面裂紋前緣有限元素分割圖

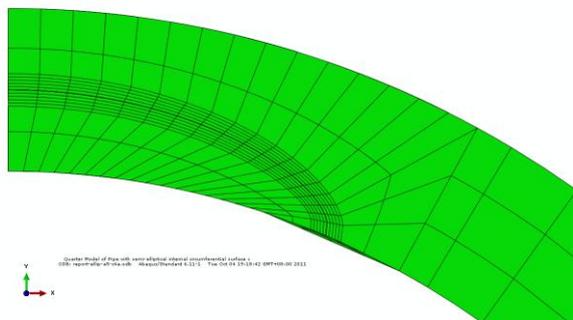


圖 10 $a=0.5t$ 、 $c=4a$ 半橢圓形圓周向內表面裂紋前緣有限元素分割圖

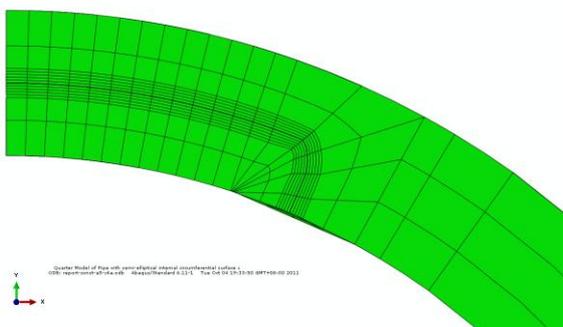


圖 11 $a=0.5t$ 、 $c=4a$ (對應之 $\theta = 25.8^\circ$)等深度圓周向內表面裂紋前緣有限元素分割圖

不論是半橢圓形或等深度裂紋，裂紋開裂的兩個面設定為接觸對(Contact Pairs)，以模擬裂紋閉合時兩裂紋面的接觸行為。漸縮管左右兩邊直管的模型長度均為其外直徑的五倍。在管路模型軸向剖面的所有節點設定對稱邊界條件，以模擬管路結構的對稱行為。將左直管遠離裂紋端的斷面上所有節點設為固定(Fixed)的邊界條件，右直管遠離裂紋端斷面設定為剛性平面(Rigid Surface)，斷面中心點定義為參考點，在此參考點施加彎矩 M 以模擬管路承受彎矩負荷的情況，如圖 14 所示，在此斷面施加軸向均佈拉力 p 以模擬管路承受軸向拉力負荷的情況， $p =$ 管子承受的軸向拉力/管子的截面積。應用 Abaqus 參數化輸入檔(Input File)的設定，分析所需的幾何參數，包括：左直管的外直徑 D_o^L ，壁厚 t^L ，右直管的外直徑 D_o^R ，壁厚 t^R ，漸縮管的長度 L ，裂紋深度 a ，半裂紋長度 c 或半裂紋角度 θ ，外

加負載彎矩 M 與軸向拉力 P ，均可由使用者依據分析條件在 Abaqus 輸入檔中任意修改，快速的建立各種含半橢圓形或等深度圓周向內表面裂紋漸縮管的彈塑性有限元素分析模型。

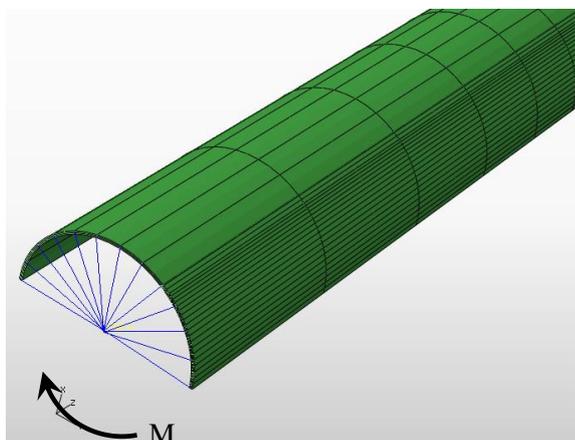


圖 14 直管末端設定剛性面施加彎矩示意圖

四、有限元素分析模型驗證

應用彈塑性破壞力學理論，計算裂紋前緣 J 積分值以評估劣化管路安全裕度的技術，在國際上仍屬較新的研究領域，目前尚未發現國內外的期刊雜誌或會議論文有討論漸縮管彈塑性破壞分析的相關文獻，為驗證本研究所建模型的正確性，以本研究發展的漸縮管建模方式，建立含半橢圓形或等深度圓周向內表面裂紋直管的分析模型(在自動建模程式中將模型左管與右管設定相同的外徑與壁厚即可自動建立劣化直管的分析模型)，再與先前已發展完成此兩類劣化直管模型^[13-18]的計算結果進行比對，若兩者結果相同，即可證明本研究發展的模型之元素分割方法、邊界條件的設定方式及負載的施加方式均正確無誤，從而驗證模型的正確性。

圖 15 所示為應用本研究漸縮管建模方式所建立的含裂紋直管的 1/2 模型，以及已經過驗證的含裂紋直管 1/4 模型，並在兩種模型上施加相同的彎矩或軸向拉力負載，模型各項幾何條件設定為：直管外半徑 $R_o = 152.4 \text{ mm}$ (6 in)，壁厚 $t = 25.4 \text{ mm}$ (1 in)，半橢圓形表面裂紋的深度分別為壁厚的 0.2、0.5 與 0.8 倍，半裂紋長度均為深度

的 6 倍，亦即， $a = 0.2t = 5.08 \text{ mm}$ (0.2 in)、 $c = 6a = 30.48 \text{ mm}$ (1.2 in)； $a = 0.5t = 12.7 \text{ mm}$ (0.5 in)、 $c = 6a = 76.2 \text{ mm}$ (3 in)； $a = 0.8t = 20.32 \text{ mm}$ (0.8 in)、 $c = 6a = 121.92 \text{ mm}$ (4.8 in)。等深度裂紋的深度同樣設為 $a = 0.2t$ 、 $0.5t$ 與 $0.8t$ ，半裂紋長度同樣設定為深度的 6 倍，因此，半裂紋長度對應的等深度裂紋之半裂紋角分別為 $a = 0.2t$ 、 $\theta = 13.8^\circ$ ； $a = 0.5t$ 、 $\theta = 34.4^\circ$ ； $a = 0.8t$ 、 $\theta = 55^\circ$ 。材料參數設定為：楊氏係數(E)與參考應力(σ_o)分別為 206.852 GPa ($30 \times 10^6 \text{ psi}$)與 206.852 MPa (30000 psi)，Ramberg-Osgood 參數 $\alpha = 2$ ，應變硬化指數 $n = 5$ ，波松比 0.3。圖 16 顯示含半橢圓形裂紋承受 $113000 \text{ N}\cdot\text{m}$ ($1 \times 10^6 \text{ lb}\cdot\text{in}$)彎矩負載，裂紋深度分別為壁厚的 0.2、0.5 與 0.8 倍條件下，1/4 與 1/2 直管模型計算所得到的裂紋前緣的 J 積分值，橫座標為裂紋前緣角 ψ ， $\psi = 0^\circ$ 代表裂紋與管內壁交接處而 $\psi = 90^\circ$ 則是裂紋最深的位置，也就是圖 2 中座標為 $(0, R_i + a)$ 之點。圖 17 為含半橢圓形裂紋承受 4448 N (1000 lb)軸向拉力負載，裂紋深度分別為壁厚的 0.2、0.5 與 0.8 倍條件下，1/4 與 1/2 直管模型計算所得到的裂紋前緣的 J 積分值。圖 18 顯示含等深度裂紋受 $113 \text{ N}\cdot\text{m}$ (1000 lb-in)彎矩負載，裂紋深度分別為壁厚的 0.2、0.5 與 0.8 倍條件下，1/4 與 1/2 直管模型計算所得到的裂紋前緣的 J 積分值，橫座標為裂紋尖端編號(Crack Tip Number)，Tip 12 為裂紋角 θ 最大的位置(參考圖 3)，Tip 37 為裂紋角 $\theta = 0$ 的位置，也就是圖 3 中座標為 $(0, R_i + a)$ 之點。圖 19 為含等深度裂紋承受 4448 N (1000 lb)軸向拉力負載，裂紋深度分別為壁厚的 0.2、0.5 與 0.8 倍條件下，1/4 與 1/2 直管模型計算所得到的裂紋前緣的 J 積分值，比較圖 16 至 19 可以看出，不論是半橢圓形或等深度裂紋，也不論承受彎矩或軸向拉力負載，1/4 與 1/2 直管模型的計算結果極為吻合，代表本研究發展此兩類含裂紋漸縮管之建模程序，無論元素之分割方法、邊界條件的設定方式及負載的施加方式均正確無誤。

為驗證裂紋面接觸對的設定正確與否，同樣

應用本研究漸縮管建模方式所建立的含圓周向內表面裂紋直管的 1/2 模型，在右管端面施加單位軸向壓力負載，查看裂紋兩面對應位置節點的位移是否一致？並檢驗直管的壓縮應變是否符合材料力學公式計算結果？從而驗證本研究模型的正確性。如圖 20 所示，直管外直徑 $D_o=2.375$ in，壁厚 $t=0.218$ in，等深度圓周向內表面裂紋之裂紋深度 $a=0.5t=0.109$ in，半裂紋角度 $\theta=60^\circ$ ，管材設定為彈性材料，楊氏係數 30×10^6 psi，波松比 0.3，施加的單位軸向壓力為 $p=300000$ psi。分析結果顯示，裂紋兩面對應位置節點的位移量完全相同，直管受力前總長度為 27.8008 in (左管管長+漸縮管管長+右管管長)，受力後長度縮短 0.277651 in，壓縮應變 $\epsilon=0.277651 / 27.8008=0.0099872$ ，與材料力學公式解 $\epsilon=300000/E=0.01$ 吻合，由此驗證本研究模型在裂紋面接觸對的設定方式正確無誤。

經由上述驗證結果可以確認本研究模型的正確性，可將本研究發展的含圓周向內表面裂紋漸縮管彈塑性有限元素分析模型用於此類劣化管路的 J 積分計算與裂管安全評估工作。

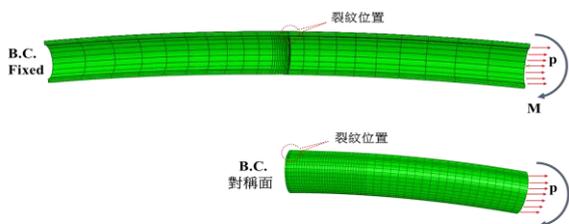


圖 15 本研究所建 1/2 直管與已經過驗證 1/4 直管模型承受相同負載分析示意圖

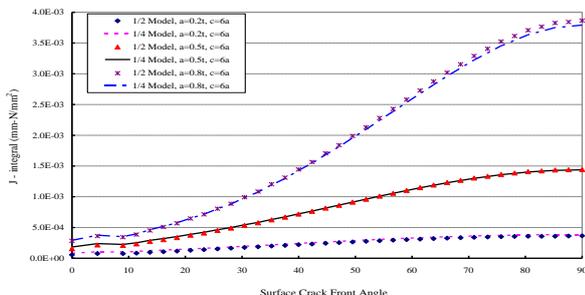


圖 16 沿半橢圓形裂紋前緣比較本研究 1/2 直管與已驗證之 1/4 直管承受彎矩負載 J 積分計算結果

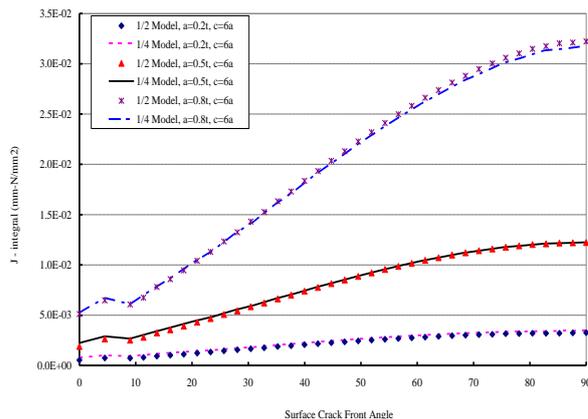


圖 17 沿半橢圓形裂紋前緣比較本研究 1/2 直管與已驗證之 1/4 直管承受軸向拉力負載 J 積分計算結果

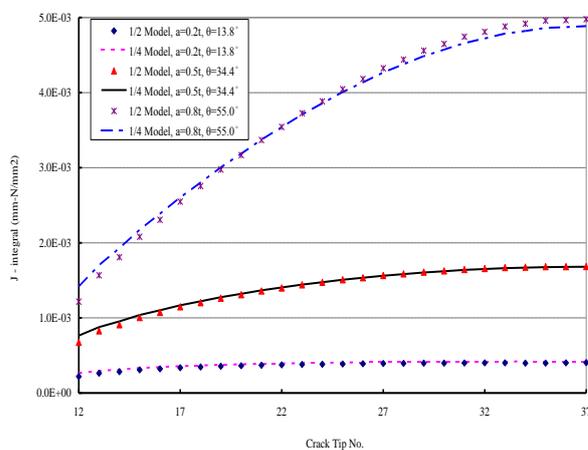


圖 18 沿等深度裂紋前緣比較本研究 1/2 直管與已驗證之 1/4 直管承受彎矩負載 J 積分計算結果

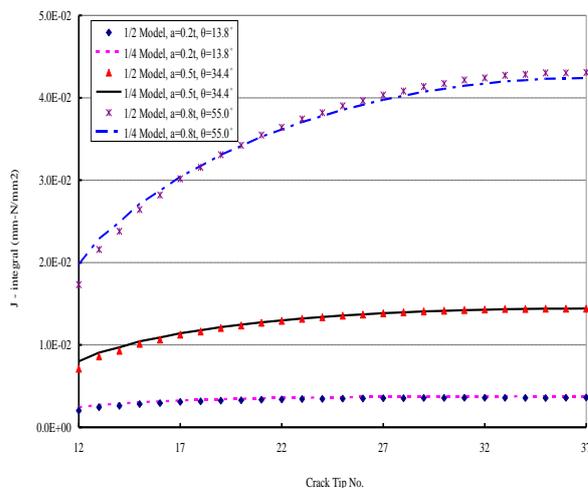


圖 19 沿等深度裂紋前緣比較本研究 1/2 直管與已驗證之 1/4 直管承受軸向拉力負載 J 積分計算結果



圖 20 管路端面施加均佈壓力以驗證裂紋接觸對之設定示意圖

五、裂紋面設定接觸對之必要性

含圓周向內表面裂紋的漸縮管承受負載時，尤其是彎矩負載，裂紋面會發生接觸(Contact)的現象，圖 21 顯示偏心漸縮管承受正、負彎矩(正與負僅表示彎矩作用在相反方向，並無實際物理意義)時的變形結果，圖 22 顯示在分析模型之裂紋面未設定接觸對的劣化偏心漸縮管(裂紋深度 $a = 0.2t$ 、半裂紋角度 $\theta = 13.8^\circ$)承受正彎矩負載時，裂紋面會發生穿越(Penetration)的現象(如圖虛線部位所示)，由此可見，必須在分析模型的裂紋面設定接觸對，才能正確地模擬此類劣化漸縮管承受負載後的結構行為，從而獲得正確的應力分布狀態並導出精確的裂紋 J 積分值。再者，圖 23~25 分別顯示 $a = 0.2t$ 、 $\theta = 13.8^\circ$ ； $a = 0.5t$ 、 $\theta = 34.4^\circ$ ； $a = 0.8t$ 、 $\theta = 55.0^\circ$ 三種劣化情況，分析模型裂紋面設定接觸對的劣化偏心漸縮管，承受正、負彎矩時裂紋面的變形情況，一般而言，承受正彎矩時，裂紋前緣是拉開(Open)而裂紋靠近管內壁部位則是閉合(Close)的現象，反之，承受負彎矩時則是裂紋前緣閉合而裂紋靠近管內壁部位則是拉開的現象。換言之，不論此類劣化漸縮管承受何種負載，裂紋面均可能發生接觸的現象，因此，在分析模型的裂紋面設定接觸對是有絕對的必要性^[18]。

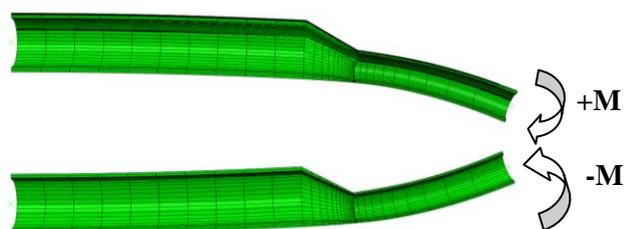


圖 21 偏心漸縮管承受正、負彎矩變形圖

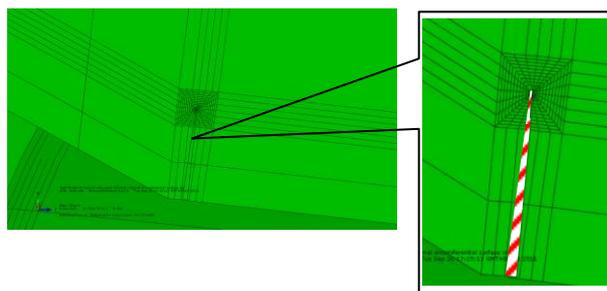


圖 22 分析模型裂紋面未設定接觸對之劣化偏心漸縮管($a=0.2t$ 、 $\theta = 13.8^\circ$)受正彎矩，變形時裂紋面發生穿越現象

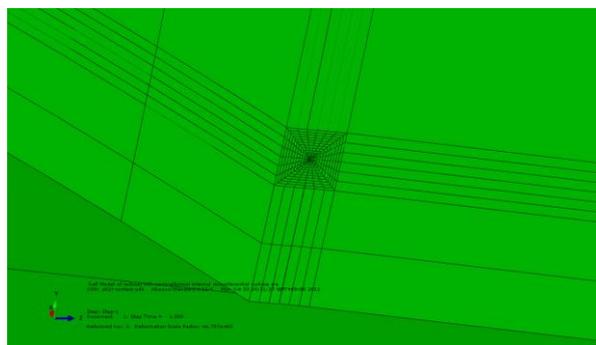


圖 23(a) 分析模型裂紋面設定接觸對之劣化偏心漸縮管($a = 0.2t$ 、 $\theta = 13.8^\circ$)受正彎矩裂紋面變形圖

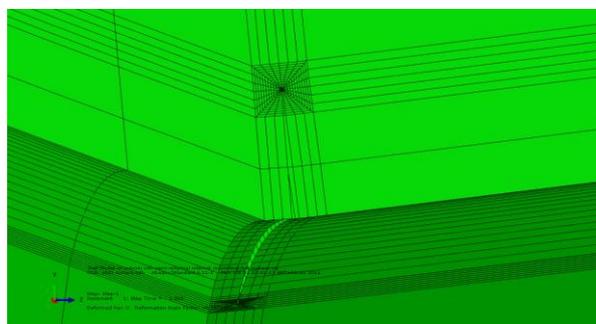


圖 23(b) 分析模型裂紋面設定接觸對之劣化偏心漸縮管($a=0.2t$ 、 $\theta = 13.8^\circ$)受負彎矩裂紋面變形圖

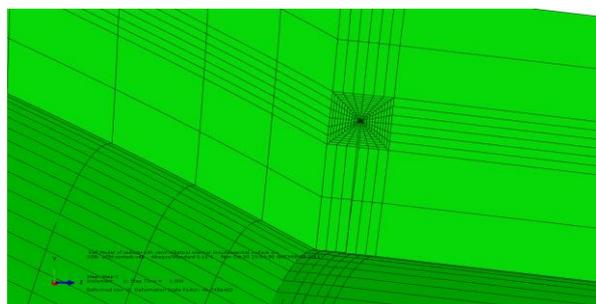


圖 24(a) 分析模型裂紋面設定接觸對之劣化偏心漸縮管($a=0.5t$ 、 $\theta = 34.4^\circ$)受正彎矩裂紋面變形圖

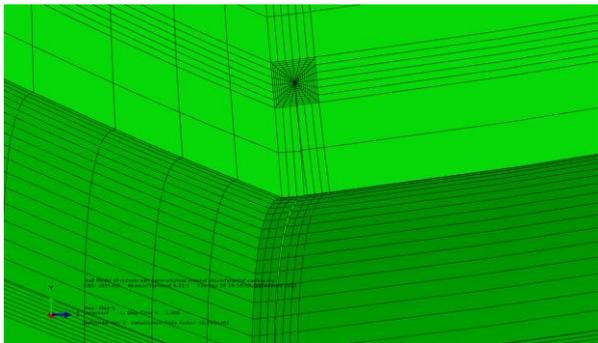


圖 24(b)分析模型裂紋面設定接觸對之劣化偏心漸縮管($a=0.5t$ 、 $\theta =34.4^\circ$)受負彎矩裂紋面變形圖

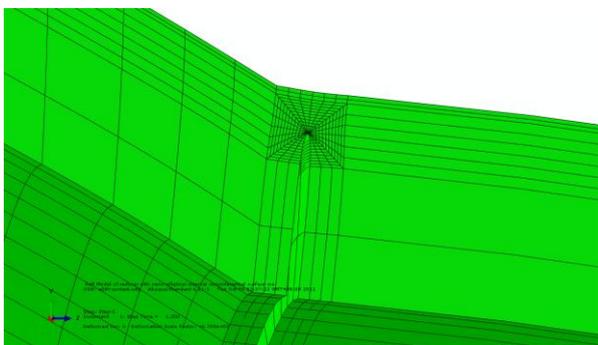


圖 25(a)分析模型裂紋面設定接觸對之劣化偏心漸縮管($a=0.8t$ 、 $\theta =55.0^\circ$)受正彎矩裂紋面變形圖

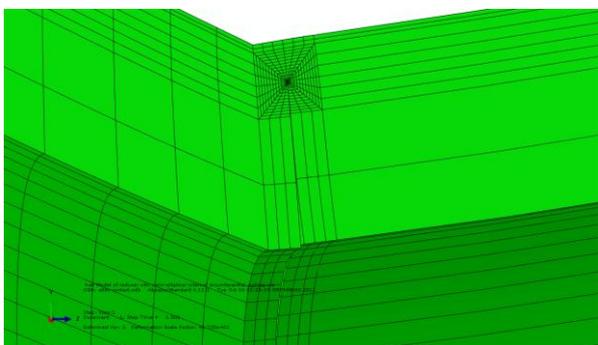


圖 25(b)分析模型裂紋面設定接觸對之劣化偏心漸縮管($a=0.8t$ 、 $\theta =55.0^\circ$)受負彎矩裂紋面變形圖

參、含圓周向穿壁裂紋漸縮管

本章節首先介紹含圓周向穿壁裂紋漸縮管相關參數之定義，再詳細介紹本研究針對此類劣化管路所建立之有限元素模型，最後說明模型的驗證方式與結果的正確性。

一、含圓周向穿壁裂紋漸縮管之幾何參數

含圓周向穿壁裂紋漸縮管的管路示意圖同圖 1，現假設漸縮管與其中一支直管銜接部位的內壁有一個圓周向穿壁裂紋 (Circumferential Through-Wall Crack)，圖 26 為銜接部位沿圓周向剖開之斷面圖， R 為管子平均半徑， t 為管壁厚度， 2θ 為管子在圓周方向裂開的角度，因此， θ 又稱為半裂紋角。

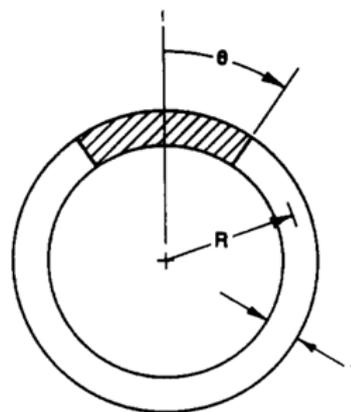


圖 26 含圓周向穿壁裂紋管路各項幾何參數示意圖

裂紋 J 積分值大小主要與兩項因素有關，一是裂紋大小，另一則是龜裂斷面所承受之負荷值。本研究目的在發展彈塑性有限元素分析模型以精確計算此類劣化管路在彎矩與軸向拉力負荷下之 J 積分值。

二、有限元素分析模型簡介

與含表面裂紋漸縮管相同，本研究同樣利用 Abaqus 編號 C3D20R 的三維固體元素建構外觀同圖 5(a)與圖 5(b)的分析模型。管路材料同樣為 Ramberg-Osgood 材料。圓周向穿壁裂紋位於漸縮管與右管連接處，圖 27 顯示裂紋所在位置與裂紋前緣的元素分割情形，將三維固體元素排列成一圈一圈環繞裂紋前緣且分布密集的元素環 (Element Ring)，且管壁厚度方向分成兩層元素，如此才能精確地計算出裂紋前緣附近的應力狀態，進而正確地計算 J 積分值。在裂紋開裂的兩

個平面設定接觸對(Contact Pairs)，以正確模擬裂紋發生閉合(Close)情況時的結構行為。漸縮管左右兩邊直管的模型長度均為其外直徑的五倍，在管路模型軸向剖面的所有節點設定對稱邊界條件，以模擬管路結構的對稱行為。外加負載彎矩 M 與軸向拉力 P 的施加方式同含圓周向內表面裂紋漸縮管。左邊直管遠離裂紋端斷面上所有節點均設定固定(Fixed)的邊界條件。同樣應用 Abaqus 參數化輸入檔(Input File)的設定，分析所需的幾何參數，包括：左側直管的外直徑 D_o^L ，壁厚 t^L ，右側直管的外直徑 D_o^R ，壁厚 t^R ，漸縮管的長度 L ，穿壁裂紋的半裂紋角度 θ ，外加負載彎矩 M 與軸向拉力 P ，均可由使用者依據分析條件在 Abaqus 輸入檔中任意修改，快速的建立各種含圓周向穿壁裂紋漸縮管的彈塑性有限元素分析模型。

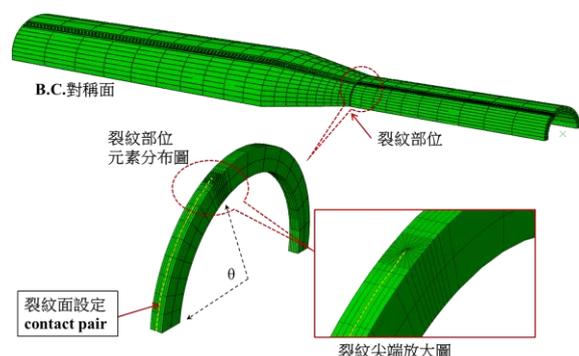


圖 27 圓周向穿壁裂紋所在位置與裂紋前緣有限元素分割圖

三、有限元素分析模型驗證

仿照含圓周向內表面裂紋漸縮管的驗證方式，以本研究所發展的漸縮管建模方式，建立含圓周向穿壁裂紋直管的分析模型，再與先前已發展完成此類劣化直管模型^[19~21]的計算結果進行比對，以驗證模型的正確性。

同圖 15 所示，應用本研究漸縮管建模方式建立含圓周向穿壁裂紋直管的 1/2 模型，以及已經過驗證的含圓周向穿壁裂紋直管 1/4 模型，並

在兩種模型上施加相同的彎矩或軸向拉力負載。驗證所用的材料參數設定如下：楊氏係數 $E=30 \times 10^6 \text{psi}$ ，波松比 $\nu=0.29$ ，Ramberg-Osgood 參數 $\alpha=1$ 、 $n=4$ ，參考應力 $\sigma_0=30000 \text{psi}$ 。表 1、表 2 與表 3 所示為平均半徑 $R=5 \text{ in}$ 、 10 in 、 20 in ，壁厚 $t=1 \text{ in}$ ，即 R/t 分別為 5、10、20 的直管，承受彎矩負載 $M=1 \times 10^6 \text{ in-lb}$ ，半裂紋角度 θ 為 10° 、 30° 、 60° 、 90° ，1/4 與 1/2 直管模型計算所得到的裂紋前緣的 J 積分值比較表。表 4、表 5 與表 6 所示為平均半徑 $R=5 \text{ in}$ 、 10 in 、 20 in ，壁厚 $t=1 \text{ in}$ ，即 R/t 分別為 5、10、20 的直管，分別承受 5000psi、4000psi 與 3000psi 單位軸向拉力，半裂紋角度 θ 為 10° 、 30° 、 60° 、 90° ，1/4 與 1/2 直管模型計算所得到的裂紋前緣的 J 積分值比較表。由於先前已驗證過的 1/4 直管模型在壁厚方向只有一層 20 節點的三維固體元素，裂紋前緣由管內壁、中間至外壁有 3 個尖點(Tip)可以做路徑積分(Contour Integral)得到 3 個 J 積分值，分別定義為 Tip 1、Tip 2 與 Tip 3，因此，1/4 直管模型的穿壁裂紋 J 積分值由公式 $J_{1/4}=(\text{Tip 1} + 4 \times \text{Tip 2} + \text{Tip 3})/6$ 計算得到。而本研究建立的 1/2 直管模型在壁厚方向有兩層 20 節點的三維固體元素，裂紋前緣由管內壁、中間至外壁有 5 個尖點可以做路徑積分得到 5 個 J 積分值，分別定義為 Tip 1、Tip 2、Tip 3、Tip 4 與 Tip 5，因此，1/2 直管模型的穿壁裂紋 J 積分值由公式 $J_{1/2}=(\text{Tip 1} + 4 \times \text{Tip 2} + 2 \times \text{Tip 3} + 4 \times \text{Tip 4} + \text{Tip 5})/12$ 計算得到。表 1 至 6 最下方一欄則是不同劣化條件下 $J_{1/2}$ 與 $J_{1/4}$ 的比值，由此可知，不論負載是彎矩或軸向拉力，也不論半裂紋角度大小，兩者的比值幾乎等於 1，換言之，1/2 與 1/4 直管模型的計算結果極為吻合，代表本研究發展之含圓周向穿壁裂紋漸縮管建模程序，其元素之分割方法、邊界條件的設定方式及負載的施加方式均正確無誤。

表 1 比較本研究 1/2 直管與已經過驗證 1/4 直管承受彎矩負載的 J 積分計算結果(R/t =5)

R/t=5	$\theta=10^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=90^\circ$
	1/2 Model	1/2 Model	1/2 Model	1/2 Model
Tip1	11.11	48.69	280.8	2166
Tip2	15.67	74.79	397.1	3045
Tip3	19.89	95.84	464.1	3528
Tip4	20.41	83.41	313.0	2094
Tip5	19.58	68.44	190.3	1025
$J_{1/2} =$	17.90	78.47	353.3	2567
	1/4 Model	1/4 Model	1/4 Model	1/4 Model
Tip1	12.45	60.88	361.8	2818
Tip2	18.44	83.09	382.7	2823
Tip3	21.39	78.93	230.4	1265
$J_{1/4} =$	17.93	78.70	353.8	2563
$J_{1/2} : J_{1/4}$	0.998	0.997	0.999	1.002

表 2 比較本研究 1/2 直管與已經過驗證 1/4 直管承受彎矩負載的 J 積分計算結果(R/t =10)

R/t=10	$\theta=10^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=90^\circ$
	1/2 Model	1/2 Model	1/2 Model	1/2 Model
Tip1	1.455	7.89	43.53	168.1
Tip2	1.825	9.72	49.48	196.8
Tip3	2.200	11.25	50.18	201.9
Tip4	2.304	10.36	35.28	119.9
Tip5	2.302	8.99	21.06	51.6
$J_{1/2} =$	2.056	9.97	42.00	157.5
	1/4 Model	1/4 Model	1/4 Model	1/4 Model
Tip1	1.435	8.34	48.16	191.1
Tip2	2.094	10.28	44.29	171.4
Tip3	2.401	10.31	26.10	65.5
$J_{1/4} =$	2.035	9.96	41.90	157.0
$J_{1/2} : J_{1/4}$	1.010	1.001	1.002	1.003

表 3 比較本研究 1/2 直管與已經過驗證 1/4 直管承受彎矩負載的 J 積分計算結果(R/t =20)

R/t=20	$\theta=10^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=90^\circ$
	1/2 Model	1/2 Model	1/2 Model	1/2 Model
Tip1	0.2036	1.593	9.035	32.03
Tip2	0.2466	1.655	8.508	31.42
Tip3	0.2944	1.715	7.488	27.27
Tip4	0.3079	1.523	5.323	16.95
Tip5	0.3060	1.283	3.213	7.71
$J_{1/2} =$	0.2764	1.585	6.879	23.98
	1/4 Model	1/4 Model	1/4 Model	1/4 Model
Tip1	0.2053	1.641	9.472	34.73
Tip2	0.2823	1.616	7.053	24.99
Tip3	0.3374	1.366	3.178	7.37
$J_{1/4} =$	0.2787	1.579	6.810	23.68
$J_{1/2} : J_{1/4}$	0.992	1.004	1.010	1.013

表 4 比較本研究 1/2 直管與已經過驗證 1/4 直管承受軸向拉力負載的 J 積分計算結果(R/t =5)

R/t=5	$\theta=10^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=90^\circ$
	1/2 Model	1/2 Model	1/2 Model	1/2 Model
Tip1	1.942	8.53	58.39	436.7
Tip2	2.304	11.21	74.33	582.0
Tip3	2.625	13.36	81.56	652.8
Tip4	2.704	12.73	60.64	402.8
Tip5	2.669	11.39	39.95	200.8
$J_{1/2} =$	2.491	11.87	66.78	490.2
	1/4 Model	1/4 Model	1/4 Model	1/4 Model
Tip1	2.035	9.61	70.29	550.8
Tip2	2.525	12.23	70.63	533.3
Tip3	2.808	12.65	47.92	256.7
$J_{1/4} =$	2.491	11.86	66.79	490.1
$J_{1/2} : J_{1/4}$	1.000	1.000	1.000	1.000

表 5 比較本研究 1/2 直管與已經過驗證 1/4 直管承受軸向拉力負載的 J 積分計算結果(R/t =10)

R/t=10	$\theta=10^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=90^\circ$
	1/2 Model	1/2 Model	1/2 Model	1/2 Model
Tip1	2.497	14.26	100.60	655.3
Tip2	3.042	17.93	124.10	859.6
Tip3	3.580	20.81	134.50	971.4
Tip4	3.624	18.55	92.31	581.5
Tip5	3.488	15.40	54.57	284.4
$J_{1/2} =$	3.317	18.10	107.48	720.6
	1/4 Model	1/4 Model	1/4 Model	1/4 Model
Tip1	2.483	15.40	115.50	798.2
Tip2	3.387	18.78	115.20	791.6
Tip3	3.705	18.20	67.61	327.7
$J_{1/4} =$	3.289	18.12	107.32	715.4
$J_{1/2} : J_{1/4}$	1.009	0.999	1.002	1.007

表 6 比較本研究 1/2 直管與已經過驗證 1/4 直管承受軸向拉力負載的 J 積分計算結果(R/t =20)

R/t=20	$\theta=10^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=90^\circ$
	1/2 Model	1/2 Model	1/2 Model	1/2 Model
Tip1	2.979	23.20	152.40	884.4
Tip2	3.644	27.22	184.60	1151.0
Tip3	4.360	30.00	195.40	1265.0
Tip4	4.424	24.79	129.70	777.6
Tip5	4.164	18.41	68.76	358.6
$J_{1/2} =$	4.011	25.80	155.76	957.3
	1/4 Model	1/4 Model	1/4 Model	1/4 Model
Tip1	3.052	25.54	176.70	1065.0
Tip2	4.122	26.89	168.00	1053.0
Tip3	4.480	20.98	88.92	534.5
$J_{1/4} =$	4.003	25.68	156.27	968.6
$J_{1/2} : J_{1/4}$	1.002	1.005	0.997	0.988

最後，仿照含表面裂紋漸縮管裂紋面接觸對驗證方法檢驗穿壁裂紋面接觸對之設定是否正確？同圖 20 所示，設定相同的直管外直徑、壁厚、材料，穿壁裂紋半裂紋角度 $\theta=60^\circ$ ，同樣施加 300000psi 的單位軸向壓力。分析結果顯示，穿壁裂紋兩面對應位置節點的位移量完全相同，壓縮應變同樣為 0.01，由此驗證本研究模型在穿壁裂紋面接觸對的設定方式正確無誤。

經由上述驗證結果可以確認本研究所建立之含圓周向穿壁裂紋漸縮管彈塑性分析模型的正確性，可應用於此類劣化管路的 J 積分計算與裂管安全評估工作。

肆、結論

本研究使用 Abaqus 有限元素分析軟體，以三維固體元素分別建構含圓周向內表面(半橢圓形或等深度)與穿壁裂紋漸縮管的有限元素分析模型，配合彈塑性破壞力學理論，分析此兩類劣化漸縮管在彎矩與軸向拉力負載下的裂紋驅動力—J 積分值，並運用參數化的建模方式，可以依據漸縮管幾何尺寸、裂紋深度、裂紋長度或角度、負荷型式、材料特性等條件，快速建立分析模型。

由於目前尚未發現國內外的期刊雜誌或會議論文有討論漸縮管彈塑性破壞分析的相關文獻，為驗證本研究所建模型的正確性，以本研究所發展的劣化漸縮管建模方式，分別建立含圓周向內表面(半橢圓形或等深度)與穿壁裂紋直管的 1/2 分析模型，與先前已發展完成且經過驗證的劣化 1/4 直管模型的計算結果進行比對，不論是表面裂紋或穿壁裂紋，1/2 與 1/4 劣化直管的計算結果極為一致，證明本研究發展的模型之元素分割方法、邊界條件的設定方式及負載的施加方式均正確無誤，再經過模型端面均佈壓力測試證明與材料力學公式之計算結果相符，確立裂紋面接觸對之設定亦正確無誤，從而驗證本研究所建立劣化漸縮管之彈塑性分析模型的正確性。

本研究成功發展 3D 彈塑性有限元素分析模型以計算含圓周向內表面(半橢圓形或等深度)與穿壁裂紋漸縮管之 J 積分值，以配合管材的破壞韌性評估劣化管路的安全裕度，俾利於電廠劣化管路安全評估工作之執行，再者，由於本研究應用參數化的建模方式，可以快速建立不同幾何尺寸、裂紋深度、裂紋長度或角度、負荷型式、材料特性等之劣化漸縮管的分析模型，更能大幅提升劣化管路安全評估工作之時效性。

伍、參考文獻

- [1] E. T. Wessel, W. L. Server, and E. L. Kenne, "Primer: Fracture Mechanics in The Nuclear Power Industry," Electric Power Research Institute, U.S.A., EPRI Topical Report NP-5792-SR, Rev. 1, May 1991.
- [2] G. Yagawa, K. Kuwabara, K. Kashima, and Y. Takahashi, "Research Activities on Fracture Mechanics for Nuclear Piping in Japan," *Nuclear Engineering and Design*, vol.98, pp.231-241, 1987.
- [3] P. P. Milella, "Outline of Nuclear Piping Research Conducted in Italy," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 98, pp. 219-229, 1987.
- [4] D. Sturm, "Recent Results and Fracture Programs of Pipe Fracture Tests in MPA Stuttgart, Proceedings of the Seminar on Leak-Before-Break: Progress in Regulatory Policies and Supporting Research," U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S.A., NUREG/CP-0092, March 1988.
- [5] P. M. Scott and R. J. Olson, "Development of Technical Basis for Leak-Before-Break Evaluation Procedures," U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S.A., NUREG/CR- 6765, May 2002.
- [6] V. Kumar, et al, "Advances in Elastic-Plastic Fracture Analysis," Electric Power Research Institute, U.S.A., EPRI Report NP-3607, Aug. 1984.
- [7] A. Zahoor, "Ductile Fracture Handbook, vol. 2,"

- Electric Power Research Institute, U.S.A. , EPRI-NP-6301-D, N14-1, 1991.
- [8] A. Zahoor, "Ductile Fracture Handbook, vol. 3," Electric Power Research Institute, U.S.A. , EPRI-NP-6301-D, N14-1, 1991.
- [9] J. E. Griffiths, "The Effect of Cracks on The Limit Load of Pipe Bends Under In-plane Bending: Experimental Study," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 21, pp. 119-130, 1979.
- [10] J. Chattopadhyay, T. V. Pavankumar, B. K. Dutta, and H. S. Kushwaha, "Fracture Experiments on Through Wall Cracked Elbows under In-plane Bending Moment: Test Results and Theoretical/Numerical Analyses," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 72, pp. 1461-1497, 2005.
- [11] S. Saxena and N. Ramakrishnan, "Characterizing the Crack Initiation Load in Circumferentially Through-wall Cracked Elbows under Bending Load," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 84, pp. 493-501, 2007.
- [12] M. Bergman, "Stress Intensity Factors for Circumferential Surface Cracks in Pipes," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 18, pp. 1155-1172, 1995.
- [13] 蔡柏軍, 洪賢豪, 康龍全, 「含等深度圓周向內表面裂縫的直管在彎曲力矩負荷下之 J 積分值計算」, 核能研究所所內報告 INER-4554R, 2007 年 3 月。
- [14] 蔡柏軍, 康龍全, 「含半橢圓形圓周向內表面裂縫的直管在彎矩負荷下之 J 積分值計算」, 核能研究所所內報告 INER-5429R, 2008 年 3 月。
- [15] 杜炎勳, 蔡柏軍, 「含半橢圓形圓周向內表面裂縫的直管在軸向拉力負荷下之 J 積分值計算」, 核能研究所所內報告 INER-6268R, 2007 年 9 月。
- [16] 杜炎勳, 蔡柏軍, 張明儒, 「含等深度圓周向內表面裂縫直管在組合負載下之 J 積分值計算」, 核能研究所所內報告 INER-A2204H, 2010 年 10 月。
- [17] 吳思穎, 杜炎勳, 蔡柏軍, 陳建忠, 「含等深度圓周向內表面裂縫直管數位模型之敏感度分析」, 核能研究所所內報告 INER-8135R, 2011 年 6 月。
- [18] S. Y. Wu, B. J. Tsai, and J. J. Chen, "Elastic-Plastic Finite Element Analyses for Reducers with Constant Depth Internal Circumferential Surface Cracks," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 131, pp. 10-14, 2015.
- [19] 俞君俠, 楊齊飛, 蔡柏軍, 「直管圓周向裂縫在力矩負荷下之 J 積分值計算」, 核能研究所所內報告 INER-2949, 2004 年 10 月。
- [20] 蔡柏軍, 俞君俠, 康龍全, 「直管圓周向裂縫在軸向拉力負荷下之 J 積分值計算」, 核能研究所所內報告 INER-A0762R, 2005 年 10 月。
- [21] 杜炎勳, 蔡柏軍, 張明儒, 陳建忠, 「含圓周向穿壁裂縫直管在組合負載下之 J 積分計算」, 核能研究所所內報告 INER-A2204H, 2011 年 7 月。

FRP 纖維筋在潛盾工程之應用

Application of Fiber Reinforced Polymer (FRP) for Shield Tunneling Method

王俊槐*
Wang, Chun-Huai

蔡英聖**
Tsay, Ing-Sheng

陳聰海***
Chen, Tsung-Hai

李順敏***
Lee, Shun-Min

摘要

潛盾工法因具有不影響地面交通、不阻礙地下水流、降低對生態環境影響等優點，近年來已成為台電在都會區電纜隧道最常採用的施工方式之一。潛盾工法之發進及到達屬高風險作業，傳統施工方式須依賴地盤改良提供潛盾破鏡時開挖面之自立性及止水性需求，因地盤改良體品質難以掌握，常在連續壁破鏡作業時，產生湧水、湧砂情事，甚至造成意外事故。為避免潛盾破鏡施工風險，近年來引進日本研發之「NOMST」工法，藉由 FRP 纖維筋取代鋼筋，利用 FRP 纖維筋抗磨度低之特性，以潛盾機之切削面盤直接切削鏡面，達到安全發進與到達的目的。

Abstract

The Shield Tunneling Method has already been one of the most popular methods applied in underground excavation in recent years. The advantages of using this method include: not interfering with the traffic on the ground, not obstructing under-ground water flow, and reducing effects on the ecological environment. The Shield Tunneling Method, however, involves high risk when the shield advances and reaches the end. Traditional construction methods rely on ground improvement to provide the water tightness and self-sustainability in coping with the problems of diaphragm wall face breaking. Because the quality of ground improvement is hard to control, water inrush and sand inflow tend to happen while diaphragm wall face breaking takes place, which can bring about accidents. In order to lower the risk of shield tunnel face breaking, the “NEFMAC” method has been imported from Japan in recent years. The concept is to use the FRP to replace traditional steel bar because the FRP has the characteristic of low wear-resistance. Therefore, the shield is able to cut the tunnel face directly, helping achieve the purpose of shield’s safe advancing and reaching the end.

關鍵詞(Key Words)：潛盾工法(Shield Tunneling Method)、破鏡(Tunnel Face Breaking)、NEFMAC 工法(NEFMAC Method)、FRP 纖維筋(FRP)。

壹、前言

潛盾工法在台灣發展超過四十多年，已廣泛

應用於捷運工程、衛生下水道主幹管、放流管及台電電纜隧道工程等，成效斐然。從 2005 年起，配合中華民國地下管道技術協會大力推動，台電亦積極推動潛盾工法，從頂湖~仙渡 345kV 線、

*台灣電力公司輸供電事業部輸變電工程處北區施工處

**台灣電力公司董事會

***台灣世曦工程顧問股份有限公司

高港~五甲~高雄 345kV 線、竹工 161kV 線累計完成長度約 39km，另施工中如松湖~大安 345kV 線及大林~高港 345kV 線等長度約 20km，均已順利執行或施工中，目前免開挖工法已成為台電輸電工程於都會區主要的施工方式。

潛盾工程施工早期以手挖式及壓氣式工法為主，到現今採用自動化的土壓式或泥水式潛盾機，不僅在整體施工管理系統技術已經發展成熟，並實際用於各類地層之長距離、大深度、急曲線等困難及挑戰之施工。隨著安全第一及工程零事故之施工要求，潛盾工程發進段與到達段施工之自動化、機械化、無公害、低噪音，成為一種新工法技術的研發方向。

台北捷運工程之隧道部分，主要以潛盾工法施工，由施工經驗可知潛盾發進段及到達段施工極易發生工安災害；高雄捷運工程 LU004 隧道也在到達破鏡時發生湧水、湧砂之大規模地層塌陷意外，如圖 1 所示，造成鄰房傾倒、交通封鎖、財物損失、工程延誤等社會事件。分析主要原因為潛盾機進出工作井採用傳統鑿除工作井擋土壁方式，由於發進段及到達段破鏡屬高風險施工作業，稍有不慎，即可能發生湧水、湧砂、地層下陷以致潛盾機受困或釀成重大災害，甚至危及已完成之隧道，使環片崩落或鄰房發生傾斜、倒塌事件。所以研究安全可靠之新工法來取代傳統施工方式，成為潛盾工法之重要課題。



圖 1 潛盾破鏡事故例

貳、新工法之特色與發展

近年來日本在潛盾隧道技術的研發快速，也累積相當多成功運用案例，深具實用價值。運用新工法於潛盾破鏡作業，可滿足施工之安全需求，其特色如下^[1]：

- 一、符合工安需求：發進與到達屬高風險作業，新工法可確保破鏡作業零災害，保障施工人員、住戶及公眾之生命財產安全。
- 二、低污染、低公害：使用新工法破鏡掘削擋土壁，可有效降低噪音、震動、空氣污染，改善作業環境；另大幅減少地質改良範圍及數量亦可減少對地下水等自然環境破壞。
- 三、自動化施工：高風險的發進與到達採用自動化工法施工，避免施工人員暴露於高風險作業環境。
- 四、大口徑之潛盾機：因應 $\phi 10\text{m} \sim 14\text{m}$ 大口徑潛盾施工需求愈來愈多，發進段及到達段的破鏡開口愈大，發生災害風險機率愈高。
- 五、大深度地層施工：在超過 GL.-40m 以下深度施工，冰凍工法及地盤改良施工的成效仍有疑慮；新工法無需依賴固化鏡面外土體方式破鏡，屬較安全可靠方式。
- 六、複雜地層施工：鄰近河海、海底等地層，發進、到達段施工不易。
- 七、縮短工期：發進段與到達段地改每次要費時 2 個月以上時間來處理，若以冰凍工法更可能長達 6 個月，使用新工法可縮短為 2~5 日，節省工期。

FRP 纖維筋(格網)工法自 1991 年首次在日本青森縣下水道之潛盾工程施工成功後，1995 年開始普遍使用，1996 年使用於橫濱地下鐵工程，潛盾機直徑達 $\phi 7.15\text{m}$ ，1997 年應用於泰國曼谷地下鐵工程，2002 年引進台灣使用於高雄捷運工程，然後台北捷運信義線，2007 年台電高港~五甲~高雄地下電纜河道(鳳林路段、過埤路段)、2014 年大林~高港地下電纜河道也陸續使用，國內引用實績如表 1 所示。

在日本常用之 FRP(Fiber Reinforced Plastics) 纖維筋商品稱 NEFMAC 材料(New Fiber Composite Material for Reinforcing Concrete)，並

設立 NOMST 研究會(Novel Material Shield-cutttable Tunnel-wall System)推展及研究此工法。

表 1 國內 FRP 連續壁實績一覽表

工程名稱	年代	工程地點	施工廠商
高雄捷運 CR4 標	2002 2003	高雄市	榮工-鹿島聯合承攬
高雄捷運 CO2 標	2003	高雄市	前田-隆大聯合承攬
台北捷運 信義線 CR283 標	2005	台北市	榮工
台電高港~五甲~高雄鳳林路段	2007	高雄市	廣記-建豐聯合承攬
台電高港~五甲~高雄過埤路段	2007	高雄市	榮工
台電大林~高港一工區	2014	高雄市	春原-萬鼎聯合承攬
台電大林~高港二工區	2014	高雄市	鹿島

參、NOMST 工法概要

一、工法簡介

新工法主要將原工作井之連續壁鋼筋籠於潛盾機欲通過範圍內，改為 FRP 纖維筋格網。因為潛盾機之刀刃不能切削鋼製品，但對於 FRP 纖維筋則無切削之問題。因此潛盾機可以直接切削新材料，順利進出工作井，而不需要像傳統工法先進行地盤改良、打除混凝土、切除鋼筋，才可以進出工作井。

傳統潛盾隧道工程發進段與到達段採用之破鏡方法，需在破除連續壁前於工作井外側先進行地盤改良，潛盾機通過範圍之工作井擋土壁體進行機械或人工破除階段，將依賴地盤改良提供

該期間之擋土強度，故地盤改良作業之良窳，對於發進與到達作業成功與否，具有決定性影響。由於地層土壤的條件常難以充分掌握，因此，地盤改良之可靠性為傳統工法使用上之一大隱憂。

比較 FRP 工法與傳統地盤改良工法如表 2 所示，對於大斷面、高水壓、疏鬆至中等緊密砂質地層，傳統破鏡施工方式容易引起崩坍及漏砂漏水，建議優先採用 FRP 工法。

理論上採用 FRP 工法不需於壁外進行地盤改良，但因潛盾機快磨穿連續壁進入土層時，因軟硬不均，連續壁之混凝土薄層因潛盾機推力不易控制，容易發生破裂成大塊混凝土塊附著在面盤造成卡鑽，導致無法出土，故一般仍施作一排地盤改良樁做緩衝。

表 2 FRP 與地盤改良工法比較

工法	FRP	地盤改良
適用性	國外使用多年，國內有案例	國內普遍使用
地改範圍	大幅縮減	必要措施，改良成效攸關破鏡成敗
安全性	潛盾機直接穿越，安全性高	人工敲除連續壁，風險較高
破鏡工期	2~5 天	7~15 天(試水、補灌另計)
費用	530 萬元	400 萬元

註：費用以潛盾機直徑 ϕ 6.25m 估計

表 3 及表 4 為 FRP 新工法與傳統施工法作業流程比較。在潛盾發進階段傳統工法於步驟 4 易造成工期延誤、步驟 9 易造成工程災害；潛盾到達階段傳統工法於步驟 4 易造成工期延誤、步驟 8 及 11 易造成工程災害。

表 3 潛盾發進步驟比較表

傳統工法	FRP 新工法
1.工作井連續壁	1.工作井連續壁
2.地盤改良	2.地盤改良(視需要)
3.工作井開挖	3.工作井開挖
4.試水及補灌	4.發進準備工作
5.發進準備工作	
6.潛盾機投入、組立	5.潛盾機投入、組立
7.臨時環片	6.臨時環片
8.鏡面破除工作架	7.潛盾機切削擋土壁 FRP 格網
9.鏡面破除	
10.混凝土塊移除	
11.工作架設施拆除	
12.初期掘進	8.初期掘進

表 4 潛盾到達步驟比較表

傳統工法	FRP 新工法
1.工作井連續壁	1.工作井連續壁
2.地盤改良	2.地盤改良
3.工作井開挖	3.工作井開挖
4.試水及補灌	4.到達準備工作
5.到達準備工作	
6.潛盾機到達工作井	5.潛盾機到達工作井
7.工作架組立	6.潛盾機切削擋土壁 FRP 格網
8.鏡面破除	
9.混凝土塊移除	
10.工作架設施拆除	
11.潛盾機推進	7.洞口止水
12.洞口止水	
13.潛盾機拆除	

二、材料特性

FRP 為一異向性(Anisotropic)材料，具質量輕、高拉力強度、無降伏點、無韌性及抗切削硬

度低等特點，目前較常使用者為碳纖維(CFRP)與玻璃纖維(GFRP)兩類^[2]，材料性質如表 5~表 6 所示。

(一) 物理特性：

1. 密度低，重量為鋼筋重之 1/6~1/4，單位重約 1250~2100 kg/m³。
2. 線膨脹係數：具有異向性，即軸向與橫向膨脹係數不同。
3. 高溫影響：高溫(約 120°C)會軟化。

(二) 機械性質：

1. 拉力強度：較鋼筋高無降伏點。
鋼筋：4830~6900 kg/cm²
GFRP：4830~16000 kg/cm²
CFRP：6000~26900 kg/cm²
2. 壓力強度：約為拉力強度之 55%和 78%，不建議使用於抗壓力構材。
3. 剪力行為：剪力強度較弱，若增加與材料層面方向垂直之纖維，可提高剪力強度。
4. 與混凝土結合行為：一般鋼筋為摩擦力傳遞結合，而 FRP 材料則與其材質及製造形狀有關，因為格網狀係將垂直筋與水平筋採用合成樹脂結合為一體，成為交叉互層結構，如點焊鋼絲網應用於混凝土般，故一般以格網狀為最佳。
5. 抗切削硬度：FRP 材料不具塑性行為，因此抗切削硬度較鋼筋為低，潛盾機鑽頭可直接切斷。

(三) 耐久性：會因周圍環境而降低，如應用於連續壁屬臨時擋土設施，通常忽略。

表 5 材料性質一覽表

符號	纖維種類	比重	抗拉強度 (N/mm ²)	彈性模數 (kN/mm ²)
G	玻璃纖維	1.7	590	30
C	碳纖維	1.42	1200	100
CM	高彈性碳纖維	1.42	1200	165

表 6 材料規格一覽表

type (reinforcement fibers)	tensile strength (kg/m ²)	tensile modulus of elasticity (kg/m ²)	bar No.	sectional area (mm ²)	max.load (tonf)	standard weight (g/m)			
C (Carbon fiber)	120	10,000	C13	65	7.8	92			
			C16	100	12.0	142			
			C19	148	17.7	210			
			C22	195	23.4	277			
			C25	260	31.2	369			
		16,000	C29	320	38.4	454			
			C32	395	47.4	561			
			C35	480	57.6	682			
			C38	570	68.4	809			
			C41	670	80.4	951			
CM (High modulus carbon fiber)	120	16,000	C51	1,020	121.8	1,448			
			G (Glass fiber)	60	3,000	G13	101	7.8	220
			G16			201	12.0	342	
			G19	297	17.7	510			

肆、FRP 纖維筋連續壁設計

一、設計理念

(一) 根據：

依 ACI-440 1R-01 之規定(2001 年頒定)^[3]，參照 ACI 318-95 理念，採用強度設計法 (Strength Design Method) 檢核纖維筋混凝土在極限狀態下之強度。

(二) 設計材料強度：

FRP 材料強度如表 5 所示，須考量在不同環境下會影響 FRP 耐久性，因此須進行折減。若連續壁屬臨時結構物，一般可忽略環境因子之影響。

(三) 撓曲設計：

1. 設計概念：傳統之鋼筋混凝土設計考量鋼筋延展特性，設計理念係鋼筋比混凝土破壞先到達降伏。由於 FRP 纖維筋有極高之拉力、不具韌性，與混凝土均為脆性材料，受極限彎矩時，以混凝土壓力控制破壞模式較佳。

2. 基本假設：

- (1) 混凝土及纖維筋之應變對中性軸呈線性變化，斷面受力前後皆保持平面。
- (2) 混凝土極限壓應變為 0.003，拉應力不計。

(3) 纖維筋在拉力作用下應力應變維持線彈性行為。

(4) 凝土及纖維筋間完全結合。

3. 設計強度需求：因不具韌性，採保守計算，折減因子 $\phi = 0.7$ 。

4. 平衡纖維筋比計算。

5. 撓曲強度計算。

(四) 剪力設計：

1. 設計理念：與 ACI-318 鋼筋混凝土剪力設計相同，採保守計算，折減因子 $\phi = 0.85$ 。

2. 混凝土剪力強度檢核。

3. 纖維剪力筋之剪力強度檢核。

4. 纖維剪力筋需求量。

二、設計要點

(一) 連續壁設計時就必須決定使用 FRP 格網，才能完成連續壁單元分割、鋼筋籠之設計以及 FRP 纖維筋格網之設計。

(二) 一般深開挖程式進行連續壁應力分析時，未特別考量鋼筋勁度，因此其分析結果亦適用於 FRP 纖維筋格網。

(三) 針對 FRP 連續壁施工，日本 NOMST 研究會對於潛盾機之製造廠商，於潛盾機設計時提出下列應注意事項：

1. 檢討面盤切刀形狀、配置及增設。
2. 調整推進千斤頂。
3. 增設同步灌漿注入管。
4. 調整排土設備。

(四) 地盤改良是否施做，須依工程需求以及地下水狀況配合整體考量，再決定改良範圍。

(五) FRP 纖維筋為訂製材料，因此需於連續壁施工前二個月完成訂貨作業。

伍、工程實例

一、施工要點

(一) FRP 纖維筋格網之製作皆在工廠內完成，運

至工地進行簡單組合後與原有連續壁鋼筋籠搭接，如詳圖 2~圖 3。

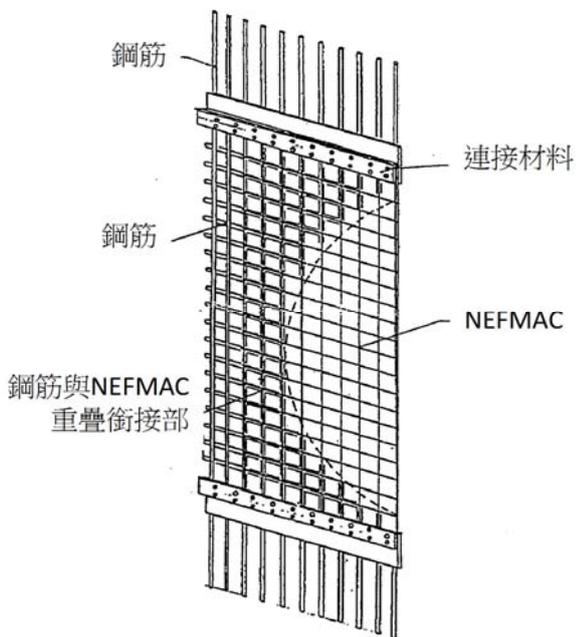


圖 2 FRP 纖維筋格網與水平筋銜接示意圖^[4]

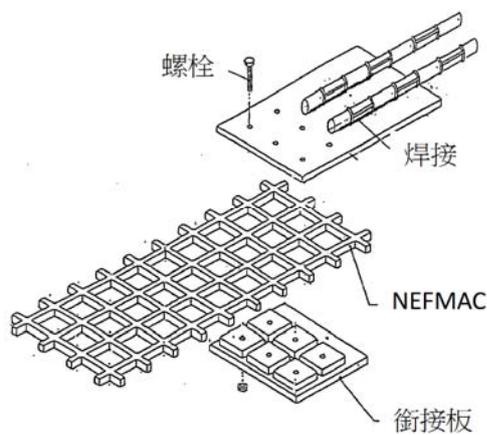


圖 3 FRP 纖維筋格網與鋼筋銜接示意圖^[4]

- (二) 由連續壁施工廠商在工地配合與原有鋼筋籠相銜接。
- (三) 工作井鏡面框之止水墊圈，建議採用二段式止水墊圈，以雙重的止水防護，可增加止水效果。
- (四) 注意潛盾機施工前檢查作業，是否已配合本

工法調整。

- (五) 由於採用新工法，潛盾機切削速度甚慢(約 1mm/min)，通常厚度 1.2m 連續壁須 20 小時才能切削完成，實際工期約為 2~5 日，長時間低速研磨會產生過熱現象，有關潛盾機機械及軸承等設施之標準應予提高，並配合施工進行檢核。

二、FRP 纖維筋在台電施工案例

「鳳林路段潛盾洞道暨高港(丙)冷卻機房工程」為高港~五甲~高雄 345kV 地下電纜線路之分標工程，本工程範圍自高港(丙)變電所旁#1 直井起，穿越在萊大排、沿鳳林二路北上，迄鳳林二路與台 88 線路口，全長約 1.56km 如圖 4 所示。考量工區之交通、民情、道路管理單位要求等因素，設計採用潛盾工法施築地下電纜洞道，以減少對當地交通、環境之衝擊。

工程範圍所在之高雄市大寮區鳳林二路交通流量大，道路下方密佈重要民生管線，加以工址地盤屬砂性地層，地下水位高，對於地下工程極具潛在施工風險性，設計及施工階段皆應妥予因應困難與挑戰。



圖 4 工址位置圖

考量發進工作井緊鄰在萊大排，為確保施工安全及避免傳統破鏡工法可能發生之砂湧意外，本工程於潛盾機破鏡範圍以 FRP 纖維筋取代傳統鋼筋，藉由潛盾機直接切削 FRP 連續壁掘進(圖 5)，可縮短工期並提昇潛盾破鏡之安全性。

發進工作井配置如圖 6，FRP 連續壁應力分析計算與一般連續壁相同，FRP 纖維筋設計係依「美國混凝土學會 ACI 440 規範」進行設計作業，通常基於經濟性考量，垂直主筋及剪力筋採高強度之碳纖維筋設計；水平筋採玻璃纖維筋設計，本工程設計成果如圖 7 及表 7 所示，NEFMAC 尺寸 6.3x11.3x1m，一次施工完成。

配合 FRP 連續壁破鏡施工，為降低潛盾切刀盤之磨耗，特別增設 38 個 FRP 專用切削刀(圖 8、圖 9)，其高度較一般切削刀外凸 2.5cm，以達到先行掘削 FRP 連續壁之目的。本工法雖增加潛盾機設備費及 FRP 材料費，但減少發進端地盤改良數量，並大幅提高潛盾破鏡施工安全性，破鏡施工時無湧砂、湧水情況，本工程施工經驗提供類似地質情況或高風險施工作業之參考^[5]。



圖 5 潛盾發進示意圖

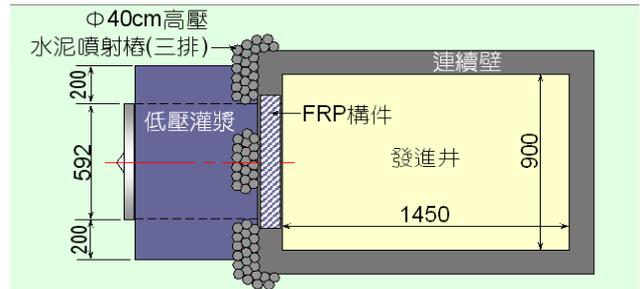


圖 6 發進工作井配置示意圖

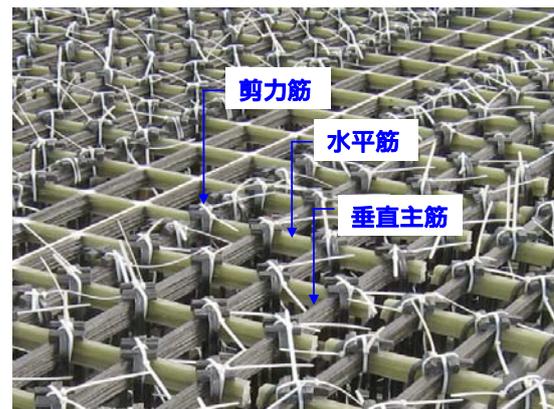


圖 7 FRP 格框構件

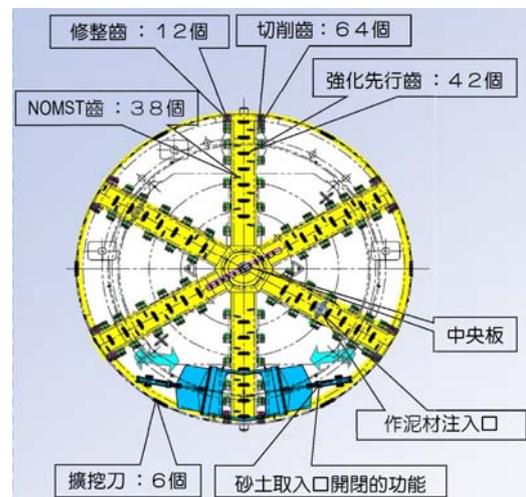


圖 8 潛盾機 38 只 FRP 刀

表 7 FRP 構件設計成果

鋼筋種類	纖維種類	型號	標稱斷面積 (mm ²)	配筋間距 (cm)	備註
垂直主筋	碳纖維筋	C41	670	2C41@20	開挖側
	碳纖維筋	C32	395	2C32@20	土壤側
剪力筋	碳纖維筋	C25	260	C25@20(H) C25@30(V)	
水平筋	玻璃纖維筋	G29	640	2G29@30	開挖側、土壤側

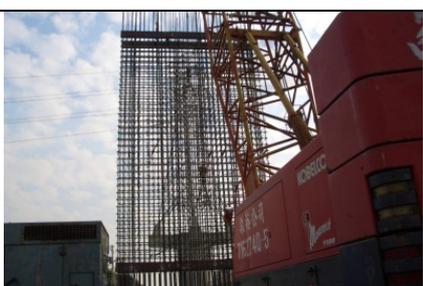
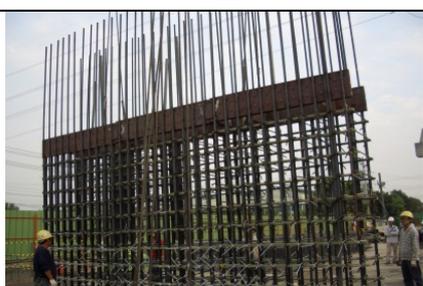
		
貨櫃運輸格網材料	格網吊放	格網組立
		
組立剪力筋	格網運往工地	裝設 PVC 管
		
纖維筋格網(一)	纖維筋格網(二)	接頭(一)
		
接頭(二)	破鏡範圍確認	吊筋
		
連續壁施工(一)	連續壁施工(二)	連續壁施工(三)

圖 9 FRP 連續壁施工

柒、參考文獻

陸、結語

隨著社會經濟高度發展，民眾生活素質不斷提高，配合都市發展需要及考量架空輸電線路對環境、景觀影響，都會區電纜線路地下化為必然趨勢，也是不得不的選擇。潛盾工法因具備不影響地面交通、不阻礙地下水流、降低對生態環境影響等優點，經不斷的改良及發展，近年來潛盾機已具備長距離、急曲線、T 分歧及地中接合等施工技術能力，台電亦順應潮流引進使用於松湖~大安案、大林~高港案洞道工程。惟伴隨大深度及高水壓之施工條件，潛盾破鏡常因地盤改良不夠確實，導致發進、到達時發生湧水及湧砂意外情事時有所聞。

FRP 纖維筋工法自 1991 年首次在日本青森縣下水道之潛盾工程施工成功後，已普遍推行於全世界，為可靠性相當高的工法。FRP 纖維筋工法具縮短工期、減少地盤改良費用、提昇潛盾施工安全性之特點，筆者僅藉本文與同仁分享施工經驗與心得。

- [1] 廖伯勳、陳聰海，「FRP 纖維筋在潛盾工程之應用與案例探討」，地下管道，第 29 期，2013 年。
- [2] 賴永豐、康思敏、周忠仁、蘇鼎鈞、相木克介、林幹朗、和田幸一郎，「FRP 纖維筋混凝土在潛盾鏡面壁之應用」，地工技術，第 97 期，2003 年。
- [3] 美國混凝土學會，ACI 規範 440.1R-01 “Guide to Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars”，2001。
- [4] 日本 NOMST 研究會，NOMST(Novel Material Shield-cutttable Tunnel-wall System)技術說明資料，1997 年。
- [5] 陳文欣、吳文隆、陳聰海、張嘉興、林俊良，「高港~五甲~高雄 345kV 地下電纜線路潛盾洞道工程設計與施工」，中華技術，第 93 期，第 74-87 頁，2012 年。



台電工程月刊 819 期專輯徵稿啟事

- 本刊預定於 105 年 11 月發行以「需求面負載管理創新做法」為主題之專輯與讀者分享，歡迎有相關論著者踴躍投稿（截稿日為 105 年 8 月 15 日），每篇以 2 萬字（含圖、表）為原則。
- 稿件之撰寫格式、投稿方式及稿酬等悉依本刊原訂標準。
- 投稿相關事宜，若有任何疑問，請與我們聯絡，謝謝您！

☎ (02)2360-1095

✉ u117212@taipower.com.tw



使用「3D 分析圖台」進行架空輸電線路之規劃設計

Design of Overhead Transmission Lines by Using “3D Graphic Platform”

林東佑*
Lin, Tung-Yu

羅偉綸*
Lo, Wei-Lun

陳建文*
Chen, Chien-Wen

陳保陵*
Chen, Pao-Ling

摘要

本篇「3D 分析圖台」係以空載光達(Light Detection And Ranging, LiDAR)航蒐之數值地貌(Digital Surface Model, DSM)及數值地形(Digital Elevation Model, DEM)等點雲資料及空拍高解析度航空正射影像外，另行載入地籍圖、礦區範圍、地質潛勢區等圖資，自成一套全新客製化軟體，作為台電公司設計人員於架空輸電線路設計中分析其最佳路徑，並快速取得剖面線進行縱斷分析之工具。早期空載光達僅有以 DEM 自動繪製地形圖上的等高線之功能，且限於土方計算、斷面圖繪製、地表坡度及坡向計算等土木工程之運用。近來因「3D 分析圖台」的建立，已可廣泛運用於架空輸電線路之設計，設計人員藉由「3D 分析圖台」選定塔位後，電腦自動模擬各塔間之線下地形，並匯出縱斷面圖及塔基圖(.dwg 檔)，供設計人員判斷地形是否適合設置鐵塔及檢討線下高度是否符合設計標準。如檢討發現不符設計原則或標準，再重新擇定塔位進行模擬，即可迅速完成塔位之初步擇定。

Abstract

“3D graphic platform” is a custom-made software, which is composed of DSM, DEM, cadastral map, mining area and geological map, via Light Detection And Ranging (LiDAR). Taipower company designers not only can use “3D graphic platform” to analyze the optimal routes of overhead transmission lines, but also obtain the route profiles and the topographic maps from this software immediately. In the early stages, LiDAR was applied only to civil engineering such as earthwork calculation, drawing the sectional views, making earth’s surface slopes and aspect calculations. With the “3D graphic platform” used in the design of the overhead transmission line, Taipower engineers are able to choose appropriate tower locations by this software, then enable the computer to simulate the landform under transmission lines and produce route profiles and topographic maps (.dwg file) which are to be used to analyze the tower locations and review the distances between conducting wires and the earth’s surface or treetops. If the analysis results do not conform to the design standards and specification, the analytic process can be quickly performed again by selecting other tower locations.

關鍵詞(Key Words)：空載光達 (Light Detection And Ranging, LiDAR)、數值地貌(Digital Surface Model, DSM)、數值地形(Digital Elevation Model, DEM)。

壹、前言

「3D 分析圖台」是一套客製化的三維環境模擬成果導覽平台，該平台係由三部分所組成，

*台灣電力公司輸供電事業部輸變電工程處中區施工處

分別為(一)空載光達所航蒐的 DSM 及 DEM 等點雲資料及空拍高解析度航空正射影像圖；(二)現有圖籍資料庫整合，即將相關之地籍圖檔、礦區圖檔、山崩與地滑地質敏感區等圖資套疊於 3D 分析圖台內形成資料庫；(三)將前述圖資建構在 Skyline 公司發展的 TerraExplorer Pro 軟體上；運用 3D GIS 技術，建構成人性化的 3D 分析圖台，讓使用者可於個人電腦上執行，透過檔案輸入模式(如直接鍵入塔位座標點)與直覺化操作流程，直接點選塔位進行細節參數設定，並於 3D 圖台中即時產生示意鐵塔、鐵塔中心線、鐵塔左右側導線投影線。

以往規劃設計架空線路，首要之務即為路徑之選擇，若鐵塔位於山區則須先由航照圖判定該區地形，擇期前往實地踏勘測量，設計人員再依測繪之縱斷面圖及塔基圖成果，檢討該處是否符合設塔之要件，若經檢討不符設計原則及標準，則須另覓塔位再行前往測量，往返期程耗時甚鉅。

3D 分析圖台除增加前述地籍圖、礦區範圍、地質潛勢區等資料外，更以 3D 方式顯示地形地貌，且經選定塔位，即可直接輸出縱斷平面圖及塔基圖供設計人員作初步檢討，檢討可行後再行前往測量，有效提升工作效率，故此「3D 分析圖台」可謂架空輸電線路設計之最佳利器。

貳、建構 3D 分析圖台之要件

一、空載光達

空載光達(LiDAR)係最新航空測量技術，主要是將雷射掃瞄系統及數位相機等精密儀器設備安裝於小型航空器上進行地面飛行測量作業。「光達」是使用「光波(雷射)」掃瞄地面來進行偵測與距離量測之系統，也可稱為「雷射掃瞄儀」，高程資料藉由雷射掃瞄地面並解讀其回傳訊號得到。

由於光達採自動掃瞄，所以產製數值地形

(DEM)的速度比航空攝影測量快速，但是光達偵測到的也是樹冠房頂之數值地貌(DSM)高程資料，如圖 1 所示，必須經由大量自動與人工的植生濾除過程以得到原始地表之 DEM 高程資料，如圖 2 所示。

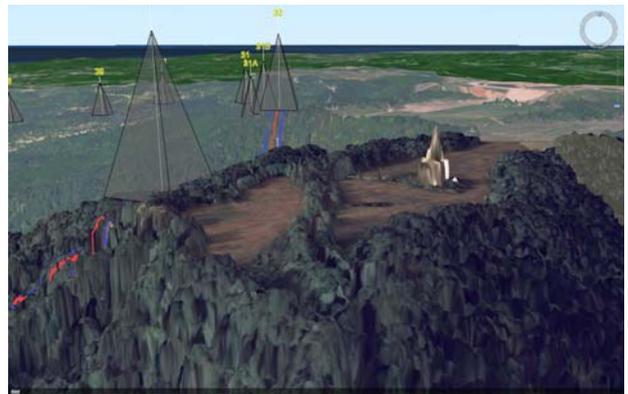


圖 1 DSM

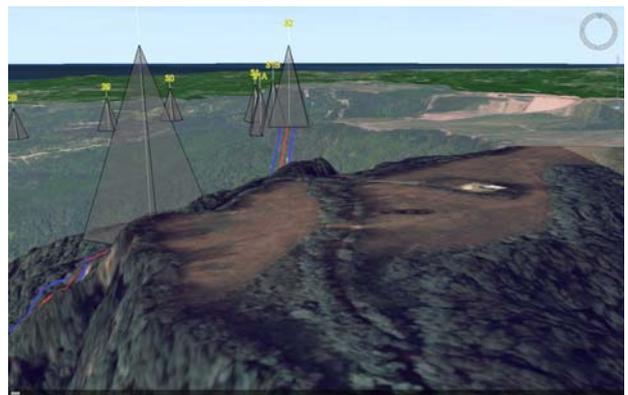


圖 2 DEM

為何架空輸電線路設計需要使用空載光達？台灣地區地狹人密，土地利用價值極高，中央山脈南北縱跨台灣島，超過 3000 公尺以上高山有百餘座，輸電線路興建於山區無可避免，現今在生態保育觀念提升及社會環境變遷下，台電公司為因應用電量成長所需興建相關電力建設將越來越困難，故架空輸電線路之規劃更須加以完善評估及規劃。

以本處興辦之田美～樂山 69kV 線之架空線路工程為例，該線路位於苗栗南庄及新竹五峰山區，16 公里長架空線路所經過地形相當特殊，其

中又以後段經過鹿場大山約 6 公里，海拔 1300 ~ 2600 公尺山勢更是險峻，亦無道路可通行，在規劃階段就耗費相當時間、人力及物力進行勘查，又必須聘請熟悉當地山區的原住民山青開闢簡便步道供設計人員踏勘，並充當設計人員之嚮導，遑論施工階段之困難度及耗費工期，因此，若採以往傳統架空線作業方式辦理測量設計，加上該區高山天候時常濃霧密佈及大雨造成地形崩坍等未確定因素，將無法精準預估作業時間，更會危及作業人員之安全。故本案架空輸電線路勘測及初步設計作業採用最新航空測量技術 LiDAR 方式辦理，經評估執行結果相較以往採地面測量方式有以下八項優點：

- (一) 節約勘測人力運用，
- (二) 維護作業人員安全，
- (三) 提高測量精確速度，
- (四) 縮短測量作業時程，
- (五) 克服地形交通限制，
- (六) 減少環境生態破壞，
- (七) 便利檢討設塔位置，
- (八) 輔助變更設計檢討^[1]。

基於上述優點，本處另興辦之通霄~峨眉 345kV 線，亦有前述之情事，且路徑更長達 52 公里，一半以上位於山區，為提昇架空線路設計效率，也採用此最新航空測量技術「空載光達」。

二、建置 3D 分析圖台

在這講求快速分析檢討的時代裏，空載光達的應用尚有如下之缺點：

(一) LiDAR 測量公司交圖工期長

設計人員是由航照圖選定鐵塔位址後，將座標交由測量公司進行 LiDAR 套繪縱斷平面圖(1km/天)及塔基圖(4 座/天)，交圖時間約為 2~4 個工作天，常緩不濟急。

(二) LiDAR 測量公司服務契約期限短

一條輸電線路從興工到竣工，耗時冗長，如大潭~龍潭 345kV 線就費時 15 年、南投~彰林 345kV 線也需要興建 18 年。

而與測量公司所訂的服務契約工期約 2~3 年，已不敷使用。倘若展期又需另外提報經費，徒增辦理採購程序。

(三) 圖籍資料庫未整合

設計人員僅能由航照圖初步選定鐵塔位址，然後再另外確認是否位在環境地質災害潛勢區、礦區或多筆土地之地籍圖內，稍一不慎，常常需要不斷重覆檢討許多次，對設計人員而言，費時且傷神。

為解決上述問題，利用通霄~峨眉 345kV 線業經取得沿線寬幅 1.3km LiDAR 點雲資料，並套疊現有圖籍資料，建置一套客製化的 3D 分析圖台，是有其必要的。

三、現有圖籍資料庫整合

以往規劃輸電線路時，係依「架空輸電線路路徑選擇準則」^[2]及「架空輸電線路設計準則」^[3]辦理，確保線路能與當地自然環境與社會環境相調和；及先行調查並配合都市計畫，避開學校、名勝古蹟、住宅區及計畫社區等處所，並儘量避免跨越既有房舍、避開油庫、火藥庫、軍事地區之地區施設。設計人員另需確認鐵塔位置，是否已避開環境地質災害潛勢區、礦區或多筆地籍之用地內，倘若前揭圖籍資料都能整合至 3D 分析圖台內，對設計者檢討塔位時，將是一大助益。

參、3D 分析圖台操作畫面及功能簡介

3D 分析圖台操作畫面主要分為六大區塊，分別是 1.資訊樹、2.數位羅盤、3.3D 場景視窗、4.滑鼠位置資訊、5.功能列等所組成，如圖 3 所示，提供使用者直覺化的操作模式。圖籍資料庫以圖層開關來設計，並於 3D 場景視窗內可藉由滑鼠、鍵盤進行六向式的全方位畫面操控。各區塊之功能分別說明如下：



圖 3 操作畫面

一、資訊樹

相關圖籍資料庫整合即是建立在資訊樹，採圖層式架構的型式視窗。勾選相關功能即可展示於 3D 場景視窗內，供使用者分析檢討相關圖資。如圖 4~圖 8 所示分別展示其相對功能，包括圖 4 顯示線路鐵塔中心線及 1.3km 之飛航範圍，圖 5 顯示現行礦區之範圍及位置，圖 6 顯示地籍範圍及地號，圖 7 顯示地質潛勢區，圖 8 則為顯示 5m 等高線之示意圖。



圖 4 飛航範圍及原通霄~峨眉 345kV 線

二、數位羅盤

數位羅盤具備放大、縮小、平移、飛行及旋轉等基本操作，並可藉由滑鼠及鍵盤進行六向式的全方位操控，如圖 9 所示。



圖 5 礦區



圖 6 地籍圖



圖 7 地質潛勢區

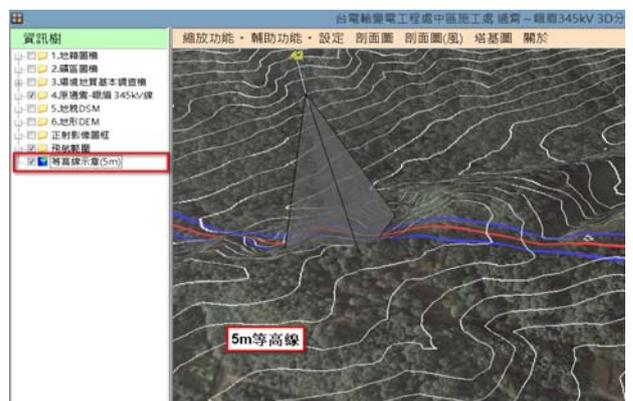


圖 8 5m 等高線

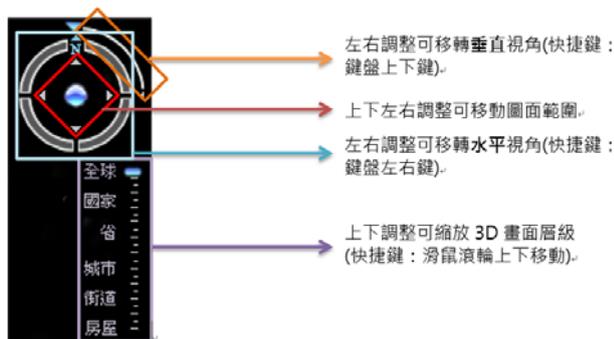


圖 9 數位羅盤



圖 10 執行剖面圖

三、3D 場景視窗

該區完全展示出 3D 模擬的畫面，於圖層控制區、功能列的操作成果皆能於此視窗展示出來，可將 3D 場景視窗視為一台浮在空中的攝影機，如圖 3 所示。

四、滑鼠位置資訊欄

於「滑鼠位置資訊欄」中，系統可即時演算滑鼠在 3D 場景內任意點，並同時顯示 WGS84 坐標系統、TWD97 坐標系統及地形高度，如圖 3 所示。

五、功能列

功能列包含七個功能選項，分別為 1.縮放功能、2.輔助功能、3.設定、4.剖面圖、5.剖面圖(風)、6.塔基圖及 7.關於等。其中又以 4.剖面圖及 6.塔基圖功能最為重要，說明如下：

(一) 剖面圖

剖面圖的功能，可於 3D 分析圖台進行單次連選連續塔位，並繪示所選鐵塔相對位置於 3D 場景視窗內，供設計者確認塔位及線路走向，如圖 10 所示。並可轉換為 AutoCAD 圖形檔繪製輸出，分為中心線斷面圖、距中心線 10m 處之左側斷面圖及右側斷面圖共 3 部分，各斷面圖繪製地面高層及樹冠高層斷面線，如圖 11 所示。

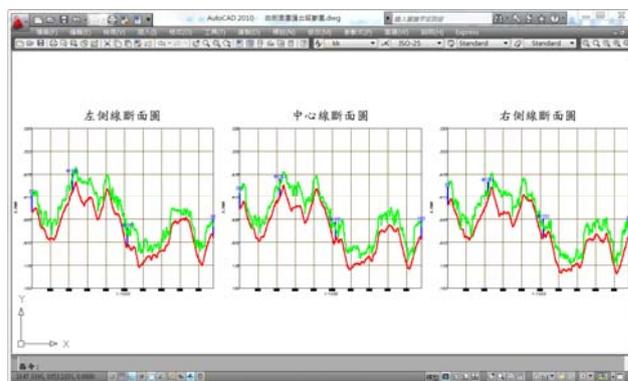


圖 11 由剖面圖匯出縱斷圖

(二) 塔基圖

塔基圖的功能，就是在 3D 分析圖台中選定塔位後，以 AutoCAD 圖形檔繪製而出，其中分為平面圖及斷面圖兩部分。

1. 塔基圖之平面圖：假定塔位中心點之標高為零，於 50m×50m 範圍內畫上 50 公分間隔之相對等高線並以 3D 漸層顯示，如圖 12 所示。

2. 塔基圖之斷面圖：以前揭塔位中心點之高程假定為零，斷面繪製方向則以中心點面向受電端為 A 方向；電源端為 B 方向(鐵塔有水平角度時，取二等分角中心線為 A、B 方向)；左側為 L 方向；右側為 R 方向，由 B 方向右後側對角線開始，順時針方向定為 a,b,c,d 腳。斷面線為中心線 A、B 方向及與中心線成直角之 L、R 方向及 45°對角之 a,c 及 b,d 方向共四條斷面繪製顯示，如圖 12 所示。

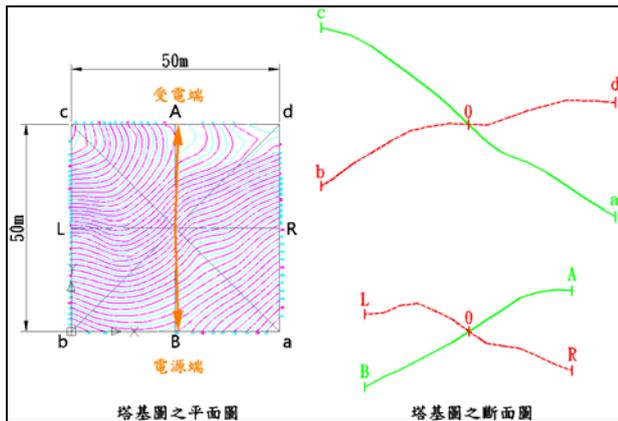


圖 12 塔基圖

肆、使用 LiDAR 設計流程與使用 3D 分析圖台之比較(以通霄~峨眉 345kV 線#84~#86 區間為例)

通霄~峨眉 345kV 線#83~#86 區間位於苗栗縣頭屋鄉山區，#83 及 #86 鐵塔位置已初步選定，惟#84、#85 路徑經過大○育樂集團、現行礦區及莊○華、楊○祥等六人共有之土地，如圖 13，大○育樂集團及莊君、楊君等皆堅決反對台電設塔，且依法令礦區內不得興建鐵塔，加上山區山勢嚴峻陡峭，更增添#84、#85 鐵塔勘選及設計之難度，故依此例作為 LiDAR 設計作業流程與使用 3D 分析圖台之差異比較。

一、傳統設計作業流程

(一) 鐵塔位置選擇

利用圖 13 航照圖中之等高線，粗略判定其地勢陡峭程度，選擇較平緩之地區作為#84、#85 鐵塔興建位置，並檢討各塔之間是否有跨越山頭、房舍或果園等，惟航照圖僅能顯示地面高程，設計員無法得知樹冠高度，且經過時光變遷，山區常有地主興建房屋或農舍等建築，確切實地狀況仍須前往現場測量方能得知。

(二) 確認#84、#85 鐵塔位置地籍。

(三) 確認#84、#85 鐵塔位置是否位於都市計畫範圍或政府大規模開發計劃範圍。

- (四) 確認#84、#85 鐵塔位置是否位於礦區內。
- (五) 線路是否經過重要道路(高速公路、高鐵)、天然氣、石油等輸送管線、既設及已規劃興建之輸電線路。
- (六) 初期準備及現場調查之工作

待前述(一)~(五)項皆確認完成，即前往現場測量，而#84、#85 塔址是否位於活動斷層、山崩與地滑及土石流等地質災害潛勢區(未來可能為公告之地質敏感區)，僅能上中央地調所「坡地環境地質資料庫查詢系統」查詢確認，如圖 14 所示，惟該查詢系統精度不高(顯示點直徑約 80m，鐵塔面積僅約為 20x20m)。

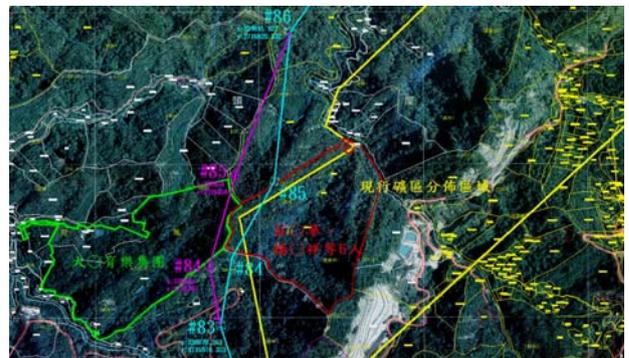


圖 13 利用航照圖選擇路徑



圖 14 坡地環境地質資料庫查詢系統

(七) 測量圖面檢討：

經現場實地測量後，LiDAR 測量公司約需 2~5 個工作天後完成縱斷面圖及塔基圖繪製並送交圖面，設計人員則依縱斷圖檢討導線弛度是否符合線下高度的規定，

並依塔基圖檢討該區地形是否適合興建鐵塔；若經檢討發現不符設計原則或標準，則須再由步驟(一)「鐵塔位置選擇」重新勘選。

綜上所述，使用 LiDAR 輸電線路設計作業流程從鐵塔勘選到設計定案耗時甚鉅，作業期間常常需費時 2~3 週。

二、使用「3D 分析圖台操作」實例

(一) 開啟 3D 分析圖台，於資訊樹勾選「4.原通霄~峨眉 345kV 線」，拉近找出原規劃 #83~#86 路徑，如圖 15 所示。

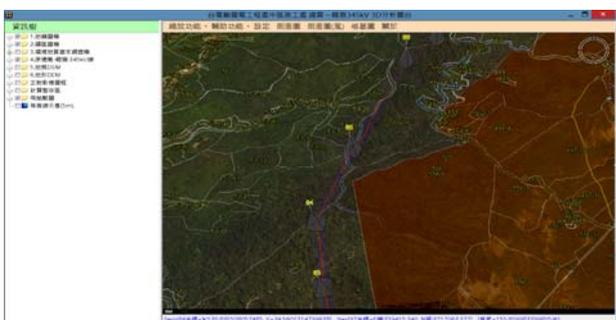


圖 15 通霄~峨眉 345kV 線#83~#86 路徑

(二) #84、#86 新塔位選擇：

勾選資訊樹之地籍圖檔、礦區圖檔，並點選功能列之「剖面圖」，因#83、#86 已定案，故在 3D 圖場景視窗中選擇可能可行之#84、#85 新塔位，分別輸入#83~#86 共 4 座塔位之座標後點選「設置」，即可在 3D 圖場景視窗中顯示 #83~新 #84~新 #85~#86 路徑，如圖 16、圖 17 所示。



圖 16 重新選擇#84、#85 鐵塔位置

(三) 匯出#83~#86 縱斷面圖：

於功能列之「剖面圖」點選「AutoCAD 剖面圖」，即可得#83~#86 區間之縱斷面圖 CAD 檔，此 CAD 檔同時包含輸電線路中心線及左右側各十公尺之縱斷面，如圖 11 所示，設計人員即可依此著手進行縱斷設計之檢討。

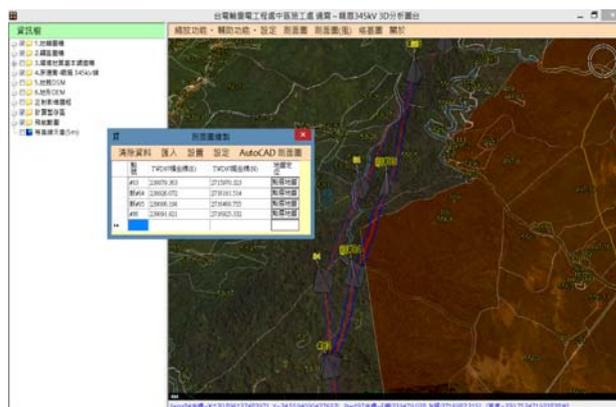


圖 17 #83~#86 新路徑

(四) 匯出新#84、新#85 塔基圖：

點選功能列之「塔基圖」，並輸入新#84 塔及其前後塔之座標，如圖 18 所示，輸入後點選「AutoCAD 等高線圖」，即可得新 #84 塔基圖 CAD 檔，如圖 19 所示，設計人員再依此 CAD 圖檔檢討該區地形是否符合設塔需求。新#85 塔基圖亦同。

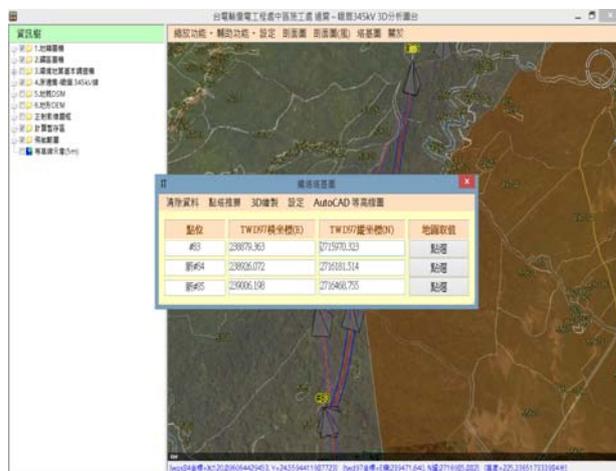


圖 18 輸入#84 塔及其前後塔之座標

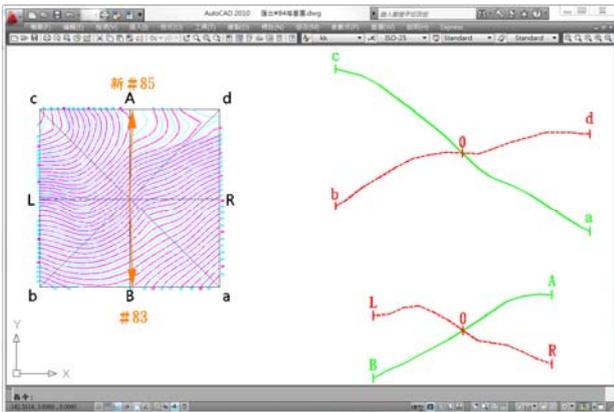


圖 19 匯出#84 塔基圖

(五) 如經檢討不可行，僅需於 3D 分析圖台中重新選擇#84、#85 鐵塔位置，即可快速取得縱斷面圖及塔基圖重新檢討；經檢討可行後(如圖 20、圖 21)再行前往現地測量，與傳統設計比較，現地測量前的前置作業可由最少 2~5 個工作天縮短至數小時即可完成，大大的提升工作效率，並節省可觀之人力物力。

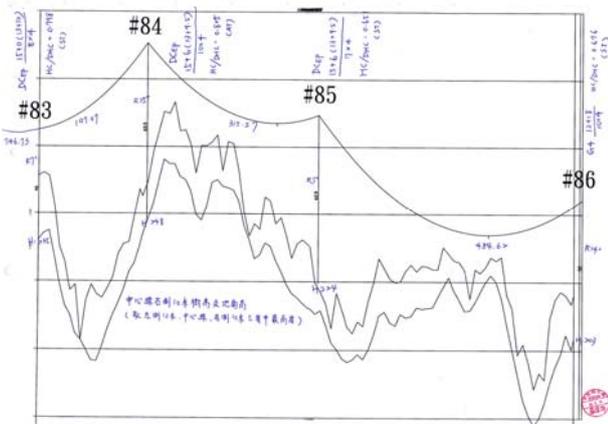


圖 20 匯出#83~#86 縱斷圖檢討

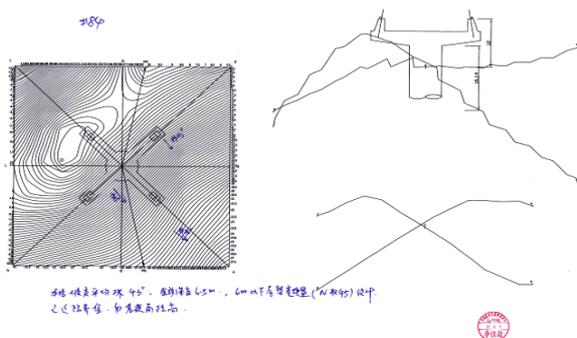


圖 21 匯出#84 塔基圖檢討

伍、結論與討論

一、結論

架空輸電線路從設計階段、地權階段到施工階段常遭遇困難瓶頸，需設計人員配合解決路徑變更移位檢討。倘若有此功能強大的 3D 分析圖台協助，將有助於縮短檢討時間，大大提高效率，且尚有以下優點：

- (一) 可先行避開山崩與地滑地質敏感區。
- (二) 可預先挑選單筆土地減少用地業主交涉。
- (三) 可先行評估索道路徑降低施工困難度。
- (四) 利用 3D 展示可清楚報告路徑及說明。

二、討論

- (一) 客製化「3D 分析圖台」具人性化之操作畫面，使用者可利用肉眼感受完整互動的地景視覺化系統，及時操作相關功能。一般而言，設計人員僅需接受 8 小時課程，即可上手匯出「剖面圖」及「塔基圖」。至於，圖檔匯出後之縱斷設計，則另需接受不同之課程訓練。
- (二) 空載光達航蒐 DSM 及 DEM 等點雲資料及空拍高解析度航空正射影像，費用以每公里計，約 1 萬 2000 元~1 萬 6000 元(航帶寬約 1.3 公里)，惟路徑長度須在 10 公里以上，才符合經濟效益。因每次飛航有其可觀基本費用，路徑低於 10 公里相對較不划算。
- (三) 開發此套客製化「3D 分析圖台」軟體約 75 萬元，目前僅能針對有 LiDAR 航蒐點雲資料之「通霄~峨眉 345kV 線」進行移位檢討(1.3 公里航帶內)，且需實體 USB Key 才能開通授權機制進行使用。倘若有新 LiDAR 航蒐線路，可協議測量公司置入「3D 分析圖台」內，節省軟體開發費用，僅需加購實體 USB Key 即可使用。

陸、參考文獻

- [1] 劉佳祺,「航測技術應用於特殊地形架空輸電線路工作經驗報告」,台電公司中區施工處,台中,2008年。
- [2] 台灣電力公司輸變電工程處,架空輸電線路路徑選擇準則,民國85年7月27日。
- [3] 台灣電力公司輸變電工程處,架空輸電線路設計準則,民國102年9月17日。

台電工程月刊 819 期專輯徵稿啟事

- 本刊預定於 105 年 11 月發行以「需求面負載管理創新做法」為主題之專輯與讀者分享,歡迎有相關論著者踴躍投稿(截稿日為 105 年 8 月 15 日),每篇以 2 萬字(含圖、表)為原則。
- 稿件之撰寫格式、投稿方式及稿酬等悉依本刊原訂標準。
- 投稿相關事宜,若有任何疑問,請與我們聯絡,謝謝您!

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



配電線路因異常電壓引起用戶器具燒損之保護研究

Protection of Customer Appliances Damage Caused by Abnormal Voltage of Distribution Lines

卓明遠*	黃信益*	陳建男*	徐永騰*
Cho, Ming-Yuan	Huang, Hsin-I	Chen, Chien-Nan	Hsu, Yung-Teng
張文曜**	蔡宗霖***	陳正源***	陳煥文***
Chang, Wen-Yao	Tsai, Tsung-Lin	Chen, Cheng-Yuan	Chen, Huan-Wen

(102~103 年度研究計畫論文)

摘要

本研究計畫目的建立一套用戶用電安全緊急回報系統，結合停限電管理系統之饋線用戶資料庫，將資訊傳至各區處，當異常電壓發生時，系統會自動判斷以及搜尋該用戶，迅速了解該事故點資訊進而確認停電區域，聯絡現場維修人員，縮短搶修時間，提高復電處理效率。計畫首先模擬分析配電線路發生事故前後電壓變化，再由實測方式來驗證模擬結果，探討防制器具燒損之方法，並研製用電安全監控模組，將資料經由 GPRS 通訊傳回伺服器儲存，將故障警訊通知維護人員。最後，將所開發之監測系統安裝實測，驗證本系統具實用性與效能。

Abstract

The purpose of this study is to establish an electrical safety alarm system, which is designed to combine the OMS (Outage Management System) database. When the alarm goes off, the system will judge where the affected customers are and analyze the relevant customers' information. Having making sure the outage area, maintaining personnel are able to spend lesser time fixing the malfunctions. At first, the system will simulate the variation in voltage when an accident occurs in the distribution line, and then verify the simulated results by actual tests, enabling us to find out a method to prevent the equipment from burning out and to develop the electrical suitable safety module. In addition, the safety module will transmit data via GPRS to remote servers, and judge the analytical result so as to send the alarms to the responsible maintainers. Finally, a monitoring system will be installed to verify the system's practicability and effectiveness.

關鍵詞(Key Words)：異常電壓(Abnormal Voltage)、緊急回報系統(Alarm Recalled System)、停限電管理系統(Outage Management System)、GPRS 無線通訊(GPRS Wireless Communication)、用電安全(Electrical Safety)。

*國立高雄應用科技大學

**台灣電力公司綜合研究所

***台灣電力公司配售電事業部

壹、緒論

近年來，台電公司配電線路因斷線(欠相)引起異常電壓、用戶中性線接觸不良或遭受外力破壞，以致電壓發生浮動現象，造成用戶之設備損壞事故，時有所聞。歷年來，逐步進行多項可行之防範措施，惟僅針對三相線路進行研討，並未針對單相中性線、各種接地情況與影響異常電壓之因素予以考量^[1-2]。

有鑒於用戶使用電子設備等用電產品大幅增加，對於接地設備與系統之好壞更加敏感，於配電線路斷線事故發生後，產生各種不同形式之異常電壓，難以證明與用戶電器設備燒毀無關；本研究有必要針對市面上電視家電、電腦照明器具等電器設備之耐突波與過電壓之能力進行了解。由於低壓用戶總開關幾乎皆為 NFB 無熔絲開關，此類開關並不具備啟斷後自動復歸能力，其在用電安全防護上的功能相當陽春。再者，如欲具備自動復歸能力，則必須選用性能較優之電磁開關作為總開關。

現階段用戶停電叫修須透過客服中心，再由客服中心分派至各區處巡修課進行檢修復電作業。此作業方式須依賴客服中心與 DDCC 人員的配合，才能將用戶停電資訊傳達至區處巡修課。此外，巡修課維修人員必須進入 OMS 停限電管理系統，以自身經驗判斷可能停電區域，此一程序將耗費較多時間。為維供電安全，提升復電處理效率，有必要研製 GPRS 型用戶端之用電安全模組。當故障發生時能自動回報停電事故至區處巡修課，配合所建置具人工智慧之自動回報系統，當可大大降低停電處理時間。此外藉由用電安全模組的自動啟斷功能，能有效降低因過電壓或電壓復動所造成的電器燒毀事故。

一、計畫目標

(一) 探討配電線路引起異常電壓之影響因素，並提出防範措施建議。

(二) 研製具異常電壓、電壓浮動、過載保護、斷電處理及緊急回報等功能之用電安全監控模組。

(三) 結合 OMS 停限電管理系統之饋線用戶資料庫，建立配電事故引起故障回報系統，快速顯示發生異常電壓用戶之地理位址與所屬配電變壓器、開關與饋線資訊。

二、預期成效

(一) 推導負載、反饋路徑阻抗與欠相線路之關係，並模擬驗證其正確性。

(二) 建立 ATP-EMTP 線路模型之模擬分析程式。

(三) 設計具異常電壓、電壓浮動、過載保護、斷電處理及緊急回報等功能之 GPRS 型用電安全監控模組。

(四) 建立配電事故引起故障回報系統資料庫、停電範圍搜尋機制、人機介面。

貳、配電線路事故產生異常電壓模擬分析

本研究應用電磁暫態程式(Electromagnetic Transients Program, EMTP)來做模擬分析。EMTP 是一種可用來模擬多相系統的電磁暫態、電機暫態和控制系統等暫態現象之軟體程式。此外 ATPDraw (Alternative Transients Program)是一套架構於 EMTP，使用 Windows 視窗下建構電路模組之 ATP 圖形化介面模擬軟體，在這套模擬軟體中，可選擇系統內建大量元件，建構電路之數位模擬、分析用。建立 ATP-EMTP 模擬電路流程如圖 1 所示^[3]。

一、架空與地下線路欠相

配電線路欠相之電路圖如圖 2，在此開 Y-開 Δ 配電變壓器組均不接負載， Δ - Δ 變壓器組接三相平衡負載。

模擬結果如表 1 所示，過電壓情況約為正常電壓 1.3 倍；而其過電壓情況均發生在開 Y-開 Δ 變壓器組二次側頭尾端電壓(c-a)。

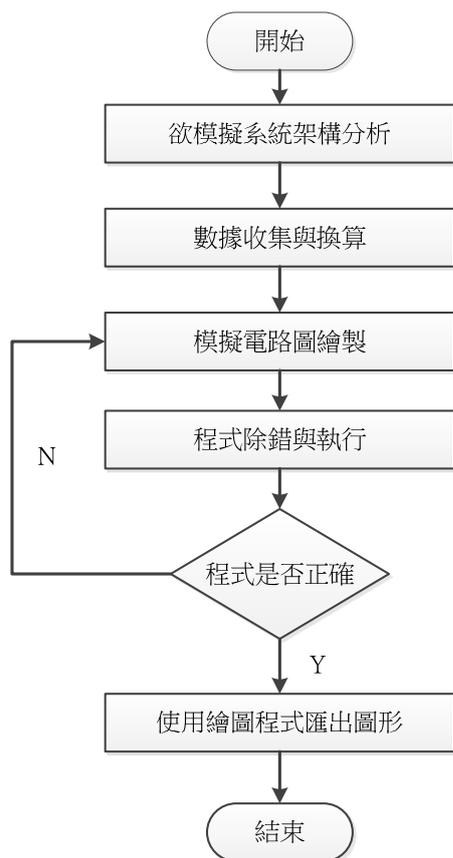
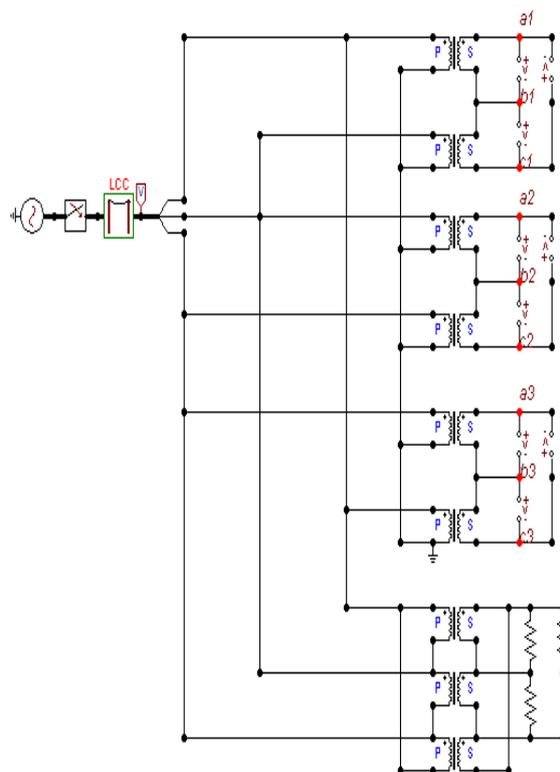


圖 1 建立 ATP-EMTP 模擬電路流程

圖 2 開 Y-開 Δ 配電變壓器組均不接負載表 1 欠相模擬結果，開 Y-開 Δ 配電變壓器組均不接負載

高壓側欠相別	開 Y-開 Δ 變壓器組#1			開 Y-開 Δ 變壓器組#2			開 Y-開 Δ 變壓器組#3		
	a1-b1 (V)	b1-c1 (V)	c1-a1 (V)	a2-b2 (V)	b2-c2 (V)	c2-a2 (V)	a3-b3 (V)	b3-c3 (V)	c3-a3 (V)
A	104 $\angle 179^\circ$	220 $\angle -120^\circ$	286 $\angle 41^\circ$	220 $\angle -121^\circ$	220 $\angle 120^\circ$	220 $\angle 1^\circ$	220 $\angle 121^\circ$	104 $\angle 179^\circ$	288 $\angle -42^\circ$
B	220 $\angle 1^\circ$	105 $\angle 59^\circ$	288 $\angle -162^\circ$	105 $\angle -59^\circ$	220 $\angle 119^\circ$	286 $\angle -78^\circ$	220 $\angle 120^\circ$	220 $\angle 1^\circ$	220 $\angle -120^\circ$
C	220 $\angle 1^\circ$	220 $\angle -121^\circ$	220 $\angle 120^\circ$	220 $\angle -120^\circ$	106 $\angle -60^\circ$	288 $\angle 79^\circ$	106 $\angle -60^\circ$	220 $\angle 1^\circ$	287 $\angle 161^\circ$
正常	220 $\angle 1^\circ$	220 $\angle -119^\circ$	220 $\angle 120^\circ$	220 $\angle -121^\circ$	220 $\angle 120^\circ$	220 $\angle 1^\circ$	220 $\angle 120^\circ$	220 $\angle 1^\circ$	220 $\angle -121^\circ$

二、單相三線中性線開路

現今 110V/220V 表燈用戶，台灣電力公司以單相三線的供電方式，而在事故案例中，以中性線開路引起異常電壓事故佔大多數。

圖 3 為模擬中性線開路電路圖，於第一組開

Y-開 Δ 變壓器組模擬中性線開路的狀況，主要分析當中性線開路時，負載平衡、不平衡以及接地是否良好，對於 V_{a1n} 與 V_{b1n} 的影響。假設用戶系統與設備共同接地，良好接地為 5Ω ，不良接地為 150Ω ，正常電壓值 V_{a1n} 與 V_{b1n} 皆為 110V，而模擬結果如表 2，電壓均以有效值表示。

三、單相接地故障

在配電系統可能發生之短路故障大致可分為 4 種：三相短路故障、兩相短路故障、兩相短路接地故障以及單相接地故障，以過往事故案例來統計，發生單相接地故障之機率最高，三相短路故障最低，因此本小節將著重探討單相接地故障之特性。圖 4 為單相接地故障模擬圖，當 $t=0.01\text{sec}$ 時將 SW1 開關關閉，於 A、B、C 三相

分別模擬接地故障，並在 $t=0.06\text{sec}$ 時將電源跳脫（模擬系統保護電驛啟斷時間在 3~5 周波），模擬結果如表 3。架空線路模擬之結果，變壓器二次側電壓產生變化，將發生過電壓的情況，約為額定電壓的 1.4~2.2 倍；地下電纜模擬之結果，由於大地電容效應之關係，過電壓的情況比架空線路更加嚴重，約為額定電壓 1.6~2.6 倍。

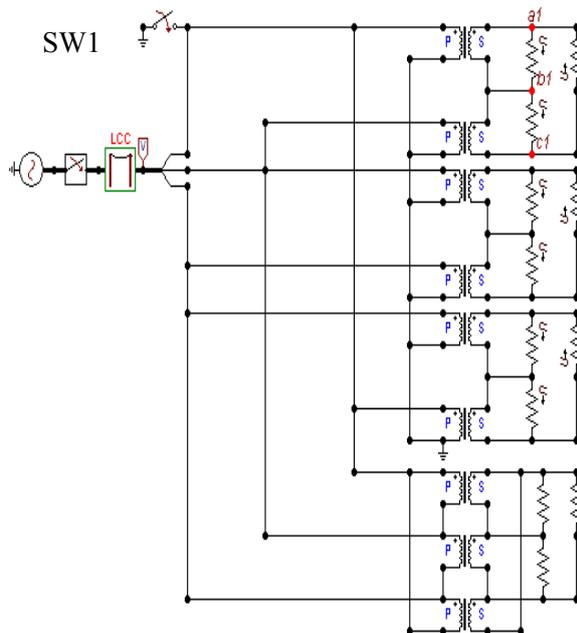
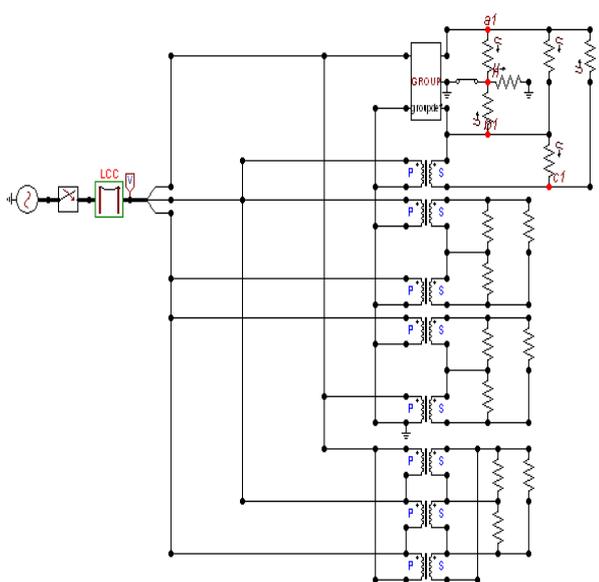


圖 3 中間抽頭變壓器二次側中性線開路模擬電路圖

圖 4 單相接地故障模擬電路圖

表 2 單相三線中性線開路之模擬結果

種類	負載		接地電阻	V_{a1n} (V)	V_{b1n} (V)
負載平衡	$Z_{a1n}=21\Omega$ $Z_{b1n}=20\Omega$	架空	1Ω	116	115
		地下	(良好)	116	115
		架空	149Ω	117	114
		地下	(不良)	118	113
負載不平衡	$Z_{a1n}=21\Omega$ $Z_{b1n}=41\Omega$	架空	1Ω	113	118
		地下	(良好)	112	119
		架空	149Ω	83	148
		地下	(不良)	82	150
	$Z_{a1n}=21\Omega$ $Z_{b1n}=149\Omega$	架空	1Ω	112	119
		地下	(良好)	111	120
		架空	149Ω	39	192
		地下	(不良)	36	195

表 3 單相接地故障之模擬結果

接地故障相別	開 Y-開 Δ 變壓器組#1 (匝數比 n=30) 之負載(Ω)	$V_{a1b1}(V)$	$V_{b1c1}(V)$	$V_{c1a1}(V)$	$V_{a2b2}(V)$	$V_{b2c2}(V)$	$V_{c2a2}(V)$	$V_{a3b3}(V)$	$V_{b3c3}(V)$	$V_{c3a3}(V)$
A 相	$Z_{a1b1}=5$ $Z_{b1c1}=5$ $Z_{c1a1}=5$	$6 \angle 106^\circ$	$320 \angle -144^\circ$	$313 \angle 36^\circ$	$308 \angle -144^\circ$	$293 \angle 140^\circ$	$495 \angle 0^\circ$	$289 \angle 140^\circ$	$6 \angle 30^\circ$	$301 \angle -39^\circ$
B 相		$309 \angle 21^\circ$	$6 \angle -88^\circ$	$308 \angle -158^\circ$	$6 \angle -12^\circ$	$323 \angle 95^\circ$	$298 \angle -85^\circ$	$317 \angle 95^\circ$	$315 \angle 22^\circ$	$488 \angle -121^\circ$
C 相		$303 \angle -22^\circ$	$314 \angle -98^\circ$	$480 \angle 119^\circ$	$309 \angle -97^\circ$	$6 \angle 152^\circ$	$303 \angle 82^\circ$	$6 \angle -131^\circ$	$309 \angle -22^\circ$	$303 \angle 156^\circ$
正常		$220 \angle 0^\circ$	$220 \angle -119^\circ$	$220 \angle 119^\circ$	$214 \angle -122^\circ$	$221 \angle 118^\circ$	$216 \angle -3^\circ$	$214 \angle 118^\circ$	$221 \angle -3^\circ$	$216 \angle -122^\circ$

四、雷擊突波

目前國內的雷擊衝擊電流標準是採用 IEC 規範之波頭時間 t_1 和波尾時間 t_2 ，分別為 $8\mu s$ 和 $20\mu s$ ，如圖 5 所示。根據電力公司研究與統計，台灣地區發生雷擊突波電流值約在 5 至 100kA 間。在此利用 ATP-EMTP 提供之 Heidler 模型模擬雷擊電流源，雷擊電流峰值分別以 20kA、70kA，雷擊波頭時間 $8\mu s$ ，波尾時間 $20\mu s$ 。圖 6 為模擬雷擊突波之電路圖，雷擊電流由變壓器一

次側輸入，假設配電線路及變壓器未裝設避雷器，雷擊突波電流於 $t=0.01\text{sec}$ 由 A、B、C 三相分別投入，其模擬結果如表 4 所示^[4]。

當雷擊電流 20kA，由 A、B、C 三相分別投入雷擊電流，第一組開 Y-開 Δ 變壓器二次側線間之最大瞬間電壓峰值分別可達 11.5kV、10.8kV 及 10.3kV；當雷擊電流 70kA 投入時，電壓變化狀況，最大瞬間電壓峰值分別可達 80.8kV、81.4kV 及 73.6kV，約經過 0.5 週期波後就趨於穩定正弦波。

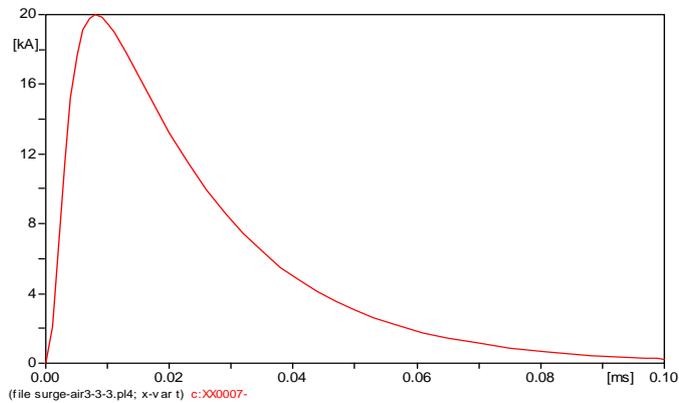


圖 5 ATP-EMTP 之模擬波形

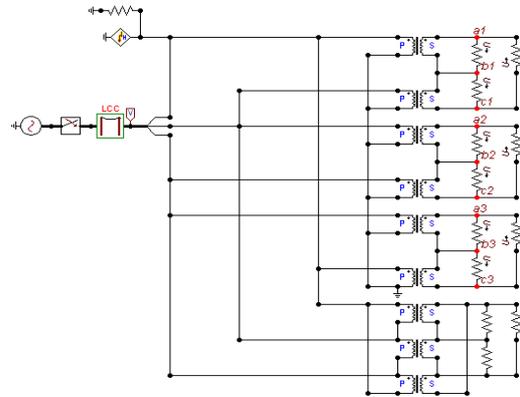


圖 6 雷擊突波模擬電路圖

表 4 雷擊突波之模擬結果

輸入相別	突波電流(A)	開 Y-開 Δ 變壓器組#1 二次側最大瞬時電壓峰值(V)			到達穩定時間 (cycle)	開 Y-開 Δ 變壓器組#1 二次側穩定電壓有效值(V)		
		V_{a1b1}	V_{b1c1}	V_{c1a1}		V_{a1b1}	V_{b1c1}	V_{c1a1}
A 相	20k	7,394	4,716	11,486	0.5	216	221	217
B 相		4,516	7,613	10,807	0.5	216	221	217
C 相		4,878	5,440	10,280	0.5	215	221	216
A 相	70k	53,194	33,156	80,781	0.5	215	221	216
B 相		33,103	53,336	81,390	0.5	216	220	216
C 相		35,365	38,227	73,592	0.5	215	221	217

參、異常電壓對家電設備影響實測分析

一、突波對家電設備影響實測分析

圖 7 為突波測試環境示意圖，待測物接於突波產生器輸出之電源，可分別輸出 110V 以及 220V 兩種電壓。

測試的項目以日常生活常用之家電設備為主如表 5，有電視螢幕、攝影機(含主機)、電腦、寬頻調變器、電冰箱與洗衣機及燈管(分為 T8 日光燈與 T5 日光燈兩種)。而冷氣以兩種不同廠牌做測試。測試一般家電對突波的耐受程度與加設突波吸收器後有何差異^[5]。

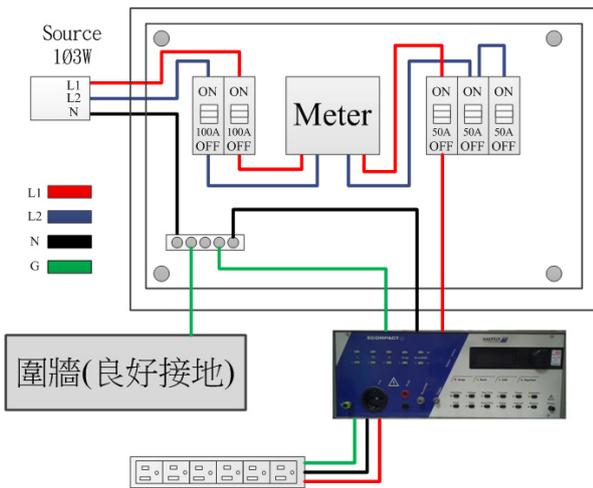


圖 7 突波測試配線圖

表 5 家電測試項目與規格

項目	電源電壓	消耗功率
電視機	110V~240V	40W(max)
攝影機	110V~240V	12W(max)
攝影機主機	110V~240V	50W(max)
電腦	115V	138W
寬頻調變器	110V	12W(W)
T8 日光燈	115V	21W
T5 日光燈	110V	17W
A 牌冷氣	220V	2kW
B 牌冷氣	220V	2.8kW
冰箱	110V	309W
洗衣機	110V	450W

比較裝設突波吸收器前後電壓波行之差異，在未裝設突波吸收器前，突波電壓分別可達 1.94kV、2.94kV 及 3.96kV，裝設突波吸收器後，突波電壓降至 500V~640V 之間，證實突波吸收器對於突波電壓擁有抑制的能力如圖 8、圖 9。

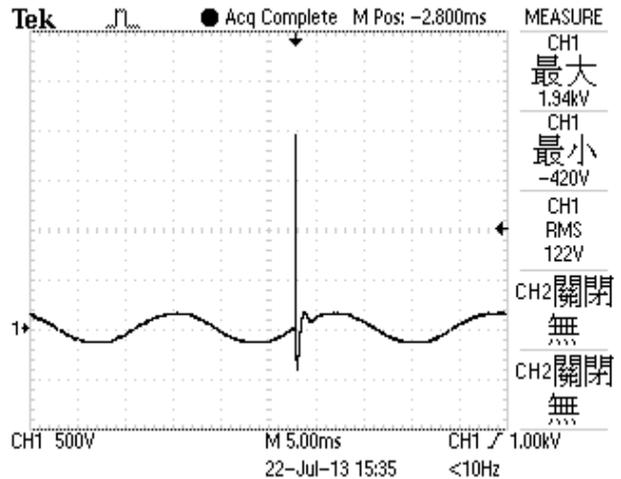


圖 8 2kV 突波電壓(未裝設突波吸收器)

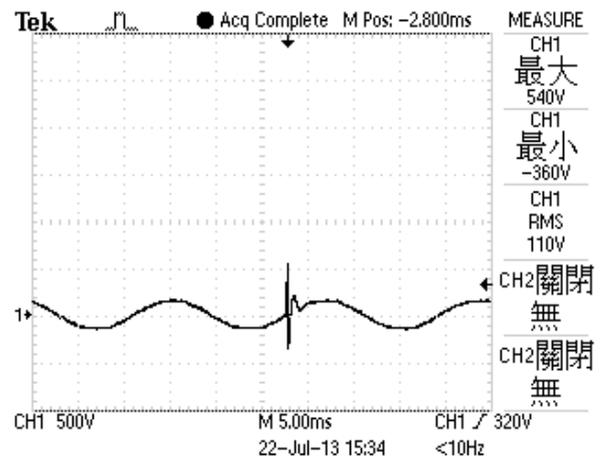


圖 9 2kV 突波電壓(裝設突波吸收器)

表 6 為家電設備運行時突波測試結果，觀察發現當電源前端裝設突波吸收器時，家電設備並不會受突波影響而損壞，當未裝設突波吸收器時，部份家電設備因突波造成設備無法運行，經檢測後得知，使設備無法運行原因為電源模組損壞以及保險絲熔斷，將電源模組以及保險絲更換後，設備皆可正常運行。

二、過電壓對家電設備影響實測分析

圖 10 為過電壓測試環境示意圖，待測物接於變壓器輸出之電源，輸出電壓範圍 110V~380V，利用自耦變壓器與升壓變壓器串接，達到測試所需電壓大小。

過壓測試家電項目與突波測試相同。即測試

一般家電設備，當輸入電壓超過設備最高額定電壓並持續一段時間，其對過壓之耐受程度。

測試電壓為設備最高額定電壓之 1.1pu、1.2pu，測試時間持續 10 分鐘，表 7 為過電壓測試結果，由結果得知，過電壓對於家電設備短時間並不會造成傷害。

表 6 設備突波測試結果

項目	裝設 A 牌 突波吸收器			裝設 B 牌 突波吸收器			未裝設突波吸收器			備註
	2kV	3kV	4kV	2kV	3kV	4kV	2kV	3kV	4kV	
電視機	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
攝影機	○	○	○	○	○	○	×			電源模組燒損(二極體燒損)
攝影機主機	○	○	○	○	○	○	○	○	×	電源模組燒損(保險絲熔斷、PCB 板燒損)
電腦	○	○	○	○	○	○	○	×		電源模組燒損
寬頻調變器	○	○	○	○	○	○	○	○	×	電源模組燒損(保險絲熔斷、PCB 板燒損)
T8 日光燈	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
T5 日光燈	○	○	○	○	○	○	○	×		保險絲熔斷
A 牌冷氣	○	○	○	○	○	○	×			保險絲熔斷
B 牌冷氣	○	○	○	○	○	○	○	○	×	保險絲熔斷
冰箱	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
洗衣機	○	○	○	○	○	○	×			保險絲熔斷

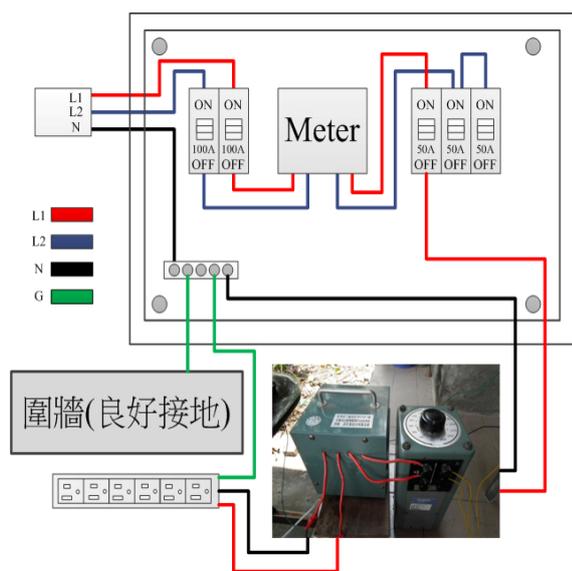


圖 10 過電壓測試配線圖

表 7 過電壓測試結果

項目	額定電壓範圍	1.1p.u.	1.2p.u.
電視機	110V~240V	○	○
攝影機	110V~240V	○	○
攝影機主機	110V~240V	○	○
電腦	115V	○	○
寬頻調變器	110V	○	○
T8 日光燈	115V	○	○
T5 日光燈	110V	○	○
A 牌冷氣	220V	○	○
B 牌冷氣	220V	○	○
電冰箱	110V	○	○
洗衣機	110V	○	○

肆、用電安全監控遙測系統

圖 11 為用戶端用電遙測監控系統架構圖，依照設計項目概分可分成用戶端用電之遠端資料收集站軟/硬體設計與後端監控中心伺服器軟體設計。本遙測監控系統主要架構係以監控中心經由有線網路連接到電信基地台再透過無線通訊系統 GPRS/3.5G 通訊方式來存取位於遠端資料收集站之資訊，而後端監控中心實現一結合 Google Map 地理圖資之圖形化監控介面，並將資訊顯示於畫面上。監控中心之監控管理系統主要

係完成即時監測與控制功能，該 Web Based 軟體主要功能係可將用戶端用電資料，由遠端資料收集站讀回並顯示於監控中心螢幕上，亦可同時作資料存檔。關於資料存檔方面，本文使用 SQL Server 資料庫系統並結合 OMS 停限電管理系統之饋線用戶資料庫作為此監控管理系統軟體的資料庫，利用 Web Based 通訊程式透過資料存取介面來進行資料的管理與控制。

圖 12 為用電安全監控模組架構圖。用電安全監控模組硬體電路方塊圖如圖 13 所示，可分為四個部分，即資料處理模組、數據擷取模組、GPRS 資料蒐集模組及電源模組。

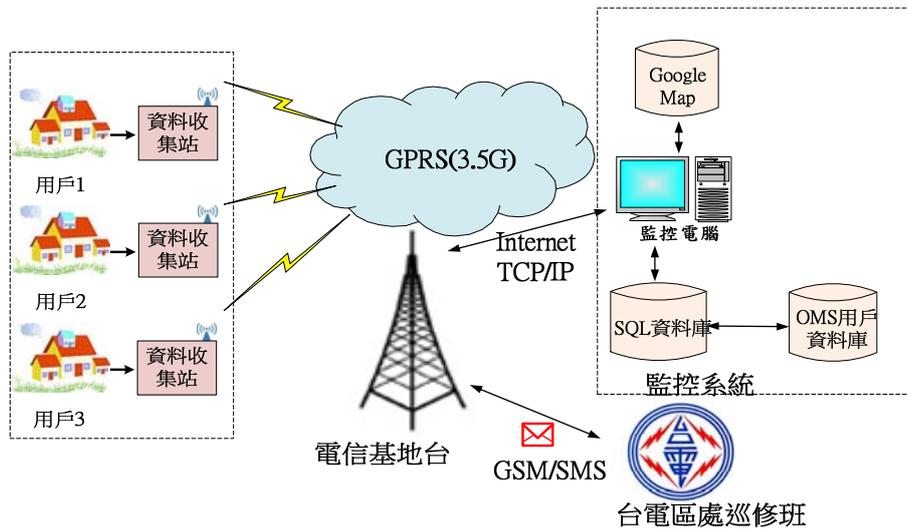


圖 11 用戶端用電遙測監控系統

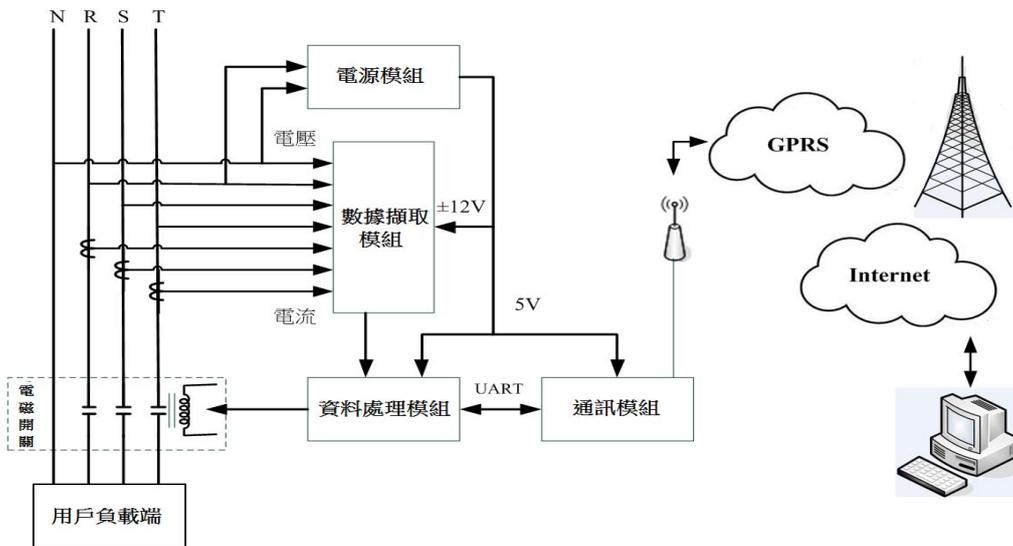


圖 12 用電監控模組資料收集系統架構圖

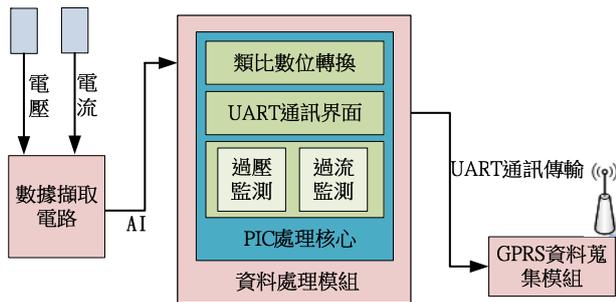


圖 13 用電監控模組硬體電路方塊圖

一、資料處理模組

資料處理模組係由一微處理機(MCU)為處理核心。該晶片結合 16 位元微處理機控制特點和 DSP 高速運算之優點，因此極為適合作為前端訊號擷取轉換使用。其主要功能為利用此 MCU 完成 10 位元 ADC 進行過電壓、過電流監測，同時將這些資訊透過 UART 埠與 GPRS 資料蒐集模組連結，再進行無限數據傳輸。當電壓及電流值異常時，MCU 將控制電磁開關切斷電源，以防家電設備因異常電壓造成損毀，同時將警報回傳至後端。圖 14 為資料處理模組實體圖。



圖 14 資料處理模組

二、GPRS 通訊模組

圖 15 為 GPRS based 資料蒐集模組硬體系統方塊圖，依其架構可細分為：

(一) 電源轉換器：將輸入直流電源(8V 以上)轉換成兩組直流電源，一組 5V 直流電源，提供 GSM/GPRS (3.5G) 模組使用，另一組 3V 提供給 SIM 卡使用。

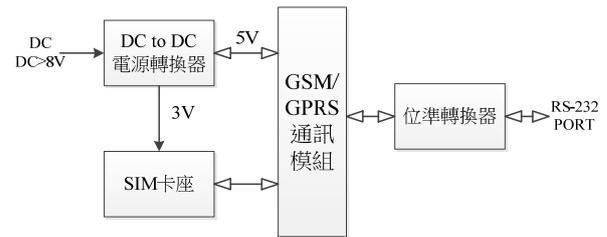


圖 15 GPRS (3.5G) 通訊硬體系統方塊圖

(二) GSM/GPRS (3.5G) 通訊模組：GSM 其功能與一般手機相同，GPRS 則是以封包的方式傳送、計費，另外此通訊模組提供一組串列介面 RS-232 供連線使用。如圖 16 及圖 17 為其資料蒐集與控制模組外觀實體。

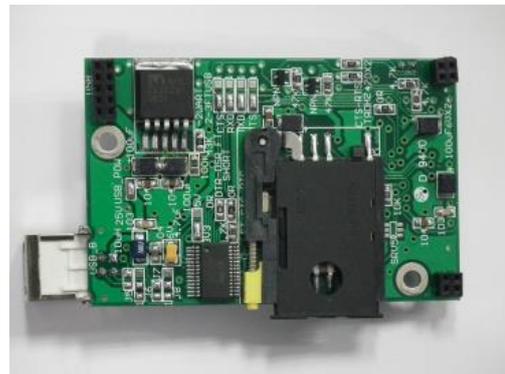


圖 16 GSM/GPRS 型資料蒐集與控制模組正面

(三) 位準轉換器：係將 GSM/GPRS 串列介面位準提昇至一般標準 RS-232 準位，使 GSM/GPRS 模組可與外部連線作控制。只要有標準 RS-232 介面均可與其連接，但必須注意此 RS-232 介面為 DCE(Data Circuit Equipment)，故連線時須注意連線纜線為非交越型(No Cross Over Type)。

(四) SIM 座：提供放置 SIM 卡使用，並將 SIM 卡連接至 GSM 通訊模組。

(五) 本 GPRS 資料收集模組可採用 GSM 簡訊或 GPRS 封包方式通訊或以更高速率的 3.5G 方式連接，GSM 的簡訊主要利用 GSM 通訊網路傳輸於行動台之間的文字訊息。

三、數據擷取模組

由於 MCU 容許輸入電壓範圍為 DC0V~3.3V，因此量測電壓、電流時需透過資料擷取模組做訊號處理。如圖 17、18 所示，資料擷取模組可分為電壓與電流兩部分：電壓訊號係以電阻分壓方式降壓，電流訊號係以 CT 擷取電流訊號轉成電壓訊號，而後經過 AFE(Analog Front-End)電路，使訊號介於 MCU 容許工作範圍，最後將數據傳送至資料處理模組進行電壓、電流計算。

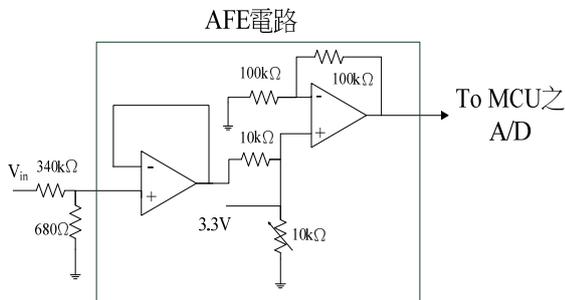


圖 17 電壓擷取電路圖

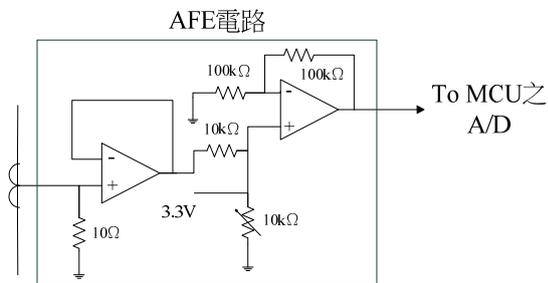


圖 18 電流擷取電路圖

四、電源模組

資料處理模組與數據擷取模組需透過電源模組引入 DC ±12V 與 DC 5V 之工作電壓。如圖 19 為電源模組實體圖，外部引入 AC90V~264V，經由 AC-DC Power Module 轉成工作電壓供電至資料處理模組及數據擷取模組。此電源模組適用於單相系統及三相系統，將輸入端電壓送至 AFE 電路作為電壓訊號經過資料處理模組計算後判斷其是否為過電壓狀態，輸出端則會依運算結果來控制電磁開關導通狀態。



圖 19 電源模組

伍、系統整合與安裝測試

一、前端資料蒐集站建置

為驗證用電安全監控模組應用在實際上是能否發揮其功能，研究團隊南下屏東做實驗，圖 20 為測試架構圖，過電壓測試使用自耦變壓器來模擬過電壓環境，過電流測試則使用三架電阻式電熱水器串聯使電流能瞬間達到所要求之電流值。

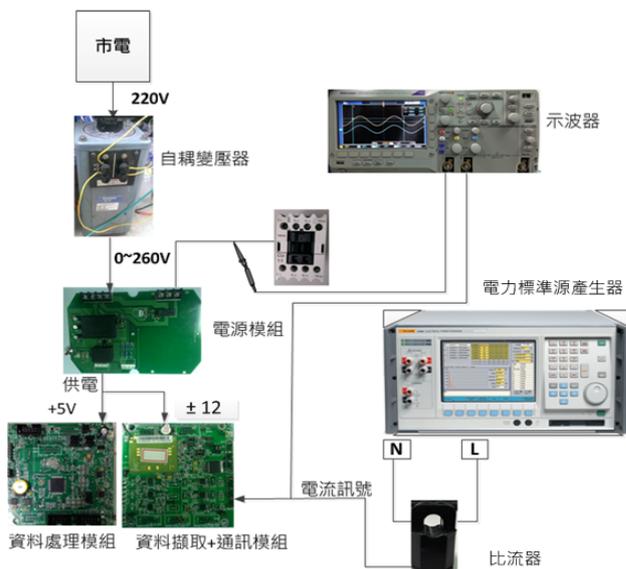


圖 20 測試架構圖

二、系統功能和介面規劃

系統管理功能之主要目的為讓系統管理者有效管理此監控系統之用，其功能共規劃：帳號

與權限管理、區處帳密與權限管理、管理權限 IP 限制、資料欄位維護、顯示欄位維護、編輯首頁功能、網站記錄檔功能、區處紀錄檔功能、編輯 Email 發送清單以及警示值上下設定。各監控功能之流程圖將介紹如下：

(一) 登入作業

使用者可由此輸入帳號和密碼進入此系統。畫面下方為系統公告，透過公告方式來告知使用者在系統上的最新資訊如圖 21。

(二) 監控站即時資訊

安裝於用戶端之用電監控安全模組會將資料傳送至此處，此頁面將顯示出目前各監控站點狀態，綠色表示正常，紅色則為狀況異常，並提供使用者選擇欲知站點詳細資料，此功能結合 GOOGLE MAP，能夠幫助使用者迅速指出欲查之站點詳細

位置如圖 22。圖 23 為站點詳細資料，其用戶端之硬體資訊包含站點之通訊狀態是否為異常、Relay 狀態導通與否、IP 位址、裝置回傳時間、電表類型(單相三線、三相三線或三相四線，以及目前站點所偵測到的電壓電流值；用戶資訊包含站點所在之戶名、地址、電號、配電變壓器名稱、迴路開關、饋線、變電所及其區處等相關資料，同時可由此處匯出報表，觀看歷史資訊。

(三) 事故回報

當有站點發生異常狀態時，本系統會將故障之站點顯示於故障警訊中如圖 24，並以發送 E-mail 的方式將此訊息發送給所設定之 E-mail 帳號，可點選站點詳細資料查看其營業區處、用戶名稱、用戶地址、經緯度、變電所、電號等資訊。

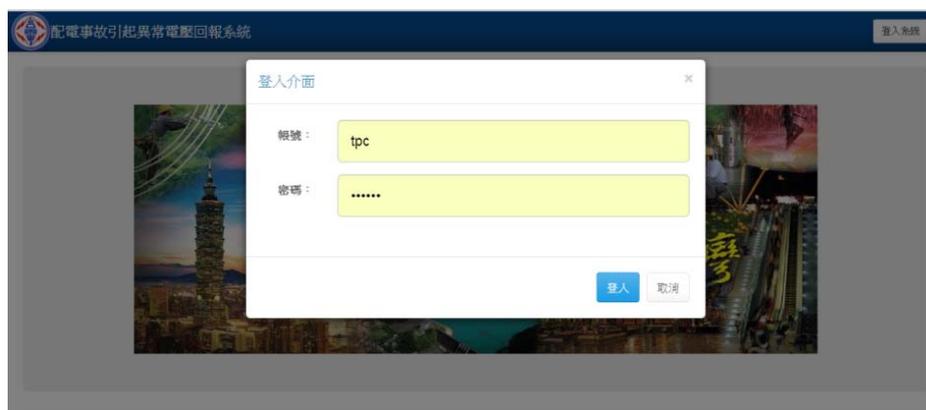


圖 21 登入作業



圖 22 監控站即時資訊



監控器所回傳的資料皆會顯示於此包含Relay狀態、電壓、電流值

監控位置結合google map，可以直接看到站點地圖

圖 23 站點詳細資料



圖 24 故障站點詳細資料

陸、結論與建議

一、結論

(一) 應用電路理論推導線路欠相過電壓等效電路以及應用 ATP-EMTP 模擬分析架空與地下線路於欠相、短路、接地以及電容器對設備的效應。方法如下：1.首先應用電路分析技巧，推導了線路在欠相下變壓器、線路之

反饋路徑的等效電路，由等效電路顯示出變壓器二次側會產生過電壓。2.再者本計畫應用了 ATP-EMTP 軟體，選擇典型架空與地下配電線路進行模擬分析於欠相(斷線)、短路、接地情形下的電壓與電流的變化。其中欠相條件下變壓器低壓側產生了 1.2~1.4 pu 的過壓，此與電路理論的推導結果一致。

(二) 完成依照屋內線路裝置規則，探討在各種接地情況下，對發生異常電壓的影響。此部分

除理論分析可獲知良好接地條件下，可有效降低負載不平衡時之異常電壓分布，本計畫亦完成了

1. 不同接地方式異常電壓對設備的影響實測，在接地良好的情形下可有效改善負載不平衡所引起的電壓不平衡問題。
 2. 突波對家電設備影響實測，此部分會對無突波保護之設備燒損其電源模組或保險絲部分。
 3. 過電壓對家電設備影響實測，此部分在短時間(10 分鐘)內不會對設備產生燒損。
- (三) 研製用戶端用電安全監控模組，用電安全監控模組乃以 PIC 微處理機與 GPRS 通訊模組為核心之硬體電路，配合過壓與過流之保護演算規則軟體所研製而成，其藉由 GPRS 通訊功能可讓使用者知道目前家中監控點之電壓值及電流值，當偵測到電壓值及電流值超過額定時，本系統會發出警訊並將電源端跳脫，隔離後端設備，以達到保護效果。
- (四) 開發 Web based 配電事故引起異常電壓回報系統，結合 OMS 圖資系統，將資訊傳至各區處。當異常電壓發生時，系統會自動判斷以及搜尋該用戶之資料，再由 OMS 圖資系統判斷可能停電範圍，迅速了解該事故點資訊，進而確認停電區域，聯絡現場維修人員，縮短搶修時間，提高復電處理效率。
- (五) 探討防止器具燒毀之防制方法。本計畫除了利用 ATP-EMTP 軟體針對架空與地下線路進行欠相、短路接地故障、中性線開路等配電線路發生事故情形外，亦以實測方式完成了 1.不同接地方式異常電壓對設備的影響實測，2.突波對家電設備影響實測，以及 3.過電壓對家電設備影響實測。由理論與實測之驗證結果得知中性線鬆脫以及線路欠相事故會造成過電壓、以及過電流、雷擊突波，皆會對用戶端設備造成嚴重的影響，因此用電安全保護裝置對於用戶端來說是必要的，能有效減少用戶設備損壞。

二、建議

- (一) 應用 ATP-EMTP 線路模型之模擬分析程式，針對架空與地下線路進行短路、接地及斷線、欠相過電壓、中性線浮接之模擬例子以及於突波與過壓耐受試驗之電器實際燒毀案例中，將以實際圖例於教育訓練中呈現，以提升區處現場人員與用戶談判時之專業判斷能力。將以簡易圖例方式呈現，以供區處教育訓練之參考。
- (二) 落實家電設備、監視系統等弱電設備安裝具耐突波能力之保護設備。經由實地測試結果得知，部分家電設備與弱電設備因無安裝突波吸收器或規格不足，於突波來襲時產生設備電源模組燒損之情形，此部分不能歸責於台電公司，建議配合宣導與修法，強制家電廠商落實此措施。
- (三) 落實協助用戶定期檢視中性線路與接地，以減少因中性線鬆脫導致過壓燒毀電器設備。配合區處定期電錶換裝檢測，可同時協助用戶並會同水電人員(由用戶邀請)檢測接地與中性線接線情形，以有效改善用戶接地與中性線接品質，防止因中性線鬆脫且接地情形不良下，產生設備燒損。
- (四) 建議修改室內線路裝置規則，針對所定義的重點用戶，能加裝具過壓與過流保護之用電安全模組，以及同時建議於營業區處建置 Web based 用電事故緊急回報系統。此外用電安全模組未來考慮並接突波吸收器，如此將可同時保護用戶免於欠相、中性線浮接產生之過壓、以及短路故障、過載產生之過流，與突波侵襲，對於用戶之生命財產保障，多加一道保險。
- (五) 擬未來台電公司採多廣泛自製系統，除可驗證系統運作成效外，亦可維連續投入商品化準備，朝降低研發成本、強化抗干擾能力並縮小硬體設備體積等方面進行性能與技術優化之改良。再者，可落實本土技術扎根，避

免國外技術壟斷，可與國外系統進行良性競爭，開發更具競爭力且價格低廉的監測設備。

柒、參考文獻

- [1] H. H. Kajihara, "Quality Power for Electronics," *Electro-Technology*, vol. 82, no. 5, pp. 46, November 1968.
- [2] D. S. Dorr, M. B. Hughes, T. M. Gruz, R. E. Jurewicz and J. L. McClaine, "Interpreting Recent Power Quality Surveys to Define the Electrical Environment," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 6, pp.1480-1487, November 1997.
- [3] Z. G. Datsios, P. N. Mikropoulos, and T.E. Tsovilis, "Estimation of the minimum shielding failure current causing flashover in overhead lines of the hellenic transmission system through ATP-EMTP simulations," *Lightning Protection (ICLP), International Conference*, September 2012.
- [4] 陳三木，「架空輸電線路雷擊閃絡之防止對策」，碩士論文，國立成功大學電機工程系，2006年。
- [5] J. Fernando, N. Kularatna, H. Round, and S. Talele, "Implementation of the supercapacitor-assisted surge absorber (SCASA) technique in a practical surge protector," *Industrial Electronics Society, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE*, November 2014.

台電工程月刊 819 期專輯徵稿啟事

- 本刊預定於 105 年 11 月發行以「需求面負載管理創新做法」為主題之專輯與讀者分享，歡迎有相關論著者踴躍投稿（截稿日為 105 年 8 月 15 日），每篇以 2 萬字（含圖、表）為原則。
- 稿件之撰寫格式、投稿方式及稿酬等悉依本刊原訂標準。
- 投稿相關事宜，若有任何疑問，請與我們聯絡，謝謝您！

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



電動車與充電站營運模式對電能補充影響分析研究

The Impact of Different Operation Models of Electric Vehicle and
EV Charging Station on Power Supply

左峻德*	陳士麟**	盧豐彰***	
Tso, Chun-To	Chen, Shi-Lin	Lu, Feng-Chang	
陳彥豪*	盧思穎*	陳俐姝*	洪幼倫*
Chen, Yen-Haw	Lu, Su-Ying	Chen, Li-Wen	Hung, Yu-Lun
李婕宇*	王耀村****	林宏飛****	陳隆武*****
Lee, Chieh-Yu	Wang, Yaw-Tsuen	Lin, Hong-Fei	Chen, Lung-Wu

(104 年度研究計畫論文)

摘 要

行政院於 2010 年通過「智慧電動車發展策略與行動方案」，規劃於六年內投入新台幣 97 億元推動智慧電動車產業發展，目標於前三年啟動期推動 3,000 輛先導運行，並結合台電與中油等國營事業共同投入。經三年推動下來，除國際間電動車推廣情況不如預期外，國內電動車發展亦面臨相同困難。行政院於 2014 年核定「智慧電動車輛發展策略與行動方案」，重新規劃推動方向與作法，新核定之方案將電動車推動策略修正為跨部會推動電動大客車、提供購車誘因、創新營運模式、鼓勵業者投入與建構產業價值鏈等五大策略，以促進我國電動車發展與應用，並藉由地方政府及民間申請先導運行計畫各案，評估後續我國電動車全面推廣最佳模式及方向。

電動車將車輛對燃油的倚賴轉為對電力的需求，提供穩定可靠電力是台電公司的主要任務，然而不同的電動車電能補充方式與服務營運模式將對台電公司電力系統改善、參與電能補充服務的程度以及承擔的風險等產生相當程度的影響。本文參酌國內外電動車發展趨勢與國內智慧電動車先導運行狀況，探討國內電動車可能的發展情境，並針對不同電動車電能補充營運模式，探討國內最適發展模式與台電公司參與策略及其影響。建議台電公司短期應以電動巴士充電對配電系統的影響為關注重點，要求用戶於裝設充電設備前提出用戶容量分析與不超載保證、饋線電壓變動率計算與逐台啟動的因應措施；中長期伴隨充電基礎建設的普及與車輛技術的提升，應持續關注國內電動車推廣數量之情形，評估電能補充對電網運行之影響，可逐步放寬由用戶群代表(Aggregator)管理充電使用行為。

Abstract

Use of electric vehicles can help reduce carbon emissions and improve the quality of atmosphere in metropolitan areas. However, the costs and the endurance capability of the

*財團法人台灣經濟研究院
 **中原大學電機工程學系
 ***大華科技大學電機與電子工程系
 ****台灣電力公司配售電事業部
 *****台灣電力公司綜合研究所

electric vehicle affect its competitiveness as compared with diesel engine vehicles. Therefore, in order to support the development of the electric vehicle and achieve the goal of emission reduction, the governments around the world have drawn up policies to promote the use of electric vehicles. Understanding the importance of environmental protection and the effectiveness of industry development, the Executive Yuan has launched “Development Strategy and Program of Action for Smart Electric Cars Project” and “Smart Electric Cars Pilot Run Projects” to conduct the research on analyzing the optimal direction for the development and business model of the electric vehicle in Taiwan.

The main task of Taiwan Power Company (TPC) is to support government policies by providing stable and reliable power supply. Electric vehicle has led the need of diesel gradually shifting to the need for electricity and as the number of electric vehicle grows, therefore, TPC has been paying close attention to the development of electric vehicles in Taiwan and started planning for power supply services to them. The electricity infrastructure is primarily designed to use the most economical investment to satisfy the needs of electricity consumption and the different types of power supply services. Adoption of different business models may have varied effects on the operation of TPC’s power supply system. It is believed that management risks may occur if TPC participates in the offering of power supply services to electric vehicles without a sound strategy. This study analyzes the development of electric vehicle around the world and the conditions of the “Smart Electric Cars Pilot Run Projects” in Taiwan, examines the possible scenarios of the development of the electric vehicle in Taiwan, and also analyzes the different business models of power supply for the electric vehicle. The main purpose of the study is to explore the optimal model of development in Taiwan, propose the adequate involvement strategies for TPC and present its possible impacts in the future.

關鍵詞(Key Words)：電動車(Electric Vehicle)、電動車充電站(EV Charging Station)、車電分離(Vehicle and Battery Separated)、營運模式(Business Model)、配電系統影響評估(Impact Evaluation on Distribution System)。

壹、前言

電動車具有低排放特性，有助於減少二氧化碳排放與降低空氣汙染，但成本與續航力尚無法與內燃機車輛相較，因此各國紛紛擬定電動車推廣政策，以推動電動車發展，達成節能減碳的目標。行政院考量環境保護與產業發展效益，於民國 99 年通過「智慧電動車發展策略與行動方案」以促進我國電動車發展與應用，並依方案進行

「智慧電動車先導運行計畫」，藉地方政府及民間申請先導運行計畫各案，評估後續我國電動車全面推廣最佳模式及方向。

電動車將車輛對燃油的倚賴轉為對電力的需求，因此台電公司關注國內電動車發展趨勢，預先設想規劃因應電動車電能補充需求。電力基礎建設追求以最具經濟性的投資滿足用電需求，不同的電動車電能補充方式與服務營運模式對台電公司電力供應系統改善、參與電能補充服務程度、風險有相當程度的影響，本文蒐集分析

國內外電動車發展趨勢及國內智慧電動車先導運行狀況，探討國內電動車可能發展情境，並針對不同電動車電能補充營運模式，探討國內發展模式與台電公司參與策略及其影響。

貳、國外電動車推動現況及技術發展趨勢

一、各國電動車推廣政策與推動現況

世界各國為減緩氣候變遷、減少對石油依賴而訂定電動車長期推廣目標。各國政府投入大量資金透過直接補貼購車、財稅補助、基礎充電設備佈建、示範計畫等政策進行電動車推廣。截至 2014 年底全球共 66.5 萬輛電動汽車與 4.6 萬輛電動巴士上路^[1]。電動車市占率不斷上升，荷蘭、挪威、瑞典及美國電動車市占率皆達 1% 以上。觀察不同類型電動車輛銷售狀況，純電動車(Battery Electric Vehicle, BEV)與插電式油電混合車(Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)年銷售量自 2010 年至 2014 年逐年成長，2014 年的增長更是迅速。

二、電動車技術發展趨勢

雖然未來全球電動車市場發展備受矚目，但現今仍限於電動車的電池成本、電池性能、充電設備等因素，電動汽車的普及仍有一段路要走。因此全球電動車廠紛紛強化油電混合車、插電式油電混合車與增程式電動車(Extended-Range Electric Vehicle, EREV)發展，並追求電動車輛的輕量化與降低能源消耗。車用電池未來技術持續在(1)材料發展，電池芯技術；(2)第四代電池創新電池概念；(3)安全性及測試方法；(4)耐久性，模組化及分析；(5)量產製程技術等方向尋求突破。

為使駕駛人能方便取得能源的供應，充電站的設置與開發必須以(1)加速、標準化與減少充電所需時間；(2)在住家、工作場合、停車場、購物中心及路邊等提供多點充電；(3)保障使用者、車輛絕對的安全性；(4)低成本的充電，使用新能源

充電及降低對於環境的衝擊等四個原則發展，提高電動車充電安全與效率。目前，電動車充電設備形式可概分為設置充電柱的充電站、交換電池式充電站及無線感應充電站，其中無線充電技術目前尚處示範階段。

三、電動車電能補充計費機制

充電基礎設施之建設為支持電動車持續發展的重要因素，目前各國在「電動車電能補充」計價上，都尚屬實驗階段。以下將介紹美國加州與日本住宅型、非住宅型電能補充服務的計費機制。

(一) 美國加州電動車充電站計費機制

1. 住宅型充電站計費機制

本文分析加州 8 家電力公司住宅型充電費率^[2](如表 1 及表 2)，帕羅奧圖電力公司(City of Palo Alto Utilities)、希爾茲堡市電力公司(City of Healdsburg Electric Department)及赫拉克勒斯市電力公司(Hercules Municipal Utility, HMU)為公營公用事業(Publicly Owned Utilities, POUs)；太平洋瓦斯與電力公司(Pacific Gas & Electric, PG&E)、南加州愛迪生電力公司(Southern California Edison, SCE)、聖地牙哥瓦斯與電力公司(San Diego Gas & Electric, SDG&E)為民營公用事業(Investor Owned Utilities, IOUs)；矽谷電力公司(Silicon Valley Power, SVP)屬農村電力合作社；馬林清潔能源(Marin Clean Energy, MCE)為區域用戶群代表。

分析結果顯示多數電力公司認為區域內電動車數量並未大幅成長，短期不會影響電網，一半以上公司並未提供電動車專用費率。太平洋瓦斯與電力公司及帕羅奧圖市電力公司對於電動車較為積極，希望配合電動車時間電價費率，將插電式電動車納入需量反應計畫以減輕尖峰時刻負載。

表 1 美國住宅型電動車充電費率與裝表計量 (資料來源：Bay Area PEV Readiness Plan, 2013)

	帕羅奧圖市電力公司 City of Palo Alto Utilities	矽谷電力公司 Silicon Valley Power	太平洋瓦斯與電力公司 Pacific Gas & Electric	馬林清潔能源公司 Marin Clean Energy
電動車專用費率 (目前)	目前進行電動車專用時間電價費率的示範研究	無	有電動車專用費率	有電動車專用費率
電動車專用費率 (未來)	未提供相關資訊	5 年內並不會建立電動車專用費率	未提供相關資訊	未提供相關資訊
推廣電動車使用	透過網站與地區性電動車團體共同教育客戶。	尚未從事任何有關電動車主題實質或有組織性的公共宣導，但非常積極正面的回應調查詢問。	透過一系列的市場推廣及宣傳活動，包括在網頁上提供電動車充電費率的比較與提供即時的能源消耗工具「Myenergy 工具」給現有客戶。	對於教育客戶不會有太多投入。
預先對未來影響之準備	提供電動車時間電價費率，並透過需量反應計畫減輕尖峰時刻的負載。	目前矽谷電力公司有足夠多的發電、輸電及配電容量因應未來增加之電動車數量。另外亦建立了測試系統，若負載超過水平時，將為可能有問題之變壓器進行升級。	目前正在發展一套智慧電網和自動需量反應的服務標準，並考量將插電式電動車納入智慧電網技術與自動需量反應中。	由於社區選擇整合計畫不同於市立公用事業，因此馬林清潔能源公司沒有進行電動車充電服務需求之研究。

表 2 美國住宅型電動車充電費率與裝表計量 (資料來源：Bay Area PEV Readiness Plan, 2013)

	希爾茲堡市電力公司 City of Healdsburg Electric	赫拉克勒斯市電力公司 Hercules Municipal Utility	南加州愛迪生電力公司 Southern California Edison	聖地牙哥瓦斯與電力公司 San Diego Gas & Electric
電動車專用費率 (目前)	無	無	有電動車專用費率	有電動車專用費率
電動車專用費率 (未來)	無規劃	無規劃	未提供相關資訊	未提供相關資訊
推廣電動車使用	因使用率低與缺乏相關援助故不再向電力公司客戶推廣插電式電動車。	無從事任何型式的公眾宣傳和教育，但於市政府設置兩座充電站進行展示。	透過教育民眾有關電動車充電服務之效益，並確保電力服務穩定性與廣泛設置充電設備，加強民眾購買電動車的意願。	針對參加 EV Project 的電動車車主提供免費建置電動車充電設備之服務，並透過網站提升一般民眾對於插電式電動車的興趣 ^[3] 。
預先對未來影響之準備	未對插電式電動車充電服務對電網可能造成影響進行詳細分析，僅表示當區域內電動車使用量明顯增加時，才會考慮插電式電動車與電網整合或利用太陽能發電系統最小化尖峰用電量。	未規劃將插電式電動車整合智慧電網技術或使用蓄電池、再生能源降低尖峰需求。	建議所有民營公用事業針對充電服務對電網之影響進行分析與討論，並持續追蹤電動車充電設備 (Electric Vehicle Supply Equipment, EVSE) 之使用情形，對於電動車未來影響之議題表達高度關注。	現場評估插電式電動車車主於住宅使用充電服務之情形，並利用地理資訊系統 (Geographic Information Systems, GIS) 記錄充電站建置位置，於充電站密度較高的社區積極投入電網建設。

2. 非住宅型充電站計費機制

美國南加州愛迪生電力公司針對企業、建築物管理公司或大樓管委會等建築所設置之非住宅型電動車充電站，根據裝表、佈線、充電費率適用方案，提供(1)全屋共用電表；(2)電動車充電站獨立電表(充電站裝置容量 ≤ 20 kW)；(3)電動車充電站獨立電表(20 kW < 充電站裝置容量 ≤ 500 kW)；(4)電動車用戶專用充電站；(5) 120V Level 1 充電站；(6) 新設線路之 120V Level 1 或 240V Level 2 充電站等六種方案^[4]。商業費率組成包含基本電費、流動電費及需量電費，其中需量電費又可細分為時間及設施相關之需量電費。

太平洋瓦斯與電力公司則根據企業裝置容量，以 200 kW 為門檻將商業型充電站分為兩類，如表 3。商業型充電站適用費率皆為既有費率，用戶可因設置充電站調整或更改費率，但 PG&E 並無計畫立即引入分戶計量或制定電動車專用商業費率。其商業費率組成包含基本電費、流動電費、需量電費及尖峰需求電價。

表 3 PG&E 商業型充電站分類^[2]

企業裝置容量		適用場所
<200 kW	小型企業	停車場、小型商辦
>200 kW	中型企業	大型商辦、大賣場、旅館

(二) 日本電動車充電站計費機制

1. 住宅型充電站收費機制

日本住宅型電動車充電的電力來源為公共用電。一般而言於住宅內設置 1-3 座 200V 普通充電設備，並不會對住宅公共用電造成太大的負擔，因此不需和電力公司重新訂定契約容量；但若要再增設則必須進行工事評估以確定是否需更新契

約容量或有更換斷路器之必要^[5]。通常集合式住宅是在整棟建築物設置數個附充電設備之停車位，由電動車用戶輪流使用。由於集合式住宅電動車充電站之電力來源為公共用電，因此電動車用電直接合併至公共電表計算，若用戶或管委會欲得知每個充電設備詳細用電量，通常會自行或委託機電公司加裝符合規格之電表，但無論充電設備是否獨立設表，公共電費皆由管委會支付給電業。

由於急速充電設備之裝置容量約為 20-50 kW，一般集合式住宅導入有其困難，因此日本於 2013 年通過電氣事業法修法，只要滿足「住宅型急速充電設備需以柵欄或圍籬區分該區域為特定場所」的條件便可單獨訂定急速充電設備專用戶號。

2. 非住宅型充電站計費機制

在非住宅型充電站之設戶標準方面，工廠、商店、超市等營業場所為自由化領域，充電設備合計契約容量超過 500 kW 之用戶必須與綜合電業協調。契約容量 2,000 kW 以上以特高壓供電，未滿 2,000kW 以高壓供電。充電費率方面，契約容量 500 kW 以下為實量制，以 30 分為單位計算每月實際用電量，取其最大值作為契約用電量基準。契約容量 500 kW 以上充電設備的電力費率，經用戶與電力公司協議決定。用戶可根據用電需求，從非住宅充電費率方案挑選合適選項、最佳協議結果，與對自己最有利的綜合電業者簽約。於裝表計量方面，原則上以「每個用戶、1 條路線、1 契約」^[6]為主，若既有契約容量足夠設置充電站，則於該地點為充電站設置高壓受電設備新設配線；若既有契約容量不足，則需向綜合電業提出調高契約容量之需求，或充電站另申請單獨電表，

自成一個電力用戶。

關於日本現行充電站適用電價費率，目前日本的綜合電業並無針對住宅型或非住宅型用戶制定電動車充電站專用的充電費率，而是將充電站充電所使用的電力併入用戶每月電費中計算。

參、國內電動車與充電站營運模式對電動車電能補充影響

一、國內電動車使用情境分析

因應國內外電動車發展趨緩，經濟部將「智慧電動車發展策略與行動方案」啟動期續延三年，並將成長期、擴張期推動時程往後順延，規劃於民國 99~105 年推動 2,600 輛電動車上路^[7]，如表 4。本文參考先導運行推行狀況及未來電動巴士推廣之政策力道支持，參酌不同種類之電動汽車技術進步狀況、補助與環保規範等，將國內電動車使用與充電站營運情境分為保守、中立、樂觀三種發展情境：

(一) 保守情境：國內電動車市場不如預期，市場上約 1,300 輛電動車

若純電動車電池技術未有重大突破，且公用充電站不足，電動車使用環境沒有大幅改善，此情況下預期未來三至五年內國際電動車發展將以插電式油電混合車為主流，估計於民國 102~105 年維持每年增加 100 輛電動汽車，外加 76 輛電動大巴，16 輛電動中巴，換算共 688 輛電動汽車，總計至民國 105 年市場上約 1,300 輛電動車。

(二) 中立情境：國內電動車市場如政府預期的 6 年 2,600 輛電動車上路

若政府延長電動汽車免徵貨物稅與牌照稅，並擴大補助對象至各式電動車輛，且國際油價維持在高檔水準，預期民國 102~105 年電動汽車每年約增加 500 輛，

外加由電動大巴與中巴換算之 688 輛電動汽車，預計至民國 105 年國內電動車推動如政府預期，達成 6 年 2,600 輛電動車上路的目標。

(三) 樂觀情境：國內電動車市場蓬勃發展，上路的電動汽車數量數較預期多出一倍，即 6 年 5,200 輛

近年來由於景氣復甦，2014 年國內車市活絡，總銷量達 42 萬輛。假設電動車輛技術提升，續航力增加、充電時間縮短，加上充電柱設置普及。預期電動車的推廣數量達新車銷售數量的千分之三，即民國 102~105 年每年約增加 1,400 輛，外加由電動大巴與中巴換算之 688 輛電動汽車，預計至民國 105 年，國內電動車市場蓬勃發展，上路的電動汽車數量較預期多出一倍，即 6 年 5,200 輛(圖 1)。

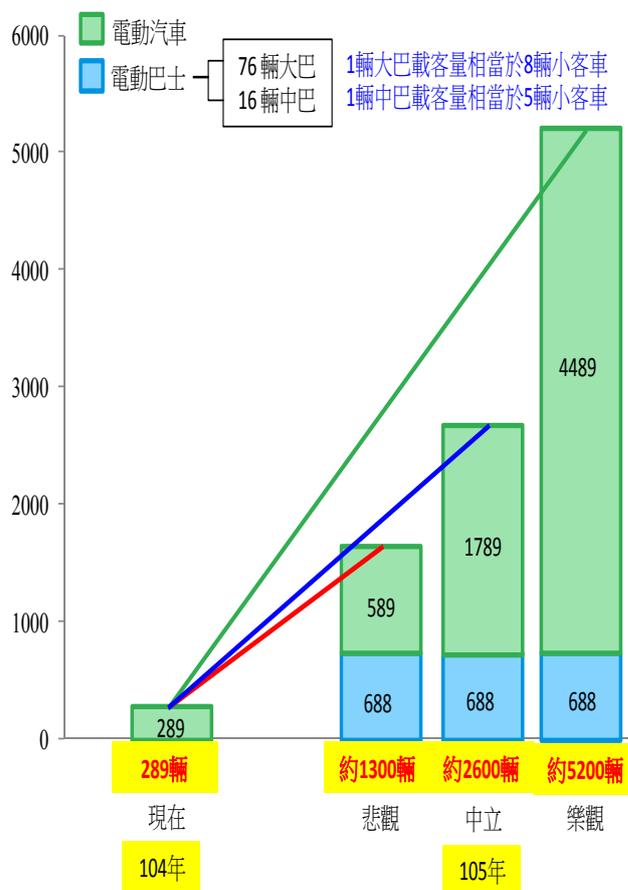


表 4 智慧電動車發展策略與行動方案啟動期第一、二階段比較表

	第一階段	第二階段
期程	民國 99 年至 102 年	民國 103 年至 105 年
推動目標	3 年推動 3,000 輛純電動車	<ul style="list-style-type: none"> ■ 電動巴士：10 年跨部會推動 10,390 輛 ■ 電動汽車：6 年推動 2,600 輛* (先導運行)
推動策略	<ul style="list-style-type: none"> ■ 訂定環保節能標準，例如二氧化碳排放標準與油耗標準 ■ 推動 10 案先導運行，每案目標為 300 輛 ■ 放寬公有地設置充電站標準以健全電動車使用環境 ■ 輔導廠商改良產品，推動整車開發與關鍵零組件外銷 ■ 行政機關與國營事業優先使用智慧電動公務車示範運行 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 電動巴士：結合跨部會資源共同推動 ■ 電動汽車： <ol style="list-style-type: none"> 1. 鼓勵產業開發新款電動車，例如增程式、插電式油電混合、電動商用車、電動蔬果運輸車等 2. 鼓勵產業發展創新電動車營運模式，如車電分離營運模式、電池回收機制 3. 整合上下游產業建構完整產業價值鏈，提升外銷競爭力 4. 國營事業與政府機關持續帶頭使用電動車
國產化推動策略	經濟部技術處協助電動車技術發展，應用於國產電動商用車型	<ul style="list-style-type: none"> ■ 電動大客車：逐年提升原產地附加價值率，民國 103 年需達 30%、104 年達 40%、105 年達 50% ■ 電動汽車：民國 105 年達 50%以上
財政措施	自民國 100 年起購置電動車 3 年內免徵貨物稅與牌照稅	<ul style="list-style-type: none"> ■ 電動巴士：由交通部、環保署與經濟部提供補助 ■ 電動汽車：延長智慧電動車輛免徵貨物稅與牌照稅

* 1 輛大巴載客量相當於 8 輛小客車；1 輛中巴載客量相當於 5 輛小客車
 (資料來源：智慧電動車發展策略與行動方案，2014；本研究彙整，2014/07)

二、電動車與充電站營運模式對電動車電能補充影響評估

本研究以電動車短租營運模式為例評估電動車與充電站營運模式對電動車電能補充之影響。該案於北部地區建置約 100 座充電柱，根據 104 年 4 月~7 月充電座上傳至雲端的充電記錄統計資料進行分析。使用充電柱的車型共有三種，而其充電規格分為 220V/50A 與 220V/80A 兩種^[8]，充電柱會偵測不同車型給予不同電流，最高出力 80A，並可向下相容。本研究採用各個充電站充電電量記錄推算充電站平均充電功率，以推估在饋線預留容量下，最多可設置幾個充電柱同時提供電動汽車充電。

假設饋線容量為 3MVA，預留 10%(約 300KVA)給充電柱使用，若以本案例之充電站每小時最高之充電功率 15.83kW 計算，在饋線預留 300KVA 的容量下，一條 3MVA 饋線最多可設置 18 座充電柱，提供 18 輛電動車同時充電。本案例由於充電站的地理分布廣泛，因此無須擔心電動車充電對配電饋線或配電網造成影響。

此外若延伸推估饋線上可負荷之電動車總數量，以充電時間為 2 小時，續航里程約 150 公里之電動車進行評估，交通部統計國內上班族使用自小客車平均每天行駛約 37.6 公里，推估每台車平均四天需充電兩小時。因此理想情況下，每座充電柱四天可服務 48 輛車，18 座充電柱每天可服務 216 輛電動車，但考量現實的車輛使用情況與生活習慣，充電柱的使用率無法達到 100%，故參考本案實際的充電柱使用率，選取使用率最高的 61.1%，推算一條容量 3MVA 饋線最多可服務 130 輛電動車。因此以目前全國電動汽車推動數量僅 289 輛判斷，其對於配電系統的影響實微乎其微，電力公司尚不需過於擔心。

三、電動車充電站配合現代配電系統架構不同情境下的最適配置

(一) 充電站(機)對配電系統的影響

電動汽車在充電過程中，由於其具有很強的空間位置和時間波動性，很容易造成配電線路變壓器過載及負載出現有功與無功功率之失衡，導致配電線路電壓發生

變動及發生諧波等問題。

1. 配電變壓器過載

若同時間有多台電動汽車進行充電，則相關配電變壓器的負載將急速增加，並且可能造成過載及三相負載不平衡的情形。當配電變壓器長期過載運轉，將造成變壓器內部元件老化而使變壓器燒毀。茲以電動巴士調度場(含 5~6 台電動車)為例，配置 1 台快充與 5 台慢充設備，夜間需量： $50\text{kW} \times 5 = 250\text{kW}$ ，日夜快充 150kW ，會造成饋線變壓器過載；因此，應以高壓用戶申請用電。

2. 三相負載不平衡

以現有蓄電池的儲存電能而言，單一或少量電動汽車分散式電源並不會對未來智慧型電網的穩定運轉造成影響。但隨著電動汽車不斷增加，這種分散式小容量充放電電池終將成為配電線路的重要電力負載，這就會影響到配電系統的穩定運轉。美國電力研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)研究指出，若全美國 60%汽車替換為電動汽車，美國電力需求將增加 9%，如果不加控制地將大量電動汽車併入配電系統，將引起配電饋線三相負載不平衡的問題。國內初期是以發展電動巴士為主，茲以比亞迪為例，充電設備額定為三相 $380\text{V}/400\text{V AC}$ ， 80kW ，係屬車載整流換流方式，地面之充電設備僅作為開關之用。目前僅設兩座充電設備，由於為三相負載，未來即使擴充為更多座充電設備仍無三相不平衡問題；然而，電動轎車則多為單向負載，美國電力研究院(EPRI)所稱問題應指電動轎車市占率高的情況，國內暫時尚不至於發生。

3. 電力品質

電動汽車的充電設備包括非線性的電力電子裝置，當充電設備對電動汽車

蓄電池(屬非線性負載)充電時，充電設備會產生諧波污染，進而對配電系統的電力品質產生影響，因此，汽車充電站(機)必須符合諧波管制標準。據之，在充電站系統內視需要設置補償和濾波裝置。電動汽車的電流總諧波失真率(Total Harmonic Distortion, THD)在開始充電時為 2.36%~5.26%；在充電快結束時可高達 28%^[9]。一般電壓的諧波失真率值隨著充電站之三相短路容量(Short Circuit Capacity, SCC)而定：在尖峰時段，三相短路容量值大，系統阻抗值小，相對應的電壓諧波失真率值遂小。反之，深夜充電較易造成高額の電壓諧波失真率。挪威的一項量測顯示^[10]：在 48kW 快充時，電流諧波失真率值為 4%，電壓諧波失真率值為 0.4%~0.6%。惟若各個充電站的責任分界點皆符合 IEEE519 的諧波電流要求，則饋線上總諧波電流會大幅低於依照 IEEE519 公式的諧波電流計算值^[11]。

(二) 充電站的最適配置

對於現行充電站之配置，可藉由充電站內之充電機制與充電站之監測達到最佳配置目標。電動車充電站之充電系統應設置智慧充電控制設備或互鎖機制，如慢充時限制其總開機數或者快充時不得同時進行慢充等方式，限制總用電需量，避免造成變壓器過載。而對於充電站的配置，要評估充電站設置者是否應於電力公司之桿上增設變壓器負載監測器，以提供充電站業者於變壓器超載前自動卸載，並提供監測資訊給電力公司配電維護部門，加強檢測並提早預作轉供。變壓器的監測，可考慮加裝變壓器末端單元(Transformer Terminal Unit, TTU)，其好處是既設變壓器的改造簡易，可量測油溫、電壓、電流等物理資訊。負載資訊經過變壓器末端單元

整合後，透過電力線通信(Power Line Communication, PLC)傳輸至光纖轉換器，再傳輸至電源端控制站。整合變壓器末端單元之智慧型變壓器，可以達到變壓器狀態監視、需量反應控制、變壓器過載預警等功能。

另外，考慮充電站用電特性屬大容量而相對低能量的用戶，建議在用戶申請用電時，檢視其所在的用電位址之饋線裕度，考量設置智慧充電控制設備或互鎖機制，當饋線容量不足時，可根據饋線電流狀態自動停止部分充電器之運作。

面對未來數量龐大之充電站，建議可由用戶群代表(Aggregator)申請設置，管理為數眾多的充電站充放電行為，換言之，充電管理/充電預測等可由用戶群代表執行。電力公司訂定規則，包括用電申請時核准的容量，此容量視饋線負載而變，用戶群代表的容量費率應反映饋線容量的成本，以上屬於被動式管理。

電力公司可在用戶申請用電時規劃適度位址責任分界點，並與分散式電源位址相配合，必要時裝設自動電壓調整器(Automatic Voltage Regulator, AVR)；在運轉策略上，設定容量競爭機制，作每日或每月的競標，由高價者取得尖峰時段的容量，作容量管理，達到分時充電的效果。充電站的運轉、維護責任可隸屬於充電站調度中心，而由該中心之用戶群代表統一負責，俾可有效管理充電站之充電行為。

肆、電動車電能回輸電網或住家(V2G或V2H)對電動車電能補充與用電負載影響

一、電動車電能回輸電網技術發展現況

近年來由於插電式電動車輛(PEV)的廣泛使

用以及電池技術的進步，電動車電能回輸電網越來越受到人們關注。IEEE 1547 已規範電動車電能回輸電網所應遵循的通訊、控制、電力品質等標準，美國國家再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)亦遵循相關標準發展相關換流器的測試驗證系統。電動車電能回輸電網系統的運轉技術亦趨於成熟，目前發展課題為進入電力市場之商業模式與業者回收成本之成熟度。在能源服務公司(Energy Services Company, ESCO)或用戶群代表之市場機制運作之下，未來電動車電能回輸電網技術可經由電力市場即時反應電價與健全的輔助服務機制，占有相當市場。分析目前電動車電能回輸電網發展所遭遇的瓶頸，概分為以下六類：

- (一) 電力公司、充電設備及電動車製造業者、駕駛人等市場參與者(Stakeholders)的財務風險、規範不明確所造成的權責不明等所形成的技術與非技術障礙。
- (二) 不成熟的用戶群代表等市場環境。
- (三) 測試與驗證體系仍不完整。
- (四) 電動車製造業者的設備容量風險。
- (五) 相搭配之配電網控制技術成本偏高。
- (六) 政府政策不明確。

二、電動車電能回輸電網或住家對電力公司的影響

經電能市場，電動車電能回輸電網或住家自然會影響用戶與電力公司配電饋線的負載；經由輔助服務市場，電動車電能回輸電網或住家會影響電力公司的調度(含備轉容量、電壓、頻率、無效功率等之調度控制)。由於這些市場功能等同於獨立電力調度中心(Independent System Operator, ISO)的相關市場功能，因此，電業管制機關必須仿照輸電系統，制定準則以提供電網資訊，包括設立公開聯網即時資訊系統(Open Access Same Time Information System, OASIS)，公佈過去一日、一週或一個月的電能與輔助服務市場價格資訊，亦即提供能源服務公司(ESCO)或用戶群代表等有關市場及電網的資訊，再經由充電站內的智

慧型充電設備(Smart Charger)或充電站的監控系統，對電動車電能回輸電網進行管理。

在 OASIS、智慧型充電設備等資訊與管理條件下，電動車電能回輸電網或住家的運作效率自會提高，影響其運作模式，包括供應電能與提供輔助服務的模式。至於電力公司亦須對於各個充電站的運作狀態進行監視，但須予以加密，俾保障用戶的個資安全。

本研究認為未來電動車電能回輸電網在台灣的實施方式，可能以獨立型、集中型、微電網型和換電型等四種型式出現。其中，較適合於台灣電力環境者為集中型和換電型，相關標準制定與商業模式發展為電動車電能回輸電網廣泛導入的關鍵。在標準部分，由於包含充電、車用電池、通訊技術與併網技術的應用。因此電動車電能回輸電網相關設備，必須由政府相關單位、電業、電動車輛廠商和電能管理公司共同研議統一規範與標準。

三、智慧型充電站調度及監測組織架構

充電站設置電池管理系統(Battery Management System, BMS)及充電設備管理系統，合稱為充電站監控系統，相關充/放電及電池狀態資料應傳送到充電站調度中心，再由充電站調度中心擇其必要者傳送到電力公司的配電或饋線調度中心。充電站調度中心依不同電價方案(包括自動需量反應電價方案)，及用戶自設之小型太陽光電、風機等之出力預測進行次日、次小時甚至次 15 分鐘之排程。換言之，充電站調度中心可以隸屬於用戶群代表，亦為日本所稱社區能源管理系統(Community EMS, CEMS)的一環。依照日本的構想，電動車充電站係屬 CEMS 的一部分，屬於用戶群代表的業務範圍。

伍、電力公司參與車電分離經營或相關衍生服務機會

考量電力公司具備電力專業及供電義務，電

力公司於車電分離、電池租賃營運模式中可能角色：(1)不參與車電分離、電池租賃經營、(2)參與電能補充服務、(3)參與電池租賃營運服務，電力公司參與車電分離經營的程度可能隨著國內電動車發展情況有所不同^[12]。

一、電力公司於車電分離、電池租賃營運模式下可能角色

(一) 不參與車電分離、電池租賃經營

在電動車市場尚處發展初期時，因市場不確定性高，電力公司不主動參與車電分離、電池租賃經營，但於車電分離模式中負責供電給充/換電站。若充/換電站導入智慧電能需量管理，則可在現有制度下與電力公司簽訂「需量反應計畫」契約。在金融方面，電能補充營運商支付基本與流動電費給電力公司，而電力公司則根據簽訂之契約給予電費優惠。未來若電業自由化，充/換電站或許能將需量售給電力公司。

(二) 參與電能補充服務

在車電分離營運模式下，電力公司第二種可能參與模式為單純參與電能補充經營，負責充電站建置、經營管理，提供充電服務給電動車使用者，使用者支付電能補充費用給電能補充營運公司。若充電站導入智慧電能需量管理可參與台電公司既有需量反應計畫，與台電公司簽訂需量反應計畫契約獲得電費優惠。

參與電能補充服務經營充電站的時機是以油價作為比較基礎，概算當某地區內電動車達多少數量時經營充電站具獲利機會。本研究假設一座含 10 台充電設備之充電站在 24 小時營運的情況下，考量充電設備購買、安裝費用、與人事費用，在不考慮土地等其他因素下，每站每月平均營運成本(含設備費用攤提)為新台幣 78,750 元。

以 2015 年 1 月平均油價新台幣 24.91

元及普通小客車每公里油耗表現概算，衡量電動車耗電量與行駛距離間的關係，電動車每度電使用成本為新台幣 7.47 元為車主所能接受之最高燃料成本。而根據現有車款電池容量約 40kWh，則每次充電服務最高收費約為新台幣 299 元。若再進一步考量每位車主之使用習慣與每個月至公用充電站補充電能之機率，營業地區至少需 77 輛電動車才可使充電站每月收支打平。因此本研究推算之充電站/電動車比率約為 0.13，此概算結果與美國電力研究院 (EPRI) 分析純電動車及插電式油電混合車的充電站/電動車比率介於 0.01 至 0.15 間充電站可產生利潤相符。

(三) 參與電池租賃營運服務

最後電力公司可參與電池租賃營運服務，向電池廠採購電池並租賃給電動車使用者，向使用者收取電池租賃費用。電力公司具電池所有權，將電池租賃給電動車擁有者，電動車主須支付電池租賃費用予電力公司。而電力公司有權使用電池，將其作為其他用途。例如當電動車主至充電站充電時，將電動車視為儲能裝置，將電動車整合至既有的電力系統中，控制電池充、放電作為提供電網輔助服務的來源之一。

對電力公司而言，電池租賃服務可增加業務多樣性，藉由電池回收機制將汰役電池作為儲能用途，使電池殘餘價值最大化，並可延緩電力公司對電網設備的投資。未來若電業自由化，電力公司提供獎勵金高於周轉電池機會成本則可控制電池充、放電提供電網輔助服務，獲得需量獎勵金。但參與經營時機則須待國內需量反應市場機制建立及電動車市場發展穩定，短期之內難有參與機會。

二、電力公司參與車電分離模式經營機會與風險

儘管電力公司在參與車電分離經營具有某些潛在的機會與可能的角色，但仍有待更進一步分析參與經營的優劣勢與風險，因此本研究初步分析電力公司參與車電分離經營的機會與風險，作為電力公司未來參與電動車車電分離模式經營之參考。

(一) 國內電動車發展推動時程修正

經濟部「智慧電動車發展策略與行動方案」執行內容的改變，連帶對於純電動車的市場占有率產生影響。過去此方案的推動內容以純電動車為主，第二階段受補助的車輛進一步擴展到插電式油電混合車與電動巴士。國內電動車推廣類型與數量上，將會與最早「智慧電動車發展策略與行動方案」設定目標不同，可預期插電式油電混合車的數量在國際車廠的推動下未來有機會提高，電動巴士在台灣的數量也有可能進一步發展。相對純電動車的市占率，可能因為推行經費分配的改變而受到影響，故此項方案內容的改變將對電力公司參與電池租賃營運帶來威脅。此一影響最後也可能改變國內所需電動車的充電設備的型態、數量與不同電能補充營運模式的可行性。

(二) 電力計價方式改變

國內新電價費率公式於民國 104 年 1 月 20 日經立法院會二讀通過，施行 2 年。新電價費率將燃料成本納入考量，適時反映燃料價格變動，但為避免因燃料價格大幅上漲，造成電價漲幅過大，對國內產業及民生產生巨大衝擊，未來電價經電價費率審議會審議每半年調整一次，並設定漲幅上限每半年調幅不超過 3%，全年累計不超過 6%。但此結果仍會影響「充電服務費用」的議價空間，壓縮使用電能取代汽油作為車輛動力來源的套利空間，若插電式油電混合車數量增加，對電能補充需求亦將隨國際燃料價格產生變化，增加未來營

業收入或營運成本的不確定性。

(三) 環保署將溫室氣體公告為空氣污染物成為純電動車發展利基

2012 年環保署認為科學上對於溫室氣體物質排放間接影響生活環境及妨害國民健康的證據與論述已日臻明確，係能符合空氣污染防治法第二條第一款所規定空氣污染物的定義，爰引用空氣污染防治法施行細則第二條第六款規定將二氧化碳、甲烷、氧化亞氮、氫氟碳化物、六氟化硫及全氟化碳等溫室氣體公告為空氣污染物。環保署已經開始著手規劃不同部門的溫室氣體管制措施。由於純電動車零排放的特性，相對於現有汽油車、插電式油電混合車、或增程式電動車在環保署管制措施更具體實施後可能增加的使用成本，純電動車的市場性可能增加。

(四) 儲能系統成發展趨勢

近年來太陽能發電與風力發電之成本下降，使得太陽能發電與風力發電成為目前能源轉型中的兩個生力軍，但由於其具有不穩定與間歇性供電問題，需藉由儲能系統減少再生能源併網造成的衝擊，增加電網運行的穩定度，提高再生能源併網占比，另可調節電網尖峰負載，維持電力供給平衡，因此美國、日本、中國、歐盟等國家將儲能技術列入能源政策的重點開發項目，並設定儲能技術發展目標、推動儲能與其他新能源技術綜合示範項目。在國內持續推動陽光屋頂百萬座與推動電能需求面管理下，將效能降低電池改為儲能設備之可行性有機會提升，有利於車電分離的營運衍生服務收入。國內已有研究單位進行汰役電池二次利用研究。但目前各車廠採用的電池無統一標準，在外型、電池類型、充放電特徵互異情況下，要改成儲能系統，無論在應用技術、修改投入成本、電池系統管理等都需進一步研究。

(五) 插電式油電混合車與增程式電動車的發展趨勢對電動車充電網路推廣的影響

插電式混合車與增程式電動車由於車價與實用性都優於純電動車，加上各車廠(含台灣的納智捷)都有插電式油電混合車與增程式電動車之車型開發與量產計畫，因此未來整體小客車的市占率將有可能逐步提升。插電式油電混合車可利用充電基礎建設進行電能補充，因此未來對充電式電能補充基礎建設需求應該是優於電池租賃的營運。儘管插電式油電混合車與增程式電動車在價格上或性能上與一般汽油車輛相比已逐漸具備競爭性，但目前國際電動車成長趨緩，若未來油價持續上漲或電池技術進步，進一步增加電動車市場規模，則有機會創造充電式電能補充服務需求，創造參與電動車電能補充服務經營的時機。建議切入電動車電能補充服務市場可以優先進行充電式電能補充網路的營運，等利用充電網路服務有固定營收後，再開始電池租賃的營運服務，如此整體營運風險應可降低。

(六) 車電分離對消費者購買純電動車的意願影響

車電分離是希望降低消費者購買純電動車負擔，以降低純電動車進入市場門檻。然而純電動車相對其他傳統或混合動力車輛，除電池造成車價較高外，功能表現方面(如：電池循環壽命、電池容量等)也成為左右消費者選擇的原因。各國對於不同類型電動車給予不同補助，使電動車價格更能與燃油汽車競爭。儘管財政補助政策有助於電動車推廣，但效果有限，因民眾購買意願仍受車輛功能性影響。僅利用車電分離降低車價，加速純電動車進入市場的策略，難達到擴大市場規模效果。

(七) 將分散至電動車車主之電池成本，全數移轉至電池租賃公司之風險

電池租賃公司相較於提供充電服務的

電能補充公司，初期需要多負擔龐大的電池成本，將延長電池租賃公司的回收期。與只提供充電服務的公司相較，營運成本與風險都將大幅上升。此營運公司必須為資本雄厚並有便宜的資金取得管道才有可能成功。近年來台灣政府財政狀況不佳，短期之內難由政府主導此一公司成立。由於電池租賃營運回收期長，因此一般企業應考慮龐大資金投資機會成本。長期而言，若國內未來建立需求反應市場機制，提供誘因增加電池租賃事業收入，為未來參與電池租賃營運時機。

(八) 經營電動車充電服務與電池租賃電能補充服務之比較

國內電動車輛市場發展趨勢和國際一致，可預期市場上純電動車數量較過去所設定全力推動電動車較少，如此對電池租賃服務需求的成長趨勢將減緩，在市場需求規模減少下，不利於對市場規模依賴度大的電池租賃電能補充服務營運。

陸、結論

本文分析電動車與充電站營運模式對電能補充的影響，並提出短、中長期之建議：

一、短期策略

電動汽車因受限於電動車的電池成本、電池性能、充電設備等三大因素，短期內電池技術難有重大突破，目前適合採用充電式為電動車進行電能補充。而國內發展目標將以電動巴士為主，由於電池容量較大，台電應關注其充電對配電系統是否會造成影響。

(一) 用戶置設電動車充電站，由於有饋線變壓器超載或致超過用戶電表容量之顧慮，建議責成電動車銷售業者或充電設備銷售業者檢視用戶的設備(含電表)容量，於裝設前向電力公司提出用戶的容量分析計算結果與不

超載之保證。

- (二) 電動巴士服務業者對於自用之充電站於必要時應設置充電設備智慧充電控制設備，俾避免多台充電設備因同時啟動造成饋線電壓變動而致違反電業法第 36 條之 5%之要求。建議責成用戶或充電設備銷售業者於裝設前向台電提出饋線電壓變動率計算結果與逐台啟動等因應措施，俾確保符合饋線電壓變動率之要求。
- (三) 可向電動車充電服務提供之營運商蒐集相關數據，針對區域內饋線數量與容量，快速、初步推估區域內電動汽車推廣量對配電系統造成之影響。

二、中長期策略

若充電基礎建設普及與電動車輛技術提升，電動車輛行駛範圍可拓展至城市周邊地區或跨城市運輸，可預見電動汽車數量將逐漸增加，台電應持續關注國內電動車推廣數量之情形，評估電動車電能補充對電網運行之影響。

- (一) 若充電站數量逐漸增加，可將充電管理/充電預測等由用戶集成商申請設置與執行，來管理眾多充電站的充放電行為。另外，電動車充電站之充電系統應設置智慧充電控制設備或互鎖機制，如慢充時限制其總開機數或者快充時不得同時進行慢充等方式，限制總用電量，避免造成變壓器過載。
- (二) 對於現行充電站之配置，因不便更動既有的配電系統架構，可藉由充電站內之充電機制與充電站之監測達到最佳配置目標，評估充電站設置者是否應於電力公司之桿上增設變壓器負載監測器，此負載監測器主要是提供充電站業者於變壓器超載前自動卸載，並提供監測資訊給電力公司的配電維護部門，加強檢測並提早預作轉供。
- (三) 若未來根據推動策略配合車電分離模式發展，可預見電池交換方式將為電動車電能補充的方式之一，台電應持續關注發展情形。

柒、參考文獻

- [1] B. Berman and J. Gartner, "Battery Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles: OEM Strategies, Demand Drivers, Technology Issues, Key Industry Players, and Global Market Forecasts," Pike Research, USA, Q2 2014.
- [2] "Bay Area Plug-in Electric Vehicle Readiness Plan: Background and Analysis," International Coach Federation, Dec. 2013.
- [3] Southern California Edison Company, "Joint IOU assessment report for PEV notification," Nov. 2015, [Online] Available: <http://docs.cpuc.ca.gov/efile/REPORT/156710.pdf>.
- [4] Southern California Edison, "The Electrician's Guide: Installing Electric Vehicle Charging Stations at Commercial and Multi-Family Properties," Nov. 2015, [Online] Available: https://www.sce.com/wps/wcm/connect/606cda45-f2be-4023-9fc2-5c103354b1b1/CommEV_Electrician+Guide.pdf?MOD=AJPERES.
- [5] 「既存の分譲マンションへの電気自動車充電設備導入マニュアル」,一般社団法人公寓計畫修繕施工協會, 2013 年 11 月。
- [6] 「電気自動車用急速充電器の設置・運用に関する手引書」, CHAdeMO 協議会, 2014 年 3 月。
- [7] 「智慧電動車發展策略與行動方案」, 經濟部, 2014 年 10 月。
- [8] 格上租車, 「格上電動車租賃」, 檢索日期: 2015 年 11 月, 網址: <http://www.ev-carplus.com.tw/index.aspx>。
- [9] J. Gomez and M. Morcos, "Impact of EV Battery Chargers on the Power Quality of Distribution Systems," IEEE Power Engineering Review, October 2002.
- [10] H. Seljeseth, H. Taxt, T. Solvang, "Measurements of Network Impact from Electric Vehicles During Slow and Fast Charging," *22nd International Conference on Electricity Distribution, CIRED*, Stockholm, 10-13 June 2013, pp.1353.
- [11] P. T. Staats, W. M. Grady, A. Arapostathis and R. S. Thallam, "A Statistical Method for Predicting the Net Harmonic Currents Generated by a Concentration of Electric Vehicle Battery Chargers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 3, pp.1258-1266, July 1997.
- [12] 陳彥豪、盧思穎、陳俐奴, 「電動車營運模式探討與展望」, 中國電機工程學會電工通訊季刊, 第 40-48 頁, 2013 年第 4 季。

火力發電廠細懸浮微粒檢測及空污排放外部成本估算

Fine Particulate Matters Monitoring and the Method of Evaluating External Costs of Air Pollutant Emissions from Coal-Fired Power Plants

蔡顯修*
Tsai, Hsien-Shiow

林武煌**
Lin, Wu-Huang

黃哲信*
Huang, Zen-Shinn

黃俊賢***
Huang, Chun-Hsien

郭泰均*
Kuo, Tai-Juan

陳怡伶****
Chen, Yi-Lin

(102 年度研究計畫論文)

摘要

本研究係針對台電所屬燃煤電廠進行細懸浮微粒排放及空氣污染物外部成本等二項議題進行研究。以我國公告之標準檢測方法和美國環保署方法，檢驗煙囪排放之原生性細懸浮微粒(含 FPM_{2.5} 及 CPM)，分析結果顯示，CPM 濃度變化大，且佔總 PM_{2.5} 之比例約為 84%~98%，若僅以我國標準方法檢測之 FPM_{2.5} 代表 PM_{2.5}，將明顯低估。

本研究蒐集外部成本分析文獻，配合燃煤機組排放空氣污染物特性，整理出可能造成的環境外部成本項目為 NO₂、SO₂、粒狀物等污染物的「健康成本」、「房產建物損害或清潔成本」與「農作損害成本」。

Abstract

The goal of this study is to investigate the emission of PM_{2.5} from coal-fired power plants, and external costs of air pollutant emissions. The primary emission of PM_{2.5} (including FPM_{2.5} and CPM) emitted from stacks was tested using both Taiwan and USA sampling methods. The study indicates that the primary emission of CPM varies significantly among stacks and CPM accounts for 84~98% of the total PM_{2.5} emission, which means that by monitoring merely FPM_{2.5}, our national sampling methods would significantly underestimate the amounts of PM_{2.5}. With the consideration of emission characteristics of coal-fired power plants and study results of other related scientific journals, the external costs from NO₂, SO₂, and PM emissions are analyzed in the following aspects: medical care damage costs, agricultural damage costs, and housing associated damage costs.

關鍵詞(Key Words)：火力發電廠(Coal-fired Power Plants)、細懸浮微粒 (PM_{2.5})、可過濾性微粒(Filterable Particulate Matter)、可凝結性微粒(Condensable Particulate Matter)、外部成本(External Cost)。

壹、前言

燃煤電廠所排放之空氣污染物，除溫室氣體外，細懸浮微粒與重金屬汞無疑是目前國際間最關注的焦點。

*台灣電力公司環境保護處
**台灣電力公司電源開發處
***台灣電力公司董事檢核室
****中興工程顧問股份有限公司

為維護民眾健康，並跟上國際腳步，我國環保署發布細懸浮微粒(PM_{2.5})空品標準。目前我國細懸浮微粒空氣品質尚未達到空品標準之要求，環保機關已著手研擬相關管制措施以達成空品目標。大氣中 PM_{2.5} 主要來源包含原生性及衍生性二大類，因應管制必要性，環保署環檢所於 102 年 3 月 6 日發布排放管道 PM_{2.5} 標準採樣方法，台電公司實有必要建立排放資料庫，以因應未來管制趨勢。

燃煤火力發電為國內主要發電方式，係以燃燒化石燃料產生熱能發電，過程中不免衍生空氣污染物排放問題，包括：粒狀物、硫氧化物、氮氧化物及微量有害空氣污染物等；雖然台電公司已安裝先進空氣污染防治設備，以符合國內環保法令要求，甚至以國際間最嚴格標準自我要求，然相關問題在新電廠設置審查過程仍屢受各界質疑，亦造成既有電廠在營運上莫大困擾。故有必要參考國內外既有模式，配合燃煤電廠排放空氣污染物特性，分析燃煤機組空氣污染物排放可能造成之環境外部成本項目。

貳、燃煤電廠細懸浮微粒(PM_{2.5})排放調查

一、研究及調查方法

細懸浮微粒(Fine Particulate Matter)為粒徑小於或等於 2.5 μm 之懸浮微粒，一般稱之為 PM_{2.5}。由於粒徑小，分散度高，在空氣中難以沉降，停留時間可達 7~30 天，具有長程傳輸之特性。由於 PM_{2.5} 粒徑小，穿透力強，容易深入人體肺部，並於肺泡累積產生病變，且 PM_{2.5} 比表面積大、活性強，易將空氣中的有毒物質，如重金屬、有機物等污染物附著在 PM_{2.5} 上，因此 PM_{2.5} 比起粒徑在 2.5~10μm 之懸浮微粒更具有危害性。

近年來，細懸浮微粒已受到國際關注，紛紛制訂空氣品質標準。為維護民眾健康，我國跟上

國際腳步，發布細懸浮微粒(PM_{2.5})空品標準，目前我國細懸浮微粒空氣品質並未達到空品標準之要求，環保機關已著手研擬相關管制措施以達成空品目標。

大氣中 PM_{2.5} 主要來源包含原生性及衍生性二大類，因應管制必要性，環保署環檢所於 102 年 3 月 6 日發布排放管道 PM_{2.5} 標準採樣方法，本計畫以實際檢測方式建立台電公司火力電廠 PM_{2.5} 排放資料庫，以因應未來管制趨勢。

原生性 PM_{2.5} 又分為可過濾性微粒(Filterable Particulate Matter, FPM) 與可凝結性微粒(Condensable Particulate Matter, CPM)兩種，FPM 係指在煙囪排氣中以固態或液態微粒存在，採樣時可由濾紙直接收集到的粒狀物；CPM 則指工廠等高溫煙囪排氣中之氣相物質排放於大氣後，經冷卻形成固態或液態之微粒，一般來說 CPM 屬 PM_{2.5}。CPM 雖不被濾紙所捕集，但排出後經冷卻於大氣環境下形成 PM_{2.5}。目前我國環保署公告之煙囪排放 PM_{2.5} 標準檢測方法(「排放管道中細懸浮微粒(PM_{2.5})檢測方法(NIEA A212.10B)」)內容主要參考美國環保署(U.S. EPA)之”Determination of PM₁₀ and PM_{2.5} Emissions from Stationary Sources”(U.S. EPA Method 201A)，但我國檢測方法內容僅進行可過濾性微粒之採樣分析，未包含凝結性微粒。為完整進行 PM_{2.5} 之檢測，本計畫另採用美國環保署公告之”Dry Impinger Method for Determining Condensable Particulate Emissions from Stationary Sources”(U.S. EPA Method 202)進行煙道中 CPM 之採樣與分析，藉以瞭解台電公司火力電廠原生性 PM_{2.5} 排放情形。

本計畫於 2014 年 4 月及 7 月分別針對中部與南部電廠各擇 2 機組進行檢測，藉以了解 PM_{2.5} 排放情形，並建立燃煤電廠 PM_{2.5} 之排放資料。

二、研究成果

本計畫檢測細懸浮微粒排放濃度與排放係數如表 1 所示，4 個機組之 FPM_{2.5} 平均排放濃度

為 0.55~2.33 mg/Nm³，CPM 平均排放濃度為 6.57~32.33 mg/Nm³，FPM_{2.5} 濃度穩定，而 CPM 濃度差異較大，排放結果均以 CPM 為主，CPM 佔總 PM_{2.5} 之 67%~99%。顯示若僅以 FPM_{2.5} 推估燃煤機組之總 PM_{2.5} 排放，與實際排放相比，有低估之情形發生。

依據採樣當時燃煤量計算排放係數，其中 FPM_{2.5} 排放係數約為 0.005~0.022 公斤/公噸燃

煤，低於美國環保署 WebFIRE^[1]與 MACTEC^[2]研究的 FPM_{2.5} 排放係數 0.085~0.520 公斤/公噸燃煤。本計畫檢測之 CPM 排放係數約為 0.068~0.304 公斤/公噸燃煤，與美國環保署 WebFIRE、MACTEC 研究的 CPM 排放係數 (0.169~0.286 公斤/公噸燃煤)相近。然而 CPM 採樣結果的變動性大，尚待未來研究資料加強其可信度。

表 1 中部與南部電廠 PM_{2.5} 排放係數

機組	日期	乾基排氣量 (Nm ³ /min)	飼煤量 (公噸/hr)	PM _{2.5} 排放濃度(mg/Nm ³)			排放係數 (公斤/公噸燃煤)		
				FPM _{2.5}	CPM		FPM _{2.5}	CPM	
南部電廠 A 號機	2014/04/17	32896.69	191.6	0.6	0.60	6.5	6.57	0.006	0.068
	2014/04/18			0.5		6.0			
	2014/04/18			0.7		7.2			
南部電廠 B 號機	2014/04/24	30490.83	194.9	2.3	2.33	71.2	32.33	0.022	0.304
	2014/04/25			2.3		4.7			
	2014/04/25			2.4		21.1			
中部電廠 C 號機	2014/07/14	31436.4	211.8	1.0	1.84	18.4	9.39	0.016	0.084
	2014/07/15			2.3		4.9			
	2014/07/15			2.1		4.9			
中部電廠 D 號機	2014/07/16	31788.43	220.9	0.3	0.55	21.8	25.62	0.005	0.221
	2014/07/17			0.6		30.3			
	2014/07/17			0.7		24.8			

參、空污排放外部成本項目分析

一、外部成本評估程序

參考我國行政院環保署「環境政策與開發計畫成本效益分析作業參考手冊」^[3]所建立的成本效益分析程序，以衝擊路徑法(Impact Pathway Analysis, IPA)分析火力發電廠空污排放外部成本的評估程序。

(一) 步驟一：範疇界定

目的在於確定評估範圍及基準情境。假設評估對象為燃煤電廠所排放之空氣污染物，在基準情境的建立上，至少須考量三個基本要項，分別是地點、排放源的運作條件及評估對象。

(二) 步驟二：認定成本評估項目

此部分關鍵在於認定須納入分析的外

部成本項目。國內外研究，目前與空氣污染相關的環境外部成本包含「健康風險成本」、「房產及建物損害或清潔成本」及「農作損害成本」等三項。

(三) 步驟三：外部成本實證評估

此步驟為整個評估流程的核心，本研究參採國際研究架構，使用 IPA 完成「排放量轉換」、「劑量反應」與「成本」等三階段的評估，以將上述的外部成本項目予以貨幣化。在處理細節上，在第一階段採用擴散模式(ISCST3)配合實際調查資料進行模擬，以了解空氣污染物的擴散情況及受影響區域範圍。第二階段則是參採國內外所建立的劑量反應函數，配合第一階段的模擬結果，估算出受影響區域的污染衝擊影響。最後，在第三階段則是針對各衝擊影響項目，建立貨幣化損害函數。

(四) 步驟四：外部成本現值計算

若涉及不同時點的影響效果評估，則發生於不同時點的外部成本，須配合適當折現率來加以折現，以得到外部成本的現值。

(五) 步驟五：敏感度分析

在一般化的評估過程中，多少會存在不確定性因素對評估結果產生影響，因此可採用敏感度的分析的方式，來釐清對於外部成本評估結果之影響。

(六) 步驟六：評估結果報告

以不同情境呈現環境外部成本評估結果。

二、燃煤電廠外部成本項目分析

燃煤機組主要排放空氣污染物包含粒狀物、硫氧化物及氮氧化物。外部成本估算時需計算各污染物對人體、建物、植物等受體的影響，而相關研究多以二氧化硫及二氧化氮進行硫氧化物及氮氧化物對受體的劑量-反應研究，故本研究亦採取電廠排放的二氧化硫(以下簡稱 SO₂)及二氧化氮(以下簡稱 NO₂)進行。粒狀物部分，除總懸浮微粒(TSP)以外，近期 PM_{2.5} 亦受到關注，然環境大氣中 PM_{2.5} 成因複雜、變動性高、科學論證尚難具體掌握，故分析電廠排放 PM_{2.5} 外部成本以原生性為主。

根據國際文獻及研究報告的彙整比較，整理出目前燃煤電廠的可量化的空氣污染外部成本包含「健康風險成本」、「房產及建物的損害成本或清潔成本」與「農作損害成本」等三項，各項分析方式說明如下：

(一) 健康風險成本

空氣污染對人體健康的影響包括罹病(Morbidity)與死亡(Mortality)，本研究評估項目包含因污染造成之疾病的醫療支出、疾病期間無法工作所損失的工資及生命期望值改變的風險成本(以下稱為死亡風險成本)，架構如圖 1。健康風險成本分為醫療成本(包含醫療支出、疾病期間無法工作

損失)與死亡風險成本等兩子項目進行評估，各子項目的計算邏輯如圖 2 與圖 3 所示。

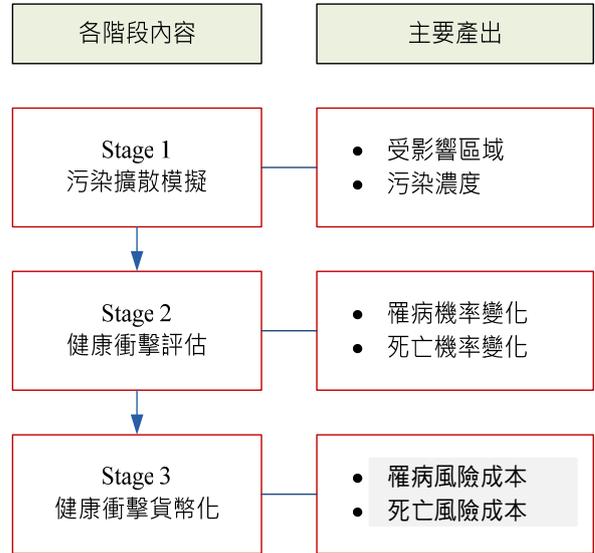


圖 1 健康風險成本之 IPA 評估架構

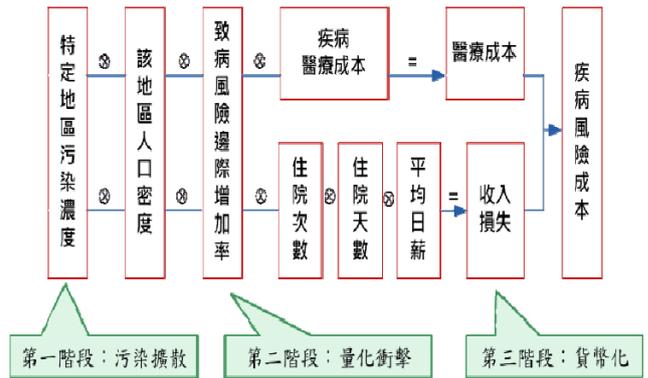


圖 2 醫療成本計算邏輯

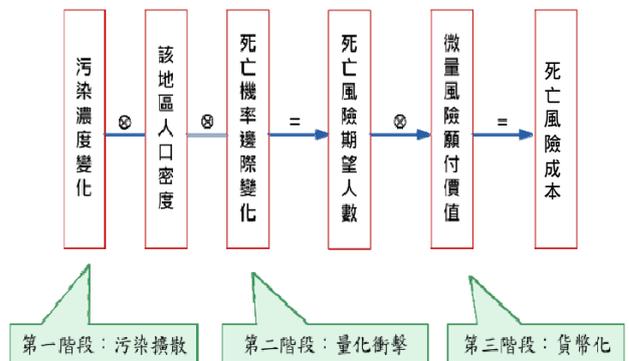


圖 3 死亡風險成本計算邏輯

第一階段可利用空氣品質模式，評估電廠排放原生性空氣污染物對附近區域之

影響。

第二階段之罹病所導致之就醫事件及死亡風險機率期望值變化，可選用美國 EPA 之 BenMAP 資料庫的劑量反應函數，其基本形式如(1)式；若因部分參數取得不易，可將(1)式進一步轉化為(2)式來進行計算。

$$\Delta y_i = y_0(e^{\beta \Delta x_i} - 1) \quad (1)$$

$$y_0 = y_i * e^{-\beta \Delta x_i} \quad (2)$$

其中：

- Δy_i ：因特定污染所導致的就醫事件數量變化(包含就診、住院、急診、死亡)，利用劑量反應函數想要求得的主要結果指標(未知)；
- y_0 ：空氣污染物排放前之背景就醫事件率(未知，須推算)；
- y_i ：現狀下(亦即 $\Delta y_i + y_0$)的就醫事件率(已知，由衛福部統計年報資料取得)；
- β ：由 BenMAP 資料庫所取得的反應函數估計係數(已知)；
- Δx_i ：污染濃度增量值(已知，透過第一階段模擬取得)。

劑量反應函數的挑選，可參採行政院環保署

(2012b)的挑選原則：首先是篩選出與本研究污染物相關的劑量反應函數，其次，因這類研究對象通常會有年齡區間的差異，為令評估結果盡可能得以涵蓋所有年齡層，因此在挑選劑量反應函數時，第二層次乃是年齡區間做為選取依據。依此，本研究所篩選出的劑量反應函數彙整如表 2，配合各污染物之模擬濃度值，可依表 3 之劑量反應函數計算各污染物之死亡、就診及急診之就醫事件變動量。後續可配合行政院主計處『中華民國統計資訊網』之研究地區人口數，乘上就醫事件增加率，則可得各地區的醫療事件變動量期望值。

而在死亡風險變動期望值方面，可透過行政院衛生署公布年度死因統計中之主要死亡原因粗死亡率，以此做為死亡風險變動量之背景值資料來源，接著配合 $PM_{2.5}$ 的死亡風險劑量反應函數求出死亡風險變動率後，再乘上受影響地區受之人口數即可得死亡風險變動量期望值。

第三階段的工作重點在於將空氣污染對人體的健康損害轉化為貨幣單位，此部分包含「醫療支出」、「疾病期間無法工作所損失的工資」(以下稱未工作損失)以及「死亡風險成本」的損失。

表 2 不同疾病及年齡層之劑量反應函數係數

污染物	健康影響	係數	劑量反應函數型態	資料來源	研究指標	年齡層	
PM _{2.5}	死亡風險	0.006766	Logistic	Woodruff et al.(2006)	年平均值	<1 歲	
		0.005827	Log-linear	Pope(2002)	年平均值	30-99 歲	
	就診	心血管疾病	0.0014	Log-linear	Moolgavkar(2000)	日平均值	18-64 歲
			0.00158	Log-linear	Moolgavkar(2003)	日平均值	65-99 歲
		氣喘	0.003324	Log-linear	Sheppard(2003)	日平均值	0-64 歲
			0.0021	Log-linear	Zanobetti et al.(2009)	日平均值	65-99 歲
急診	氣喘	0.0056	Log-linear	Mar et al.(2010)	日平均值	0-99 歲	
SO ₂	就診	呼吸系統疾病	0.005468	Log-linear	Luginaah et al.(2005)	最大小時值	0-14 歲
			0.003418	Log-linear	Luginaah et al.(2005)	最大小時值	15-64 歲
			0.003709	Log-linear	Fung et al.(2006)	最大小時值	65-99 歲
	急診	氣喘	0.000744	Log-linear	Ito et al.(2007)	最大小時值	0-99 歲
NO ₂	就診	呼吸系統疾病	0.006747	Log-linear	Luginaah et al.(2005)	最大小時值	0-14 歲
			0.007139	Log-linear	Luginaah et al.(2005)	最大小時值	15-64 歲
			0.001238	Log-linear	Fung et al.(2006)	最大小時值	65-99 歲
	急診	氣喘	0.00546	Log-linear	Ito et al.(2007)	最大小時值	0-99 歲

註：資料來源：本研究彙整自 BenMap 系統資料庫

表 3 不同評估項目之劑量反應函數

評估項目	評估污染物項目		健康影響	年齡層	劑量反應函數	
死亡風險	PM _{2.5}	年平均值(μg/m ³)	-	<1 歲	$\Delta y_i = y_0 \left[\frac{1}{(1 - y_0 * e^{-0.006766\Delta x_i} + y_0)} - 1 \right]$	
			-	30-99 歲	$\Delta y_i = y_0 (e^{0.005827\Delta x_i} - 1)$	
就診	PM _{2.5}	日平均值(μg/m ³)	心血管疾病	18-64 歲	$\Delta y_i = y_0 (e^{0.0014\Delta x_i} - 1)$	
				65-99 歲	$\Delta y_i = y_0 (e^{0.0158\Delta x_i} - 1)$	
			氣喘	0-64 歲	$\Delta y_i = y_0 (e^{0.003324\Delta x_i} - 1)$	
				65-99 歲	$\Delta y_i = y_0 (e^{0.0021\Delta x_i} - 1)$	
	SO ₂	最大小時值(ppb)	呼吸系統疾病	0-14 歲	$\Delta y_i = y_0 (e^{0.005468\Delta x_i} - 1)$	
				15-64 歲	$\Delta y_i = y_0 (e^{0.003418\Delta x_i} - 1)$	
				65-99 歲	$\Delta y_i = y_0 (e^{0.003709\Delta x_i} - 1)$	
	NO ₂	最大小時值(ppb)	呼吸系統疾病	0-14 歲	$\Delta y_i = y_0 (e^{0.006747\Delta x_i} - 1)$	
				15-64 歲	$\Delta y_i = y_0 (e^{0.007139\Delta x_i} - 1)$	
				65-99 歲	$\Delta y_i = y_0 (e^{0.001238\Delta x_i} - 1)$	
	急診	PM _{2.5}	日平均值(μg/m ³)	氣喘	0-99 歲	$\Delta y_i = y_0 (e^{0.0056\Delta x_i} - 1)$
		SO ₂			最大小時值(ppb)	0-99 歲
NO ₂		0-99 歲			$\Delta y_i = y_0 (e^{0.00546\Delta x_i} - 1)$	

註：1. 資料來源：本研究彙整自 BenMap 系統資料庫。

2. y_0 為背景死亡風險、就醫事件率(Baseline Incidence Rate)，即排放源未運作前之就醫、死亡事件率，而 Δx_i 代表排放源運轉後所排放的空氣污染物質增加值，其中下標 i 為暴露於空氣污染中之第 i 人， Δy_i 表示暴露於特定空氣污染物質增量環境下的死亡風險、就醫事件率變動量。

首先，在估算醫療支出時應先求出單位醫療支出，即每一次就醫之醫療成本，其中醫療成本可採全民健康保險醫療統計年報中，全民健保特約醫事機構向健保局申請之申報費用及自行負擔之點數合計值，包括門診、急診、住院再除以件數做為各別醫療行為之成本。除就醫所支出之

費用外，在疾病期間無法工作所損失的工資部分，可參考行政院主計總處所公布之受僱員工薪資調查統計數據，以 2012 年為例，我國平均年薪資為新台幣 547,289 元，以一年工作 52 週每週工作日 5 天計算我國平均每日工作薪資為新台幣 2,105 元。在計算未工作所導致的損失部分，考量主要

工作人力之年齡，建議可以 18 歲至 64 歲民眾就診(含門診與急診)每次以損失一個工作日計算，住院部份則可依據全民健康保險醫療統計年報所統計之平均住院天數而定。最後加總「醫療支出」及「未工作損失」，用以呈現罹病事件增加之健康風險成本總額。

進而，在死亡風險期望值提高所導致的死亡風險成本方面，可參考行政院環保署(2012b)的評估方式，採用(3)式進行計算：

$$\sum_{i=1}^N \Delta\mu\gamma_i * WTS_i(\mu\gamma) \quad (3)$$

在(3)式中， $\Delta\mu\gamma_i$ 表示死亡風險變動量， $WTS_i(\mu\gamma)$ 為減少一單位死亡機率所對應的願意支付價格，可參考劉錦龍(2011)^[4]以特徵工資模型研究工作風險與工資報酬二者之間的關係、進而透過補償性工資推估 2002 年至 2006 年我國勞動者的 $WTS(\mu\gamma)$ 研究成果，研究中顯示我國勞動工資介於 73 元至 110 元之間，平均約為 85.37 元。但由於該文中之 $WTS(\mu\gamma)$ 是以 1996 年物價水準為基準，後續可利用行政院主計總處所公布之消費者物價指數，將 $WTS(\mu\gamma)$ 平均值調整至研究年度(例如以 2014 年物價水準計算為 103.97 元)。最後依先前所求出之死亡風險變動量透過式(1)加總而得統計生命價值。

(二) 房產或建物損害或清潔成本

房產或建物損害成本區分為二種方式，一種以損害成本法為基礎，另一種則以維護成本法為主。

損害成本法需有受影響區域內的所有房產及建物之材質資訊，才能進一步透過實驗所得的損害函數來估算可能的損害。此法雖清楚直接，但實際執行估算十分困難、且成本高昂。另一種替代的方式，即

是站在維護成本法的觀點，以受影響區域內民眾面對污染情況願意支付的趨避行為成本做為替代衡量。依此邏輯架構評估受影響區域內民眾為避免總懸浮微粒(TSP)濃度增量所衍生的清潔行為願意支付費用，以及民眾對於降低 SO_2 濃度以減少建築物受腐蝕之願付價值進行此項成本之評估。計算方式如式(4)、(5)。

$$\begin{aligned} & \text{避免房產及建物損害之清潔成本} \\ & = \sum \Delta TSP_i \times \text{Population}_i \times WTP_{TSP,i} \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{房產及建物受 } SO_2 \text{ 腐蝕成本=} \\ & \sum \Delta SO_{2i} \times \text{Population}_i \times WTP_{SO_2,i} \quad (5) \end{aligned}$$

其中 ΔTSP_i 及 ΔSO_{2i} 為第 i 區域的總懸浮微粒濃度增量及二氧化硫增量、 Population_i 為第 i 區的人口數量、 $WTP_{TSP,i}$ 為第 i 區域民眾每年願意支付用來避免房產及建物遭受空氣污染損害之清潔成本費用，而 $WTP_{SO_2,i}$ 則為第 i 區域民眾針對減少建物受蝕所願付的金額。

(三) 農作損害成本

空氣污染成分中， SO_2 及 NO_2 所造成之酸雨，均對農作物有不良影響。在農業損失成本的評估之上，文獻上的分析方法至少包含三種，分別是「市場價值評估法」、「數學規劃法」，及「計量經濟方法」，在實務上的運用，受限於實證資料之可取得性，本研究採用「市場價值評估法」。

IPA 三階段評估程序中，第一階段以空氣品質模式評估受影響的行政區域及空氣中污染物的濃度。第二階段則是配合彙集國內外農作對空氣污染物的損失反應函數(可分為稻米、雜糧、特用作物及蔬菜四大類別進行評估，如表 4)，評估作物曝露在特定濃度的污染物質下對農作產量造成的衝擊影響。最後一階段，是利用市場價值評估法，配合受影響地區的作物種類、

年產量(可參考農糧署農情報告資源網)及售價(可參考農委會農業統計年報)，以評估農損造成的經濟成本損失。其損失包含農作產量減少導致農民部份投入成本無法回收及相對應的銷售利潤減少。

三、燃煤電廠排放改善外部成本分析

依據台中發電廠 1~4 號機空氣污染物排放改

善規劃(表 5)試算改善後的外部成本差異如表 6，可看出未來台中發電廠 1~4 號機進行空氣污染物排放改善後，主要可減少每年約 1,700 萬元的外部成本，其中以醫療成本占大部分，約 1,555 萬元/年；各項污染物減量對外部成本降低貢獻，以二氧化硫最大，約 1,417 萬元/年，二氧化氮減量對外部成本降低貢獻則約為 276 萬元/年。

表 4 各類別農作之損失函數

農作類別	農作損失函數	參考文獻
稻米	yield loss= -0.1096SO ₂	任勇等 (2011)
雜糧	yield loss= -0.2878SO ₂	任勇等 (2011)
特用作物	yield loss= -3.7-0.187SO ₂	Roberts (1984)
蔬菜	yield loss= -0.5345SO ₂	任勇等 (2011)

註：1.yield loss 為農作物產出量減損百分比，以(%)表示。

2.SO₂ 為年平均值，單位為 ppb。

表 5 台中發電廠第 1 至 4 號機空污改善排放濃度與排放標準比較

空氣污染物	排放標準	排放情形	
		改善前	改善後
粒狀污染物 (mg/Nm ³)	<20	<17	<15
硫氧化物 (ppm)	60	<40	<37
氮氧化物 (ppm)	70	<80	<65

表 6 台中發電廠第 1 至 4 號機空污改善後減少外部成本分析

項目		成本估算結果 (新台幣元/年)			
		NO ₂	SO ₂	TSP	總計
健康風險成本	醫療成本	2,764,184	12,782,045	-	15,546,228
	死亡風險成本	-	-	-	0
農作損害成本		-	69,617	-	69,617
房產及建物損害或清潔成本	清潔成本	-	-	72,347	72,347
	避免腐蝕成本	-	1,319,934	-	1,319,934
總計		2,764,184	14,171,596	72,347	17,008,127

肆、結論

一、細懸浮微粒(PM_{2.5})粒徑小，穿透力強，容易深入人體肺部，且比表面積大、活性強，空氣中的有毒物質(如重金屬等)易附著在 PM_{2.5} 上，因此 PM_{2.5} 比起粒徑在 2.5~10μm 之懸浮微粒更具有危害性。目前世界各國已

注意 PM_{2.5} 的危害性，紛紛制定 PM_{2.5} 空氣品質標準，但尚無國家制訂固定污染源 PM_{2.5} 排放標準。

二、本計畫進行燃煤電廠煙囪排放 PM_{2.5} 檢測分析工作，分析電廠排放之原生性 PM_{2.5}(包含可過濾性 FPM_{2.5} 及可凝結性 CPM)。南部發電廠 A 號及 B 號機與中部發電廠 C 號機及 D 號機等 4 部機組之 FPM_{2.5} 平均排放濃度為

0.6 mg/Nm³、2.3 mg/Nm³、1.8 mg/Nm³、0.5 mg/Nm³；CPM 佔總 PM_{2.5} 之比例分別為 92%、93%、84%、98%。檢測結果在 FPM_{2.5} 部分與過去台中市環保局檢測結果相近，而 CPM 濃度值則有較大差異。目前國際間對燃煤電廠 CPM 排放機制尚無一清楚定論，主因為有進行檢測之研究較少，且美國 method 202 在 2010 年修正前，採取所得之 CPM 濃度有偏高情形，故可茲參考的資料非常少。以美國執行經驗，CPM 採樣結果的變動性大，尚待未來研究資料加強其可信度。

三、本研究蒐集外部成本分析文獻，配合燃煤機組主要排放空氣污染物，整理出目前燃煤電廠的可量化的空氣污染外部成本包含「健康風險成本」、「房產及建物的損害成本或清潔成本」與「農作損害成本」等三項。依據台中電廠 1~4 號機空污改善規劃進行試算，改善後外部成本每年約減少 1,700 萬元，其中以醫療成本占大部分，約 1,555 萬元/年；各項污染物減量對外部成本降低貢獻，以二氧化硫最大，約 1,417 萬元/年，二氧化氮減量對外部成本降低貢獻則約為 276 萬元/年。

伍、誌謝

本研究執行期間，承蒙各單位的鼎力相助，提供相關檢測資料，特別是各電廠於採樣期間提供諸多協助，使本研究得以順利完成。

陸、參考文獻

- [dep.state.pa.us/dsweb/Get/Document-100359/AppC4_Technical_Memorandum - EFs for CPM from EGUs.doc](http://dep.state.pa.us/dsweb/Get/Document-100359/AppC4_Technical_Memorandum_-_EFs_for_CPM_from_EGUs.doc).
- [3] 蕭代基等人，「環境政策與開發計畫成本效益分析作業參考手冊」，行政院環境護署，2012 年。
- [4] 劉錦龍，「越老越不值錢？一年齡結構與生命價值之研究」，行政院國家科學委員會輔助專題研究計畫，2011 年。
- [1] Technology Transfer Network Clearinghouse for Inventories & Emissions Factors, Commodities Now April 2015, [Online]. Available:<http://epa.gov/ttn/chief/webfire/index.html>.
- [2] MACTEC, "Emissions Factors for Condensable Particulate Matter Emissions from Electric Generating Units," Commodities Now April 2015, [Online]. Available: <http://www.elibrary>.

具自動需量反應之用戶能源控制器開發與研製

Development and Implementation of Energy Controller with Open Automated Demand Response

卓明遠*

Cho, Ming-Yuan

林士允*

Lin, Shih-Yun

李建興*

Li, Chien-Hsing

陳建男*

Chen, Chien-Nan

黃信益*

Huang, Hsin-Yi

摘要

國內外電業公司向以需求面管理代替供給面的電源開發，推出開放式自動需量反應(Open ADR)方案，以完善的時間電價與公開的自由市場機制達到供需平衡，並且得以有效抑制尖峰用電。有鑑於此，本研究以 Linux 為核心之開放原始碼作業系統，設計一個具備自動需量反應功能之用戶能源控制器。此能源控制器除了可透過 OpenADR 參與電業公司之需量反應計畫，同時可獲取本地端即時用電資訊並以不同的負載管理策略對本地端負載進行投入與卸載控制，以達到實際節能效果。此外提供 WEB 圖形化介面(GUI)，使用者可透過其進行能源管理與相關參數與組態設定。最後，雛型經實驗室測試，其功能符合需求，並驗證了所研製之控制器的效能與實用性。

Abstract

Domestic and international electrical companies have been making strenuous efforts to replace the supply side management with the demand side management of energy development. Some of them use the open automated demand response (Open ADR) to improve usage rate, open free market mechanism and achieve the balance between supply and demand, aiming to bring down the power system's peak demand. This paper aims to study the use of open source Linux operating system in designing a client-server energy controller with Open ADR function. This energy controller not only could participate in the electrical companies' demand response programs via Open ADR, but also could provide easy access to the relevant information of local real time power consumption. Moreover, by using the different strategies of electricity load management the controller can make it easier to have better control of loading and unloading of power demand to order to achieve our purpose of real energy savings. Besides, the energy controller provides a WEB graphical user interface (GUI), allowing users to conduct the effective energy management and to get a good understanding of the above information. Finally, an experimental testing is executed for the prototype unit, with the result indicating that its function has met the requirement. Our expected efficiency and practicality of the controller have also been verified.

*國立高雄應用科技大學

關鍵詞(Key Words)：自動需量反應(Open Automated Demand Response (Open ADR))、嵌入式系統(Embedded System)、節能控制器(Energy Saving Controller)、負載控制器(Load Controller)。

壹、緒論

電力產業為國家重要之能源工業，與國家經濟發展、產業成長息息相關。由於經濟成長，生活水準提高用電需求殷切，導致每年之尖峰負載持續成長。為解決目前台灣地區夏季尖峰負載電力不足之窘境，本文以供給面管理與需求面管理兩個面向作為探討。供給面管理係指電能開發、提高電廠發電效率、提升電力傳輸效率之投資計畫，以對於未來整體電力需求事先做好規劃。需求面管理係指以不同負載管理措施實施於不同類型用戶，以改善用戶的負載型態，提升能源使用效率、均衡尖峰與離峰負載和減少電能消耗。

然而，若僅為滿足系統尖峰負載需求而投資興建電廠，將造成設備在尖峰負載以外的時段閒置而無法充分利用，投資風險大。且我國近年來環保意識抬頭，加上日本福島核災事件^[1]後，國內民眾對於此類議題更加敏感，造成興建電廠與相關電力輸配設備的日益困難。為避免有限資源被過度開發帶來環境的成本，因此需求面負載管理的實施，為有效降低尖峰負載需求、紓解限電壓力達到節約能源目標的有效方法。

一、計畫目標

- (一) 設計以嵌入式系統為基礎並具備 ADR 協定連線功能的能源控制器雛形，並研究其應用在各類型用戶的適用性與效能。
- (二) 開發數位化後的電表、水表以及瓦斯表三表合一的通訊界面與資料格式，同時進行電、水與瓦斯的能源管理。
- (三) 配合台電目前積極推動之 AMI 系統以及負載特性計畫，協助台電與資策會進行用戶端的 ADR 試驗。
- (四) 藉由 ADR 降低或移轉用戶尖峰時段之電

力，以有效抑制尖峰負載(Peak Load)。

- (五) 提升智慧電網中自動需量反應之執行成效，並落實用戶端的負載管理策略。

二、預期成效

- (一) 開發的能源控制器具備技術領先與創新。
- (二) 具有自動需量反應與自動卸載功能。
- (三) 以嵌入式系統技術研發具備了(無線與有線)網路傳輸且低成本特性。
- (四) 整合電表、水表、瓦斯表，用戶易於進行能源與資源管理。

貳、需求面管理現況與趨勢

一、需求面管理概述

需求面管理 (Demand-Side Management, DSM) 係指電力公司透過負載管理 (Load Management) 等措施以改善用戶的負載型態、縮短尖離峰差距、提高能源使用效益，其目的在於均衡系統負載，提高發電設備利用率與減少不必要之能源消耗。

圖 1 為需求面管理之分類，需求面管理制度隨著電業自由化之趨勢，從傳統需求面管理走向需量反應(Demand Response, DR)機制，而需量反應計畫由傳統負載反應朝向價格基礎(Price Based)與市場基礎(Market Based)反應^{[2][3]}。

所謂需量反應是指用戶為反應一些信息(如價格或緊急事件通知)，用戶將負載(或電力需求)回授給系統或是指「有能力抑低消費能力的用電戶，當躉售市場每小時電價飆漲時，用戶抑低電力消費而使價格下降；或當獨立調度機構因系統緊急情況而要求電力用戶卸載或抑低負載時段用戶配合降低電力消費，以避免遭遇到實施分區輪流停電之需要」。

需量反應方案具有極大的彈性與互動性，其優點包含系統操作者在緊急時有更多的選擇、使抑低負載的用戶產生潛在的經濟利益、移轉發電業者市場電力及導入面對高價電力的彈性需求。需量反應方案一般分為兩類，分別為負載反應與價格反應方案。至目前為止，大部分的需量反應是屬於負載反應方案，焦點著重在提供系統負載的舒緩以維持供電的可靠性。

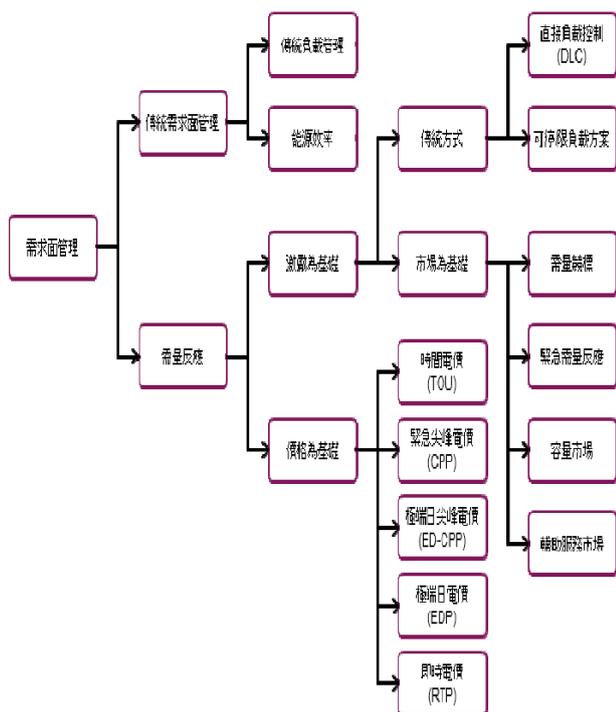


圖1 需求面管理分類

二、季節電價

於 1989 年起實施的季節電價係反映不同季節供電成本差異的一種電價制度，主要目的在於引導用戶抑低夏季尖峰用電，降低供電成本，進而維持低廉的電價水準。民眾可以利用各項節約用電措施降低夏月用電所佔比例，而有效減少全年度整體電費支出^[4]。台電現行之季節電價採累進制，依據不同的用電度數級距給予不同之費率，如表 1 所示。即便季節電價方案在六至九月季節性負載用電重載時給予較貴之用電費率，但最大電價比僅有 1.27 倍，且無法真實反映尖峰負載時刻的發電成本。

表 1 台電現行季節電費表(102 年 10 月 1 日起適用)

分類	度數	夏月 6/1~9/30	夏月	電價差	電價比
非營業用	~120	2.10	2.10	0.00	1.00
	121~330	3.02	2.68	0.34	1.13
	331~500	4.39	3.61	0.78	1.22
	501~700	5.44	4.48	0.96	1.21
	701~1000	6.16	5.03	1.13	1.22
營業用	1001~	6.71	5.28	1.43	1.27
	~330	3.76	3.02	0.74	1.25
	331~700	4.62	3.68	0.94	1.26
	701~1500	5.48	4.31	1.17	1.27
	1501~	6.73	5.31	1.42	1.27

三、時間電價

時間電價(Time of Use, TOU)為反映尖峰、半尖峰、週六半尖峰、離峰時間不同之供電成本，分別就各個時間訂定不同費率；尖峰時間電價較高，離峰時間電價較低，以鼓勵用戶調整作業時間、更新設備或增設負載管理設備等，俾移轉尖峰時間用電於離峰時間使用^[4]。基本上，所謂 TOU 方案乃根據電力公司的發電成本或購買電力成本的基礎上以特定時間為依據進行電價訂定的方式，如平假日差異與時段差異等因素而產生用電的尖峰、半尖峰或離峰。由於該電價費率方案主要以時間作為電價訂定的分段切割的設計，因此以時間電價稱之，也是各國時間電價制度中最常見與最普遍的費率方案。

現行時間電價方案經多次的修正與擴大電價差距，依時段可分為二段式與三段式，且又可分為尖峰時間日固定與非固定擁有不同之電價表(如表 2)。時間電價使用經驗法則判斷出高用電量區間給予昂貴之電價，可有效使用戶轉移負載至離峰時段以達到負載均衡。

自 1979 開始實施時間電價於工業用戶，直到 2003 年起才開放住宅表燈用戶選擇參與時間電價方案，但礙於一般用戶對方案的不了解與誘因不大等因素，採行率並不高。且目前實行的時間電價缺點為制定時間範圍與各級距電價差異並不明顯，無法即時判斷當前階段之負載情況給予新的電價。

表 2 台電時間電價分類

	高壓與特高壓			低壓		
	固定尖峰		非固定尖峰	固定尖峰		
二段式	時間	夏月	非夏月	不適用	夏月	非夏月
		尖峰	尖峰		尖峰	尖峰
		週六半尖峰	週六半尖峰		週六半尖峰	週六半尖峰
		離峰	離峰		離峰	離峰
三段式	時間	夏月	非夏月	同左，但尖峰時間由台電公司指定日期，全年共計30日180小時	不適用	
		尖峰	尖峰			
		週六半尖峰	週六半尖峰			
		離峰	離峰			

四、發展趨勢

智慧型電表基礎建設主要由智慧型電表、通訊系統、電表資訊管理系統所組成，除可取代人工抄表外，尚具有支援各種不同電價費率、提供用戶能源使用資訊並引導自發節能、停復電管理、進行電表設備資產管理等優點。

在國外自由電力市場中，如雨後春筍般出現的能源服務管理公司提供能源節約服務，主要為大電力用戶進行節約能源可行性評估與執行，從為客戶省下的能源經費中獲取利益。部分能源管理公司甚至可兼任能源集成商的角色，其將想要參與需量反應之小負載(如住宅、商業用戶)用戶匯集起來，達到參與電力市場競價機制之最小批量，從現貨市場價格與契約價格間謀取套利機會。此類需量管理單位需要協調不同用戶所需抑低之負載量與時間，並將抑低負載量匯集起來參與電力市場競價獲取利益，同時也須結算各用戶參與需量反應之績效與利潤分配。

各國電力公司除了施行時間電價外，部分電業也同時施行緊急尖峰電價(CPP)、尖峰回饋電價(PTR)與即時電價(RTP)等電價策略，如表 3。

緊急尖峰電價(CPP)在一般時期與時間電價(TOU)的費率設計的結構相同，電力事業可能會在離峰時段提供較時間電價(TOU)方案更為優惠

的電價，並同時與用戶約定在特定的時段、日期、或者供電緊急的事件下以相當高的價格作為電價，以達到避免用戶在設定的時段中用電，而造成供電的不足的問題。而尖峰回饋電價(PTR)則是在約定的特定時段若客戶可以減少用電，電力事業將根據減少的用電給予電價的回饋，屬於鼓勵性的費率設計。因此，尖峰回饋電價(PTR)與緊急尖峰電價(CPP)的主要目的在於用戶可以在約定的特定時段中不使用電，差異僅在於電力事業是透過相對較高的電價懲罰用電的用戶或是提供優渥的回饋補償鼓勵用戶不用電，而兩個方案所達到或呈現的效果應相同^[6]。

表 3 國外電力公司時間電價策略^[5]

電力公司	累進費率	時間電價 TOU	需量電價 CPP/PTR	即時電價 RTP
日本東京電力公司	√	√		
新加坡能源服務公司	√	√	√	
韓國電力公司	√	√	√	
美國加州 PG&E	√	√	√	√
美國紐約州 ConEdison	√	√		
美國德州 TXU Energy	√	√		
瑞典 Vattenfall	√	√		√
義大利 Enel	√	√		
法國 EDF	√	√		

資料更新時間 20/15/12/09

即時電價(RTP)方案電價訂定的機制為反應電力批發市場即時性的電力價格，提供用戶更貼近實際市場價格的電價，具有確實反應實際且合理成本的優點。透過即時電價(RTP)方案也可以促使電力市場價格朝向更具競爭力的市場環境。在電力自由化程度較高的國家，民眾可以就藉由即時電價(RTP)的方案，向提供低廉電力的業者採購電力，在消費者為最大獲利者的角度，讓電力業者之間產生良性競爭。

參、開放式自動需量反應協定

一、Open ADR2.0 通訊協定^[7-9]

遵循 OASIS Energy Interoperation 1.0 標準^[10]的概念，在 OpenADR 2.0 網路架構中的這些節點可分為兩組：即發布和傳輸有關的事件的資訊到其他節點(例如，公用事業)，以及接收與回應資訊的節點(例如，終端用戶)。該上游節點即稱為 Virtual Top Nodes(VTNs)，這是一個控制需求側資源的實體，負責傳送電網資訊(如價格、可靠性、事件等)到其他實體(如 VENs)；下游節點則被稱為 Virtual End Nodes(VENs)，擁有一組資源和/或過程可進行操作控制，並且可以對已知的智慧電網訊息(如 DR 訊號)做出回應。該 VEN 可以是能源的生產者或是消費者。

如圖 2 顯示出 VTN 對應 VEN 關係的所有組合。最單純的情況是從一個公用事業(Utility)或獨立電力調度中心(Independent System Operator, ISO)下達 OpenADR 命令到各個客戶端站點(Site)。此外，一個 OpenADR 裝置可以在分層架構的上層作為一個 VEN 對上層 VTN 伺服器做響應，並且也可同時作為下層的 VTN 對下級的 VENs 下達命令。它們被視為兩個完全獨立的介面並獨立測試，以確保其符合規範與互操作原則。實際的系統部署方案取決於公用事業和參與客戶之間的協議。這些 VTNs 與 VENs 節點之間可以使用簡易超文本通訊協定(Simple HyperText Transfer Protocol, Simple HTTP)或 XMPP(XML Messaging and Presence Protocol)通訊協定進行通信。

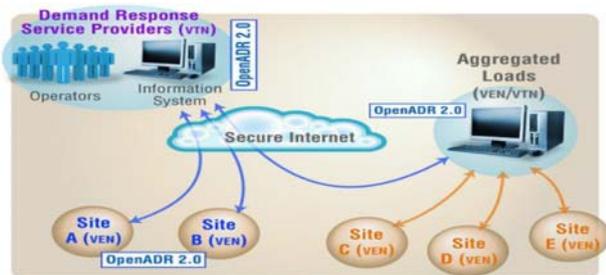


圖 2 OpenADR2.0 VTN 與 VEN 關係圖

二、OpenADR2.0 資料模型

OpenADR 2.0 配置文件(Profile)是一個靈活的資料模型，以方便電力供應商、能源集成商(Aggregator)與終端用戶之間的共同的訊息傳遞與交換。其涵蓋 Virtual Top Nodes(VTNs)伺服器與 Virtual End Node(VENs)自動化客戶端之間的雙向訊息，且包含特定的需量反應減少用電或轉移策略的相關訊息。在 OASIS EI 1.0 標準中定義了 EiRegisterParty、EiEnroll、EiEvent、EiMarketContext、EiQuote、EiReport、EiAvail 與 EiOpt 等八項服務。OpenADR2.0 Profile B 支援了其中四項(EiRegisterParty、EiEvent、EiReport 與 EiOpt)，其餘服務 OpenADR 聯盟預計在後續 Profile 中定義與支援。

三、OpenADR2.0 特點

總結 OpenADR 2.0 包含了以下特點以作為能源控制器選用之通訊協定：

- (一) 開放規範：提供一個標準化的需量反應通信架構。可用以實作動態時間電價與緊急需量反應事件等。
- (二) 靈活性：提供彈性、非平台相依且可互相操作的開放通信介面與協定。
- (三) 創新與互操作性：鼓勵開放創新和互操作性，允許工廠或企業在現有的能源策略上建立通信，以減少技術和維護成本。
- (四) 易於整合：便於整合於常見的能源管理控制系統(Energy Management and Control System, EMCS)、中央控制照明系統與其他可接收網路訊號的設備。
- (五) 支援廣泛：可以傳遞各種需量反應訊息給不同的裝置設備，可以從簡單的終端設備(如節溫器)到複雜的中介機構(如用戶全代表、仲介商)。
- (六) 遠端存取：方便參與者選擇不參加或覆寫功能來管理需量反應策略。

此外，OpenADR 聯盟提供三種不同 VEN 裝

置的認證級別，包含 OpenADR 2.0a、OpenADR 2.0b 與 OpenADR 2.0b(僅有能源回報)。而 VTN 在 OpenADR 2.0b 標準釋出的同時停止了 2.0a 的認證，目前 VTN 僅有 OpenADR 2.0b 認證。在不同的認證等級中，各項服務與功能需求也不盡相同。如表 4 可以看出不同認證級別對於各項功能的要求為必要性(Mandatory)或是選擇性(Optional)。

表 4 OpenADR2.0 認證等級

	VTN	VEN		
	B	A	B	B(Energy Reporting only)
Services and Functions Support				
EiEvent				
Limited Profile (2.0a pecification)	M	M	NA	NA
Full Profile	M	NA	M	NA
EiOpt				
Full Profile	M	NA	M	NA
Eireport				
Full Profile	M	NA	M*	M*
EiRegisterParty				
Full Profile	M	NA	M	M
Transport Protocols				
Simple HTTP	M	M	O-1	O-1
XMPP	M	O	O-1	O-1
Security Levels				
Standard	M	M	M	M
High	O	NA	O	O
M-Mandatory NA-Not available for profile O-Optional *Optional features available O-1-Optional, but at least one of them must be supported				

四、服務導向架構

EI 1.0 與 OpenADR 2.0 協定皆是基於服務導向架構(Service Oriented Architecture, SOA)而發展之上層應用協定。因近年來隨著網路的蓬勃發展，網頁服務(WEB Service, WS)名詞在 2000 年被人提出，應用在各公司企業之商品與服務的資源整合中。隨後網際網路標準組織(World Wide Web Consortium, W3C)在制定標準的過程中為網頁服務下了定義：「網頁服務為一個在網路上可以讓設備之間相互溝通、操作的軟體系統。其擁

有一個介面並以設備可處理的格式，通常為 WSDL(Web Service Description Language)描述。而其他的設備可以依照其規定的方式透過 SOAP(Simple Object Access Protocol)訊息與其互動，多數情況下使用 HTTP 與 XML(eXtensible Markup Language)配合其他 WEB 相關標準傳遞」^[11]。

在網路服務中所使用的架構則在後來被歸納為服務導向架構。SOA 本身本非一種技術，而是一種用來建構、組織、開發的方法，目的是為解決企業或組織內部眾多異質系統之間的互通性(Interoperability)問題，但其並非只能套用在網路服務中，也可將此組織方式應用在其他領域。在 SOA 中，所有的軟體元件不再是物件而是被塑形成為服務，並且著重在設計服務的介面(Interface)，此介面可以被網路上其他用戶端(client)存取使用。SOA 的設計開發者再也不是撰寫一個特定功能，取而代之的是介面被完善定義的一個服務，而這樣的服務可以被移植到不同的平台運行。具有鬆散耦合(Loosely Coupled)、互操作性(Interoperability)、可重用性(Reusability)、發現性(Discoverability)等特點。

肆、能源控制器設計

一、系統架構

本研究所欲設計之能源控制器(Energy Controller)應用情境如圖 3，其須支援開放式自動需量反應協定(OpenADR 2.0)之 VEN 功能，接收所有來自電力公司或是能源服務提供者之 VTN 所發送的需量反應資訊。同時需要取得本地端即時電表用電資訊以監控目前電力使用量，並且參與電力公司需量反應計畫使用不同智能負載控制策略卸除或投入本地端負載以達到節能效果。綜合以上需求，能源控制器須具備以下三項主要功能：

(一) 作為 VEN 設備，可透過 OpenADR2.0 可與

其他 VTN 裝置溝通。

- (二) 即時取得本地端電表資訊。
- (三) 以不同控制策略進行本地端負載控制。

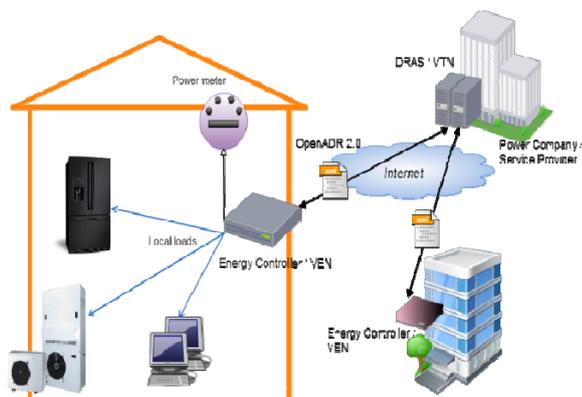


圖 3 能源控制器應用情境

二、硬體設計

為迎合越來越多自造者(Maker)、教育者(Educator)與開發者(Developer)的需求，許多晶片廠商開始製造低成本之開源硬體(Open Source Hardware) 卡片式開發平台 (Single Board Computers，或稱卡片式電腦)，方便自造者或是設備開發商花費較低廉的價格投入初期產品開

發。卡片式開發平台是指將所有電腦所需之基本功能元件如系統晶片(System on Chip, SOC)、顯示晶片(Graphics Processing Unit, GPU)、隨機存取記憶體(Random Access Memory, RAM)、儲存媒介等晶片整合至約略為信用卡大小之電路板上之嵌入式系統(Embedded System)。此類硬體之運算能力雖無法與當今之個人電腦匹敵，但具備基本之操作處理能力並且擁有多度的環境適應性，可以應用至各類特定功能於不同環境中。

而所謂開源硬體是指將開放原始碼的精神移到硬體上，將硬體設計上所需要的所有零件、電路、佈局等資源全數公開，並且發揮網路社群的力量去不斷改善硬體架構。開源硬體之價值，在於可以幫助系統開發商或是個人以友善價格取得功能完整的開發平台，同時也可加速開發腳步，不需要從無到有自食其力。市售常見之開源嵌入式系統硬體彙整如下表 5。硬體架構開發如圖 4 所示，並且完成能源控制器的製作，其外觀如圖 5 所示。

表 5 市售常見開源硬體彙整表

Model	Beagle Bone Black	Cubie trunk	A13-OLinUxino	Raspberry Pi Model B	Galileo
Producer	BeagleBoard	Cubietech	Olimex	Raspberry Pi Foundation	Intel
SOC	TI AM3359	Allwinner A20	Allwinner A13	Broadcom BCM2835	Intel Quark X100
RAM	512	2048	512	512	256
Flash	2048	8912	0(SD Card)	0(SD Card)	0(SD Card)
USB Ports	1	2	3	2	1 Host 1 Device
Price (USD)	45	89	62	35	70

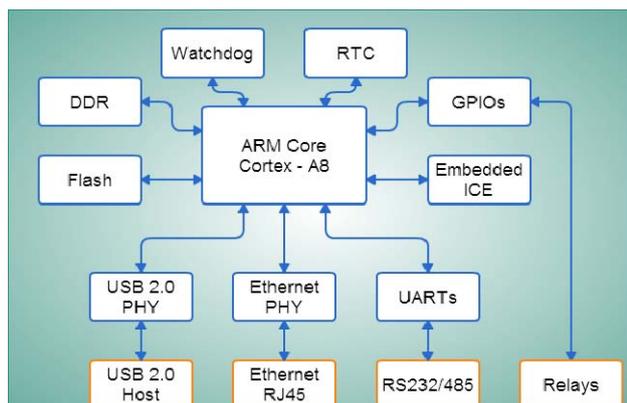


圖 4 硬體架構圖



圖 5 硬體外觀圖

三、軟體設計

作業系統使用以 Linux 為核心的 Debian 發行版本(Distribution)，其具備系統穩定性佳、套件支援度廣、硬體相容性高、網路社群熱絡等優點，因此也是不少商用伺服器所選用之作業系統。Debian 是一套自由軟體(Free Software)，秉持開放原始碼(Open Source)的精神以 Linux 做為系統核心，授權方式採用 GNU 通用公眾授權條款(GNU General Public License, GPL)。所謂的自由軟體是指任何都可以使用、重製、發佈該軟體，以讓使用者達到真正的軟體自由，這同時也是 Linux 與 Debian 至今如此受歡迎的原因之一。

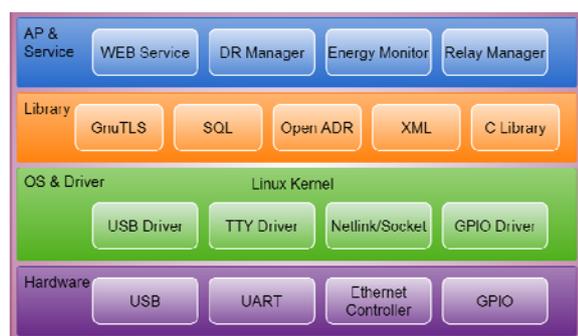


圖 6 軟體方塊圖

如圖 6 能源控制器軟體設計架構圖，依照應用功能區分為四層，最底層為搭配之硬體設計，軟體則可定義所搭配硬體之功能與驅動硬體。第二層則為作業系統與驅動程式，負責系統的基本

管理與週邊硬體驅動。第三層為函數庫，負責定義最上層的應用服務程式(Application & Service)之功能屬性。

最上層則為應用服務程式，負責進行各類型用途之功能管理程序之執行工作。

設計採用 u-boot 作為核心啟動程式(Boot Loader)，其目的為提供嵌入式系統硬體初始化，同時提供簡易之命令列介面(Command Line Interface, CLI)，開發者可透過此介面執行燒錄核心程式、傳輸檔案與除錯等功能。並且在作業系統發生嚴重損毀時可執行救援。作業系統使用 Linux 核心版本 2.6 以上，其模組化與分層架構利於開發自有模組功能，且對於任務排程、記憶體管理、硬體支援與網路封包處理有非常優秀之性能。

在此核心之中，需針對當前硬體架構撰寫或套用相對應的裝置驅動程式(Device Driver)，使該對應之硬體可以順利受控於作業系統或上層應用服務。於 Linux 核心上層之使用者空間(User Space)須包含應用程式(Application)與對應函式庫(Library)。各個應用程式皆有其存在之目的與功能，且須同時與其他相關服務交換資料達成資料同步。就目前需求規劃及規格設計以下主要應用程式與服務：

(一) DR Manager: 自動需量反應管理程式。此程式需以 VEN 的角度實作 OpenADR2.0 標準協定 Pull 模式。建構於 Simple HTTP 之上，

並使用 TLS1.0 加密傳輸。即時統計與計算當前 15 分鐘需量並回傳透過 OpenADR2.0 協定與 VTN 做資訊交換。此程式可透過行程間通訊(Inter-Process Communication, IPC)與其他行程交換資訊。

- (二) Energy Monitor: 能源監視程式。從數位電表取得目前需量資訊並記錄。此程式可透過 IPC 與其他行程交換資訊。
- (三) Relay Manager: 負載管理程式。透過數位輸出腳位控制 relay，進而控制本地端負載的投入與卸載。此程式可透過 IPC 與其他行程交換資訊。
- (四) WEB Service: 網頁伺服器服務程式。依循標準 HTTP 協定 1.0/1.1 提供使用者 HTML 網頁圖形化人機操作介面。使用者可透過此人

機介面了解目前負載狀態與需量資訊，並且可讀寫系統設定已配合不同安裝環境之現場需求。此程式可透過 IPC 與其他行程交換資訊。

伍、實測與結果

一、實測環境規劃

本研究測試環境架構圖如圖 7，將所研製的能源控制器透過 Modbus 協定利用 RS-485 與設備介接，進而讀取能源資訊。架設筆記型電腦模擬 VTN 端，透過乙太網路(Ethernet)與能源控制器 (VEN 端)連接，透過各個節點控制器進行需量卸載/加載。

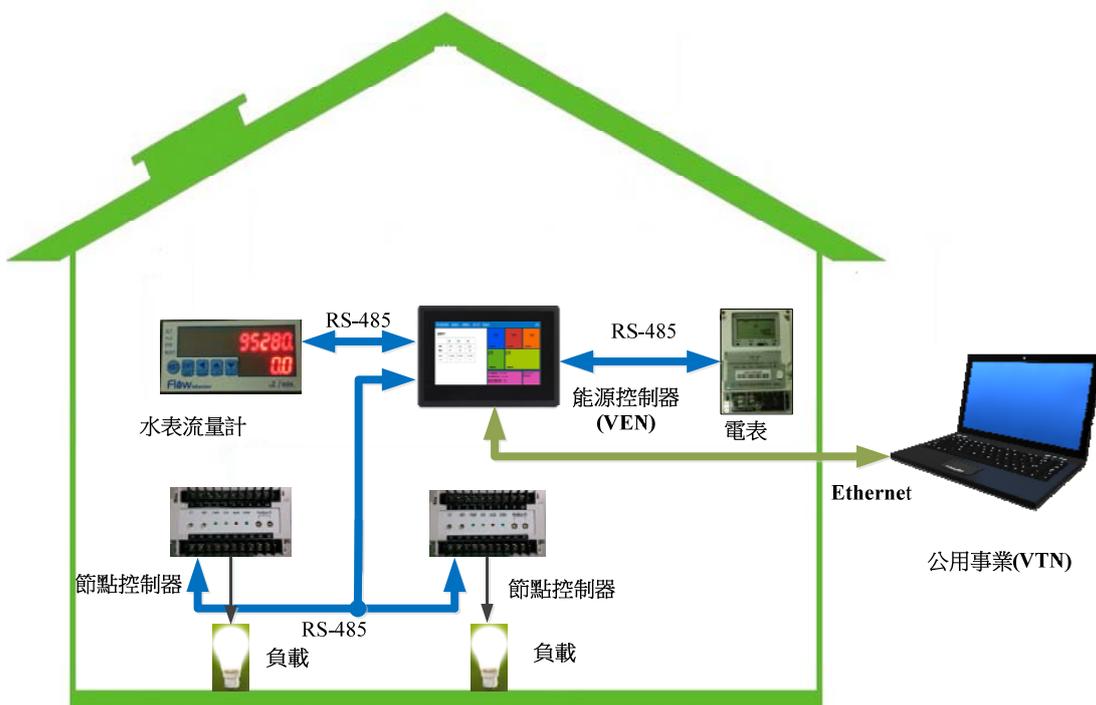


圖 7 測試環境架構圖

二、實測測試流程

依據實測環境規劃製作能源控制器展示系統如圖 8 進行實測，流程如下：

- (一) 首先接上電源 110V~220V 並開啟無熔絲開關。

- (二) 能源控制器的觸控面板顯示能源資訊與需量反應事件資訊。
- (三) 操作能源控制器進行自主式需量反應或參與 VTN 端發送的需量反應事件，執行需量反應流程如圖 9 所示。

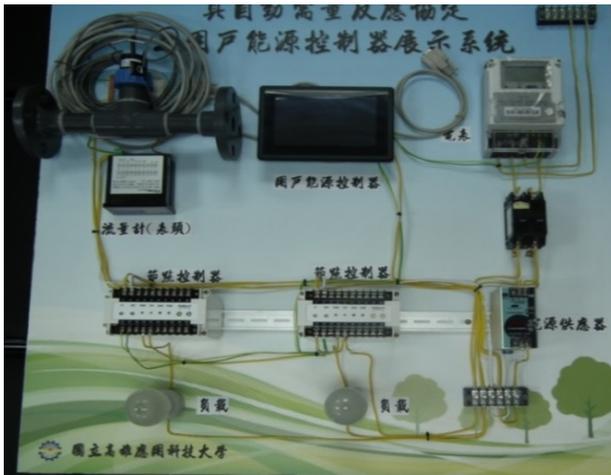


圖 8 能源控制器展示系統圖

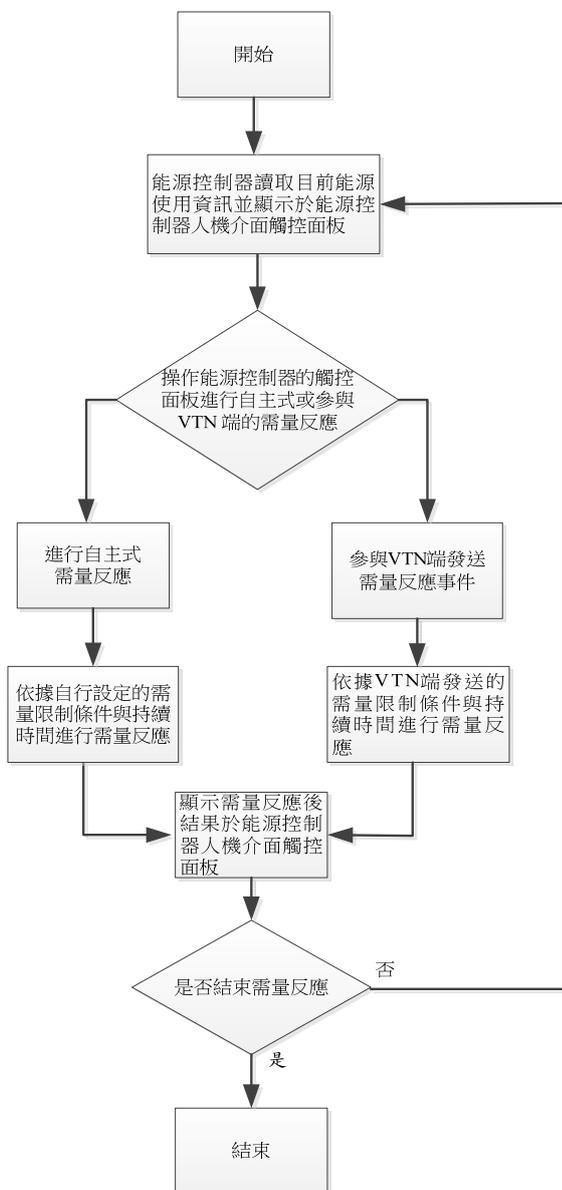


圖 9 能源控制器執行需量反應流程圖

圖 10~圖 12 表示 VTN 端發送需量反應事件訊息與 VEN 端未接收/接收到需量反應事件訊息。圖 11、圖 12 讓用戶掌握需量反應即時訊息，考慮是否繼續參與下次需量反應。



圖 10 VTN 端發送需量反應事件訊息圖



圖 11 VEN 端未接收到需量反應事件圖



圖 12 VEN 端接收到需量反應事件圖

三、能源控制器實際測試成效

設定能源控制器的需量限制條件為 300kW。如圖 13 標示 A 的位置是需量反應事件尚未進行前的負載曲線；標示 B 的位置是 VEN 端參與 VTN 端需量反應的負載曲線；標示 C 的位置是 VEN 端進行自主式的需量反應管理後的負載曲線，以上需量反應所節省的需量結果詳見表 6。

尖峰時段 12:00~13:00 參與 VTN 端發送需量反應事件或進行自主式的需量反應管理，分別可節省 340 度(kWh)與 260 度(kWh)。

未來一萬個用戶安裝能源控制器，節省的用電度數很可觀，並且讓用戶從電業公司獲得電費優惠與不超過契約容量支付違約金。電業公司可藉由能源控制器了解用戶的用電情形，計算發電成本與在用電尖峰時段有充裕電力調度空間。

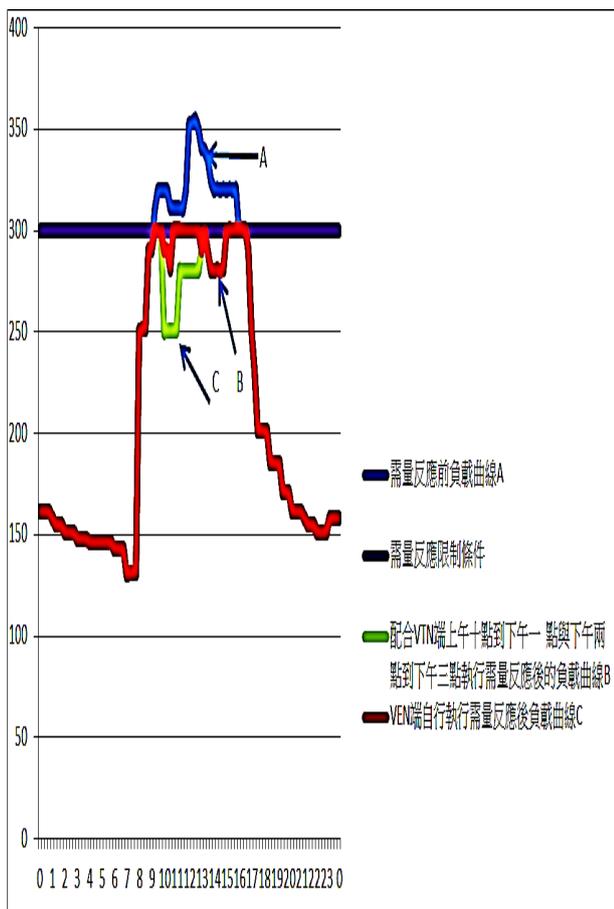


圖 13 負載曲線變化圖

表6 執行需量反應所節省的需量結果

時間	執行 VTN 發送需量反應事件節省的需量 (單位 kW)	執行自主式的需量反應事件節省的需量 (單位 kW)
10:00:00	70	30
10:15:00	70	30
10:30:00	60	30
10:45:00	60	10
11:00:00	60	10
11:15:00	30	10
11:30:00	30	10
11:45:00	40	20
12:00:00	72	52
12:15:00	73	53
12:30:00	75	55
12:45:00	70	50
13:00:00	50	50
14:00:00	40	40
14:15:00	40	40
14:30:00	40	40
14:45:00	40	40
15:00:00	20	20
總共節省需量 (單位 kW)	940	590

陸、結論與未來研究方向

一、結論

OpenADR2.0 自動需量反應提供了一個定義良好的框架，電業公司或能源集成商可藉由此框架進一步完善定義箇中事件欄位之意涵，以定義後的內容與各類型用戶達成協議，使用電戶可以選擇是否參與需量反應計畫，以節省整體能源消耗達到業者、用戶、社會三贏之目標。

本研究結合自行開發撰寫之應用程式與服務，實作一個支援自動需量反應之用戶端智慧型能源控制器。此能源控制器可以接收電業公司所遞送之需量反應計畫資訊，藉由自動參與需量反應計畫搭配不同之負載管理策略達到節省能源之目的。同時利用開放原始碼資源，可以加速整個產品的開發或是實驗的進行，參考前人的經驗，避免重蹈相同的錯誤。

經過實驗測試的結果，所研製之能源控制器

雛型，除了可支援 OpenADR 進行自動需量反應外，尚可有效控制本地端負載，依據目前用戶的使用容量，動態調節負載投入與卸載，達到節能效果。

綜觀而言，有包含各種智能負載策略之能源控制器可確實有效抑低用戶端負載容量，一來避免超約，二來又可配合需量反應節省電費開銷。再者也可進一步配合智慧家庭應用，將能源資訊集於一身作為家庭能源管理系統之用。

二、未來研究方向

在完成本研究實作之自動需量反應能源控制器，為強化此能源控制器之實用性質，僅提出下列建議以供未來研究之參考。

- (一) 本研究研製之能源控制器未能實際安裝於用戶端，並且控制負載。日後可尋找適切之場域進行安裝與實測，發掘應用面之短處，進一步改良能源控制器。
- (二) 能源控制器未來可結合瓦斯與其他公用事業資訊，對用戶端所有能源與資源做一個整合性的監控與管理。
- (三) 針對住宅型之用戶，能源控制器可納入居家智能化之概念，囊括空調設備與情境照明等以單一介面集中管理。
- (四) 電業自由化後，能源服務管理公司或是能源集成商可參考本研究之能源控制器自行定義能源控制器功能與協定資訊，結合小型住宅或營業場所用電戶參與電力公司之需量反應計畫，達到節能效果。

柒、誌謝

本研究感謝科技部南部科學工業園區管理局補助南部科學工業園區綠能低碳產業聚落推動計畫經費之支持(計畫編號 103GE09)。

捌、參考文獻

- [1] 徐懷瓊，「日本 311 福島核災之教訓及我國核能電廠因應措施」，中國鑛冶工程學會會刊，第 215 期，第 9-19 頁，2011 年 9 月。
- [2] 楊政晁，楊正光，陳宏義，「推動需量反應之可行性研究」，能源季刊，第 36:3 期，第 44-59 頁，2006 年 7 月。
- [3] ALBADI, Mohamed H. and EL-SAADANY, E. F, " A summary of demand response in electricity markets," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, issue 11, pp. 1989-1996, November 2008.
- [4] 台灣電力公司，「時間電價與季節電價」，2014 年 5 月，http://www.taipower.com.tw/UpFile/PowerSavFile/main_6_2_2.pdf.
- [5] 陳詩豪，黃奕儒，施恩，「國際時間電價發展概況及推動經驗之探討」，台電工程月刊，第 777 期，第 58-76 頁，2013 年 5 月。
- [6] 陳詩豪，湯政仁，黃佳文，呂嘉容，歐陽利姝，賈方霽，施恩，「智慧電網(Smart Grid)下住宅時間電價研訂策略之研究」，台電工程月刊，第 733 期，第 38-58 頁，2013 年 1 月。
- [7] OpenADR Alliance, OpenADR 2.0a Profile Specification. 2011.
- [8] OpenADR Alliance, OpenADR 2.0b Profile Specification, 2013.
- [9] OpenADR Alliance, "Understanding OpenADR 2.0," May, 2014, [Online]. Available: http://www.openadr.org/assets/docs/understanding%20openadr%202%200%20webinar_11_10_11_sm.pdf.
- [10] OASIS, Energy Interoperation Version 1.0, Dec. 19 2013
- [11] W3C, "Web Service Architecture," Feb 12 2004, [Online]. Available: <http://www.w3.org/TR/ws-arch/>.

售電業務及客戶服務相關系統整合可行性研究

The Feasibility Study about System Integration on Billing and Customer Service Systems

楊新全*
Yang, Shin-Chuan

袁作滋**
Yuan, Tso-Tzu

賈方霈*
Jia, Fang-Pei

季延平***
Chi, Yan-Ping

戴台平***
Day, Tai-Pyng

黃致祥***
Huang, Chih-Hsiang

(104 年度研究計畫論文)

摘要

本研究計畫乃針對台電公司近年之客戶服務導向經營目標，探討售電業務及客戶服務相關系統整合時，其功能可否涵蓋台電公司客戶服務導向的需求，或另採其他方式進行，而進行現況診斷與規劃。從台電客戶服務策略到資訊策略，再到資訊架構和流程，通盤考慮各相關部門的資訊化需求，制定整體的資訊整合策略，統一規劃，分步建置。

本研究採用 IBM 企業系統規劃法(Business System Planning, BSP)、Holland 提出的策略系統規劃法(Strategic System Planning, SSP)等方法以確保業務流程與資訊系統架構間的一致；採用 King 提出的策略集合轉移法(Strategy Set transformation, SST)、McFarlan 提出的策略格道法(Strategic Grid, SG)、Rockart 提出的關鍵成功因素法(Critical Success Factors, CSF)等方法以確保經營策略與資訊系統策略間的一致；採用 James Martin 提出的資訊工程法(Information Engineering, IE)與 Zachman 的企業 IT 架構標準架構(Zachman Framework)等以確保經營策略、業務流程與資訊系統架構三者間的一致性。

另外，本研究分別從企業流程、資料庫技術、資料庫設計等層面探討、省思現行系統資料模型設計是否包含企業流程要件、目前所使用的資料庫技術是否符合企業所需，以及系統的資料庫設計尚須精進之處，然後建立售電業務及客戶服務相關系統整合的系統架構，提出系統建置的細部方法、預算概估與推動建議。最後提出新系統建置之 RFP，以期能為後續開發新系統建立起好的基礎。

Abstract

This project takes a holistic approach to integrating the information systems in our company which are involved both in sale of electricity and in provision of customer services. An overall information integration strategy is proposed that is in line with the service strategy of TPC. With the blueprint of the information infrastructure and business processes that follow the company's overall strategic guidelines, the project are carried out in phases.

The IBM's Business System Planning (BSP) and Holland's Strategic System Planning (SSP) is used to assure the business processes under the information systems architecture.

*台灣電力公司綜合研究所

**台灣電力公司資訊系統處

***環域科技股份有限公司

Applying King's Strategy Set Transformation (SST), McFarlan's Strategic Grid (SG), and Rockart's Critical Success Factors (CSF) methodologies guide the strategic alignment between the business strategy and the information system strategy. Lastly, we plan to use the Information Engineering methodology (IE) proposed by James Martin and the Enterprise Architecture Framework and by Zachman to assure the consistency and alignment between business strategy, business processes, and information systems architecture.

It will be concluded whether or not the current database model is sufficient enough in analyzing the business processes, database architecture, and system architecture. The architecture of Integrated Customer Service System will be proposed based on the result of our previous analysis. The scope of the Integrated Customer Service System implementation, its estimated schedule and budget will also be outlined. Once the system architecture is defined, the study will make comparisons among several alternatives and delineate the cost benefit, feasibility, and extensibility of these alternatives and provide a comparative study for TPC to evaluate. Once TPC decides to adopt one of the alternatives, a detailed development method, budget, and action plan will be proposed for implementation of the selected alternative. The study can also provide necessary assistance in writing a RFP for TPC to establish the new system.

關鍵詞(Key Words)：售電業務及客戶服務系統(Power Selling and Customer Service Systems)、商業智慧(Business Intelligence)、資訊策略規劃(Information Strategic Planning)。

壹、前言

台電公司肩負國家經濟成長與安定社會的使命，由早期以提供可靠的電力到近年因基礎建設日趨完善與電力市場逐步開放、重視環保節能、再生能源及智慧電網議題等因素而漸漸轉變為以客戶服務導向為目標，故『客戶服務系統』之功能是否良善關係著台電公司第一線客戶服務品質之良窳；另台電公司售電業務又是一般用電大眾及用戶非常關心之切身問題，支持售電業務運作之『售電業務系統』，其作為『客戶服務系統』之用戶用電和購電資料重要來源，二者實互為表裏，密不可分。

目前市面上大多數提供電信服務或公用事業服務之企業，因服務之對象及用戶數量眾多，提供之業務服務內容複雜，莫不以業務營運及客

戶服務整合度良好之後端資訊系統，當作客戶服務之堅實基礎。目前台電公司整體『售電業務系統』及『客戶服務系統』因早期時空環境、電腦技術等限制而採用逐步擴充建置方式，40多年來歷經多次之各自系統增修與重大改變，以致相關系統結構日趨複雜，不同作業資訊平台上各子系統間缺乏緊密連結，用戶之資料重覆散置於各子系統資料庫，造成資料儲存空間與設備運算性能之負擔及重複投資。尤其是『售電業務系統』之核心-新電費核算開票系統(NBS)開發建置已七年，運作平台已呈現效能不足，作業系統及套裝軟體須升級等問題。故台電公司資訊系統處認為必須整合現行『售電業務系統』及『客戶服務系統』，進而提升服務層次並擴大服務層面，在此背景下「售電業務及客戶服務相關系統整合可行性研究」(以下簡稱「本案」或「本專案」)遂行開始。

台電公司近五年來客戶數平均成長率接近 2%(1.99%)，102 年用戶總數達到 13,184 仟戶(資料來源：www.taipower.com.tw)，規模在全球電力公司中名列前 20 大電力事業。加以台電公司為一綜合性電業公司，本身即具有發、輸、配、售各項業務，因此相關的客戶服務業務相當龐大與複雜。另外近年來由於能源價格飛漲，以致台電公司虧損幅度逐年擴大。因此台電公司總經理在「98 年業務聯合檢討會」中特別強調的築夢專案等五大經濟部指示研提之改造專案，期能在短中長期的規劃中掌握能源變化的趨勢，改善經營體質，厚植競爭能力。

「售電業務及客戶服務相關系統整合」能否跟上這改造的課題，甚而帶領台電公司改造的方向與規模，本研究計畫的結果具有很大的參考性與影響力，其重要性不可謂不大。

本研究需要達成下列研究目標：

- 一、以流程、功能及資料等層面規劃未來的系統整合需求，達成整合成一套以用戶服務為導向、以售電資訊為內涵之高效率及完善的整合性售電業務及客戶服務系統。
- 二、依據資訊處與業務處未來整合性後端資訊系統業務推展之實際需求與現行資訊業務進行差異和問題分析，經由整合歸納分析後，規劃最佳化整合性售電業務及客戶服務系統服務策略、流程與功能，並制訂前瞻性、整體性資訊需求架構。
- 三、針對台電現有之環境，進行系統流程診斷(包含相關其他資訊系統整合介面流程)，因應資訊集中整合、資源共享服務、簡化、標準化及模組化，作一系統功能面與架構面之完整規劃。
- 四、研究評估未來整合性售電業務及客戶服務系統之建置方法、預算概估，並提出可行之推動建議方案。

本研究之預期效益有如下幾點：

- (一) 落實客戶服務導向經營目標

透過瞭解台電公司現況與背景，高階管理者對本專案的期望與願景，以及本專案在台電公司整體營運環境中所扮演的角色，參考國外相關案例與實務做法，提出售電業務及客戶服務相關系統整合服務的初步策略。透過細部的業務流程分析與最佳化設計，針對不同種類客戶開發出不同的客製化客戶服務策略。

- (二) 了解系統整合的困難與解決方式

針對現行台電公司售電業務及客戶服務相關系統整合應用現狀之解析，透過反向工程之技術，更實際瞭解系統資料庫的架構和系統的運行方式。將資料庫反向工程之結果以資料模型呈現。並與整合性資料模型與現行系統的實際資料模型，針對兩者進行比較其間的差異性，從事 GAP 分析，以提出實際的解決方案。

- (三) 考慮未來系統適應變化的彈性

本專案將建立起現況的業務流程模型與資料模型，針對電業法修正案之可能進程，探討在新的組織、電費變化、電價結構與用電購電方式的改變時系統在流程與資料面可能受到的影響，使得新系統建置時考慮可能的變化。

- (四) 強化內部流程

本專案將進行細部模型分析，將可以發現許多實際業務執行上所遭遇的瓶頸。透過多次的問題與討論會議，並透過流程模型之事實展現，將可進行徹底分析，使得台電公司相關部門對於整合性客戶服務有了一致共識，奠定未來售電業務及客戶服務相關系統整合開發的基礎。精化服務流程，提升服務效率。

- (五) 提升對內管控績效

本專案透過對於售電業務及客戶服務相關系統整合的共識，可望達成資料的集中管理。如此可統一客戶服務處理之作法，集中統籌資料之分析、及時反應例外

資訊，除可減少資料錯誤率外並可提供相關主管正確且即時之決策資訊。

(六) 提振同仁的工作士氣

雖然台電公司同仁十分任勞任怨，但是繁瑣的作業程序將抹煞員工的工作士氣。因此，藉本售電業務及客戶服務相關系統整合可行性研究之規劃，期望未來可運用無縫隙之流程。一方面可藉由網際網路提供 24 小時不間斷的服務，同時還可減少同仁大量的人力作業，二方面大量提高同仁的工作速度與效果。這樣一來，可增加同仁的信心與成就感，進而提振其工作士氣。

(七) 密切配合投入的資源

此次的售電業務及客戶服務相關系統整合可行性研究，乃以滿足客戶服務作業流程的需要為主要目標。客戶服務流程的整合，不是推翻現有行政作業程序，而是探討各項作業間關係如何透過資訊系統連接，而促使台電公司每項資源投入、人員作業、產品或服務的提供等，都能真正而有效地符合法規並與公司文化密切的配合。

(八) 建立整體的服務方式

透過本案之研究，促使未來的資訊系統以一種整體而不是各自為政的方式提供客戶服務。並且使台電公司的一切客戶服務，更具有“整合性、全盤面”的特色，傳遞持續一致的資訊，增加櫃臺單一窗口與客服中心(CCS)的服務績效與客戶滿意度，同時減少重複投資狀況，降低服務成本。

(九) 樹立整合性客戶服務的示範

未來做到售電業務及客戶服務相關系統緊密的整合後，必然將資訊系統呈現另一番氣象。而這些整合的努力與過程，必然成為各界整合服務的典範，樹立各界仿效的指南。

貳、文獻與建置方法論

因本研究範圍涵蓋之資訊系統甚多，涉及之業務範圍很廣，所需之資訊相關技能與研究方法甚多^[1]，以下列出主要之研究方法與技能。

- 一、資訊策略規劃
- 二、資訊架構設計和網路架構設計
- 三、企業架構(EA)
- 四、企業整合
- 五、用戶介面整合
- 六、資料整合及其實現模式
- 七、應用整合及其實現模式
- 八、業務流程整合
- 九、整合實現成熟模型
- 十、企業建模理論
- 十一、系統功能模型(IDEF 方法)
- 十二、資訊模型
- 十三、過程模型
- 十四、介面模型
- 十五、過程模型之間的相互組合最佳化形成了系統的功能模型
- 十六、中介軟體法
- 十七、資料倉儲法

參、研究重點、實施方式與步驟

一、研究重點

- (一) 流程與資料整合：從流程、功能及資料等層面進行整合，規劃未來的系統整合需求，達成整合為一套以用戶服務為導向、以售電資訊為內涵之高效率及完善的整合性售電業務及客戶服務系統^[2]。
- (二) 系統架構規劃：依據資訊處與業務處未來整合性後端資訊系統業務推展之實際需求與現行資訊業務進行差異和問題分析，經由整合歸納分析後，規劃最佳化整合性售電業務及客戶服務系統服務策略、流程與功能，並

制訂前瞻性、整體性資訊需求架構。

(三)功能與系統架構規劃：針對台電現有之環境，進行系統流程診斷(包含相關其他資訊系統整合介面流程)，因應資訊集中整合、資源共享服務、簡化、標準化及模組化，作一系統功能面與架構面之完整規劃。

(四)預算與推動方案：研究評估未來整合性售電業務及客戶服務系統之建置方法、預算概估，並提出可行之推動建議方案

二、實施方式

本專案實施方式首先瞭解台電公司現況與背景，進行整合發展策略規劃，以了解高階管理者對本專案的期望與願景，以及本專案在台電公司整體營運環境中所扮演的角色。接著進行各部門訪談與對公司文件與最佳實務的探討，透過與台電公司相關主管的會談，提出售電業務及客戶服務相關系統整合的服務的初步策略。根據產業特性、公司背景、組織架構與系統目前概況，透過細部訪談從事流程分析與最佳化設計。根據多次訪談結果，建立以業務流程和規則為基礎的理想資料模型。

另一方面，我們展開對現行台電公司 IT 應用現狀之解析，主要訪談對象為資訊人員，每次訪談的時間為二至三小時，並以系統說明文件和實際系統操作為輔助，以利瞭解台電公司售電業務及客戶服務相關系統的現況。並透過反向工程之技術，更實際瞭解系統資料庫的架構和問題，並了解現行系統的運行方式和架構。最後，將資料庫反向工程之結果以資料模型呈現，其為現行系統的資料模型。前兩步驟我們得到了業務流程導向的理想系統資料模型與現行系統的實際資料模型，針對兩者進行比較兩者間的差異性從事 GAP 分析，分別從企業流程、資料庫技術、資料庫設計等層面探討問題所在，省思現行系統資料模型設計是否包含企業流程要件、目前所使用的資料庫技術是否符合企業所需、以及系統的資料

庫設計尚須精進之處，然後建立售電業務及客戶服務相關系統整合的系統架構。

另外，本研究將提出三種未來系統建置的可行方案，並進行採行方案比較，比較不同可行方案的考慮因素與如何與台電公司環境最佳契合。經過會議的討論選用方案後，針對所選用方案，進行現行台電公司 IT 系統轉換到新系統之設計。最後提出新系統建置之 RFP，以期能為後續開發新系統建立起好的基礎。

三、專案步驟

本研究案之工作項目如圖 1、圖 2。工作上能否有效達成目標，在執行過程中，絕對需要和台電公司相關主管人員，以及今後售電業務及客戶服務整合系統主要之使用群(內部與外部使用群)有密切的接觸、溝通與合作，才能經由實地查訪台電公司相關資訊系統的使用者，確實瞭解資訊應用現況，並確切掌握未來的資訊需求。在這方面的工作，本研究團隊以如下步驟與方法完成現況與未來資訊需求之調查工作。

- (一) 流程分析-所謂流程分析，其本身可以被當成是一種目的，用以達到規範有關成本和週期時間的節省計劃、流程本質的改善或其他改善績效的努力。本研究團隊以流程分析之細部流程作業方法，對台電公司作業流程加以深入了解，以及詳實探討如何改善以有助於台電公司未來得以順利完成資訊化工作。
- (二) 決策分析-分析台電公司業務處在作業流程中之決策點，及在各決策點可以幫助決策之資訊與表達方式。
- (三) 資源規劃分析-分析在售電業務及客戶服務流程中所涉及之資源，是否需要建立數量化之規劃模式，及是否可以幫助資源之有效運用。
- (四) 工作流分析-分析業務處在關鍵業務流程上，是否可以透過工作流來加速業務之自動化、追蹤與稽催。

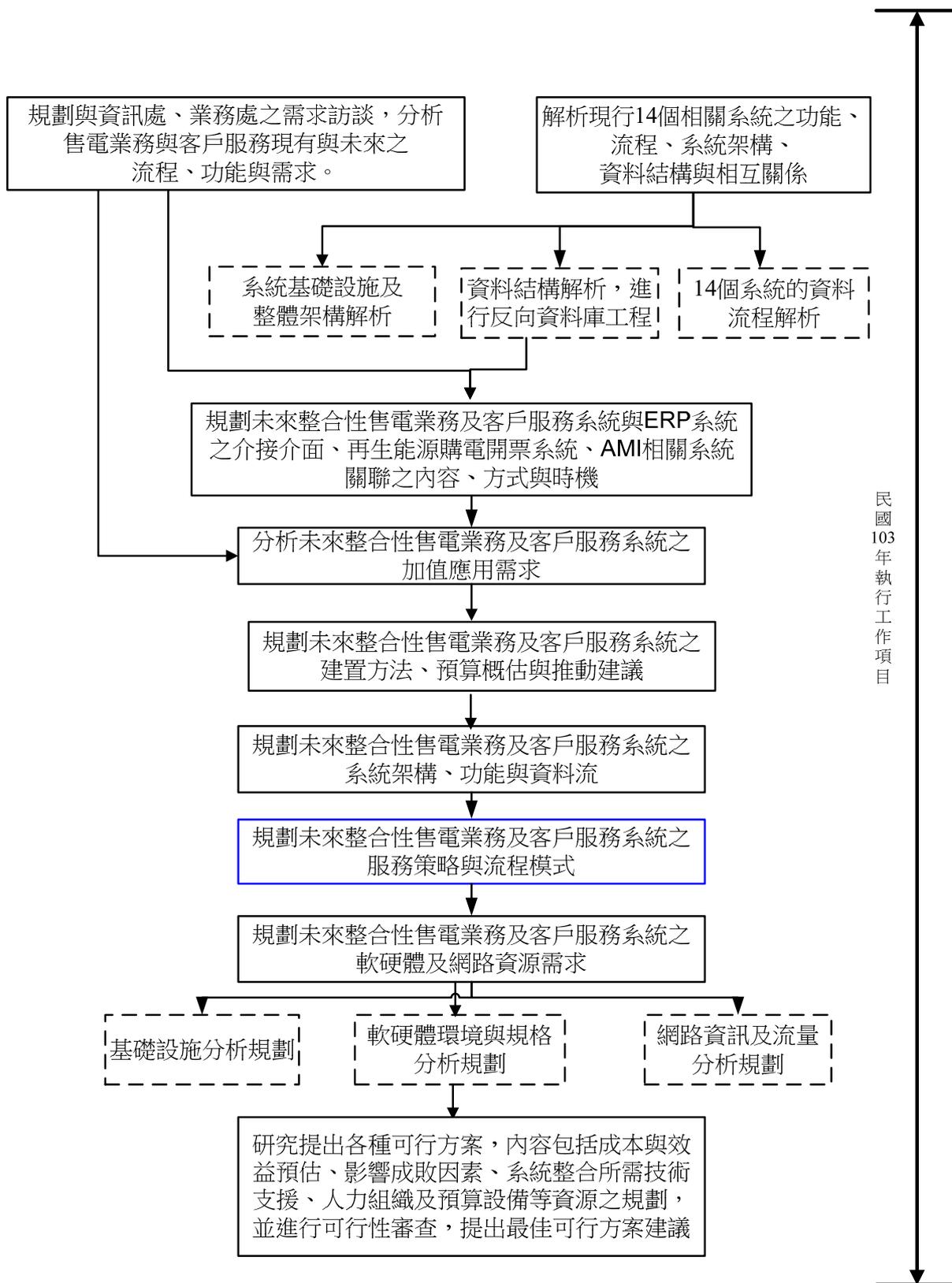


圖 1 計畫進行步驟(一)

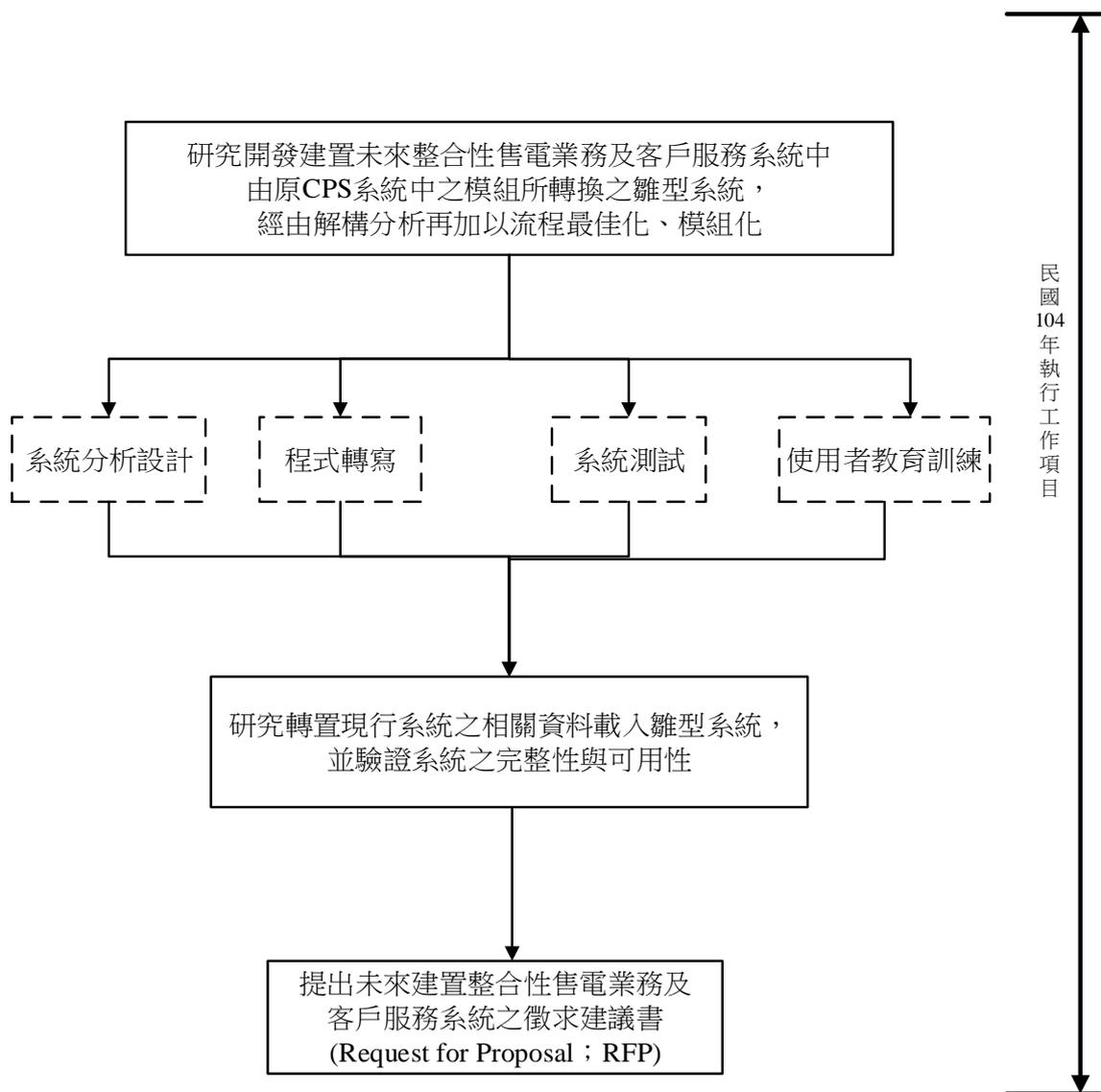


圖 2 計畫進行步驟(二)

表 1 流程訪談採用之方法及技術與工具

項目	方法、技術	應用工具	目的
流程分析	作業基礎分析	Visio	確實掌握業務流程
業務規則分析	資料模型	Power-Designer	確實掌握業務規則
作業分類	ASME 方法(American Society of Mechanical Engineers)	Excel	評估作業的增值性能
工作流設計	工作流設計	Visio	設計工作流

(五) 績效分析-針對流程分析中之控制點,針對人員、工作,以及資料輸出入與應用方式等進行績效分析。

(六) 最佳化設計-為了要成功地完成「整合性售電

業務及客戶服務系統」,本研究案之分析小組首先必須瞭解整個研究案的業務與資訊領域,定義出業務、帳務、內稽內控、管理決策與民眾接觸等現行做法與問題,依據現

行業務，建立出 As-Is 模型。在設計階段，依據對未來之業務、帳務、內稽內控、管理決策與民眾接觸等需求與新的願景，將分散在各區處的流程依自然的業務流程整合成整體性之流程，建立出 To-Be 模型；這裡面包含了成本效益分析。

四、流程分析工具

表 1 說明本專案所採用之方法及技術與工具。與用戶訪談後所產製之 Visio 與 Power-Designer 檔案將針對原始資料轉成 Office 說明文件供台電公司運用。

五、系統分析工具

(一) 資料模型探討

企業資訊系統之資料庫存放組織重要信息，當資料量愈龐大，資料庫儲存的複雜性愈高，而資料模型(Data Model)便是用來描述資料庫中資料的儲存結構，將資料儲存細節模式化以圖示表達。本研究案以實體關係模型作為本研究案資料模型的建置方式。

實體關係模型 (Entity-Relationship model: ER model)的高階模型化概念普遍應用於資料庫應用程式的設計，且許多資料庫設計工具亦是運用此概念，如：Microsoft Access 等。其主要包含實體(Entity)、屬性(Attribute)和關係(Relationship)三個基本元素，實體代表真實世界的一個物件或觀念；屬性則進一步描述實體的重要特性；關係是表示兩個或兩個以上實體的關係^[3]。

(二) 現行系統反向工程

1. 工作內容

了解現行資訊系統的功能、資料與用戶介面。因台電公司現行系統係於不同的軟體技術與時程下進行開發，各系統採用不同的技術平台與工具，系統間雖有著密不可分的關連，但其中隱含諸

多的資料交換。更因各系統間作業時序的不同，致使系統內部存在有資料一致性、即時性與完整性的潛在差異。因此，需要完整了解現行系統間之開發技術差異、作業流程、用戶介面與資料流程，以清楚掌握未來系統整合與建置之各項挑戰^[4]。

因需解析的系統眾多且架構、型態不一，尤其以大型主機的系統最具挑戰性，因此以較具代表性的系統作業功能略敘，以做日後解析的基礎：

2. 工作步驟

- (1) 進行應用軟體解析工程：包括現行系統的用戶界面、功能、流程、系統架構、資料結構、相互關係。
- (2) 進行報表分析與維度設計。
- (3) 硬體應用現狀分析與資安管控機制。
- (4) 彙整售電業務及客戶服務的流程、功能等既有及新增之資訊需求。
- (5) 存在的問題研討。

肆、研究成果

依主要工作項目將研究執行成果簡述如下：

一、業務探索

訪談業務處、資訊處、客服中心及幾個代表區處的業務及系統需求，共同研討用戶申辦、設計、施工、計費開票、收費等現行作業流程、現行系統之支援情況以及不足之處，共同研擬出未來最適化之作業流程、功能與需求。資訊系統與業務單位訪談的日期與主要受訪人員整理如表 2 所示。

二、系統解析

解析現行 12 個售電及客戶服務相關系統之系統架構、軟硬體環境、作業功能及系統間之關聯性。解析系統的軟硬體環境詳如表 2。

表 2 系統及業務單位訪談之日期與主要受訪人員

資訊系統	訪談日期	主要受訪單位/人員
CIS：用戶服務資訊系統	103年07月21日(9:00am)	資訊處-楊立成
CPS：營業櫃檯作業電腦化系統	103年07月10日(4:00pm) 103年07月15日(2:00pm)	業務處-何君怡 業務處資訊組-柯淑瑛
CCS：客服中心系統	103年07月10日(2:00pm)	北部客服中心-李育銘
NAS：網路申辦服務系統	103年07月08日(2:00pm)	資訊處-許哲偉 業務處-何君怡
NBS：新電費核算開業系統	103年07月31日(3:00pm) 103年08月27日(1:30pm)	資訊處-徐振議 資訊處-李宏全
BAS：電費帳務管理系統	103年06月25日(3:30pm)	資訊處-許哲偉 業務處-陳虹吟
EBPPS：電子帳單服務系統	103年07月30日(9:00am)	資訊處-翁偉誠
IPS：帳單列印控制系統	103年07月30日(9:00am)	資訊處-陳俞安
資訊系統	訪談日期	主要受訪單位/人員
REMS：再生能源資訊管理系統	103年07月02日(9:30am)	業務處-陳虹吟 業務處資訊組-楊元琪
RNBS：再生能源購電開票系統	103年07月03日(2:00pm)	資訊處-陳俞安 業務處-陳虹吟
OMIS：停限電管理資訊系統	103年07月31日(11:00am)	資訊處-周錦慶
HCS：掌上型電腦抄錶系統	103年07月31日(9:00am)	資訊處-楊立成
ERP系統	103年07月21日(2:00pm)	資訊處-洪振展
AMI自動讀表系統	103年08月01日(2:00pm) 103年08月05日(10:20am)	資訊處-李信彰 台中區處-賴杰宏
NDCIS新配電工程系統	104年01月08日(2:00pm)	配電處-荊玫、柯淑瑛 業務處-仇忠銘 三商公司
現場業務作業	訪談日期	主要受訪單位/人員
營業櫃檯申辦作業(北北區處)	103年08月14日(9:30am)	劉凱文、朱誠輝、楊佩珊 楊修齊、鄭宜婷
抄表(表務)作業(北西區處)	103年08月18日(10:00am)	鄭元凱、陳維淡、謝讚智
客戶服務中心作業(北部客服)	103年08月20日(9:30am)	謝敬堅、李育銘、吳詩雯
收費帳務作業(北西區處)	103年08月18日(1:30pm)	彭美珠、鍾祥柳、劉承倫
營業櫃檯申辦+收費帳務作業(台中區處)	103年08月28日(9:30am)	高凱南、張孟惠、白慶德 王啟東
櫃檯受理後相關部門作業(北西區處)	104年01月13日(1:30pm)	林興旺、陳松鴻、許金龍 林英智、曾慶芬、鍾主任

三、用戶服務目標與策略

(一) 成果

台電公司於民國 35 年成立之初，即是以提供可靠電力及滿足用戶需求為己任，六十幾年來，雖然經濟結構與社會型態改變，且面臨自由化與民營化的挑戰，但所

表 3 現行系統之軟硬體環境

系統	硬體	伺服器軟體	資料庫
BAS	IBM Mainframe	Mainframe 作業系統：Z/OS	IBM SAM/VSAM File
REMS	Windows XP/2003/2008 Professional(含)以上或相容之作業系統	IIS 5 (含) 以上之網頁伺服器程式	Microsoft SQL Server2005(含)以上
RNBS	IBM AIX	WebLogic 9.2	Oracle 10g
NAS	Windows Server 2003	IS 6.0/asp	Microsoft SQL Server2000
CCS	Windows Server 2003	IIS	IBM p570+Oracle 11g
CIS	IBM Mainframe	Mainframe 作業系統：Z/OS	IBM SAM/VSAM File
EBPPS 服務系統管理系統	Windows Server 2003 IBM AIX 5.3	WebLogic 9.2 WebLogic 9.2	Oracle 10g
系統	硬體	伺服器軟體	資料庫
IPS	IBM System X3500 M2	IPS Server PDF Server	
OMIS	IBM Mainframe	Mainframe 作業系統：Z/OS	IBM SAM/VSAM File
NBS	IBM AIX 5L	WebLogic SPL CC&B	Oracle 10g
HCS	PC	Windows 7	Visual Foxpro 6.0
CPS	(詳見下表)		
設備名稱	廠牌、型號		
資料庫伺服器作業系統	SUN Solaris 10 Operating System		
資料庫管理系統	Sybase Adaptive Server Enterpriser 12.5 (Sybase ASE 12.5)		
個人電腦作業系統與傳輸工作站	Microsoft Windows 2000/XP 各版本		
IBM TN3270 連線模擬軟體	精誠 SYS Client/ TN3270 模擬連線軟體 2.07d 版		
異地資料備份作業軟體 (Symantec Veritas)	Storage Foundation Standard Solaris v5.0		
	NetBackup Client UNIX Protect Server 5.1		
	Volume Replicator Option Solaris v5.0		

扮演的企業角色及肩負的任務並沒有太大的改變，而隨著電力市場逐步開放，亦將面臨強大的競爭壓力，為留住既有顧客並創造新顧客，台電將積極轉型為顧客導向的服務型公司。目前台電公司在用戶服務方面的努力及取得之初步成果有如下幾點：

1. 快速處理陳情案件，維護顧客權益
2. 顧客滿意度(調查)
3. 持續研究改善，減少用戶不便
4. 用戶資料保密
5. 櫃檯服務一元化
6. 網路申請及 E-mail 通知服務
7. 多元化收費服務
8. 用戶服務專線 1911，全年無休
9. 專人服務
10. 用戶意見信箱

然在如下幾點仍有待加強與改善的空間：

1. 售電及用戶服務業務支援系統
系統間資料交換頻繁，容易造成資料遺漏、時間落差、整合度不夠完善。
2. AMI
高壓/特高壓用戶已全數裝置完畢，與AMI系統整合之應用需求衍生而出。
3. 需求端管理
需求端管理方案老舊，104年已重新規劃、整併，推出新的減少用電措施方案；對售電業務系統造成整合與增修衝擊。
4. 發展雲端服務策略(科技發展趨勢)
雲端運算是一種大規模分散式運算模式；透過雲端運算可以形成一個抽象的、虛擬的、可動態擴展的資源池，該資源池可以透過 Internet 向用戶按照其需求提供計算能力、存儲能力、開發平台和軟體等服務。
5. 行動化服務策略(科技發展趨勢)
行動應用在電力公司中有著廣泛的應用範圍，比如可落實在公司的電力作業、日常辦公、業務服務、商業智慧中，行動應用可以提升工作效率、精益管理水準與客戶滿意度。

(二) 服務目標

1. 服務目標
售電服務目標(豐富服務方式、拓展服務領域、最佳化服務流程、精進服務體系、

提高服務品質、兌現服務承諾)

2. 管理目標
 - (1) 精進用戶服務標準化體系
 - (2) 建立有效的管理平台，貫徹執行品質標準，強化工作品質監督體系，推進管理模式改革
 - (3) 加強營業管理，加快營配整合
3. 服務現代化目標
 - (1) 實現用戶服務資訊垂直貫通、水平整合、高度共用
 - (2) 促進用戶服務管理的標準化、精細化，做到用戶服務高效率便捷
 - (3) 持續改善精進
4. 用戶服務團隊建置
 - (1) 配置優秀服務團隊，建立選拔人才及技術帶領人機制
 - (2) 職位及技能教育訓練，提高人員素質

(三) 服務策略

1. 售電與用戶服務系統與業務流程相結合
系統乃支援業務流程，系統屈就業務流程，或業務流程進行大的變革，應該做到兩者間的平衡
2. 業務運行與分析同時並進
從日常交易型業務資訊，萃取進行分析，透過資料倉儲之建置，進行更為深入之用戶及行為分析
3. 資訊化結合管理創新
非僅技術課題須面對，管理問題亦不容忽視
4. 資訊化配合業務部門組織結構創新
資訊系統如何能夠較及時、彈性地因應組織結構改變

四、現行業務流程解析

本研究在現行業務流程的解析與描述部分採用 IDEF3 流程模型圖，以圖例示計費開票模型範例。

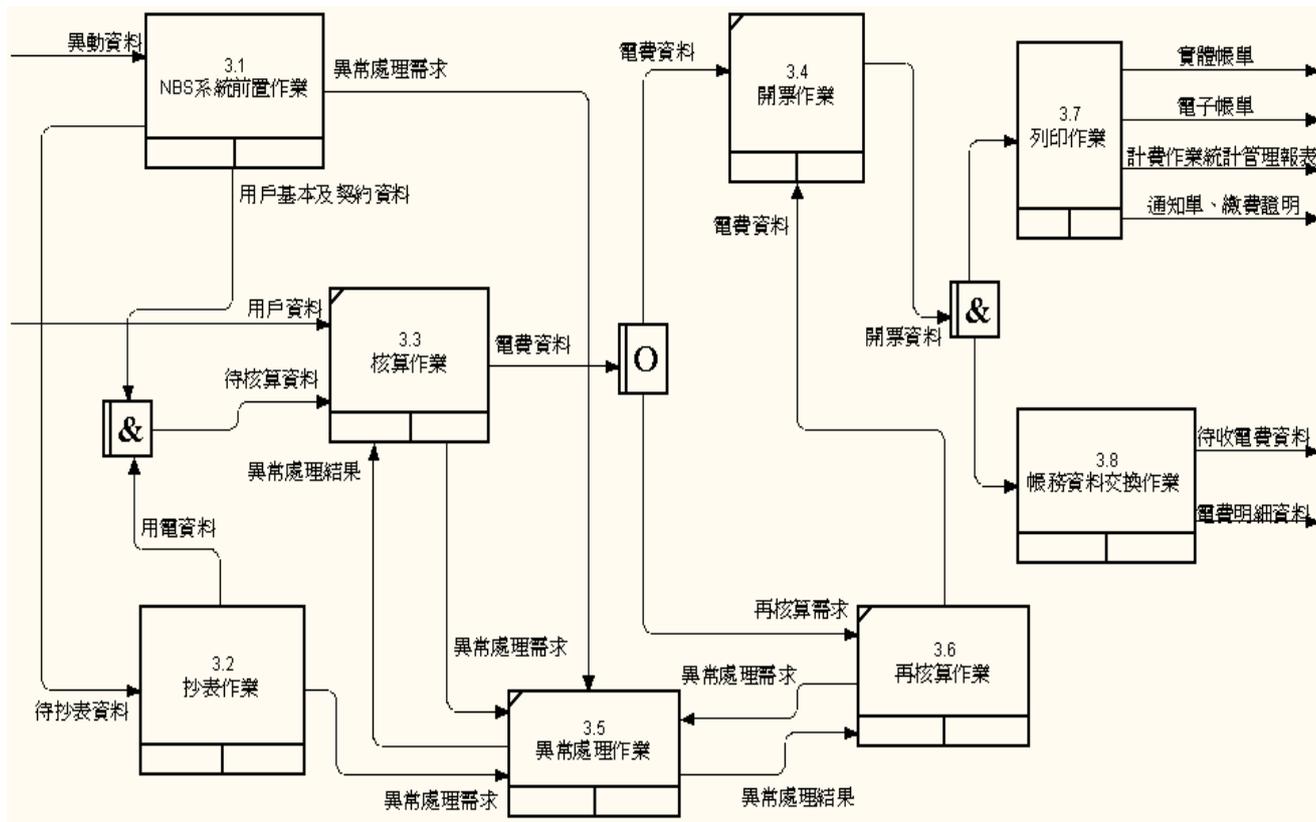


圖 3 現行計費開票作業流程

五、最適化業務流程

用戶申辦服務作業之最適化業務流程主要從用戶申請案件提出申請之案件生命週期觀點出發，從受理、設計、查定、繳費、施工、報竣、檢驗、至核算歸檔，需要建立完整的流程管控機制。另外在定期的抄表作業、計費作業、帳務收款作業管理，以及催、停、拆、訴訟以及債權管理(呆帳管理)上，本研究皆提出了與現行作業不同之最適化流程建議。以無紙化之用戶申辦作業流程為範例圖示如圖 4、圖 5。

六、受理案件辦理狀態管控

未來整合性用戶服務系統(ICIS)之櫃檯受理子系統在案件申辦進度狀態的管控上十分重要。不僅是用戶查詢案件進度所需，亦是控管系統作業功能的關鍵。

以下說明未來 ICIS 櫃檯受理子系統在申辦案件整體進度的狀態變化，多項狀態必須與

NDCIS 緊密結合以達到整體流程的順暢性。

未來系統除記錄案件狀態變更的日期時間外，並同時記錄使用者在系統所提供之收件、送件功能進行操作時之日期時間，以免系統間自動交換之狀態變更時間與人為作業時間間之爭議(如因 NDCIS 系統改變案件狀態，到人為因紙本傳遞或其他因素所造成之收、送件間的時間落差)。

圖 6、圖 7、圖 8 以目前紙本登記單流程為例，說明案件狀態的改變(含退件情境)。

七、未來整合性系統功能架構

建議未來『售電業務及客戶服務整合系統』之整體系統架構如圖 9『售電業務及客戶服務整合系統』系統架構圖一，以及以及圖 10『售電業務及客戶服務整合系統』系統架構圖二。可歸納分為 1.ICIS—整合性用戶服務系統、2.計費管理系統、3.帳務管理系統、4. 管理控制、績效評估與決策分析系統，以及 5.其他共用模組。

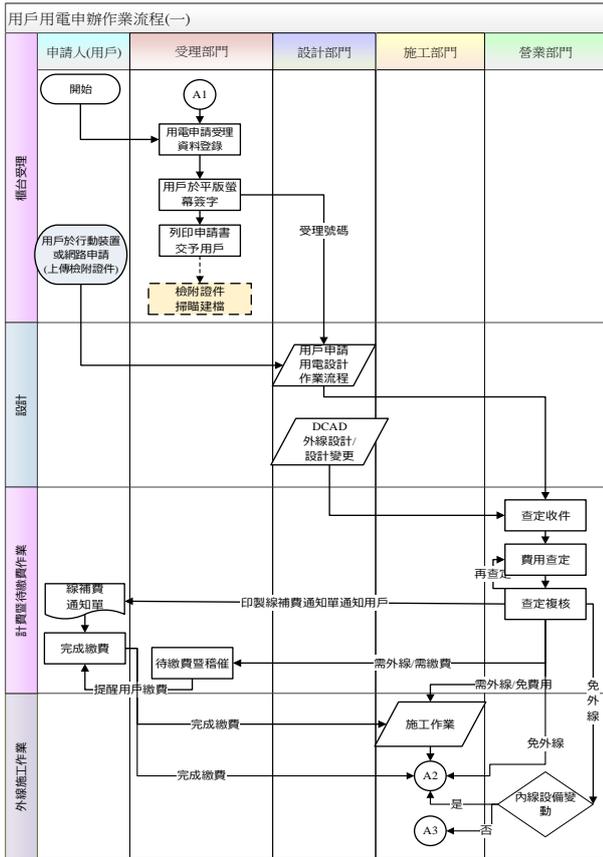


圖 4 用戶申辦作業流程一(登記單無紙化)

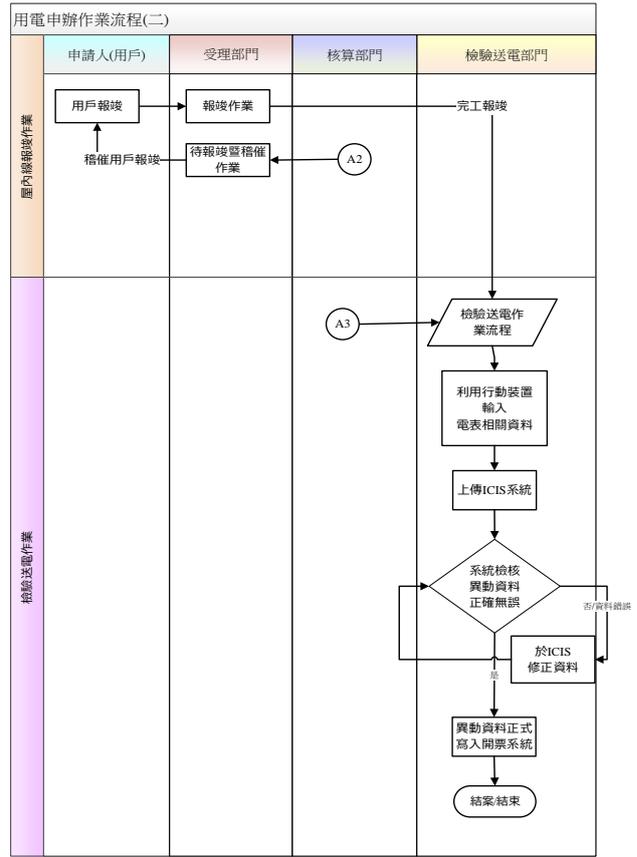


圖 5 用戶申辦作業流程二(登記單無紙化)

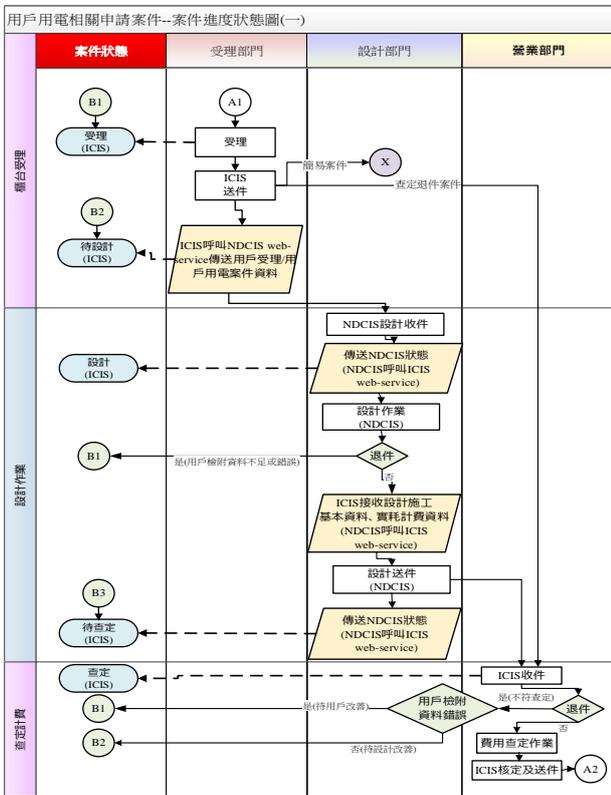


圖 6 用電相關申請案件—案件進度狀態圖(一)

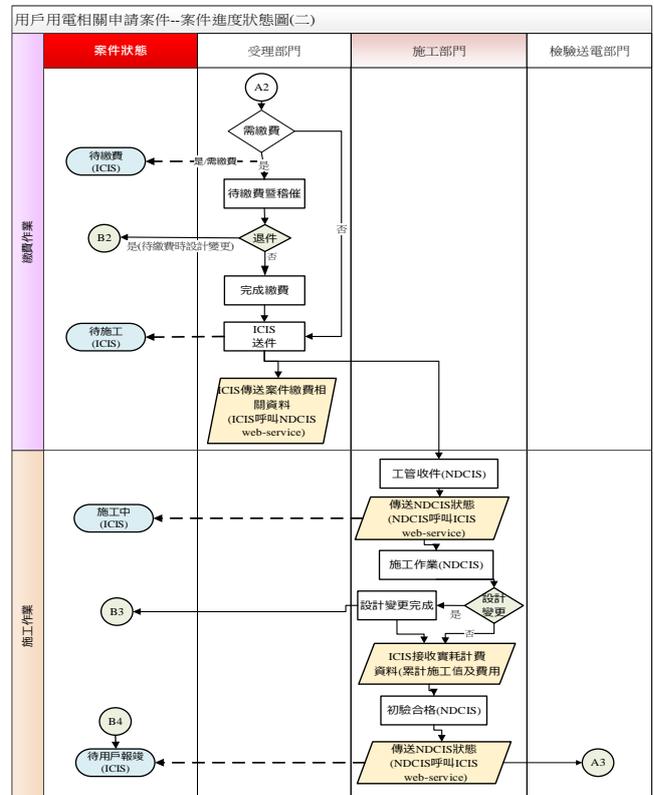


圖 7 用電相關申請案件—案件進度狀態圖(二)

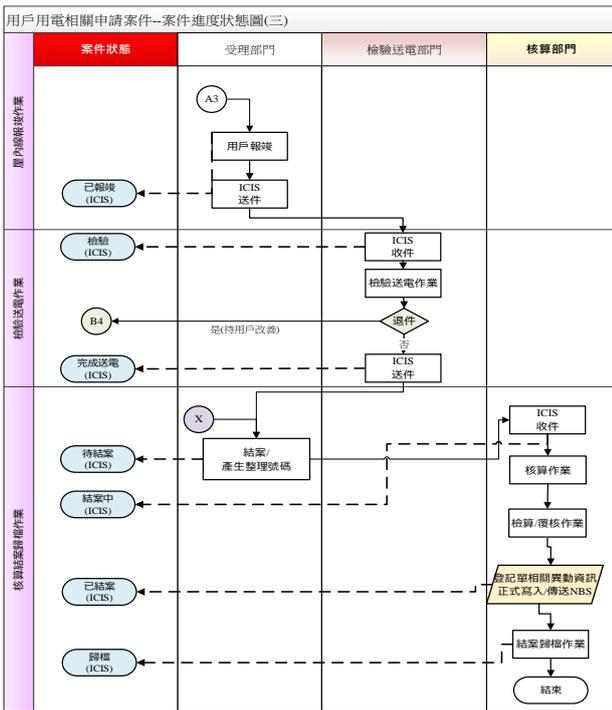


圖 8 用電相關申請案件—案件進度狀態圖(三)

各系統下涵蓋的模組/子系統如下：

(一) ICIS—整合性用戶服務系統

1. 網路服務模組
2. 案件受理模組
3. 案件辦理模組
4. 減少用電管理模組

5. 停限電管理模組

6. 整合性綜合查詢及報表模組

(二) 計費管理系統

1. 手持抄表管理子系統
2. 電費核算開票子系統
3. 電表抽驗子系統

(三) 帳務管理系統

1. 電費帳務管理子系統
2. 催收管理子系統

(四) 管理控制、績效評估與決策分析系統

(五) 其他共用模組

1. 線上申請案件接收管理模組
2. AMI 用電資料整合及接收管理模組
3. 查詢統計管理模組
4. 附加檔案管理模組
5. 資料交換介接管理模組
6. 登入管理模組
7. 系統管理模組

IICIS 整合性用戶服務系統之功能架構圖如圖 11、計費管理系統之功能架構圖如圖 12、帳務管理系統之功能架構圖如圖 13。



圖 9 『售電業務及客戶服務整合系統』系統架構圖一



圖 10 『售電業務及客戶服務整合系統』系統架構圖二

ICIS—整合性用戶服務系統功能

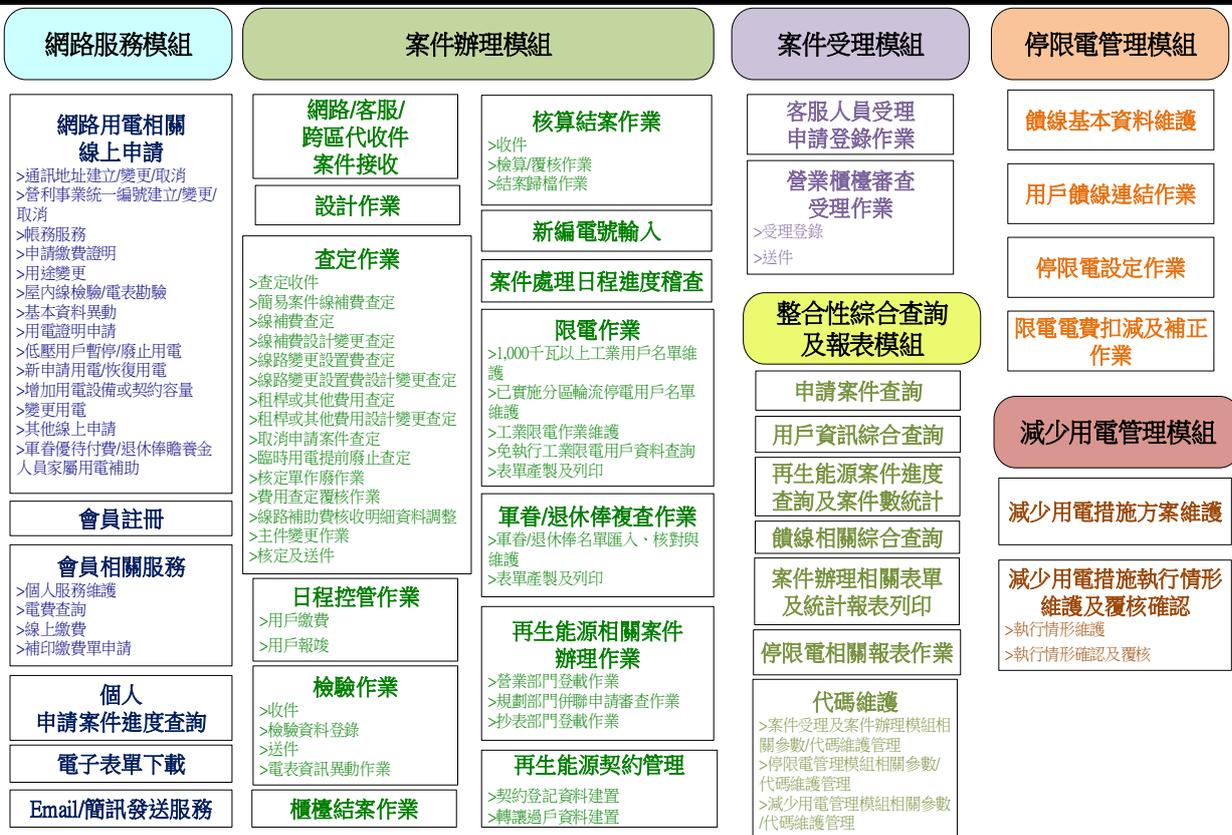


圖 11 ICIS 整合性用戶服務系統功能架構圖

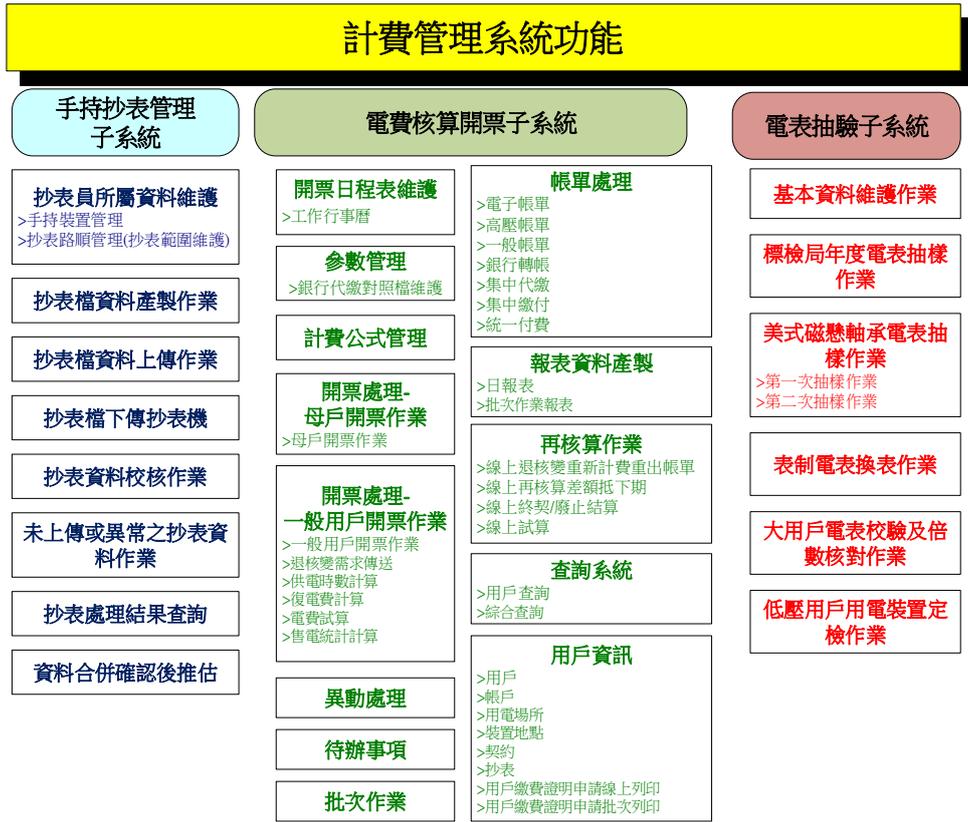


圖 12 計費管理系統功能圖



圖 13 帳務管理系統功能架構圖

八、整合性系統硬體時體架構設計

本研究提出未來售電業務及客戶服務整合系統硬體架構以集中式配置與三中心式配置兩種主架構進行之規劃與設計，分別說明 1.本研究依現行系統及業務資料量所推估的硬體資源需求規劃、2.Oracle 所提供的以 CC&B 套裝軟體為

核心開發的硬體資源需求之估算，以及 3.SAP 所提供的以 SAP-ISU 套裝軟體為核心開發的之硬體資源需求估算之 3 種硬體資源估算結果，供台電公司評估參考。

以下 2 圖為規畫之集中佈署以及資料中心為主佈署之網路架構示意圖。

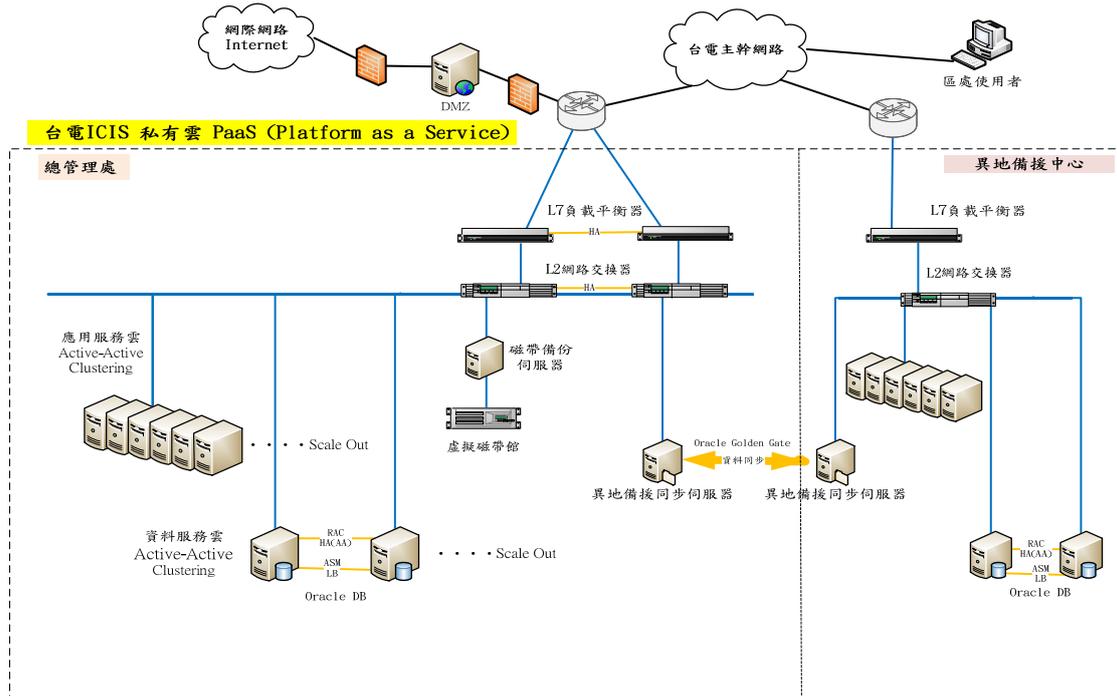


圖 14 集中佈署網路架構示意圖

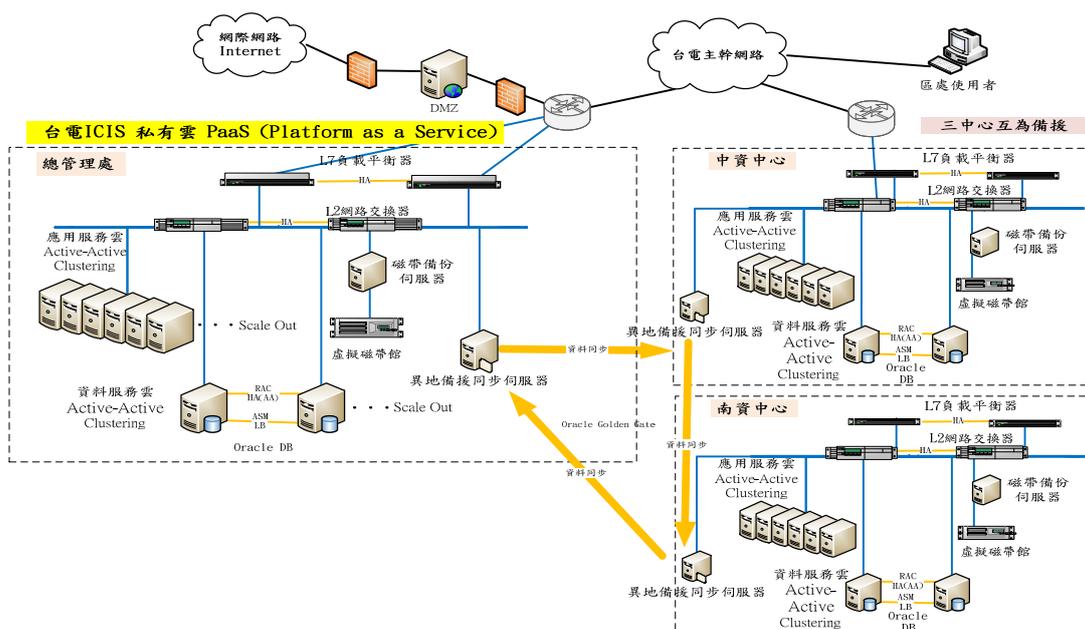


圖 15 資料中心為主佈署網路架構示意圖

九、應用系統建置方案與時程規劃

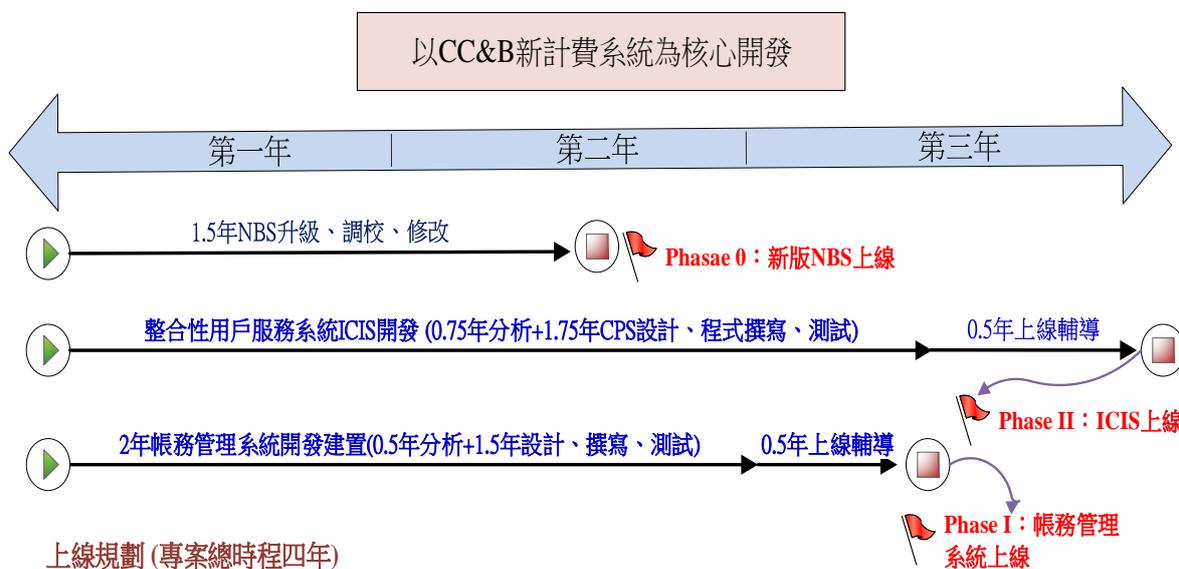
本研究在未來售電業務及客戶服務相關系統重建方案的初步規劃。本研究提出 3 個進行的方案為時程與預算說明的分類，分別為 1.以 CC&B 套裝軟體為核心開發、2.以 SAP-ISU 套裝軟體為核心開發，以及 3.專案型開發(全面客製化開發)。

實際的選項可能有更多種，如現行 CC&B 之 NBS 進行升級調校、櫃檯申辦及網路服務採客製化開發、帳務管理採套裝或客製化開發等等。各種組合需視經費、時程與技術可行性再行選定。本研究針對組合方案亦進行了初步的篩選建議(詳見結論與建議)。

(一)方案 A:以 CC&B 新電費核算開票系統(NBS)為核心開發

此方案建議 ICIS：整合性用戶服務系統以及帳務管理系統的開發與 NBS 的升級調校同步進行，1.5 年後，升級後之新版 NBS(含 RNBS 功能)上線，此階段歸為 phase 0。第二年底，電費帳務管理系統(原 BAS+催收管理)完成開發，經 0.5 年的上線輔導後，正式上線，此階段定義為 phase I。此時 ICIS 整合用戶服務系統完成開發，經過 0.5 年的上線輔導後，正式全面上線，此階段定義為 phase II。

此方案的總專案時程規劃為 3 年。各階段時程詳如圖 16 方案 A 總專案時程。圖 17 為方案 A 之 phase I 完成後與外部系統間的系統關聯圖，圖 18 則為方案 A 之 phase II 完成後的系統關聯圖(phase 0 與現行 NBS 資料交換關聯圖一樣，沒有改變)。



上線規劃 (專案總時程四年)

- 第1.5年→新版NBS上線 (Phase 0)
- 第2.5年→新帳務管理系統上線 (Phase I)
- 第3年→ICIS系統上線(全面新用戶服務及計費、帳務管理系統--Phase II)

系統範圍

- ICIS系統範圍包括原CPS、CIS、NAS、EBPPS、REMS、OMIS、HCS、ECMS功能
- 新版NBS系統包括原NBS以及RNBS功能
- 帳務管理系統包括原BAS功能
- 其他新增系統範圍詳見新系統功能說明

圖 16 方案 A 總專案時程

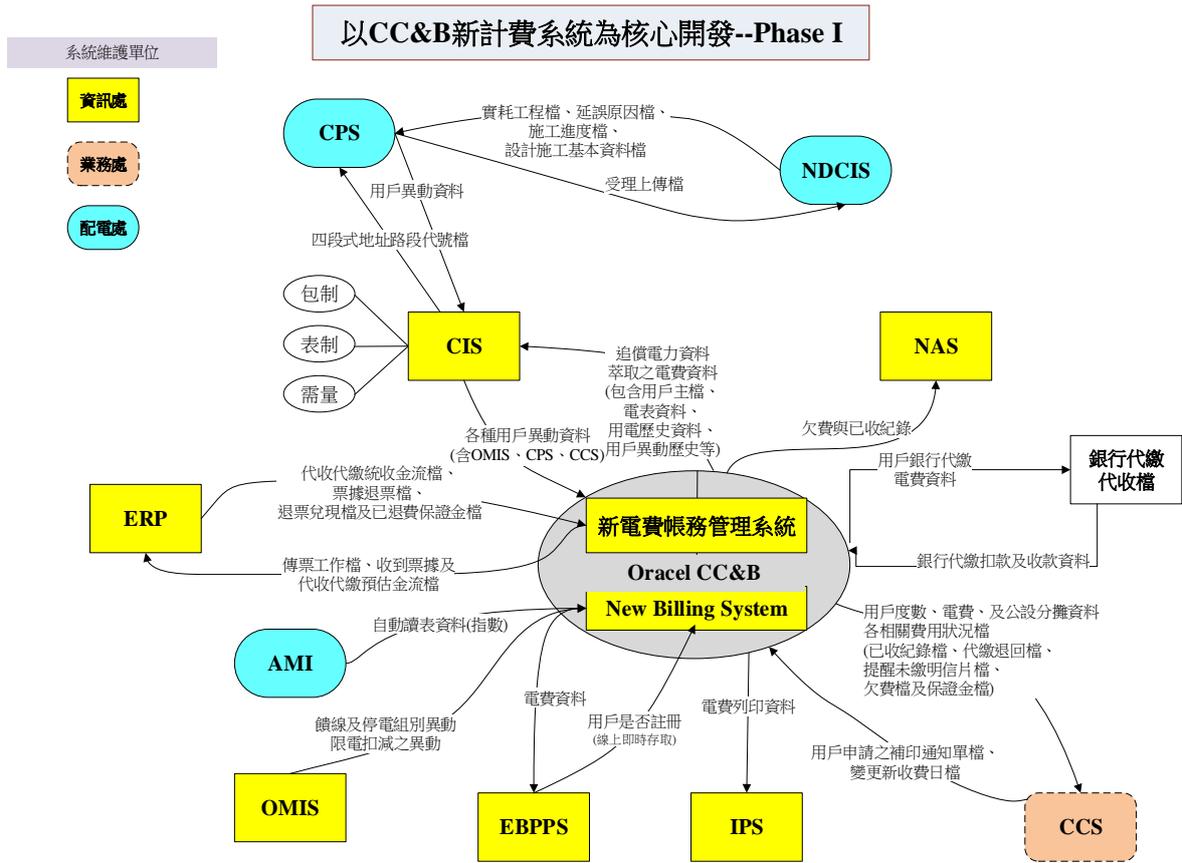


圖 17 方案 A—phase I 完成後之系統關聯圖

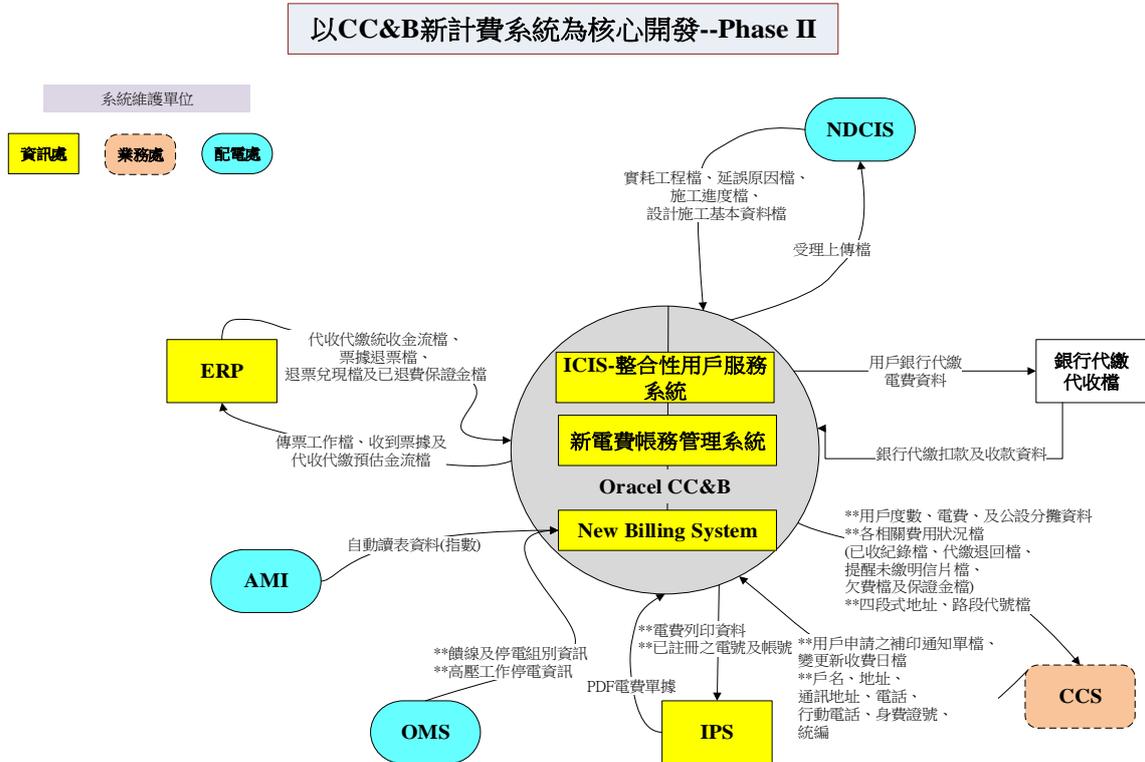


圖 18 方案 A—phase II 完成後之系統關聯圖

(二) 方案 B：以 SAP 之 ISU 套裝為核心開發

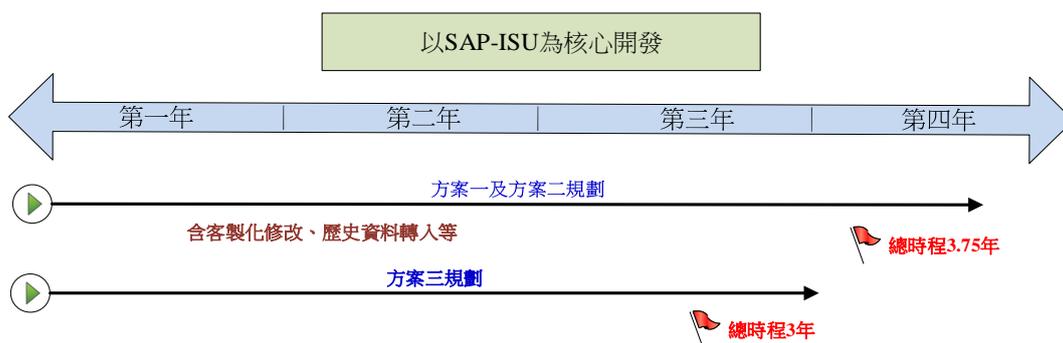
此方案之建置及導入時程規劃經 SAP 與 Accenture 顧問公司評估後，依階段性導入之單位的不同，提出了三個時程建議方案，如圖 19 方案 B 總專案時程。

(三) 方案 C：專案型全客製化開發建置

此方案建議整合性用戶服務系統與電費核算開票系統同時啟動開發，3 年後兩個系統同時上線。此為本方案的 phase I 成

果。3 年期間亦含資料的整理與轉置。第 4 年起開始電費帳務管理系統的開發，時程亦為 2 年，之後規劃 0.5 年的整合測試、輔導上線，第 5.5 年上線，此階段為此方案的 phase II。

此方案的總專案時程規劃亦同方案 B，為期 5.5 年。各階段時程詳如圖 20 方案 C 總專案時程。



上線規劃 (根據分階段導入區處規劃之不同，分為方案一、方案二及方案三)

- A案：方案一及方案二→第3.75年(所有系統同步上線)
- B案：方案三→第3年(所有系統同步上線)

系統範圍

- ICIS系統範圍包括原CPS、CIS、NAS、EBPPS、REMS、OMIS、HCS、ECMS功能
- 計費管理包括原NBS、RNBS功能
- 帳務管理系統包括原BAS功能
- 其他新增系統範圍詳見新系統功能說明

圖 19 方案 B 總專案時程



上線規劃 (專案總時程五年半)

- 第3年→新版NBS+ICIS:整合性用戶服務系統(新櫃檯申辦系統)上線
- 第5.5年→新BAS上線(全面新用戶服務及計費、帳務管理系統)

系統範圍

- ICIS系統範圍包括原CPS、CIS、NAS、EBPPS、REMS、OMIS、HCS、ECMS功能
- 計費管理包括原NBS、RNBS功能
- 帳務管理系統包括原BAS功能
- 其他新增系統範圍詳見新系統功能說明

圖 20 方案 C 總專案時程

十、專案風險

隨著軟體產品規模增大，為保證 IT 專案按照預定的成本、進度和品質順利完成，軟體發展企業越來越重視對專案的有效分析和管理的。軟體是純知識產品，其開發進度和品質很難估計和衡量，生產效率也難以預測和保證，加之軟體系統本身的結構和技術複雜性等原因，造成了開發過程中存在許多不確定因素，給專案開發帶來風險，導致專案計畫失敗或不能完全達到預期的目標，因此風險管理是 IT 專案管理的重要內容。

比起傳統的專案如建築專案來說，IT 專案有更高的風險。90 年代，在歐洲透過對 20 多家軟體公司歷時十餘年追蹤調查，發現 IT 投資中 20% 浪費掉了，30~40% 沒有淨利潤，由此可見很多專案都不能成功，那麼人力物力的浪費可想而知了，如果 IT 專案風險哪怕只降低 1%，產生的實際效益也相當可觀。

在專案實施中的各個層次、過程及環節中，存在著很大的不確定性、不穩定性和不可預見性，因此，應該將專案的全部環節納入風險管理計畫中，以確保專案實施中成本、進度、品質的目標。要對資訊系統專案進行合理、有效的風險管理，要制定風險管理計畫，對風險進行預測，然後準確地識別風險，並對其進行定性和定量分析，制定風險的相關應對策略，對風險進行追蹤、監控、管理及處理。

如圖 21 所示，目前研究團隊歸納未來售電業務及客戶服務整合系統風險有以下幾大類及項目。



圖 21 專案風險

十一、營業櫃檯申辦系統雛型

本研究初步完成的雛型系統構想，是以用戶案件申請的申辦流程為主軸，依案件的辦理狀態，設計各業務辦理部門的就源輸入登錄作業。

規劃與設計的前提是與未來 NDCIS 採 web-service 方式彼此交換資料與案件辦理狀態，以避免資料面的時間落差。

目前 NDCIS 尚在開發建置階段，其與現行 CPS 間將採 ftp 方式交換 txt 檔。原則上一方有異動則產生相應的 txt 檔，上傳 ftp 目錄，由另一方自訂排程定期抓取。

與未來 NDCIS 間之資料交換為便於展示以及讓各案件辦理階段之系統功能得以順利進行，故本雛型系統將模擬 NDCIS 設計及施工階段之案件收件及送件動作(即提供畫面讓使用者點選模擬 NDCIS 收送件)。

本雛型系統之最大效益為展示未來取消了 CIS 登記單資料打卡之後，資料如何就源輸入的構想。以選定之實作申辦案例來演示服務中心/服務所從案件受理、設計、查定、繳費、施工、屋內線報竣、檢驗送電，到最後核算歸檔之整體案件办理流程控管，以及各階段需就源輸入之資料為何，讓服務中心/服務所之各部門業務承辦人員更能具體體認未來的改變。並證明承辦過程中，所需資料的完整性，完成核算覆核後，未來資料如何順利無誤的寫入 NBS 相關異動表格。

為了展示未來落實資料在各單位就源輸入之構想(取消最終打卡輸入 CIS 大型主機系統)，本系統選定「高壓電力綜合新(增)設」、「表燈新設」(整批新設)、「線路遷移」、「過戶」為建置項目之申辦案例，進行 CPS 案件受理及 CIS 打卡結合的就源輸入設計，達到在所屬職位點執行業務時，輸入產生的資訊，以落實專業分工，每一個人都只需要完成分內的工作，再透過資訊系統將每一個人的工作成果，整合在系統中共享。圖 22、23 說明本雛型系統實現之系統功能、操作流程以及案件控管程序。

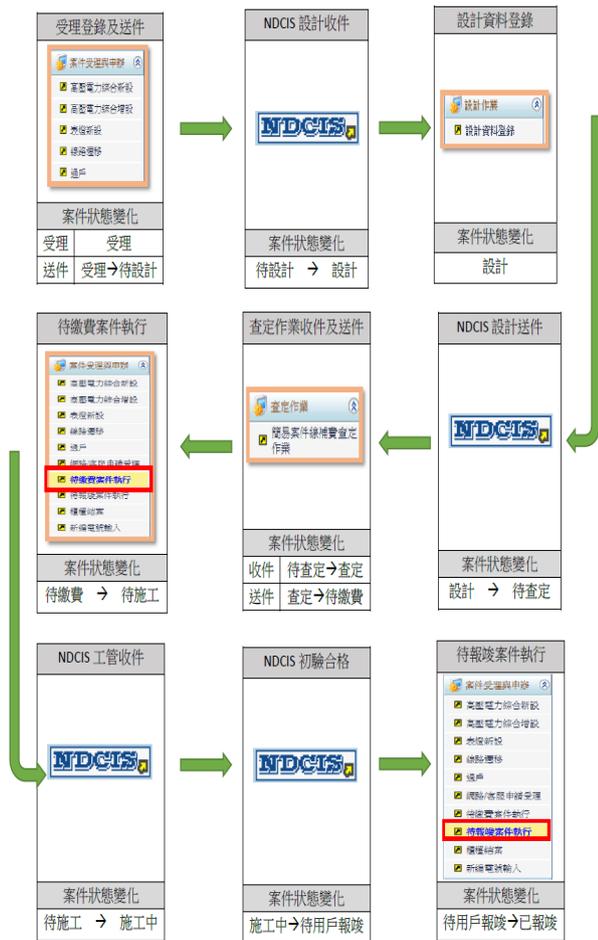


圖 22 雛型系統操作流程(一)



圖 23 雛型系統操作流程(二)

圖 24-26 為雛型系統畫面範例。



圖 24 雛型系統畫面範例(一)

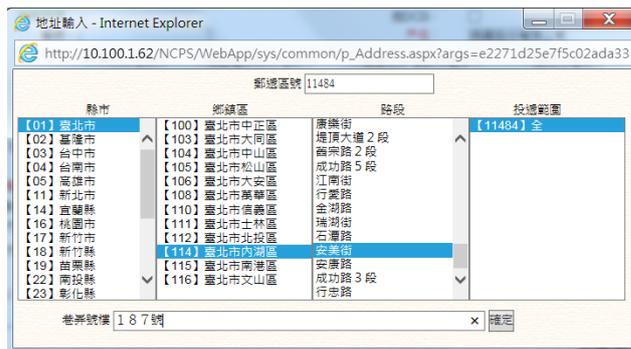


圖 25 雛型系統畫面範例(二)



圖 26 雛型系統畫面範例(三)—模擬 NDCIS 設計送件

十二、CPS 與雛型系統轉檔對照表

本研究針對雛型系統進行了原 CPS 系統資料轉置驗證工作；由配電處資訊組提供北北區處

2013 年經資料遮罩後之 CPS 申請案件資料 7 個表格之轉出檔。本研究案轉入的是雛型系統建置之高壓電力綜合新設(34 件)、高壓電力綜合增設(28 件)、低壓新設(8,794 件)、過戶(22,885 件)及線路遷移(406 件)等 5 類申請案件類型,共 32,147 筆資料。

伍、結論與建議

一、結論

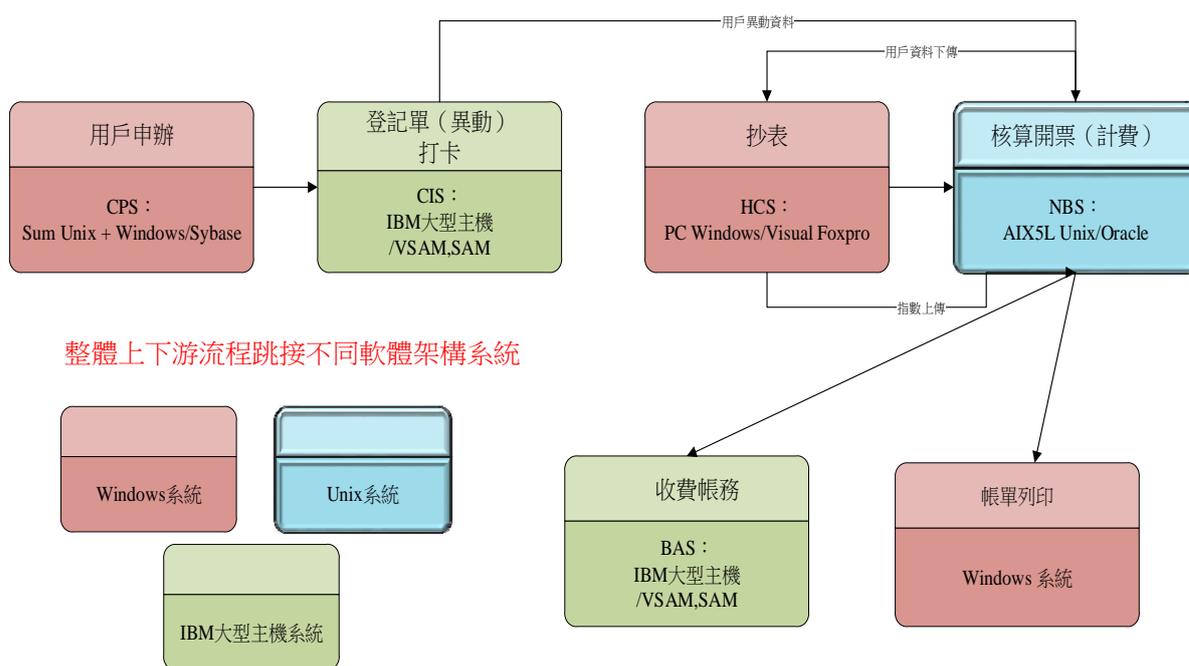
(一) 從不整合到整合

台電公司目前與售電業務及客戶服務相關的軟體系統眾多。從用戶用電申辦上游到日常的抄表、計費開票及電費帳務管理

理,貫穿的皆是異質性系統及異質性資料庫(示意如圖 27);故在資料整合、共享,資訊即時性方面,無法做到有效率的連貫。

與售電業務及客戶服務相關的軟體系統眾多;從用戶用電申辦上游到日常的抄表、計費開票及電費帳務管理,貫穿的皆是異質性系統及異質性資料庫;故在資料整合、共享,資訊即時性方面,無法做到有效率的連貫。圖 28 示意出目前錯綜複雜的系統交換關聯。

未來售電業務及客戶服務相關重新開發建置後,將朝共通平台、同質性資料庫方向設計,如此將做到真正的整合,僅需與外部系統進行資料介接;未來整合性系統的資料關聯示意如圖 29。



現象：

1. 異質性主機、作業系統、資料庫環境
2. 導致大量資料頻繁交換,資料無法整合、共享,作業無法及時

圖 27 現行售電業務與客戶服務流程相關系統平台現象

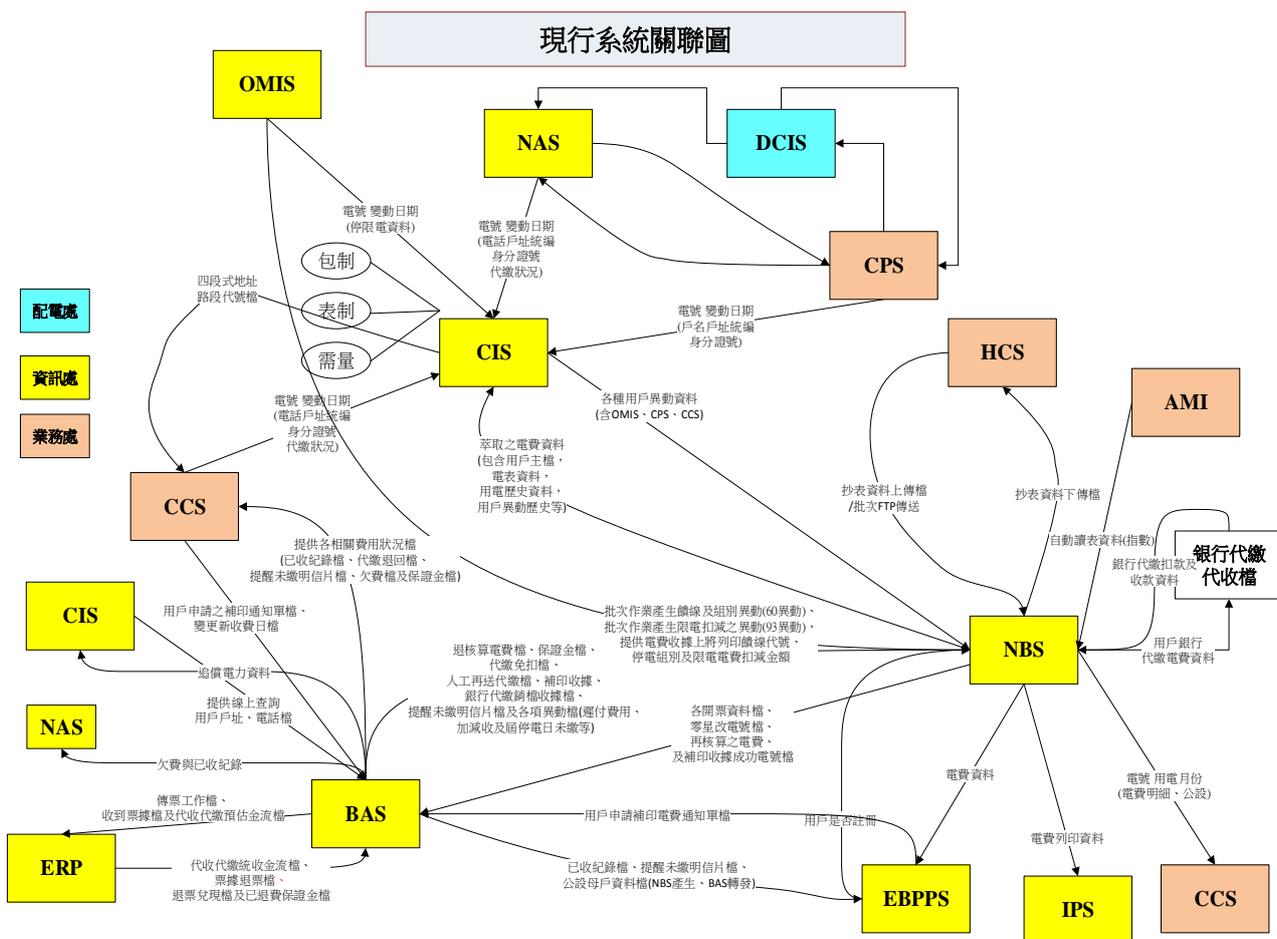


圖 28 錯綜複雜的系統介面—現行主要系統關聯圖

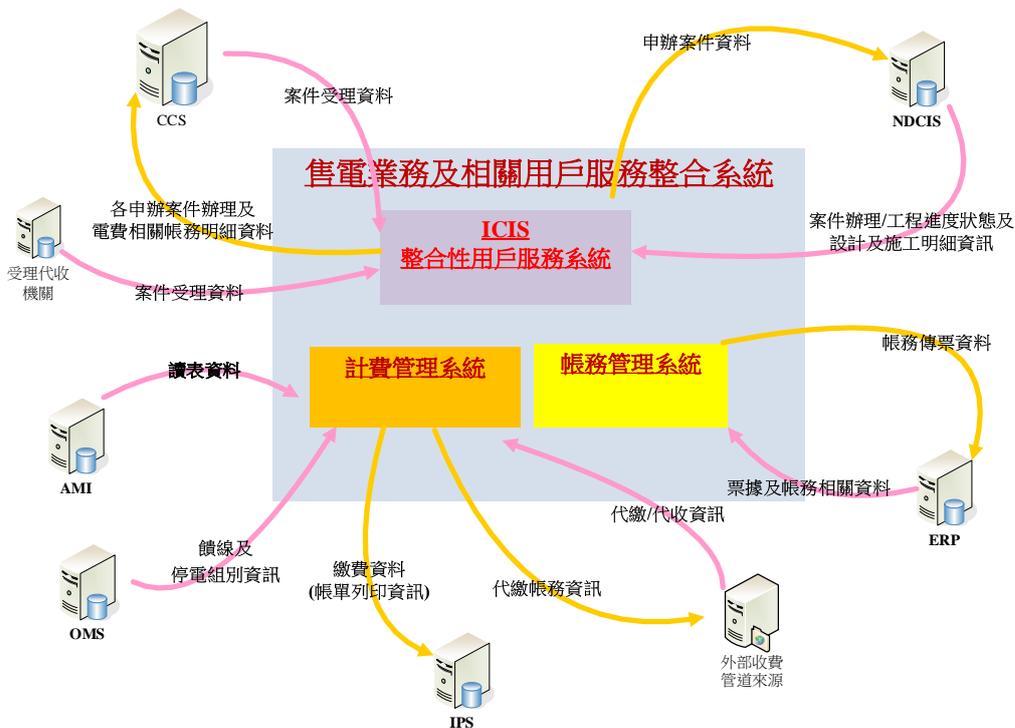


圖 29 未來整合性系統外部關聯圖

(二) 應用系統不建議採用 Open Source 軟體

系統應用軟體(如資料庫管理軟體、應用伺服器軟體、業務流程核心元件-如計費開票引擎等)不建議採用 Open Source 軟體。原因如下：

1. 不保證一定適用
2. 產權問題
3. 主要應用於科學研究,較不易找到適用的商業應用軟體,特別是特殊產業的

4. 缺少市場宣傳,使用者就無法瞭解軟體功能和使用方法

5. 軟體支援與服務較為缺乏

6. 因應後續維運及資安需求,系統開發工具宜採用市面上的主流工具

(三) 套裝或自行委外開發

本研究歸納出套裝軟體與客製化開發相對台電應用的 SWOT 分析比較如表 4。

表 4 套裝與客製化開發之 SWOT 分析

項目	套裝	
優點 S	套裝： <ol style="list-style-type: none"> 1. 產品功能齊全 2. 產品品質高 3. 參考客戶群多(目前皆為國外) 4. 開發時程較短 5. 可跟著全球最佳實務之制度與流程走 	客製化開發： <ol style="list-style-type: none"> 1. 容易因應與支援公司政策變化 2. 使用者使用、操作品質高(介面親和性高) 3. 系統開發建置成本較低 4. 後續維護成本較低；無需負擔產品授權維護費，僅有應用系統維護成本 5. 易與外部系統介接
缺點 W	套裝： <ol style="list-style-type: none"> 1. 無法修改核心系統 2. 較難滿足個人客製化的需要 3. 無法因應政府政策與公司政策進行大幅度的修改 4. 沒有能夠承擔責任的可靠、有能力和積極的夥伴(國際提供之獨特產業產品，國內資源有限) 5. 產品購置成本高 6. 產品購置後之授權維護費可觀並隨時不預期地單方面調高價格 7. 硬體規格要求較高 	客製化開發： <ol style="list-style-type: none"> 1. 開發時程較長 2. 自行開發風險較大 3. 初期 bug 較多
機會 O	套裝： <ol style="list-style-type: none"> 1. 導入國外電業作法，大幅改變業務流程；易達到流程改善與再造目的 	客製化開發： <ol style="list-style-type: none"> 1. 系統可充分支援公司核心競爭能力之售電業務 2. 將培養出正規技術的團隊，儲備大的自行建置開發能量 3. 台電公司配合台灣電力多元化與節約用電發展，將會陸續推出各種政策方案與用電模式，售電系統會經常修改 4. 能夠得到可靠、有能力、並有相應積極性的資訊服務廠商 5. 容易與其他系統軟體開發工具結合(如資料倉儲、big data、BI、統計分析等)
威脅 T	套裝： <ol style="list-style-type: none"> 1. 本地化適應性差 2. 國外團隊技術支援不易 3. 有些業務流程需要配合政策，無法依循歐美電業最佳實務 4. 與產品綁定之專業化資訊技術人員短缺 5. 導入失敗風險 6. 套裝授權費不易掌握，造成預算編列困難 	客製化開發： <ol style="list-style-type: none"> 1. 無法導入歐美最佳實務 2. 開發失敗風險

接者針對各系統本身的特性進行套裝軟體適用性的評估。

1. ICIS—整合性用戶服務系統

用戶申辦從申請到完成，皆依循公司營業規則、細則及權則單位流程走；然配合資訊系統的變革，以及內部作業流程最佳化的檢討，有流程細微調整、規劃之需要；但重新引進套裝實務之申辦流程，進行全面再造的可能性小；與配電工程作業互動緊密，目前配電工程系統已外包開發建置，未來與用戶服務系統將以資料介接方式進行溝通；介接皆須全數客製化(無法採用套裝之 Total Solution)。

因此從套裝軟體導入觀點來看，客製化幅度屬『高度』客製化、『低』適用度系統。

2. 計費開票系統

計費開票功能，較不涉及業務流程議題；需經常因應各種優惠方案及新措施之訂定，修改程式，故自行開發的自主性將高一些；然因計費功能邏輯十分複雜，計費引擎(Engine)若自行撰寫，時程將拉長，另系統的完整性與品質是另一個風險；

因此從套裝軟體導入觀點來看，客製化幅度屬『中度』客製化、『中』適用度系統。

3. 電費帳務系統

目前三中心運作，涉及戶區帳務移轉(轉戶區)問題，須客製化解決；所有外部機關資料介接交換皆須全客製撰寫；帳務涉及眾多報表，所有報表亦皆須全面客製化；目前台電公司一人可能完成多項套裝軟體程序的多項工作，為免多個畫面跳接以完成工作，預期將比照目前 NBS，客製化撰寫整合畫面供使用者查詢與操作。

因此從套裝軟體導入觀點來看，客製化幅度屬『中高度』客製化、『中低』適用度系統。

綜合套裝與客製化委外開發以及三大主要系統的特性，本研究歸納了以下幾點結論：

1. 使用國外套裝軟體，本地化適應性差，根本無法修改核心系統，較難滿足個人客製化的需要，也無法因應政府政策與公司策略進行大幅度的修改。
2. 由於台電業務特殊，國外團隊技術支援不易，沒有能夠承擔責任的可靠、有能力和積極的夥伴，加上國內與產品綁定之專業化資訊技術人員短缺。
3. 經常需要配合政府的政策與公司策略性目標修改各項作業內容，預計在邁向智慧化、綠能的時代趨勢下，在售電與客戶服務業務流程方面，需要不斷修改，這些是套裝軟體無法勝任的。
4. 產品購置成本高，產品購置後之授權維護費可觀並隨時不預期單方面調高價格；且套裝軟體，所耗硬體資源多，硬體規格要求高。
5. 台電公司是一個歷史悠久與優秀人才濟濟的公司，所實施的許多售電與客服業務流程都是經過多年磨合的結果，若導入一套國外系統，並要求員工依據套裝系統實務去改變熟悉的業務流程，可能會引起反彈，導致績效不彰。
6. 台電現有非常優秀的資訊人力，藉此機會培養智慧化新資訊技術的能力，在實現重要系統的任務下，同時建立起內部對於新系統與新技術的能力，對資訊部門轉型也是一個新的契機。
7. 業務流程需要配合政策，無法依循歐美電業最佳實務，造成高的導入失敗風險，因此經過分析之後，研究團隊推薦 ICIS 與 BAS 採自行開發、BS 則可選擇自行開發或套裝。

(四) 經濟效益

通常軟體系統之經濟效益約佔可增加年度營收的 1~5% 不等，而台電公司之年度總營收約為 6,000 億，本研究保守以 0.1% 進行估算，每年將會增加 6 億的效益，如此本系統投資將可在不到 3 年的時間即可回收。

二、建議

(一) 為避免專案風險，建議成立第三方認證之 IV&V 專案辦公室

資訊系統專案在實施過程中存在著很大的不確定性、變數、隱蔽性及複雜性，風險的存在就在所難免；本研究已將未來專案可能遭遇的風險詳細描述於第壹拾壹章、第三小節。然由組織自身成立專案辦公室投入的資源過大，台電資訊人力的培養重點亦不在此，故建議未來在建置與推動此複雜及範圍龐大的整合性系統時，委外成立獨立之第三方認證 IV&V 專案辦公室。

(二) 成立專案推動團隊

售電業務及客戶服務整合性系統所涉及的業務單位眾多，系統亦十分龐雜，建置案推動時，需要跨單位的溝通與整合，故建議於台電內部成立跨單位之專案推動團隊。建議之系統推動團隊詳如圖 30，主要由業務流程再造團隊及技術實施團隊所組成。每一個團隊下各有數個小組，各小組之組成單位及人數建議如圖所示。

(三) 申請表單(登記單)重新整併

在用戶申辦部分許多區處提出登記單於申請後即數位化掃瞄建檔，不隨案件辦理過程紙本傳遞的構想；本研究亦針對此議題提出了許多探討。為了解其他組織(公司)的作法，研究團隊訪談了中華電信(股)公司、台北自來水事業處、台灣省自來水公司 3 個外部單位，針對此議題進行其現

行做法與未來想法討論。

目前台電公司已有實踐行動櫃檯的構想，本研究亦建議未來登記單應朝數位化及無紙化方向逐步改進，逐漸實現行動運算的時代趨勢；從申請表單重新整併起步。

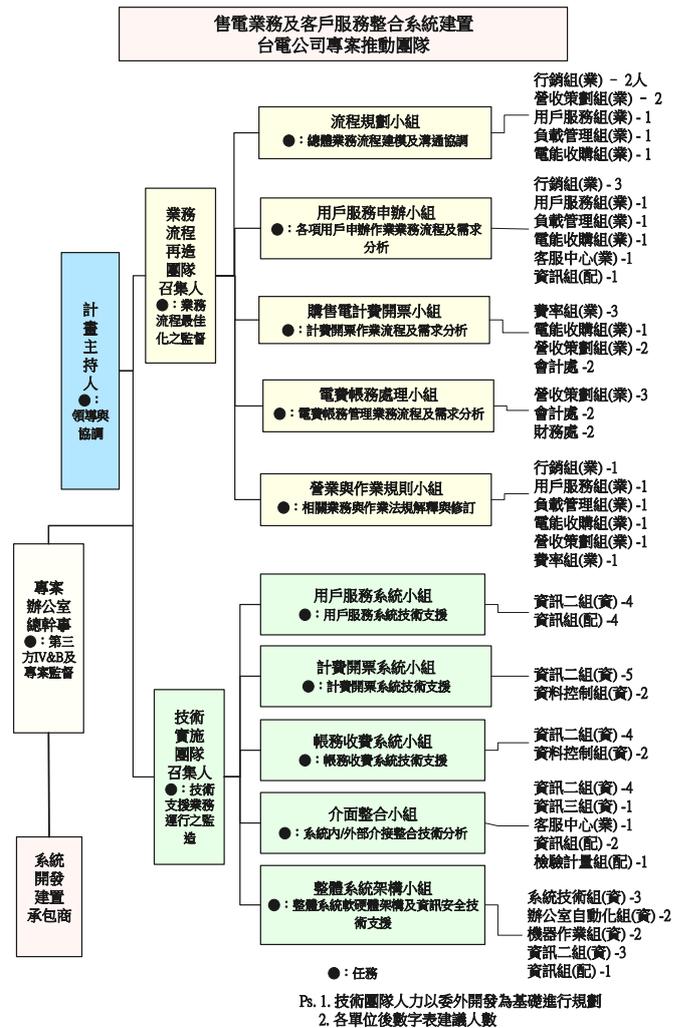


圖 30 整合專案推動團隊

陸、誌謝

整合性售電業務及客戶服務系統整合可行性研究專案自 103 年 6 月開始，歷經一年半的訪談、規劃、分析、設計與雛型系統建置，在整個研究過程中，除了研究團隊環域科技股份有限公司、綜合研究所兢兢業業讓環環相扣的各個環節銜接不墜外，更承蒙台電公司資訊處與業務處、

各區處、配電處、配電處資訊組等單位鼎力相助，而得以獲致豐碩的果實，特別是資訊處林組長俊宏、袁制師作滋，業務處李組長秀碧、許課長佳玉、張課長碧蓮、劉課長凱文、仇課長忠銘、陳課長虹吟，謝課長敏堅、姚課長若翠、曾祥霖、配電處資訊組柯淑瑛等還有多位熱心的區處同仁，有了您們積極的參與及協助，使得本專案能順利推展與完成。

柒、參考文獻

- [1] 季延平、郭鴻志，系統分析與設計，台北市：華泰書局，1995 年，第 357-387 頁。
- [2] 林于新，「以企業流程模型導向實施資料庫重構之研究－以 S 公司為例」，碩士論文，國立政治大學資訊管理研究所，2009 年。
- [3] Yeh, D.M., Li, Y.W., and Chu, C.W., "Extracting entity-relationship diagram from a table-based legacy database," *The Journal of System and Software*, vol. 81, pp. 764-771, 2007.
- [4] Mathew Schwartz, "Reverse-Engineering," 2001, [Online]. Available <http://www.computerworld.com>.

台電工程月刊 819 期專輯徵稿啟事

- 本刊預定於 105 年 11 月發行以「需求面負載管理創新做法」為主題之專輯與讀者分享，歡迎有相關論著者踴躍投稿（截稿日為 105 年 8 月 15 日），每篇以 2 萬字（含圖、表）為原則。
 - 稿件之撰寫格式、投稿方式及稿酬等悉依本刊原訂標準。
 - 投稿相關事宜，若有任何疑問，請與我們聯絡，謝謝您！
- ☎ (02)2360-1095 ✉ u117212@taipower.com.tw



徵稿簡則

- 一、本刊歡迎電力工程相關之論述、譯述、經驗談及特約稿等。
- 二、來稿需簡潔明瞭、字數以不超過2萬字為原則(含圖、表，惟圖表篇幅以不超過全文20%為原則)，並請附書面稿件乙份及微軟Word建檔之光碟片乙份。
- 三、來稿格式及章節編號等請依照所附之「稿件撰寫範例」撰寫。
- 四、文責自負；作者應簽署「台電工程月刊申請投稿暨著作財產權讓與聲明書」；譯稿請附原文及著作權人書面同意書。(列名作者以4位為原則，其他協同參與者加註於文末)
- 五、文章一經採用著作財產權即屬本刊所屬之台灣電力股份有限公司所有，文章發表後酌致稿酬。
- 六、除另有聲明外，本刊對來稿有刪改權；無論刊登與否，恕不退稿。

稿件撰寫範例

促進台電公司學習型組織與網路化教學推廣導入之研究

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

楊世雄 *
Yang, Shyh-Shyong

楊中旗 **
Yang, George

蘇文華 ***
Su, Wally

(年度研究計畫論文)

摘要

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

Abstract

||.....||

* 台灣電力公司綜合研究所

** 育基數位科技公司

*** 勝典科技公司

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

壹、前言

貳、(章節請按下列順序編排)

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

伍、誌謝

*本篇其他協同參與者：000、000、000

陸、參考文獻

- 圖書：請依作者姓名、書名、版次、出版地、出版者、出版年、起訖頁數順序書寫。
- 期刊：請依作者姓名、論文篇名、期刊名稱、卷或期號、起訖頁數、出版年順序書寫。
- 註1：數字用語：請依「公文書橫式書寫數字使用原則」，具一般數字意義者以阿拉伯數字表示。
- 註2：請提供稿費收款人及聯絡人姓名、通訊地址、電話號碼。
- 註3：請於文中適當位置，標註相關參考文獻編號並以[]上標表示。

台電內部網頁：<http://10.52.200.200/w/>本所刊物/台電工程月刊

台電外部網頁：<http://www.taipower.com.tw/>電力生活館/台電圖書/台電工程月刊

MONTHLY JOURNAL OF TAIPOWER'S ENGINEERING

Vol.815 July 2016

NUCLEAR POWER GENERATION :

Elastic-Plastic Fracture Analysis for Circumferentially Cracked Reducers.....Tsai, Bor-Jiun et al.....(1)

TRANSMISSION AND TRANSFORMATION :

Application of Fiber Reinforced Polymer (FRP) for
Shield Tunneling Method.....Wang, Chun-Huai et al.....(15)

Design of Overhead Transmission Lines by Using “3D Graphic Platform”.....Lin, Tung-Yu et al.....(24)

DISTRIBUTION :

Protection of Customer Appliances Damage Caused by Abnormal Voltage
of Distribution Lines.....Cho, Ming-Yuan et al.....(33)

The Impact of Different Operation Models of Electric Vehicle and EV
Charging Station on Power Supply.....Tso, Chun-To et al.....(47)

ENERGY AND ENVIRONMENT :

Fine Particulate Matters Monitoring and the Method of Evaluating External
Costs of Air Pollutant Emissions from Coal-Fired Power Plants.....Tsai, Hsien-Shiow et al.....(61)

Development and Implementation of Energy Controller with Open
Automated Demand Response.....Lin, Shih-Yun et al.....(70)

INFORMATION AND COMPUTER :

The Feasibility Study about System Integration on Billing and Customer
Service Systems.....Yang, Shin-Chuan et al.....(82)



GPN : 2003700005
定價：新台幣100元