

電力研究簡訊

Power Research Newsletter

102年第4季 (102.10 No.90)

台電綜合研究所 **TPRI**

地址：(10091)台北市羅斯福路4段198號 電話：(02)2360-1084 傳真：(02)2364-9611

目錄

研究計畫成果

- 一、鎳基硬面合金之鐳補鐳接程序開發.....1
- 二、煤灰CLSM築堤工程CO₂排放盤查與計算..... 3
- 三、用戶負載量測與辨識資訊系統建置研究.....4
- 四、同步發電機並聯改善案例.....6

技術服務

- 地下電纜配電線路阻抗常數計算與量測.....7

台灣電力公司
使命：滿足用戶多元化的電力需求、促進國家競爭力的提升、維護股東及員工的合理權益。
願景：成為具有卓越聲望的世界級電力事業集團。
經營理念：誠信、關懷、創新、服務。

研究計畫成果

一、鎳基硬面合金之鐳補鐳接程序開發

(能源研究室：吳憲政、王敬堯、鐘震洲、李日輝)

(一) 前言：

核能電廠許多閥件漸使用非鈷硬面合金，藉以降低鈷磨損活化後造成之輻射劑量，非鈷硬面合金包括鐵基(NOREM)及鎳基(Colmonoy-5;Deloro40/50)硬面鐳材，本公司以往已開發成功 NOREM 鐳修製程技術，但缺乏鎳基硬面合金之鐳補製程。機組於運轉過程，閥件發生洩漏異常現象，若因硬面鐳層龜裂或腐蝕或沖蝕所造成之損傷，可依建立之鐳補製程進行現場修補施工，減少機組停機損失舊閥件若未填鐳鎳基硬面汽封面，可依據本研究建立之鐳補製程覆鐳鎳基合金硬面鐳層，以增強該閥件之抗高溫氧化、抗腐蝕及抗磨耗與防止洩漏作用，延長閥件壽命，降低停機損失及風險。

(二) 研究結果：

閥件鎳基硬面合金鐳補填料 Deloro 40 於雷射送粉覆鐳(或氬鐳)時，因具有較高矽、硼及鉻元素，易於鐳補凝固過程，鐳道易產生 CrB、Ni₃B 及 Ni₁₇Si₃ 液態共晶相偏析(圖 1)，加上覆鐳鐳道凝固之收縮熱應力與鎳基覆鐳層之低延性，導致鎳基覆鐳鐳補層之凝固龜裂及沿樹狀晶之脆性龜裂裂縫傳播，如圖 2 所示為 SA-350 閥件材料以 Deloro 40 填

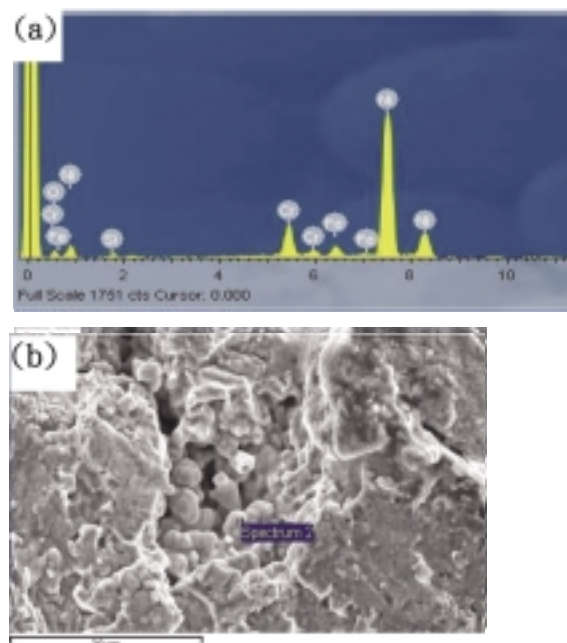


圖 1 Deloro 40 粉末經雷射披覆處理產生龜裂之覆鐳層破斷面 SEM 照片及 EDX 能譜:(a)破斷面 EDX 分析能譜;(b)龜裂裂縫起始區。

料進行氬鐳及雷射送粉雙層覆鐳鐳補之鐳道產生龜裂之外觀照片（預熱 200°C~250°C）。

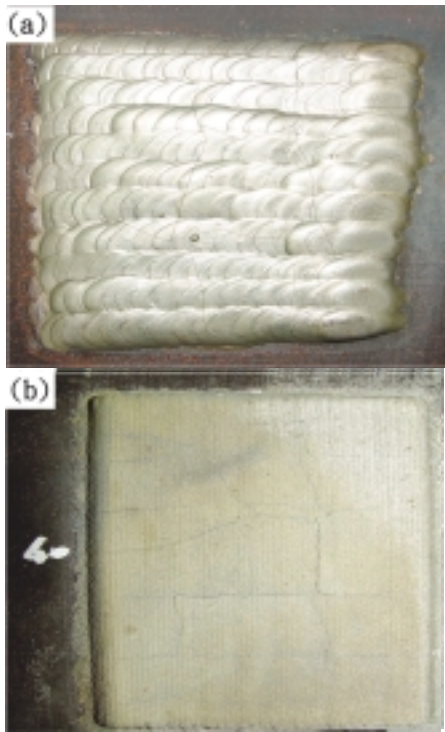


圖 2 SA-350 閥件材料以 Deloro 40 填料進行氬鐳及雷射送粉雙層覆鐳鐳補產生龜裂之外觀照片:(a)氬鐳;(b)雷射送粉鐳

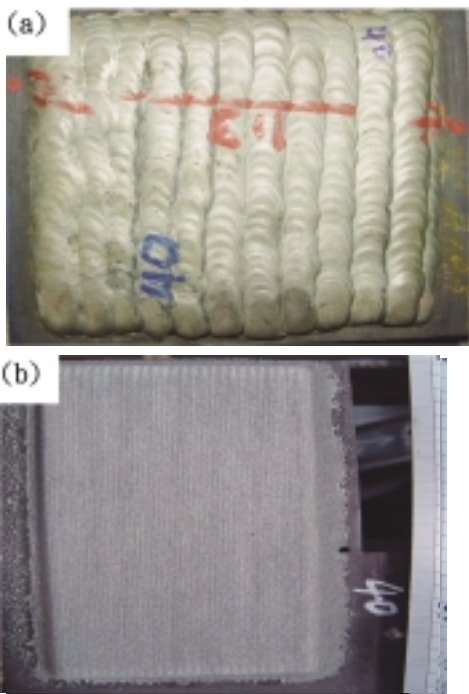


圖 3 A-350 閥件材料以分別 Deloro 40(D40)填料及粉末進行氬鐳及雷射披覆鐳補之外觀照片:(a)氬鐳;(b)雷射送粉鐳。

由覆鐳鐳補研究結果建立閥件鎳基硬面合金 Deloro 40 龜裂覆鐳鐳補之鐳接製程，並釐清引起該

硬面合金鐳補之龜裂原因及鐳補之解決對策，並可同時應用於 Deloro 50 填料氬鐳之相關製程與雷射粉末鐳補製程。A-350 閥件材料分別以 Deloro 40(D40)填料及粉末進行氬鐳及雷射送粉覆鐳鐳補，如圖 3 所示經由控制正確之預熱條件及鐳補參數，可得鐳補完成無龜裂試片之外觀照片。

由拉伸機械性質測試顯示，閥件材料以 Deloro 40 填料覆鐳鐳補或以 SS309 填料覆鐳介層進行 Deloro 40 覆鐳鐳補，其鐳補鐳道之抗拉強度皆高於 518.43 Mpa，其伸長率則高於 1.25%，且平均微硬度值高於 403HV。又由鐳補之微硬度測試可知，以 Deloro 40 填料氬鐳鐳補鐳道微硬度值分佈介於 401HV 至 420HV 間，發生稀釋鐳道之微硬度值由 401HV 降至 366~386HV，而熔融線碳遷移區為 211HV，熱影響區至母材之微硬度分佈介於 132HV~150HV 間，至於鐳道近熔融線擴散區微硬度值為 162~171HV，且由閥件鎳基硬面合金之雷射送粉鐳補金相組織分析可知，Deloro 40 之雷射披覆鐳道其樹狀晶間距約為 10~30 μm ，較以氬鐳鐳補鐳道之樹狀晶間距約 30~60 μm 為小且析出量多(圖 4)，且粉末具有較高之碳、鉻、硼及鐵含量，其鐳道相較於氬鐳鐳道，具有較高之硬度及耐磨性。此外，鐳道之析出相經 X 光繞射及 EDX 成份分析顯示由 CrB、Ni3B、Ni17Si3 及鎳固溶相所組成。

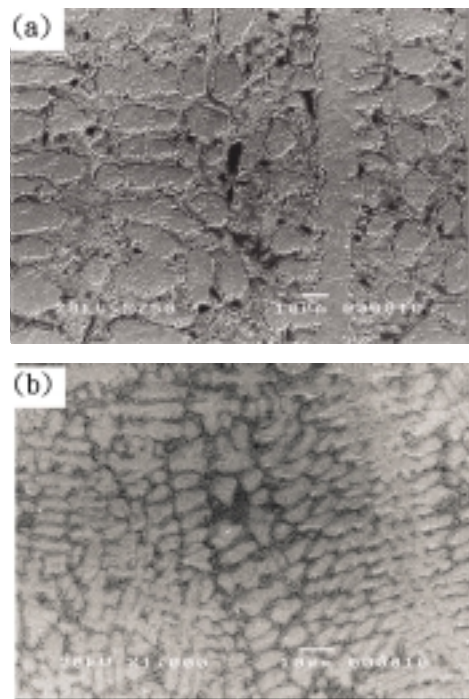


圖 4 閥件材料 SA-350 以 Deloro 40 填料/粉末分別進行氬鐳/雷射送粉鐳補之鐳件 SEM 金相組織照片:(a)氬鐳鐳道;(b)雷射送粉鐳道。

為了解覆鐳鐳補後殘留應力分佈，由鐳補件殘留應力分析顯示，閥件鎳基硬面合金覆鐳鐳道經

多道次鐳補及鐳後熱處理，鐳補鐳道之 σ_{YY} 殘留應力值最高值低於 240 Mpa，最低值為-50Mpa， σ_{XX} 殘留應力值最高值低於 100 Mpa，最低值為-150Mpa(圖 5)。又由電化學腐蝕試驗顯示，Deloro 40 鐳道及 Deloro 50 鐳道在 3wt% NaCl 溶液之腐蝕電位皆高於 SA-350 及 SA-105，使閥件鐳覆鍍基硬面材料較閥件材料具有較佳之抗腐蝕性，其腐蝕電流亦較閥件

小，腐蝕反應速率亦較低。

(三) 結論與建議：

本研究經由實驗鐳補測試，避免閥件材料鐳補過程引起龜裂問題，並建立閥件鍍基硬面鐳層之龜裂鐳補製程規範，相關規範建議可作為各電廠相同閥件鍍基硬面合金鐳補之參考。

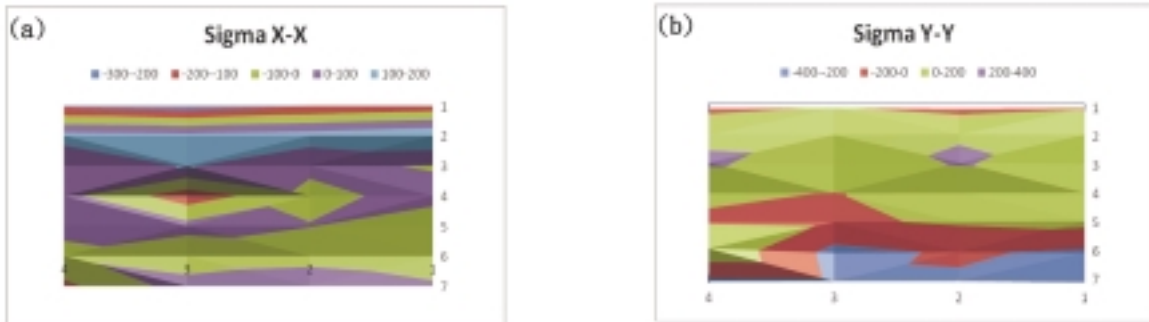


圖 5 閥件材料 SA-350 以 Deloro 40 填料進行氬鐳鐳補之鐳件殘留應力分佈(鐳件 630°C/1hr)鐳後熱處理。

二、煤灰 CLSM 築堤工程 CO₂ 排放盤查與計算

(化學與環境研究室：邱善得、郭麗雯；核火工處中部施工處：許平發、林富村、陳昭仁、陳建文)

(一) 研究背景：

本公司核火工處於彰濱工業區線西西 3 區填灰案中構築長隔堤工程，規劃在既有圍石堤內，構築長約 1500 公尺的中隔堤，其堤心構造擬採全煤灰 CLSM 材料施築，本所協助研發全煤灰 CLSM 材料之配比，已證明其應用於淺層海水下構築之可行性，核火處依據研發成果，發包運用於該築堤工程。在此築堤工程施工之際，規劃煤灰 CLSM 築堤工程二氧化碳排放量盤查與計算研究案，因應公共工程節能減碳的須求，以本工程為案例，進行工程碳盤查，除可建立相關經驗，並找出工程減排重點項目，建立工程碳足跡之評估機制。

(二) 研究內容：

煤灰 CLSM 築堤工程二氧化碳排放量盤查之主要工作內容包含下列各點：

1. 築堤工程生命週期評估架構與流程地圖製作：定義築堤工程需求，並由工程管理單位、設計單位和施工單位之訪查，建立築堤工程之生命週期流程圖。
2. 築堤工程 CO₂ 排放量盤查與計算系統邊界檢核：根據築堤工程需求和生命週期範圍，建立煤灰 CLSM 堤、混凝土堤和砂心堤之 CO₂ 排放量的檢查邊界及優先順序。
3. 築堤工程 CO₂ 排放量盤查與計算表單製作：根據築堤生命週期流程，先行設計煤灰 CLSM 堤 CO₂ 排放量相關項目之盤查與計算表單，再與工程管理單位、設計單位和施工單位討論修正，確認妥適後供實際工作使用。

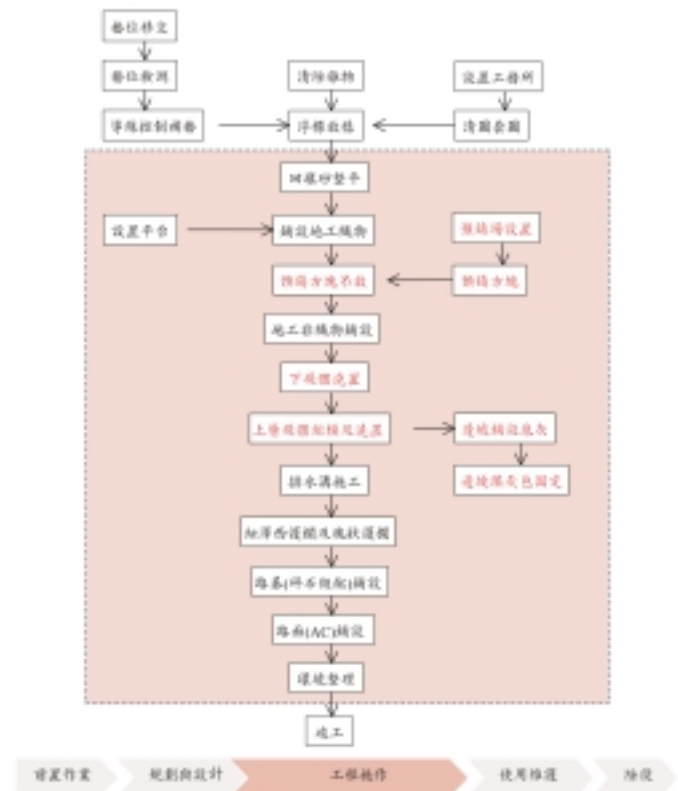


圖 1 煤灰 CLSM 堤邊界及流程設定

4. 築堤工程 CO₂ 排放量之活動數據和排放係數盤查：配合彰濱工業區線之築堤填地工程進行，煤灰 CLSM 堤之 CO₂ 排放的活動數據和排放係數採用現地盤查。盤查可採訪談和資源耗用紀錄模式進行，惟無法盤查之數據可

參考相關資料庫建議。

5. 築堤工程 CO₂ 排放量盤查資料品質分析：透過可靠分析方式檢查盤查資料之準確性、變異性和完整性。
6. 築堤工程 CO₂ 排放量計算：依據盤查結果，計算煤灰 CLSM 堤所界定之生命週期範圍內的 CO₂ 排放量。

(三) 研究成果：

以煤灰 CLSM 堤工程施工階段的活動排碳量為評估內容，如圖 1 所示，盤查邊界從工程起始階段的回填砂整平至工程施作結束後的環境整理，盤查的評估項目內容包括工程材料、施工機具、交通運輸 3 大類。本研究所使用的材料以 CLSM 為主，透過現地的盤查可導出第一級的碳排放係數，本工程使用之 CLSM 的碳排放係數為 88.4、100.7 及 106.4 kgCO₂/m³(如表 1 所示)。經盤查計算全煤灰 CLSM

堤的總排放量如表 2 所示。CLSM 築堤中工程材料、機具設備、交通運輸等類別的碳排放量如圖 2 所示。由圖可知，CLSM 築堤工程之 CO₂ 排放，其中工程材料占比最高，超過 90%，其次為交通運輸。由此可知，為達到工程節能減碳的目標，從工程材料著手，是最快也是最直接的方法。

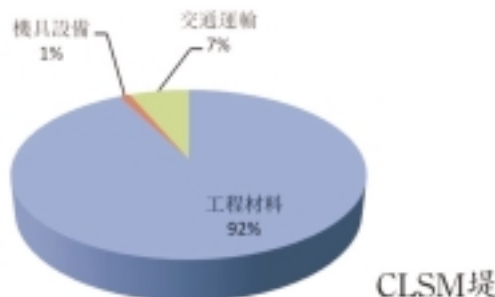


圖 2 CLSM 築堤各類別碳排放量占比

表 1 全煤灰控制性低強度材料碳排放係數

全煤灰控制低強度材料	碳排放量(kg CO ₂ e)	使用數量(m ³)	碳排放係數(kgCO ₂ e/m ³)
C8540 配比	303450	3432	88.4
C10562 配比	771638	7254	106.4
C7572s 配比	684487	6800	100.7

表 2 CLSM 堤的總排放量

工程項目	總碳排放量(kgCO ₂ e)	單位長度碳排放量(kgCO ₂ e)
土工織布(No.4)	5059.71	11.43
土工非織物(第V類)	4169.97	9.42
2×2×2m 預鑄方塊製作(CA/CLSM 材料)	975533.56	2204.50
2×2×2m 預鑄方塊吊放(CA/CLSM 材料)	4146.72	9.37
全煤灰控制性低強度材料(下層堤體用)及澆置	1465007.70	3310.60
全煤灰控制性低強度材料(上層堤體用)及澆置	1600616.06	3617.05
排水溝	81740.97	184.72
格柵蓋板及框座	24834.44	56.12
紐澤西護欄	55806.88	126.11
總計	4216916.02	9529.32

三、用戶負載量測與辨識資訊系統建置研究

(負載研究室：黃佳文、陳裕清)

(一) 研究背景：

1. 由於彰化區處近年來線路損失居高不下，經檢討主因係該處轄內小型工廠林立，沿海水產養殖業發達及在南彰化地區電照花卉盛行，因受不良竊電風氣及大環境不景氣影響，致竊電情形嚴重，雖經檢警單位協助稽查，仍然無法有效遏止竊電歪風甚至有蔓延趨勢，致線損率偏高。過去在區處全力支持下，運用可行之 CT 電流偵測法結合 GPRS 無線通訊系統，並藉由 FTU 回傳至控制中心，竊電稽查工作執行以來，由於現場實際安裝監測設備於測試用戶之電桿上，直接與

間接地對附近用戶的竊電行為有嚇阻的效果，並已顯示出不錯的成效。唯受限於人力在供售電資料的處理上大費周章，此外現場安裝於用戶的電流偵測單元無法同時提供 6 具 CT 資料通道，且 FTU 無 3 相 VT 電壓取量且體積大重量重，無法符合竊電功率讀值、輕便之需求。

2. 本計畫為有效全盤掌握整個區處各類型用戶之合理用電模式，並據此推求可疑竊電用戶模式與規模，乃研發應用資料採礦技術找出各類型用戶之合理用電模型與竊電模式等相關資訊，並建置用戶負載量測與辨識資訊系

統及發展電表型竊電偵測單體，期能強化用戶竊電監測系統功能，並提供竊電查緝之有力資訊，以及應用本研究計畫成果，提升竊電查緝效果。

(二) 研究目標：

1. 探討與設計產出竊電表格資訊，以契合稽查竊電之需求。
2. 設計與研製以 GPRS/Zigbee 無線通訊為基礎之電表型竊電偵測單體，並完成介面整合與實驗室測試。
3. 於營業區處內規劃線上與離線之後端資料庫伺服器中之資料庫資料結構與撰寫「配電線路損失統計系統」資料存取及轉換介面程式，建立區處饋線/用戶屬性資料資料庫管理系統。
4. 建立區處 Web Based 後端伺服器人機介面與現場 GPRS 資料收集裝置之通訊協定與軟體設計，完成網路型用戶竊電後端監測系統建構。
5. 應用資料採礦與模型辨識技巧，推求用戶之合理用電與竊電之模式，建立區處用戶負載量測與辨識資訊系統，並與現有資訊系統整合，期能於區處定期統計區處竊電可疑用戶之相關資訊，並以報表輸出作為稽查之參考。
6. 選擇彰化區處轄區竊電較明顯之三條饋線及 173 個代表性用戶，於所選定的饋線配電變壓器與用戶桿上安裝以 GPRS/Zigbee 無線通訊為基礎之電表型竊電偵測單體，進行實測並調整測試後之相關性能，以驗證其實用性與功能。

(三) 研究方法與程序：

1. 與業務處、及竊電較嚴重之營業區處討論竊電方式及可能之應對策略與計畫產出之竊電表格資訊，以切合稽查竊電之需求。
2. 應用微處理機、Zigbee 結合 GPRS 無線通訊模組完成電表型竊電偵測單體之硬體與軟體設計與系統整合及實驗室測試。
3. 應用 ORACLE 資料庫，規劃設計伺服器之軟硬體架構，完成資料庫邏輯與實體之資料架構與資料儲存以及應用 DTS 資料轉換技術，以整批離線處理方式建立與「配電線路損失統計系統」之資料擷取轉換程式，並將 OMS 與 NBS 之區處用戶用電資訊轉入竊電資料伺服器，此外並分析與 AMI 系統之資料介面。
4. 於彰化區處內建立後端 Web Based 伺服器人機介面與現場 GPRS 竊電偵測單體之通訊協定與軟體設計，以建構離線與線上整體之監測系統。

5. 於彰化區處轄區選定 173 個用戶與三條饋線，於所選定的饋線配電變壓器與用戶桿上安裝以 GPRS 為基礎之電表型竊電偵測單體，進行半年實測並調整測試系統之相關性能，以驗證其實用性與功能。
6. 應用資料採礦與模型辨識技巧，推求區處表燈與低壓用戶與高壓用戶之合理用電與竊電之模式，並定期執行用戶竊電辨識以報表格式列出竊電嫌疑用戶之統計資料，以作為爾後查緝與求償之依據。
7. 建立 Web Based 用戶負載量測與辨識資訊系統，提供稽查人員重要資訊，掌握有效之稽查時間，以提高稽查成效。

(四) 研究成果及其應用：

1. 應用微處理機、ZigBee 結合 GPRS 無線通訊模組完成電表型用電資訊收集偵測單體之硬體與軟體設計與系統整合，於彰化區處內規劃後端資料庫伺服器中之資料結構與撰寫資料存取及轉換介面程式。
2. 撰寫本公司現已上線使用之「配電線路損失統計系統」資料存取及轉換介面程式，整合區處饋線損失資料。
3. 建立區處 Web Based 後端伺服器人機介面與現場 GPRS 資料收集裝置之通訊協定與軟體設計，完成網路型用戶用電資訊收集後端監測系統建構。
4. 應用支撐向量機(SVM)及資料採礦與模型辨識技巧，推求用戶之合理用電與違章用電之模式，並與現有資訊系統整合，期能篩選出疑似違章用電戶，辦理查核，以做為本研究之可行性驗證以發揮研究案效用。
5. 可有效嚇阻用戶違章用電行為，提升違章用電查緝成效，降低配電線路非技術性損失率，節省區處讀表人員來回現場交通與讀表作業時間。

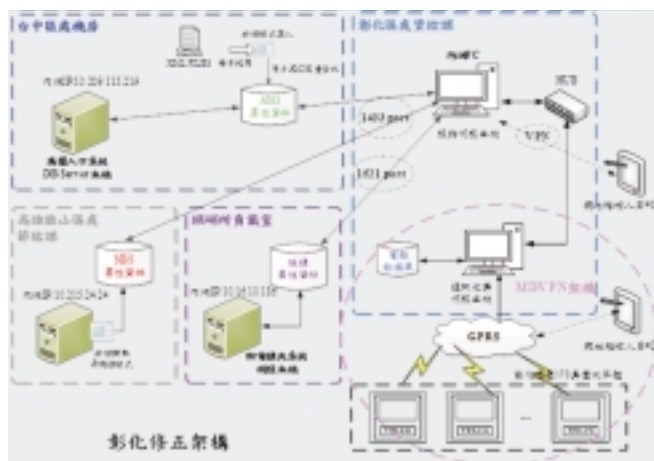


圖 1 用戶負載量測與辨識資訊系統架構

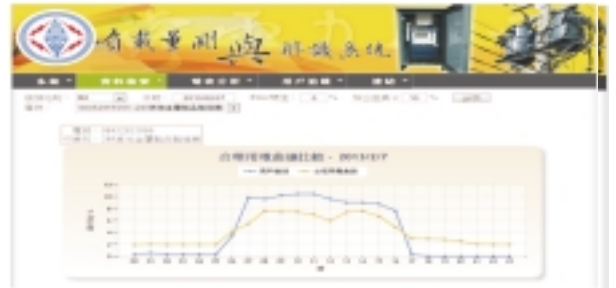


圖 2 GPRS 資料收集與控制單體 圖 3 量測收集單體施工照片

圖 4 合理用電分析曲線圖

四、同步發電機並聯改善案例

(高壓研究室：鄭強)

(一) 前言：

B 電廠之水力發電機組於整步與同步並聯試運時，核對機組並聯條件檢測結果，觀察到系統維持在三相平衡的運轉狀態，惟輸入並聯盤之系統側 PT-3 二次側相電壓未真實反應系統運轉狀態，三相對地之相電壓呈現振幅不平衡及相角偏移現象；機組側 PT-1、PT-2 之相電壓、線電壓兩者均維持三相對稱與平衡關係。系統側 VT 三相電壓失衡狀態，深深影響機組整步效能及並入系統時機正確性，亟需深入檢討同步訊號失真肇因及改善整步與並聯時機之解決方案。

(二) 系統設計與結構：

B 電廠依 a-b-c 系統旋轉相序作為發電機組、主變壓器之設計基礎，主變壓器依 Ynd1 方式結線，主變壓器高壓側電壓超前低壓側電壓 30° ，主變壓器 13.2 kV 之低壓側，經相間絕緣匯流排(IPBD)經 110 斷路器與機組連接，因而具有簡化主變壓器高低壓側相角位移之輔助比壓器相位補償電路結構之優點。

(三) 發電機整步限制條件：

在整步過程中，並聯裝置依橫跨於斷路器兩側之系統電壓(V_{running})、發電機電壓(V_{incoming})對時間變化關係，及其電壓包絡線的振幅、相序、相位、頻率差及整步必要條件，進行轉速及電壓調整。並於機組與系統間電壓相位趨近零度時，投入斷路器完成整步並聯。機組整步相關限制值，整理如表 1：

表 1 發電機整步限制條件

斷路器閉合角度	$\pm 10^\circ$
機組電樞電壓與系統電壓差	0~+5%
機組與系統之頻率差	$\pm 0.067 \text{ Hz}$

機組若超出上述整步限制範圍併入系統稱之為“整步不良(faulty synchronization)”，發電

機在過電流及機械應力設計考慮因素上，並未涵蓋整步不良的異常因素；若整步不良引起強烈的同步化短時間過電流及暫態轉矩，可能導致機組機械結構故障。

(四) 機組整步電量分析：

1. 機組解聯前後電壓分析

本技術服務於 B 電廠機組廠房，擷取 PT3、PT1 及 CT6 之三相電壓、電流訊號；系統側及機組側運轉中、解聯之三相電壓量測值，如表 2~3 所示；機組運轉中、解聯及並聯之三相電壓、電流波形，如圖 1(a)所示；機組運轉中、解聯及同步並聯量測值計算而得之電量波形，如圖 1(b)所示。

圖 1(b)波形顯示機組於解聯中，計算系統側相電壓之零相序電壓合成波形不為零，而線電壓計算值近似零，其相電壓、線電壓波形，如圖 2 所示。

機組解聯後，PT-3 三相相電壓量測值為： V_{an} 7.190 kV、 V_{bn} 8.635 kV、 V_{cn} 7.117 kV，幅值變化 0.944、1.129、0.929 標么；波形分析結果顯示其相電壓幅值、相位發生偏移，而線電壓幅值僅輕微波動，相位未變動；此一結果對機組整步之電壓調整、掌握同相位時機之控制效能有所影響，亟需檢討改善方案，恢復自動並聯裝置之既有性能。

表 2 機組解聯前、解聯 PT3 之系統電壓值

	$V_{\text{an}} / V_{\text{ab}}$	$V_{\text{bn}} / V_{\text{bc}}$	$V_{\text{cn}} / V_{\text{ca}}$
解聯前	7.615 kV	7.646 kV	7.659 kV
	13.184 kV	13.263 kV	13.243 kV
解聯中	7.190 kV	8.635 kV	7.117 kV
	13.106 kV	13.200 kV	13.194 kV

表 3 機組解聯前、解聯 PT1 之系統電壓值

	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}
解聯前	7.615 kV	7.647 kV	7.663 kV
解聯中	7.615 kV	7.647 kV	7.663 kV

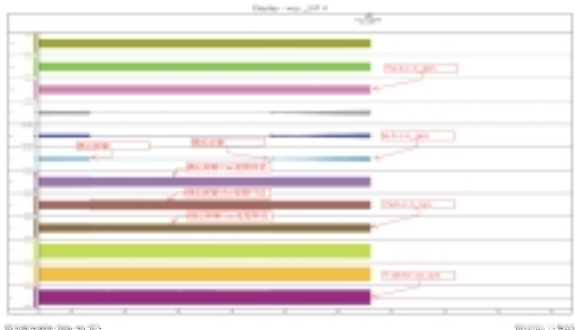


圖 1(a) 機組-系統三相電壓、電流量測波形

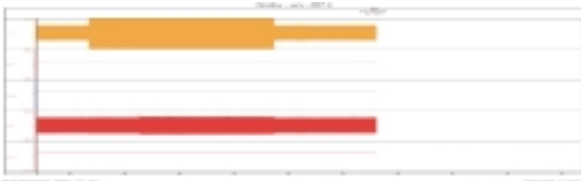


圖 1(b) 機組、系統三相電壓計算之波形

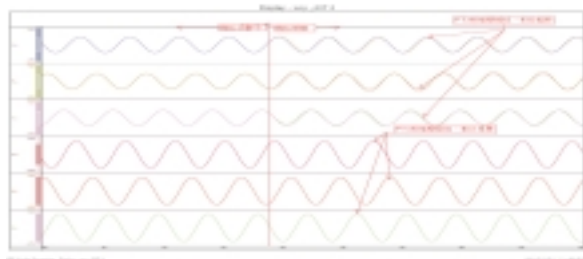


圖 2 機組解聯後，系統側 PT3 之相電壓、線電壓波形

2. 機組整步及併入系統狀態分析

機組整步時，電壓控制稍高於系統約 1.005 標么，機組併入系統前，系統頻率為 59.9978 Hz，機組頻率控制在 59.9476 Hz，頻率較系統略低 0.0502

Hz；在此狀態下機組進入同相位約可持續 150 ms，斷路器足以在此時間中完成投入操作，而自動同步檢定裝置輸出斷路器投入訊號延遲，導致機組延遲 -1.9809° 併入系統；機組整步、併入系統之運轉數值，如表 4 所示；機組整步、併入系統之相/線電壓包絡線波形，如圖 3 所示。

表 4 機組整步與併入系統數值

包絡線	同步角度($^\circ$)	Δt (ms)	頻率(Hz)
V_{an}	未抵同步點		f_{sys} 59.9978
V_{bn}	未抵同步點		
V_{cn}	-7.2513	-401.306	
V_{ab}	-1.9809	-109.613	
V_{bc}	-1.9809		
V_{ca}	-1.9809		

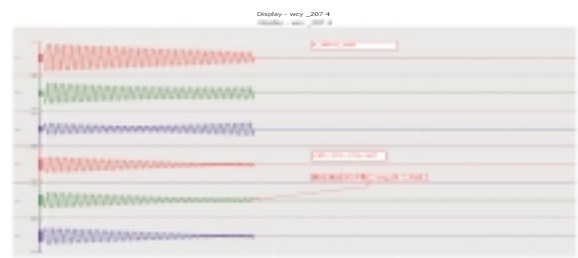


圖 3 機組併入系統之相電壓、線電壓包絡線波形

(五) 結論：

本文依據 IEEE Std C50.12-2005 標準文獻，整理發電機併入系統之規範，作為機組整步性能評估之依據。並依機組之系統結構檢討廠家並聯盤設計缺失，經電量量測分析數據確認整步不良之問題所在，提出採取線電壓訊號之系統具體改善對策，有效解決整步訊號失真問題。

技術服務

地下電纜配電線路阻抗常數計算與量測

(電力研究室：林建宏、王永富、許炎豐)

(一) 緣起：

配電系統饋線數量多，供電幅員遼闊，由於配電系統條件、饋線系統架構、各相負載之時變性及變壓器配置的不同，饋線三相電流不平衡比輸電系統嚴重。為能增進對三相不平衡分析之準確度，確實掌握饋線各節點電力潮流及穩態電壓分佈情形，且對於未來再生能源併接於配電系統時，進行併網衝擊分析時，對於採用線路阻抗的真實性以及一致性，需要進行詳細的確認以及計算，以確保系統穩定，本文透過 Modify Carson' Equation、Matlab 進行計算及程式撰寫。

(二) 地下電纜裝置：

三相四線 11.4/22.8kV 地下常閉環路型 (Normally Close Loop)。高壓地下電纜均採用

25kV 級 150kV BIL 之交連 PE 電纜，主幹線之線徑為 500MCM，分歧線之線徑為 #1AWG，使用交連 PE 遮蔽電纜時，不論三相或單相線路均不需另裝中性線。主幹線以配置於管路組之下層導管，分歧線配置於管路組之上層導管為原則，且應採一導管一回路電纜採品字型排列。高壓饋線供電容量為 225A，高壓饋線緊供最大負載電流為 450A。電纜位置與相位排列如圖 1，地下配電電纜阻抗如表 1。



(採品字型電纜排列)

圖 1 電纜位置與相位排列

表 1 地下配電電纜阻抗表

項目	25kV	
	#1AWG	500MCM
截面積	42.41mm ²	253 mm ²
股數	19	37
絞線外徑	8.18mm 3%	20.04 3%
絕緣體外徑	22.86 0.76mm	37.31 0.76mm
外半導體外徑	24.89 1.27mm	37.85 1.27mm
完成外徑(約)	33mm	47mm
內半導體厚度	0.381mm 以上 (平均)	0.51mm 以上 (平均)
絕緣體厚度	6.6mm 以上 (平均)	6.6mm 以上 (平均)
外半導體厚度	0.76mm 以上 (平均)	1.02mm 以上 (平均)
PVC 外皮厚度	2.03mm 以上 (平均)	2.03mm 以上 (平均)
同心中性線線徑及數目	#16AWG-18	#15AWG-27
導體重量	385kg/km 以上	2300kg/km 以上
標準長度	600m	600m

(三) 地下電纜模型：

常用的地下電纜線型式各別為中性線與輸電線為同軸或在輸電線外圍環繞中性線金屬帶，帶入計算卡爾森方程式上，須先求得輸電線的阻抗值、各輸電導線間的幾何平均半徑與中性線的幾何平均半徑。

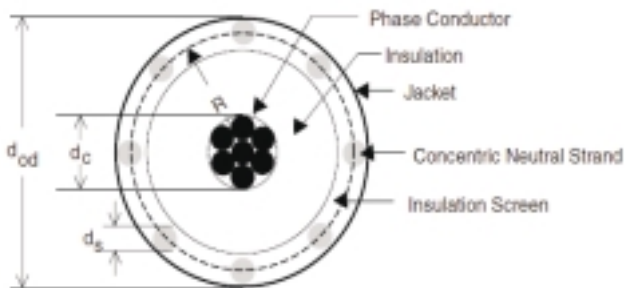


圖 2 同心中性線電纜

圖 2 所示一個簡單的中性線共軸電纜剖面圖，中心導線外覆蓋了一層較厚的絕緣材料，外圍包圍了一層薄的非金屬半導體隔板，這一層非金屬隔板中穿插了螺旋狀排列的中性線，更外層則包圍了一層絕緣的外套管。為了使用卡爾森方程式來表示此地下共軸心中性線的電抗，以下的參數需要先求出：

- d_c = 相導線直徑(inches)
- d_{od} = 整個中性同軸導線外徑(inches)
- d_s = 同心中性絞線直徑(inches)螺旋狀中性線直徑

GMR_c = 相導線的幾何平均半徑(ft.)
 GMR_s = 中性線的幾何平均半徑(ft.)
 rc = 相導體阻抗值(Ω /mile)單位長相導線阻抗
 rs = 中性線阻抗值(Ω /mile) 單位長中性線組抗
 k = 同心中性線數量

透過上述的模型定義及計算導線與導線間的等效幾何平均半徑，並使用 Modify Carson' Equation 方程式計算。

(四) 計算方式：

本文透過 Modify Carson' Equation 進行地下電纜配電線路阻抗的計算，計算如式(3)以及式(4)所示，而導體距離與配置如圖 1 所示。

Modified Carson' Equation

導體自感阻抗：

$$z_{ii} = r_i + 0.09530 + j0.12134 \cdot \left(\ln \frac{1}{GMR_i} + 7.93402 \right)$$

(ohm/mile) (3)

導體間互感阻抗：

$$z_{ij} = 0.09530 + j0.12134 \cdot \left(\ln \frac{1}{D_{ij}} + 7.93402 \right)$$

(ohm/mile) (4)

r_i : 導體 i 阻抗(ohm/mile)

GMR_i : 導體幾何平均半徑(feet)

D_{ij} : 導體 i 與導體 j 間距(feet)

(五) 結論：

根據本文地下電纜根據計算結果可以發現，在正負零相序中 Modify Carson' Equation 計算出來的阻抗值差異並沒有很大，加上環境的不同實測值是有可能小於計算理論值的，另外在非對稱相可以發現量測及 Modify Carson' Equation 計算皆是趨近於零的，故在計算地下電纜三相不平衡阻抗上使用 Modify Carson' Equation 是沒有問題的。

表 2 正負零相序比較表

	Z_{012}
試驗報告	$\begin{bmatrix} 0.4095 + 0.2081i & -0.0002 + 0.0002i & 0.0004 - 0.0002i \\ 0.0004 - 0.0002i & 0.0865 + 0.1444i & 0.0004 - 0.0010i \\ -0.0002 + 0.0002i & -0.0015 - 0.0005i & 0.0865 + 0.1444i \end{bmatrix}$
業務處資料	$\begin{bmatrix} 0.5458 + 0.1518i & 0 & 0 \\ 0 & 0.1075 + 0.1437i & 0 \\ 0 & 0 & 0.1075 + 0.1437i \end{bmatrix}$
Modify Carson' Equation	$\begin{bmatrix} 0.6509 + 0.2880i & 0.0000 + 0.0000i & 0.0000 + 0.0000i \\ -0.0000 + 0.0000i & 0.1430 + 0.1832i & 0.0000 + 0.0000i \\ -0.0000 + 0.0000i & -0.0000 + 0.0000i & 0.1430 + 0.1832i \end{bmatrix}$