

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：太陽光電電力調節器(Inverter)維修技術研習

頁數 20 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/陳德隆/(02)23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

陳明安/台灣電力公司/電力修護處中部分處/經理/（04）736-3666 EXT360

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：100/11/07 ~ 100/11/20

出國地區：美國、加拿大

報告日期：101/01/06

分類號/目：G3/電力工程

關鍵詞：

PV (Photovoltaic)；電力調節器；Inverter；最大功率追蹤；MPPT (Maximum Peak Power Tracking)；IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors)

內容摘要：(二百至三百字)

至民國 100 年底為止，本公司太陽光電系統第一期已商轉裝置容量已達 10MWp，太陽光電系統之維護保養將成爲重要之課題，尤其是其最重要之設備—電力調節器(Inverter)，更是核心技術所在。爲因應將來保固期過後電力調節器之維修及故障排除等工作，特地前往本公司永安鹽灘地及台中電廠生水池等前兩大光電站所使用之電力調節器(Inverter)原廠 Schneider Electric (Xantrex)，學習相關維護技術。本報告除做一般系統架構說明，並針對 Inverter 工作原理、最大功率追蹤及其維修等做介紹。

報 告 目 次

壹、出國目的與過程：

一、 出國目的-----	P.3
二、 出國過程-----	P.3
(一) 本公司太陽光電系統發展現況-----	P.3
(二) 參訪廠家與研習期間-----	P.5

貳、出國研習內容與心得：

一、 Schneider Electric 公司簡介-----	P.7
二、 研習內容-----	P.8
(一) Grid-Tie Inverters -----	P.9
(二) 最大功率追蹤 Maximum Peak Power Tracking-----	P.10
(三) 太陽光電板局部遮蔭之最大功率追蹤(Shade-Tolerant MPPT)----	P.12
(四) Xantrex GT Inverter 系統架構及工作原理-----	P.14
(五) Xantrex GT Inverter 系統狀態及運轉流程-----	P.17
(六) 安全注意事項及故障排除-----	P.18

參、出國感想與建議-----	P.20
----------------	------

壹、出國目的與過程：

一、出國目的

緣起：配合國家發展再生能源利用之政策，太陽能發電為本公司新裝置能源重要方向之一。太陽光電系統為新的能源技術，尤其電力調節器為其核心且有其獨特性。其原理是運用於交直流電能轉換，未來太陽光電站將廣設於台灣本島及離島等地區，電力調節器數量多，設備廠牌不一且造價高，電力修護處亟需建立北、中、南等所屬分處維護據點，早日儲備電力調節器之自主維修能力，以減少對原廠技術的依賴。

目標：研習電力調節器設計原理及維修技術，返國後可擔任電力調節器維修技術的種子工程師，進而節省日後的維護費用，達到太陽光電站最大發電效益。

實施要領：目前國內有關電力調節器之修製技術仍局限於小容量設備之製造，對於大型設備之維修技術與經驗仍十分欠缺，因此派員赴 Schneider (Xantrex) Electric 公司原廠家研習，以期早日建立自主維修能力。

預期成果：1. 瞭解電力調節器工作原理及設計技術。

2. 建立電力調節器偵錯及維修技術。

二、出國過程

(一) 本公司太陽光電系統發展現況：

本公司為配合政府推動綠色能源政策，積極開發建置包括風力發電及太陽光電等潔淨能源。其中太陽光電一期至 100 年底為止，預定完成 10MWp 之容量，已完成超過 10MWp，各太陽光電站設置區域、名稱及裝置容量如表一。

本公司目前單一光電站裝置容量最大為 4636kWp，裝設於永安鹽灘地，使用 16560 片美國 Suntech STP280-24/vd(280Wp)模組，符合 IEC 61215、IEC 61730 之標準，搭配 18 部容量 250kW Xantrex GT250 Inverter。裝置容量次大為 1508kWp，位於台中電廠 DE 生水池，使用日本 Kyocera\KD210GH-2P(210Wp) 7184 片模組，符合 IEC 61215(JIS C 8990)之標準，結合 15 部容量 100kW 之 Xantrex GT100 Inverter。

區域	光電站名稱	裝置容量(kWp)
北區	中大 DS	40
北區	大潭發電廠#1、#2 生水池	651
中區	台中電廠示範站	72
中區	台中電廠DE生水池	1508
中區	中部儲運中心	90
中區	東勢新伯公倉庫	115
中區	卓蘭會館	41
南區	興達電廠3,4,5,6生水池	953
南區	嘉義民雄	60
南區	永安鹽灘地	4636
南區	興達電廠 SCR	60
南區	路北超高壓變電所	60
南區	核三廠	1458
花東區	花蓮配電中心示範站	15
花東區	台東區營業處示範站	15
離島區	金門金沙文化園區	528
離島區	澎湖七美	155
總量:		10527

表一、台電太陽光電現況表

(二) 參訪廠家與研習期間：

本次研習前往本公司前兩大光電站所使用之電力調節器原廠 Schneider Electric (Xantrex)訓練中心、製造廠及光電站，研習地點及期間（含往返行程）如下表：

起始日	迄止日	前往機構	地點	詳細工作內容
1001107	1001107			往程(台北－舊金山)
1001108	1001110	Schneider Electric (Xantrex)	美國 加州	太陽光電電力調節器 (Inverter)維修技術研習
1001111	1001117	Schneider Electric (Xantrex)	加拿大 安大略省	太陽光電電力調節器 (Inverter)維修技術研習
1001118	1001120			返程（渥太華－溫哥華 －台北）

以下各相片為在美國加州訓練中心教室、工廠，以及加拿大安大略省渥太華附近之太陽光電站。



上課講師 Mr. Phil Robinson



實習用 CCU board



實習課程 Upload & Refresh Firmware



實習測驗



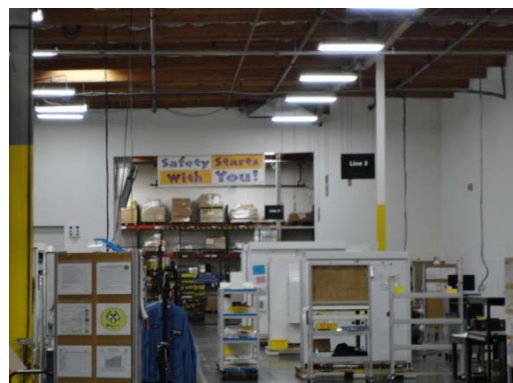
工廠配線情形



配線及測試



直流電源 PV 模擬器



工廠工安宣導告示牌



加拿大安大略省試運轉中太陽光電站



加拿大安大略省建造中太陽光電站(共 29MW)，使用貨櫃式整合兩台 Inverter 及 Switchgear 及 Scada、控制器等，縮短施工及試運轉期間

貳、國外公務之心得：

一、Schneider Electric 公司簡介：

Schneider Electric 公司從創立至今已逾 170 年，擁有十萬名以上員工，年銷售額超過 158 億歐元，為美國財富雜誌評選世界 500 強企業之一，2008 年收購可再生能源解決方案的領導者 Xantrex。Schneider Electric 公司其前身在 19 世紀為鋼鐵、重工和造船業起家，20 世紀公司改以電力與自動化控制著稱，21 世紀為能源效率管理專家，致力於為客戶提供安全、可靠、有效率的能源，積極承諾致力於「善盡其效，盡享其能-Make the most of your energy™」。該公司提供整合性解決方案，在能源及基礎建設、工業製程、大樓自動化居重要地位。

太陽能電力調節器相對於整個太陽光電系統而言雖僅佔總成本金額的 10%到 15%，但其在整體運作中所扮演的角色至為關鍵。Schneider Electric 公司產品搭配整體電力保護與監控，提供有效率太陽能光電解決方案。新一代太陽能電力調節器(Inverter) 同步併聯技術，符合各國標準的太陽能電力調節器產品，應用範圍涵蓋大樓至電廠等級。Schneider Electric (Xantrex)電力調節器不單純只是一個將直

流電轉為交流電的設備，它同時還內建有系統之頻率、過電流及過電壓保護功能，並能自動調節輸出容量以達到最有效率的發電。該公司對於新能源產業，透過大量投資太陽能光電相關產品的設計研發，成功將太陽能電力調節器整合中低壓配電與電力監控設備，實現高效能源管理。針對市電併聯應用，Schneider Electric (Xantrex) GT(E)三相電廠級併聯型系列產品(GT30、GT100、GT250 與 GT500)擁有最高可達 98%的發電效率、內建主動式及被動式保護系統、通過嚴苛環境測試同時兼具美規(UL)與歐規(CE)品質認證的三大特色，此外 XW 系列更具同時併聯及儲能應用的特點，也可連接風力、水力及發電機，有利於偏遠山區、軍事用地等市電無法抵達的區域使用。

二、研習內容

本次出國研習於該公司訓練中心與其他客戶學員一起參加 Inverter System Operations and Troubleshooting Training。課程主要目的是讓學員熟悉針對 Grid-Tie PV(Photovoltaic) Inverter 如何運轉及故障排除，課程內容包括：

- System Overview
- Safety
- System Circuits and Components
- Communications
- State Machine
- Data Logs and Oscillography
- Fault codes and Troubleshooting

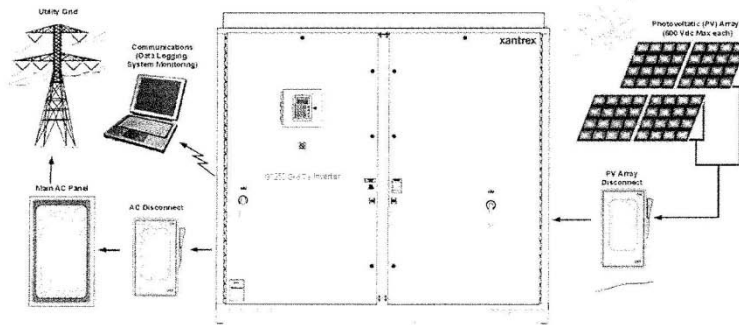
各章節完成後皆有測驗或實作，通過後授予如下結業證書：



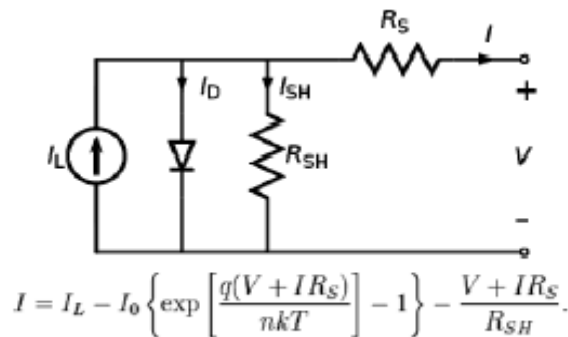
以下針對研習內容不同主題摘要舉例說明：

(一) Grid-Tie Inverters：

一個 Grid-Tie Inverter 系統由太陽光等再生能源產生直流電，再利用 Inverter 轉換為交流電後，將電力送到公用電網出售，示意圖如圖一。



圖一、Grid-Tie Inverter System



圖二、太陽光電模組之等效電路模型

Direct grid-tie inverters 不使用電池，也無法使用電池，直接連接 DC Source，以及公用電網。太陽光電模組之等效電路模型如圖二，這類產品為電流源裝置，而非電壓源，將能量以所連接電網同步波型輸出至電網。因此，無法提供 AC 負載及當作備援電力。電網停電，Inverter 亦然。

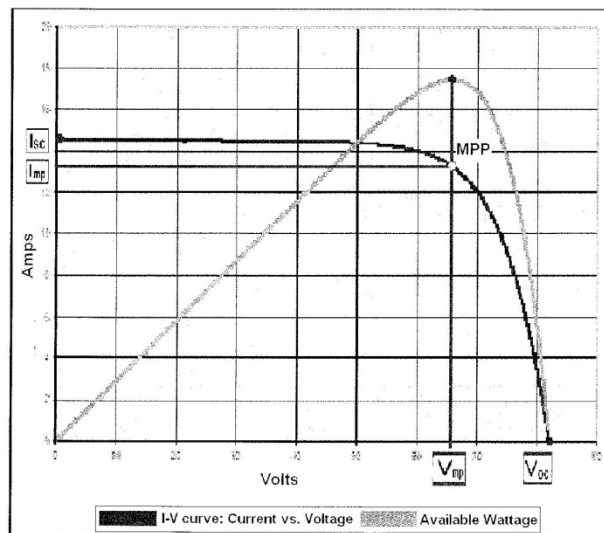
Xantrex Technology 於 2007 年先後發表負極接地(NG, Negative Ground)及正極接地(PG, Positive Ground) 之三相 grid-tie 250kW Inverter GT250，GT500 則為 500kW 機

型。該等機型運轉在標稱電壓 AC 三相四線 480V，可接受來自 PV 陣列 300~550V DC 電壓，具備防止孤島運轉及接地故障等保護裝置，使用 maximum peak power tracking(MPPT)以獲得最佳光電產出。維護前需確認該機型所連之太陽光電陣列接地是 NG 或 PG。

(二) 最大功率追蹤 Maximum Peak Power Tracking (MPPT)：

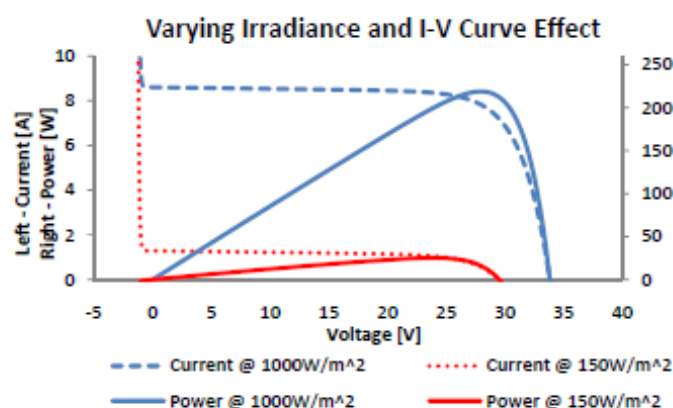
太陽能模組不像電池或公用電力，無法送出固定電壓，只能在有限範圍內運轉，在不同負載條件下，電壓將有所變化。最大電壓為開路電壓 V_{oc} ，最大電流為短路電流 I_{sc} ，Inverter 必須提供可控制之可變負載，於此兩點間取得電壓及電流，如果太陽光電陣列加上正確負載量，將使 Inverter 獲得最大功率。每一太陽能模組會有其 I-V 曲線，如圖三，在曲線中轉折點即是最大功率點 MPP。量測運轉電壓是非常重要的，不同模組具有不同特性，例如單晶矽具有較尖銳轉折 I-V 曲線，較小電流改變即能造成較大電壓變化。

Maximum Peak Power Tracking

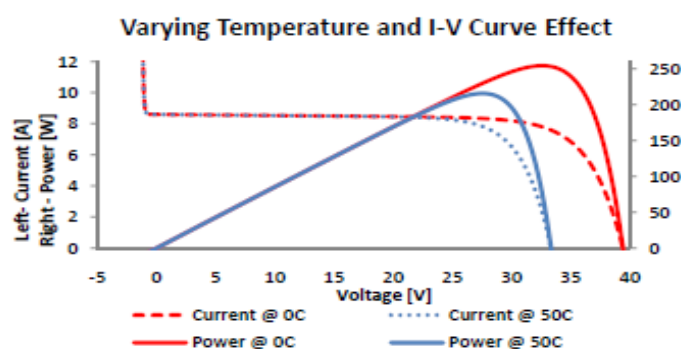


圖三、太陽光電模組 I-V 曲線及最大功率點

整合於 Schneider Electric GT500-MV 控制軟體內之高階 MPPT algorithm 可確保由太陽光電陣列獲取最佳功率輸出，太陽光電模組陣列之最大功率電壓點主要會隨著照度及表面溫度而變，如圖四、圖五分別為照度及溫度變化對 I-V 曲線之影響，由圖五可知溫度越低，PV 之效能越高。最大功率電壓每隔數秒沿著太陽光電陣列 I-V 曲線移動，MPPT algorithm 持續讓 Inverter 找尋最佳電壓及電流運轉點，以維持 PV 最大功率輸出。



圖四、照度變化對 I-V 曲線影響



圖五、溫度變化對 I-V 曲線影響

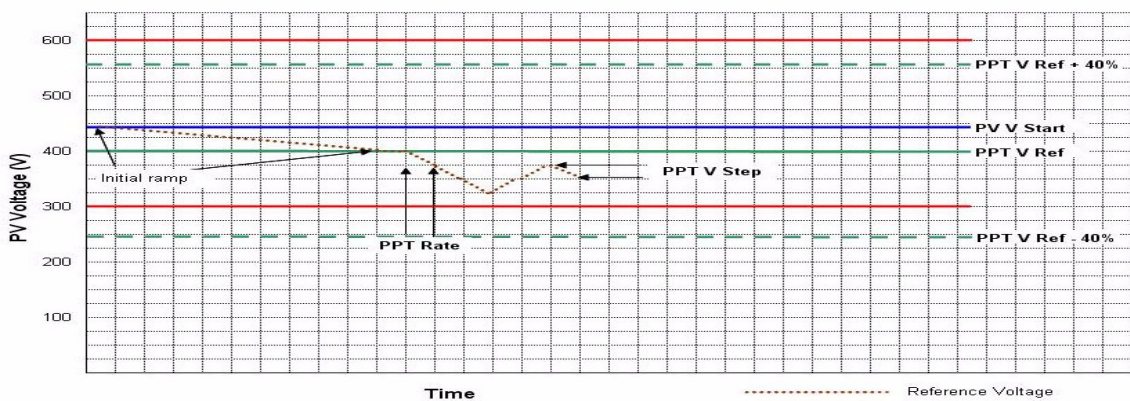
本系統可讓使用者透過 Universal Front Panel Control Unit(UFCU)調整或改變以下五個參數，以控制 GT500-MV MPPT 行為。

- PPT V Ref(Peak Power Tracker Reference Voltage)：當 inverter 進入 on-line 模式，且 power tracker off，inverter 會試著去維持此參考電壓；如 power tracker on，由

此參考電壓開始觀察電壓值，以調整產生更多 power。default 值為 400 V，最大/小值為 590/300 V。

- I PPT Max(Power Tracker Maximum Output Power)：設定最大輸出功率百分比。default 值為 100 %，最大/小值為 100/0 %。
- PPT Enable(Enable Peak Power Tracker)：default 為 1 (On)，0 為 Off。
- PPT Rate(Power Tracker Rate)：power tracker 增減參考電壓之間隔時間，default 值為 0.5 秒，最大/小值為 50/0.1 秒。
- PPT V Step(Power Tracker Step)：power tracker 增減參考電壓之每一步之變化值，default 值為 1 V，最大/小值為 10/0.1 V。

如下面圖六所示為 MPPT 工作情形。當進入 Power Tracking 模式後 60 秒，不論實際 PV 電壓值為何，PV 電壓將調至” PPT V Ref” (400V)。如” PPT Enable” 設為” 0”，則改變太陽光電陣列輸出電流，以維持此參考電壓；如” PPT Enable” 設為” 1”，則每隔” PPT Rate” 時間，以” PPT V Step” 改變降低 PV 電壓，此時 MPPT 將比較總輸出 AC 功率是否增加。如果是，在下一” PPT Rate” 會朝同一方向(降低)改變 PV 電壓；如為否，在下一” PPT Rate” 會朝相反方向(增高)改變 PV 電壓。MPPT 會持續這種” stepping and comparing” algorithm，以追求太陽光電陣列最大功率。

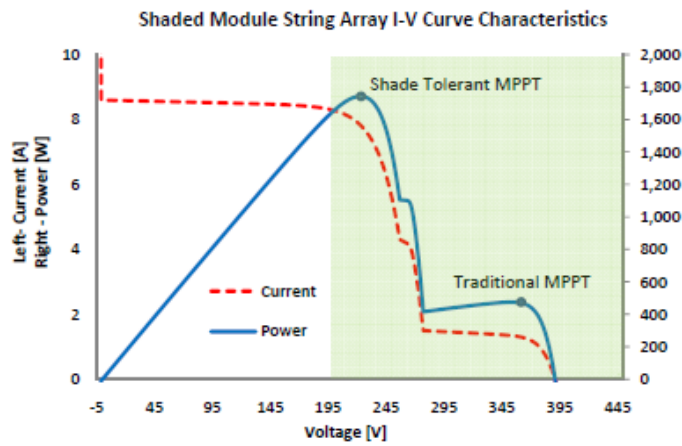


圖六、Maximum Peak Power Tracking

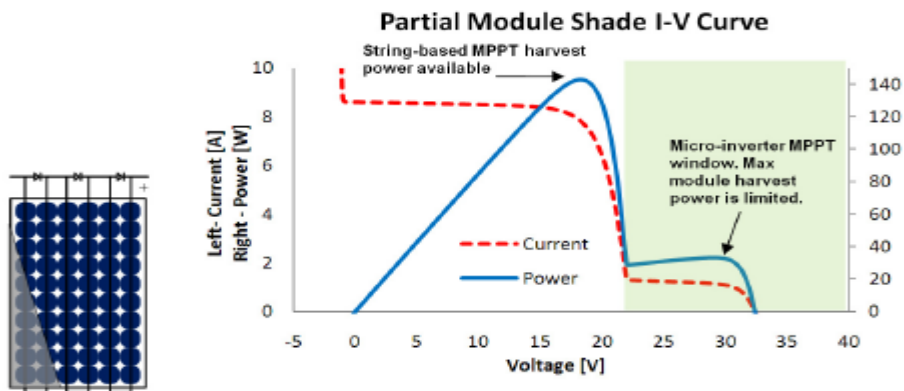
(三) 太陽光電板局部遮蔭之最大功率追蹤(Shade-Tolerant MPPT)：

如果太陽光電板局部被建物或樹木遮住，此時使用傳統之 MPPT 將找到總輸出功率落在局部高點之 MPP，而非 global 最高點。如圖七所示，inverter 運轉在 220V 比用傳統 MPPT 取得之 360V V_{mp} 可明顯獲得更多輸出。要解決此種遮蔭問題，一種是使用多個 micro-inverters 於個別模組階層就執行 MPPT，稱為

micro-inverter/module-based MPPT。如圖八所示，為一使用 60 cells 之次模組受遮蔭影響之 I-V 曲線，部分照度只有其他未被遮住者 15%。Schneider Electric 發展另一種 algorithm，稱為 shade-tolerant string based MPPT，使用該公司之 Fast Sweep™ 技術可以快速找到 global MPP，且不會降低原來傳統 MPPT 之靜態及動態效能。表三係說明三種 MPPT algorithm 在有所遮蔭下可獲得最大輸出功率之比較範例。



圖七、Shade-Tolerant MPPT & Traditional MPPT



圖八、Partial Module Shade & Micro-inverter MPPT

	Traditional String-based MPPT				Micro-Inverter / Module-based MPPT				Shade-Tolerant String-based MPPT			
Individual Module	28	45	45	45	30	120	219	219	-9	139	219	219
Operating Point	28	39	45	45	30	39	219	219	-9	139	219	219
Power (W)	28	39	45	45	30	39	219	219	-9	139	219	219
Total Harvested Power (W)	475				1599				1702			

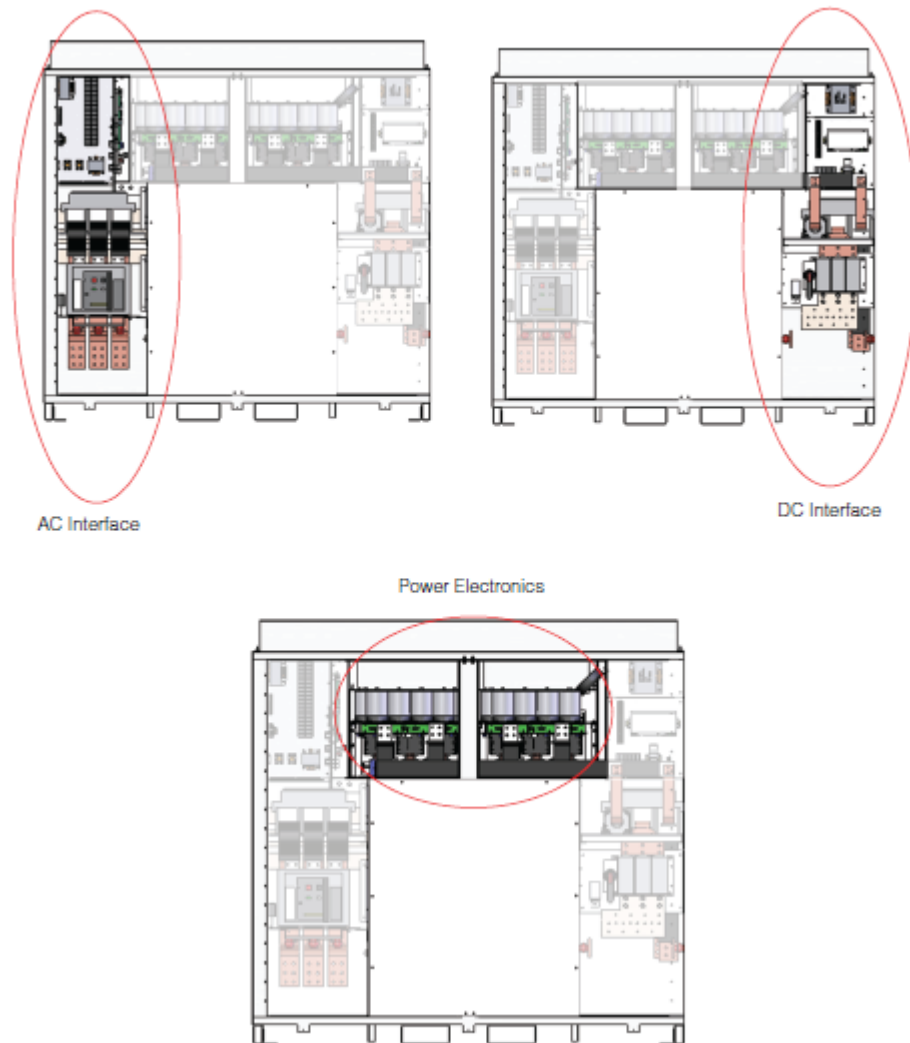
表三、不同方式 MPPT 所獲功率輸出比較

(四) Xantrex GT Inverter 系統架構及工作原理

Xantrex GT Inverter 因容量大小不同機型而架構有些許差異，但大部分是統一設計有其標準 layout，具有防止孤島運轉、自動三相相位旋轉(A-B-C 順時鐘)及 local 顯示、remote GUI 介面等高階設計功能。100kWp 機型之隔離變壓器是在 inverter 盤體內，250kWp 及 500kWp 型則需外加隔離變壓器，所有隔離變壓器在 inverter 側皆為 AC 60 Hz，線電壓 208V，Y 接，中性點不接地(以免 inverter 受損)。如圖九，其架構主要可分為三大部分：

- AC 介面
- DC 介面
- 電力電子部分

其他尚有顯示裝置、使用者操作介面及濾波等部分。



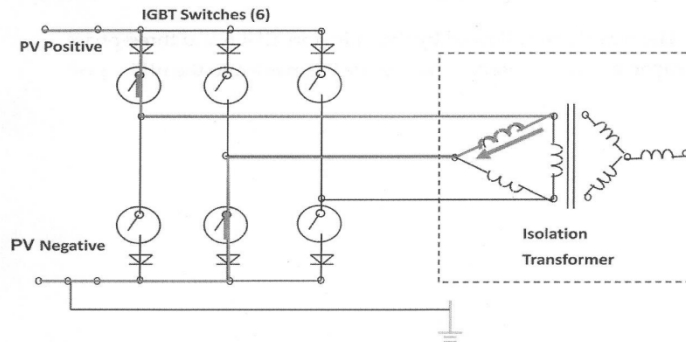
圖九、Xantrex Inverter Main Enclosure Interfaces

AC、DC interface 包括 AC、DC 接線端(TB1-A,-B,-C 連接至隔離變壓器及電網；TB3,4,5 連接至太陽光電陣列)，AC、DC 電磁接觸器 K1、K2，AC、DC 突波吸收器 SA1、SA2，AC、DC 偵測電路、控制電源變壓器、保險絲，AC 斷路器 CB1、固態繼電器 SSR1~3，以及維修時需隔離 PV 電力之 DC 隔離開關 S1。

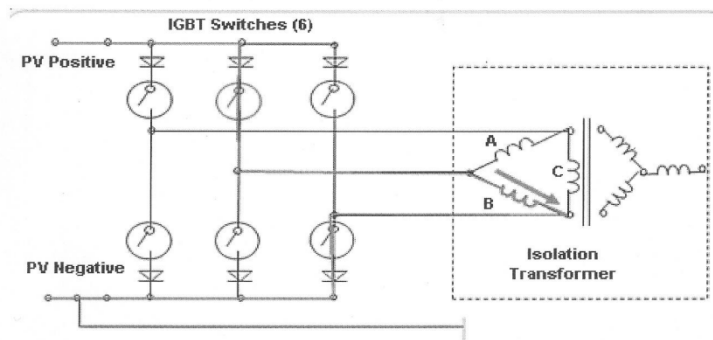
電力電子功能為將由太陽光電陣列之 DC 電力轉換為 AC 波型，主要元件有兩個電力矩陣，每個為由兩兩一組共 6 個 Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBT)組成。每個電力矩陣具有 3 個 CT 以偵測各 IGBT。下圖十說明電力矩陣之三相 inverter bridge 在 CCU 透過驅動模組使一對 IGBT 導通，經由隔離變壓器之一相繞組產生電流，接著再讓此對 IGBT OFF、另一對 IGBT 導通產生另一相電流，Converter Control Unit (CCU)持續依此順序空制 IGBT，以產生與電網同相位之交流電。

Three-Phase Inverter Bridge

Phase A sine wave generation

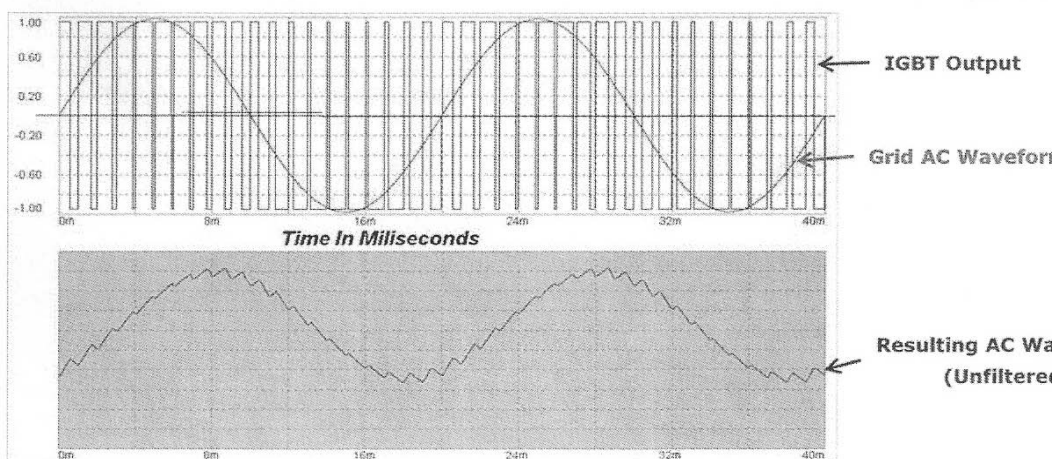


Phase B sine wave generation



圖十、Three-Phase Inverter Bridge

High Frequency PWM output



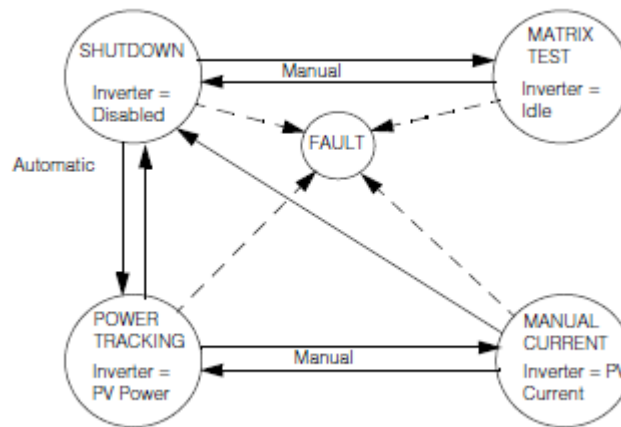
圖十一、High Frequency PWM Output

電力矩陣之輸出為 Pulse Width Modulation (PWM) AC 波型，此種 PWM AC 波為具有鋸齒狀之不完整正弦波，如圖十一所示，需再經六個電感器 L1~L6 及一個三相電容器 C1 濾波後，可輸出高品質之 AC 正弦波至電網。

(五) Xantrex GT Inverter 系統狀態及運轉流程

如圖十二，Xantrex GT inverter 共有五種穩態運轉及數個中間轉移狀態，分別說明如下：

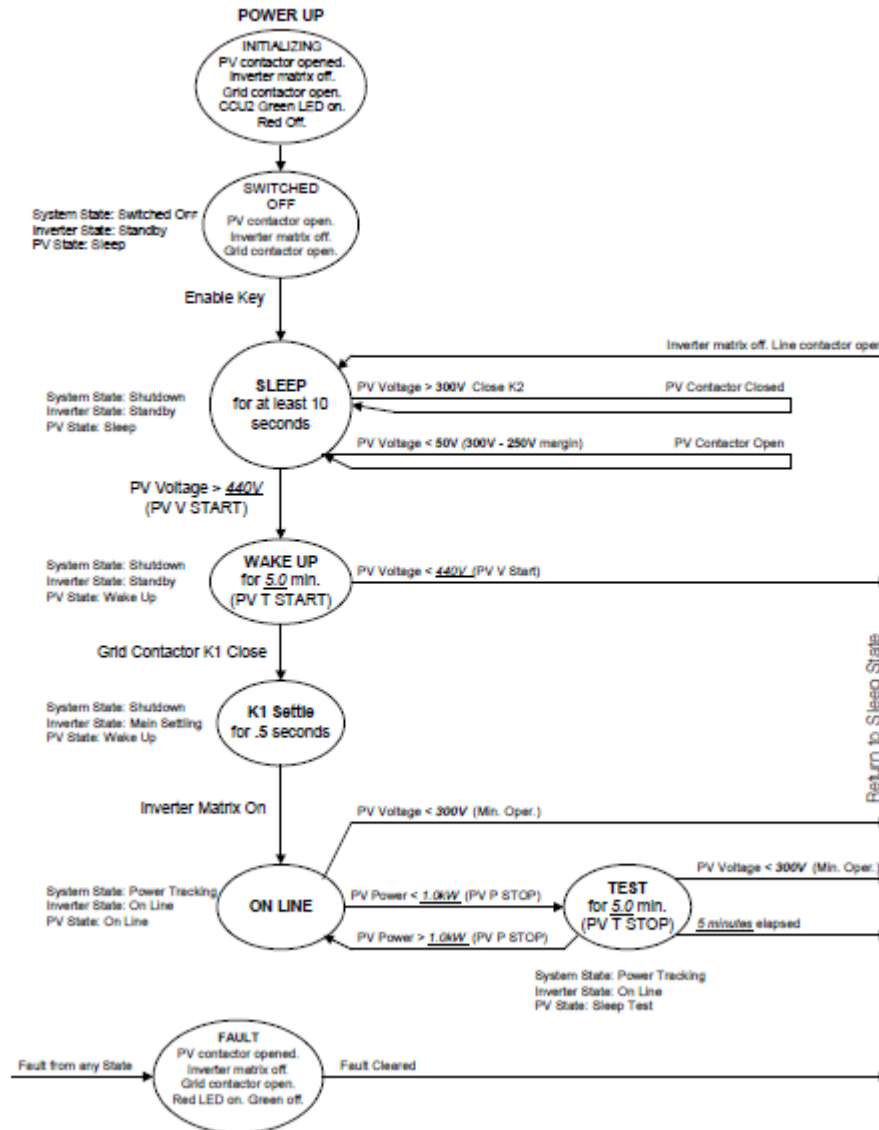
- Power Tracking 電力追蹤：系統標準運轉狀態
- Shutdown 關機：系統停止，等待直到太陽光電陣列能開始產生電力
- Fault 故障：系統偵測到故障情形而停止產生電力
- Manual Current 手動電流：用於評估太陽光電陣列電壓及電流特性
- Matrix Test 電力矩陣測試：用於測試電力矩陣及相關控制電路之動作
- Transition 狀態轉移：由一個狀態轉換至另一狀態過程
- Automatic Sleep Test 自動休眠測試：系統決定一天最後何時停止產生電力



圖十二、GT Inverter 狀態轉換圖

圖十三為運轉流程圖，圖中粗體字表示系統參數，斜體字表示可以由使用者設定，有底線之數字表示系統 Default 值。當系統 Power on 後進入初始化及 Switched Off 狀態，如按下 Enable，系統進入 Shutdown 狀態，PV State 為 Sleep。直到 PV V 電壓大於 300V，PV Contactor K2 Close，大於 PV V START (default 440V)，PV State 進入 Wake Up 狀態，5 分鐘後如仍大於 440V，Grid Contactor K1 Close 0.5 秒後，Inverter Matrix On，系統進入 Power Tracking 狀態，Inverter 及 PV 皆為 On Line。當 PV 電壓小於 300V 或輸出功率小於 1kW 持續五分鐘，PV State 回到 Sleep 狀態。於任何狀態

下有故障發生，PV Contactor K2 Open，Inverter Matrix Off，Grid Contactor K1 Open，直到故障排除後回到 Sleep 狀態。



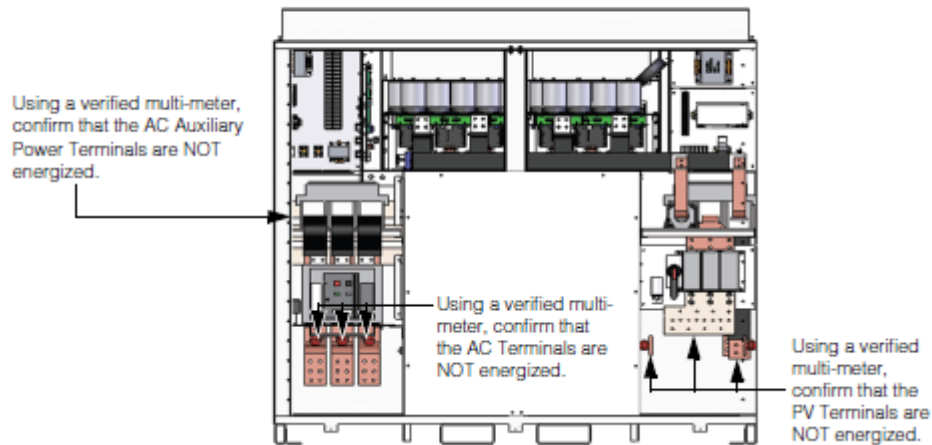
圖十三、GT Inverter 運轉流程圖

(六) 安全注意事項及故障排除

外國原廠對工作安全一項極為重視，且都已形成文化並落實執行。如第五、六頁之相片，上課講師原來是左耳戴一只耳環，到工廠實習當天不只換工作服、安全鞋，並將手錶、耳環取下。在現場配線或測試人員，亦皆隨時配戴安全眼鏡。執行

Inverter 維修測試，至少 2 人一組，人員需經專業序訓練，取下手錶、耳環、戒指及項鍊，準備安全眼鏡、安全帽、耳塞、絕緣鞋、絕緣手套、皮手套、接地棒、停電鎖及標籤、AC 及 DC 1000V 以上電錶等安全配備，並依一般作業停電、驗電、掛接地、掛卡上鎖。特別注意 Inverter 內停電後需等電容放電完，時間 5 分鐘，如圖十四為維修前需確認已未帶電之接點位置。

Safety



圖十四、需確認未帶電之接點位置

Schneider Electric 之 Xantrex GT Inverter 發生故障時會自動停機，並將 16 進位之故障碼與簡述顯示於 VFD。故障如為下列一些電網擾動或進氣溫度過高，在確認並排除後，inverter 系統會自動清除故障碼及回復正常狀態；當為其他故障時，必須確認並排除後，利用 UFCU 按鍵手動清除錯誤碼。新型 inverter 並提供資料及圖形紀錄，對故障原因查明，是項方便有效工具。

- 0010 (AC Frequency Low)
- 0090 (Fast AC Frequency Low)
- 0011 (AC Frequency High)
- 0012 (AC Voltage Low)
- 0092 (Fast AC Voltage Low)
- 0013 (AC Voltage High)
- 0093 (Fast AC Voltage High)
- 0015 (Grid Disconnect)

參、實習之感想與建議

此次有機會奉派前往美國、加拿大實習，並順利完成任務返國，除了要感謝各級長官外，對於各相關單位同仁，無論是事前提供參考資訊，以規劃出國行程，或協助辦理各項相關手續，在此特別表達感謝之意。

基於此次實習及接觸太陽光電系統後，職有以下點淺見：

- 一、不論是太陽光電系統之 Inverter，風力發電機組之 Converter，皆為其核心。所使用如 IGBT 或其他種類電力電子元件，非常重要，故障情形亦不少。建議本公司專業人員應在傳統電機及儀控外，多加強培養或引進具電力電子方面專業人員。
- 二、目前公司太陽光電 Inverter 已有多種廠牌、機型，維修人員技術培養不易，尤其是國外製造者，維修備品之準備、取得亦較困難，對於後續運維，尤其是保固期過後，應整體考量、及早因應。
- 三、在原廠實習，除了課程解說，尚有與真實設備一樣之模擬機，可以實際操作甚至模擬問題，做為 trouble shooting 訓練。選擇部分核心課程參加原廠訓練應是有其必要；雖然訓練費用高，但相對可降低故障率、減少檢修時間、提高可用率，應是值得。如果限於公營事業體制，出國訓練預算有限，在建廠規範合約即包括原廠訓練費用應是可行。
- 四、不論是太陽光電系統、風機，或其他發變電設備，各項維修作業皆有其獨特性。除了購置齊全之安全護具及設備，接受原廠或在台灣之 HSE (health & safety education) 訓練亦是所有參與運轉、維修人員必要之訓練。