

出國報告（出國類別：實習）

太陽光電電力調節器 (Inverter)維修技術研習

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：胡澄讚 自動控制課長

何鴻維 電機工程師

派赴國家：德國、義大利

出國期間：100年08月14日至100年08月27日

報告日期：100年10月19日

QP - 08 - 00 F04

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 29 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

胡澄讚/台灣電力公司/電力修護處/儀電組自動控制課長/(02) 27853199ext207

何鴻維/台灣電力公司/電力修護處南部分處/電機工程師/(07) 2510195 ext550

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：100.08.14 至 100.08.27

出國地區：德國、義大利

報告日期：100.10.19

分類號/目：G3/電力工程

關鍵詞：太陽光電池模組(Photo Voltaic Module)、電力調節器(Inverter)

內容摘要：(二百至三百字)

全球再生能源正蓬勃發展，太陽電池模組和電力調節器是太陽光電系統中之二大重要核心。太陽電池模組為半導體材料，將輻射能轉為直流電能，再透過電力調節器轉換為交流電能，併入電網系統，提供太陽光發電。未來太陽光電系統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，維修技術日益重要，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。目前國內有關電力調節器之技術發展，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)和 Power One 公司，研習電力調節器設計原理和維修技術。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://open.nat.gov.tw/reportwork>)

報告目次

壹、出國目的	1
貳、出國過程	2
一、Schneider(Xantrex)Inverter 研習過程	3
二、PowerOne Inverter 研習過程	7
參、出國研習內容	10
一、太陽光電池的特性和最大功率追蹤	10
二、電力調節器(Inverter)的架構與原理	15
三、太陽光電系統的設計與控制原理	20
肆、出國心得與建議	26
伍、參考文獻	29

壹、出國目的

出國緣由：地球暖化問題日益嚴重，從京都議定書開始，全球皆在研擬如何降低二氧化碳排放的方案，又適逢今年日本福島核災問題之影響，引起普羅大眾對核能發電安全之疑慮，於是各國政府更積極著手於節能減碳計畫，更將再生能源推廣最大化。台灣電力公司身為台灣的龍頭電業公司，推動綠色能源政策更是國家先驅，從西濱沿海風力發電到各地的太陽光電系統，一點一滴增加再生能源裝置容量，並累積其相關維護保養經驗。太陽光電系統則由小容量示範站開始起步，如花蓮和台東營業區處之 15KWp 太陽光電系統，到大容量興達電廠永安鹽灘地 4636KWp 太陽光電系統，預計於民國 100 年建置完成 10MWp 裝設容量。而電力調節器是太陽光電系統中之核心新技術，其原理是運用於交直流電能轉換，一旦電力調節器發生故障，將影響整個太陽光電系統發電，因此必需建立自主之維護能力。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。

出國目標：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時程與費用，達到太陽光電系統之發電效益。

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，因此有必要派員赴 POWER-ONE 公司和 Schneider(Xantrex)公司等原廠家，研習電力調節器設計原理及維修技術，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。

貳、出國過程

日期	地點	行程內容	天數
08/14 ~ 08/15	台灣 至 德國 柏林	台灣 => 德國 法蘭克福機場 =>柏林	2 天
08/16 ~ 08/20	德國 柏林	太陽光電電力調節器(Inverter)維修技術研習 1、Schneider(Xantrex) Inverter 介紹：。 2、Inverter 設計架構和原理：。 3、Trouble Shooting 討論：。 4、太陽光電系統建置現場介紹：。 5、Turnkey Solution 預防維護保養：。	5 天
08/21 ~ 08/24	義大利 Terranuova Bracciolini,Arezzo	太陽光電電力調節器(Inverter)維修技術研習 1、Power One Inverter 介紹：。 2、Inverter 設計架構和原理：。 3、Inverter 生產流程介紹：。 4、停車棚太陽光電系統現場介紹：。 5、Trouble Shooting 討論：。	4 天
08/25 ~ 08/27	義大利 至 台灣	義大利 => 德國法蘭克福(駐留一晚) =>法蘭克福機場 =>台灣	3 天

一、Schneider(Xantrex) Inverter 研習過程

1 Inverter 設計架構和原理：Inverter 的核心為 IGBT Module，配合前端直流側的接觸器(contactor)和 EMC(電磁兼容性濾波器)，以及後端交流側的接觸器，低通濾波器，和隔離變壓器等組成，並由韌體組成的控制電路、監控和數據收集，如圖 1~2 所示。

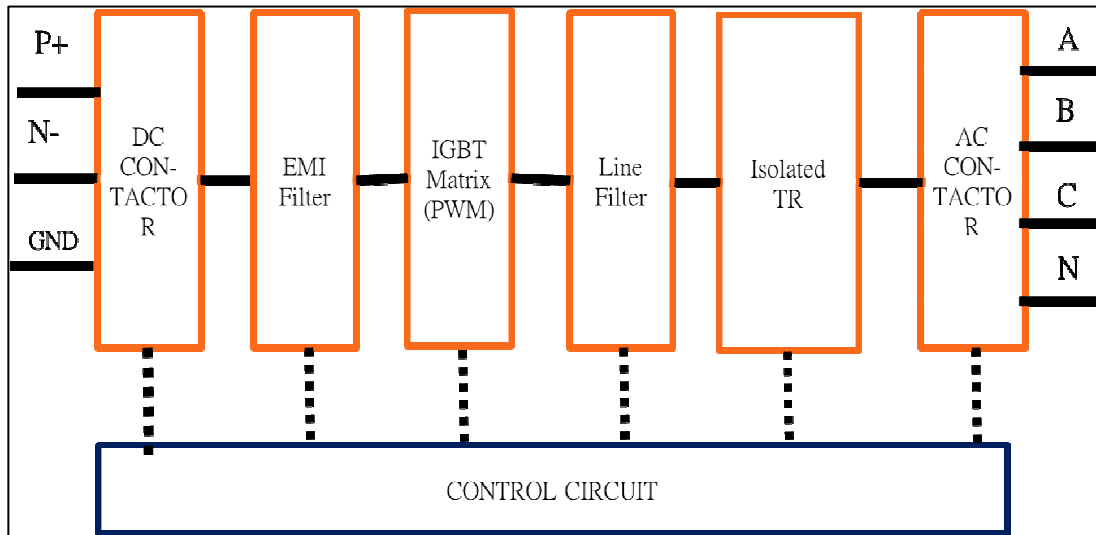


圖 1-1 Inverter 方塊圖

2 Schneider(Xantrex) Inverter 介紹：

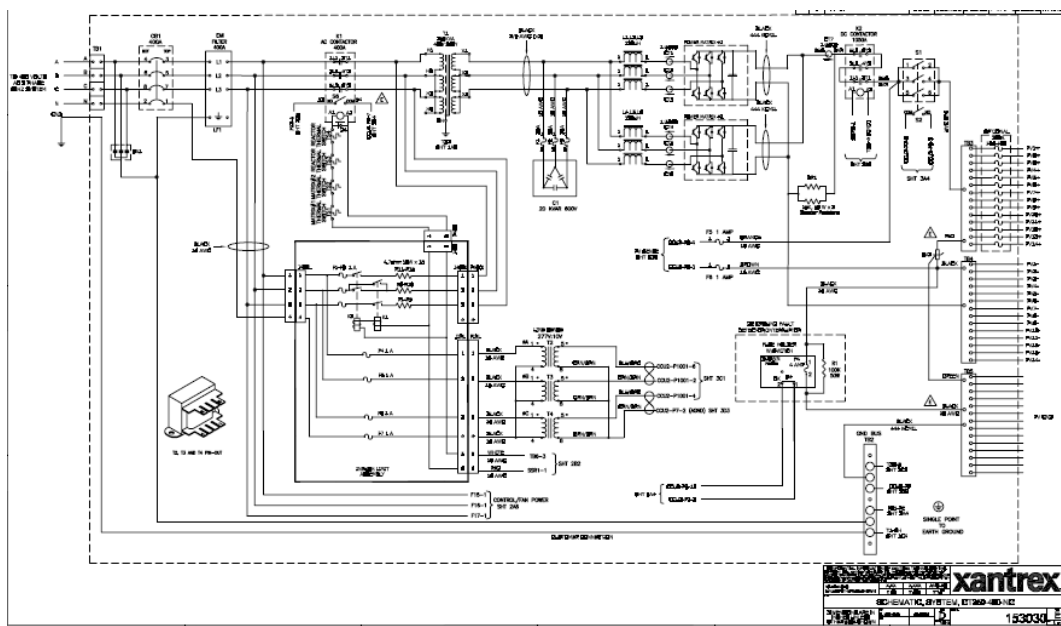


圖 1-2 Schneider(Xantrex) Inverter GT-250

2.1 重要元件如下：

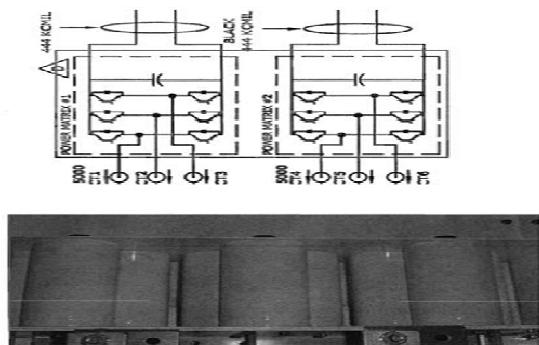


圖 1-3 穩壓電容器

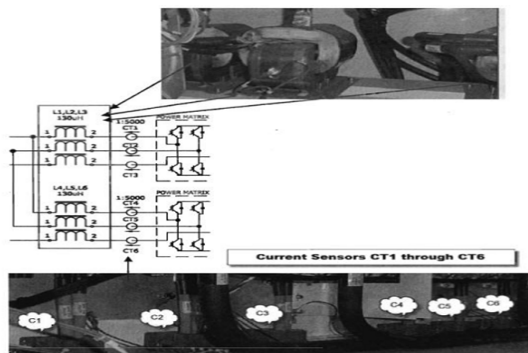


圖 1-4 電感 L1~L6

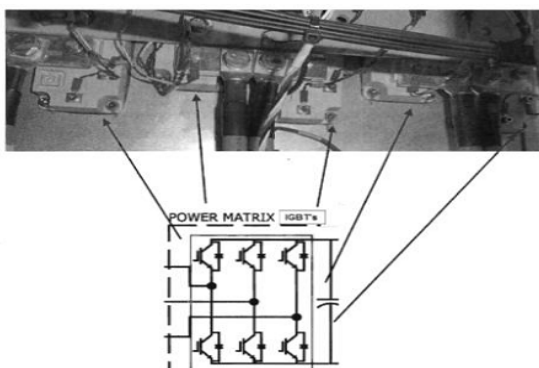


圖 1-5 IGBT Module

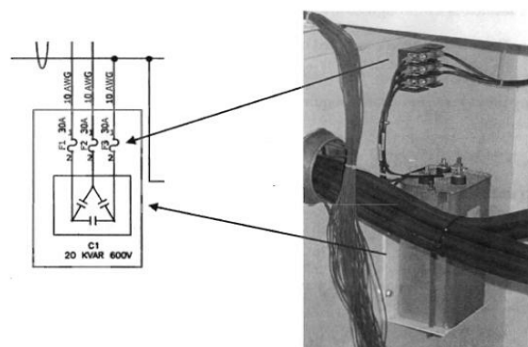


圖 1-6 電容 C1

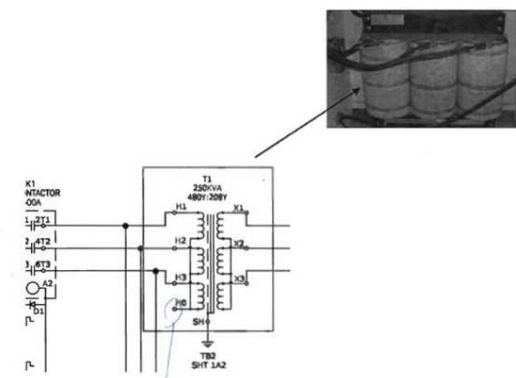


圖 1-7 隔離變壓器 T1

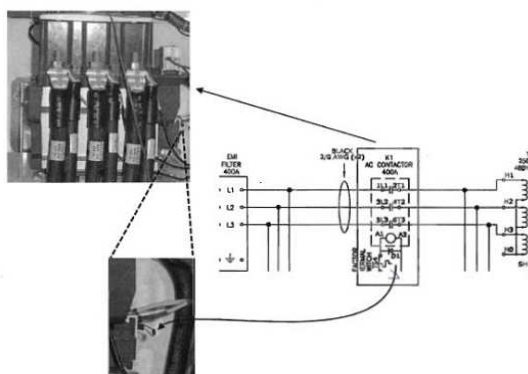


圖 1-8 交流接觸器(AC Contactor) K1

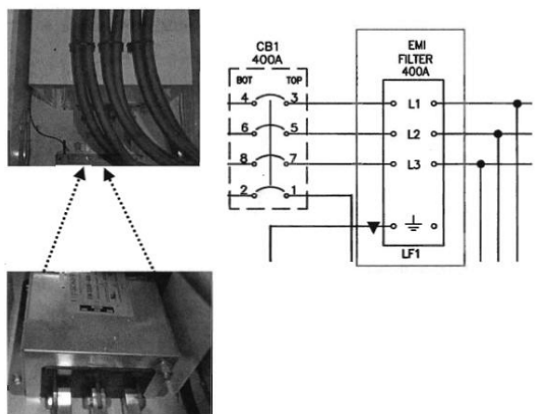


圖 1-9 EMI Filter F1

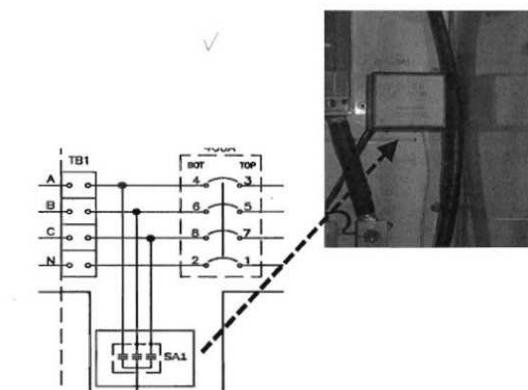


圖 1-10 突波收吸器(Surge Arrestor) SA1

3 Schneider(Xantrex) Inverter 特性：

3.1 孤島效應預防(Anti-Islanding)：市電網路因故電力中斷，若太陽光電系統未及時偵測，持續供電，會造成負載電壓不穩定，電器設備損壞，系統維修人員有感電的危險。

3.2 流入限制的保護(Inrush Limiting)：當併聯斷路器突然跳脫時，隔離變壓器會因失去電壓而釋放能量，灌回前端直流側。

3.3 與發電機相似的保護：包含自動偵測欠相，並校正相位。過(欠)電壓保護，過(欠)頻率保護，以及無效電力控制系統。

4 太陽光電系統建置現場介紹：目前台電公司有二處太陽光電系統場使用 Xantrex 的 Inverter，一為台中發電廠生水池，裝置容量 1.5MW，使用型號為 GT-100-480。二為永安鹽灘地，裝置容量 4.6MW，使用型號為 GT-250-480，主要模組如圖 1-3~圖 1-10。期間，Schneider 公司帶我們參訪即將竣工的太陽光電場(PV Park)。裝置容量 70MW，Inverter 使用型號為 GT630E，如圖 1-11~圖 1-18。

5 Trouble Shooting 討論：可事先利用原廠家的 Trouble Shooting 資訊，先行將 Inverter 故障排除。例如從 VFD 顯示器中得知問題代碼為 0012，即表示 AC 電壓過低，可能原因有三、一市電電壓低於允許值下限，二 PCB 板 F4、F5、F6 保險絲燒毀，三 CCU2 上 P1001 接腳鬆脫。



圖 1-11 Mr.Ernst 的簡報介紹



圖 1-12 太陽電池模組排列



圖 1-13 太陽電池模組和集電箱



圖 1-14 Inverter 組裝過程



圖 1-15 Inverter 吊運至定位



圖 1-16 Inverter Housing



圖 1-17 Xantrex Inverter GT630E



圖 1-18 遠端監控模組

二、PowerOne Inverter 研習過程

1 Power One Inverter 介紹：目前 Power One Inverter 應用於台電公司的金門金沙文化園區，裝置容量 500KW，Inverter 型號為 PVI-CENTRAL-100-US-480，如圖 2-1 所示。以及大潭電廠生水池，裝置容量 640KW，Inverter 型號為 PVI-CENTRAL-300-US-480，其設計架構以 50KW 的 Inverter 為基礎，組成大容量 Inverter，如圖 2-2 所示。

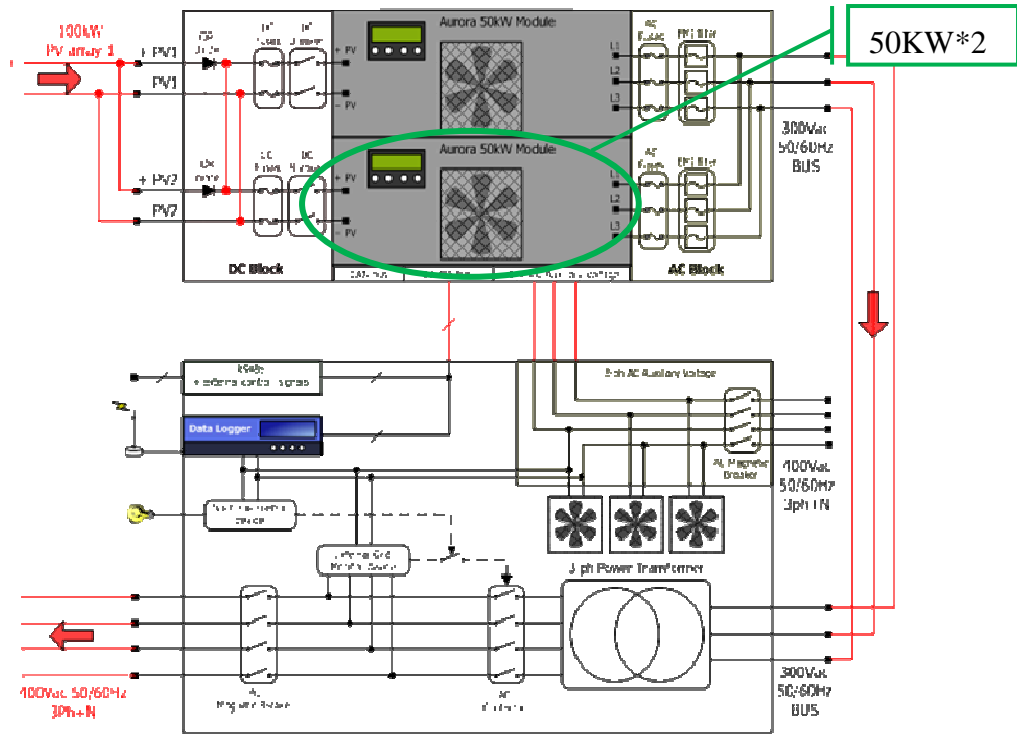


圖 2-1 PVI-CENTRAL-100-US-480 架構圖

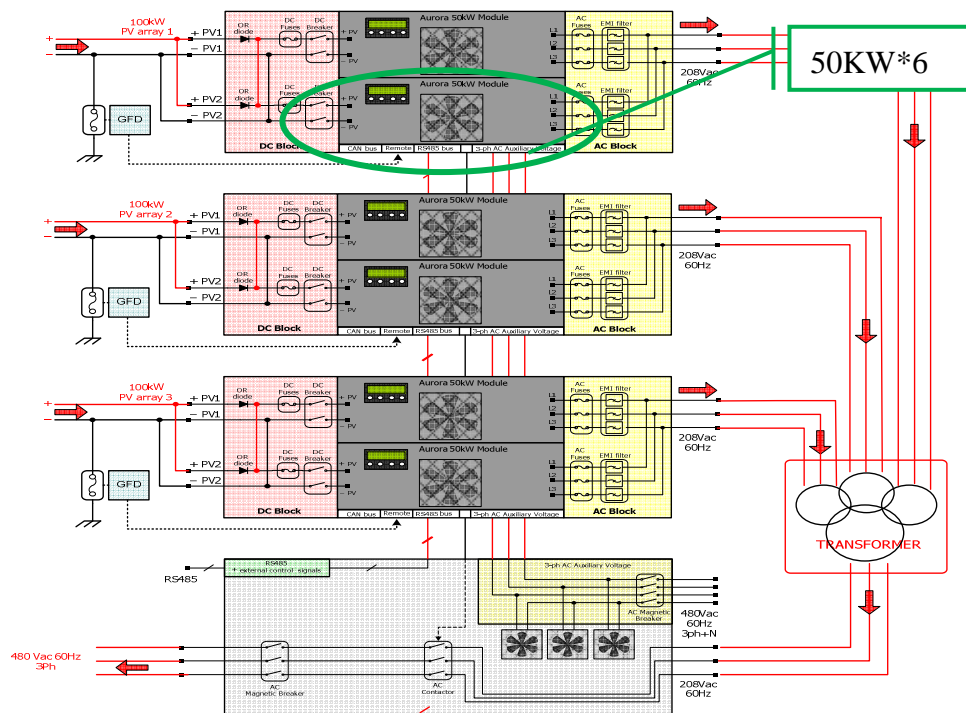


圖 2-2 PVI-CENTRAL-300-US-480 架構圖

1.1 多重 Inverter 設計架構: Power One Inverter 以 50KW 為基礎, 組成大容量 Inverter。

如圖 2-1 PVI-CENTRAL-100-US-480 為例, 若其中一個 Inverter 故障, 最多造成 50KW 的損失, 另一個 Inverter 並不會造成影響。以圖 2-3、2-4 為例, 更可清楚地比較出, 單單設計一只 Inverter, 遇其故障時, 整座太陽光電場皆需停擺, 無法將電能送至市電網路。若使用多重 Inverter 的設計架構, 只會損失某部分的電能, 依然可正常輸送電能。

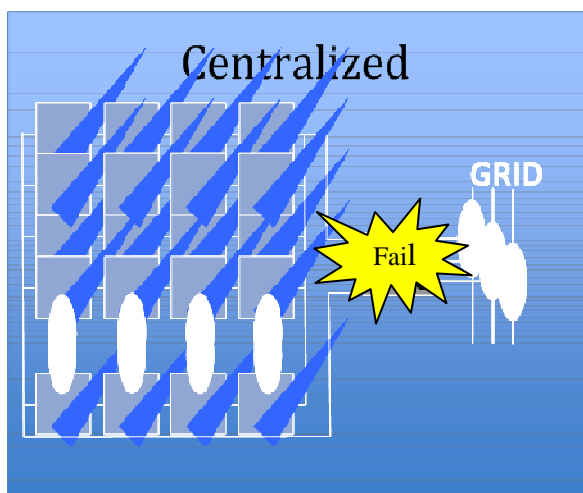


圖 2-3 單一 Inverter 設計架構

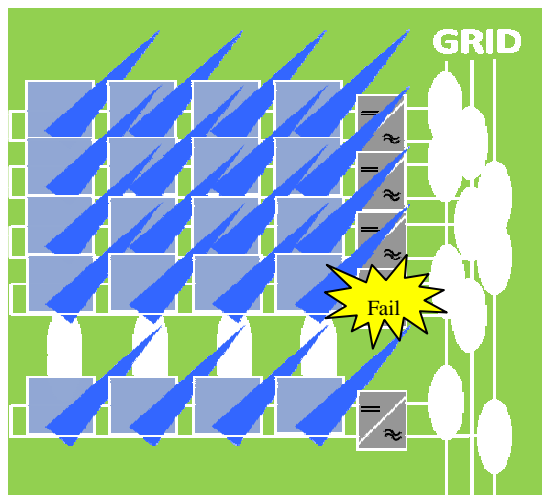


圖 2-4 多重 Inverter 設計架構

1.2 生產線流程介紹: 因為使用 50KW 的模組為基礎, 生產線的主力並可放在此模組上, 再依客製化容量的不同, 組裝成一較完整的 Inverter。這樣的設計理念, 大幅減少不同規格電子元件的使用, 降低庫存的負擔, 構造如圖 2-5 和 2-6 所示。



圖 2-5 PVI-CENTRAL-100



圖 2-6 客製化不同, 組成不同 Inverter

2 停車棚太陽光電系統現場介紹：利用停車棚建置太陽光電系統，做為一般發電和兼具新產品開發測試之太陽光源，如圖 2-7~2-14 所示。



圖 2-7 Mr.Stefano 的簡報介紹



圖 2-8 PowerOne 公司廠區



圖 2-9 停車棚太陽光電系統-1



圖 2-10 停車棚太陽光電系統-2



圖 2-11 Inverter PVI-3.0-OUTD



圖 2-12 Inverter TRIO-20-TL



圖 2-13 Inverter PVI-12.5-OUTD



圖 2-14 發電量與收購金額的顯示

參、出國研習內容

一、太陽光電池的特性和最大功率追蹤

1 太陽能電池特性：要探討 Inverter 的設計原理之前，首先要了解太陽能電池的特性。太陽能電池可視為一個電流源，其等效電路模型如圖 3-1，輸出電流-電壓特性曲線方程式可表示如下：

$$I = I_l - I_d \left[\exp\left(\frac{V + I \times R_s}{AV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \times R_s}{R_{sh}} \quad (3-1)$$

其中

- I_l ：太陽電池短路電流
- I_d ：逆向飽和電流
- $V_T = KT/q$ ：熱電壓(Thermal Voltage)
- T ：絕對溫度(K)
- K ：波茲曼常數(Boltzman' s constant)
- q ：電子電荷
- A ：理想參數，一般介於 1~2 之間
- R_{sh} ：接面併聯電阻

理想狀態時，若忽略由各種原因所造成而呈現接面不完全的併聯電阻 R_{sh} (一般很大可忽略)，(3-1)可修正為：

$$I = I_l - I_d \left[\exp\left(\frac{V + I \times R_s}{AV_T}\right) - 1 \right] \quad (3-2)$$

藉由改變負載電阻來測定太陽能電池之電流-電壓之特性曲線，從圖 3-2 可看出輸出特性為非線性曲線，並且有一最大功率點 P_{max} 的呈現。

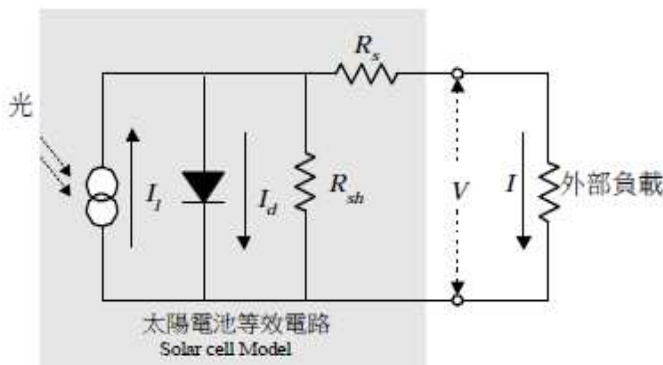


圖 3-1 太陽電池等效電路

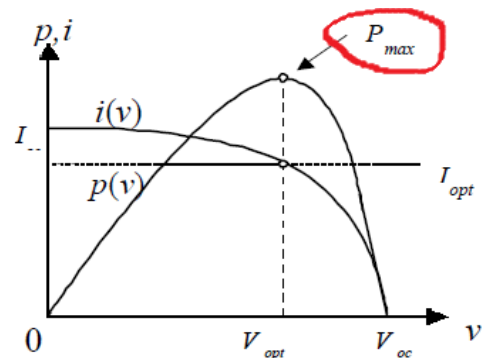


圖 3-2 太陽電池輸出特性

2 最大功率追蹤方式：太陽能電池電壓與電流是非線性的關係，在溫度不同及日照強度不同時，各具有獨特的工作曲線，如圖 3-3~6。而每個工作曲線中，只會有一個最大功率點(Maximum power point,MPPT)，此即太陽光電板的最佳工作點。爲了可以充分提高太陽電池的效率，找尋此點的法則，通稱最大功率點追蹤法(Maximum power point tracking,MPPT)。太陽光電系統最常用的最大功率點追蹤方式，分別有 (1)電壓迴授法、(2)功率迴授法、(3)擾動觀察法、(4)增量電導法、(5)實際量測-開路電壓法、(6)實際量測-短路電流法、(7)直線近似法。目前設備上最普遍採用的最大功率點追蹤方式，則爲擾動觀察法，以下將針對各種不同的最大功率點追蹤法(MPPT)加以介紹。

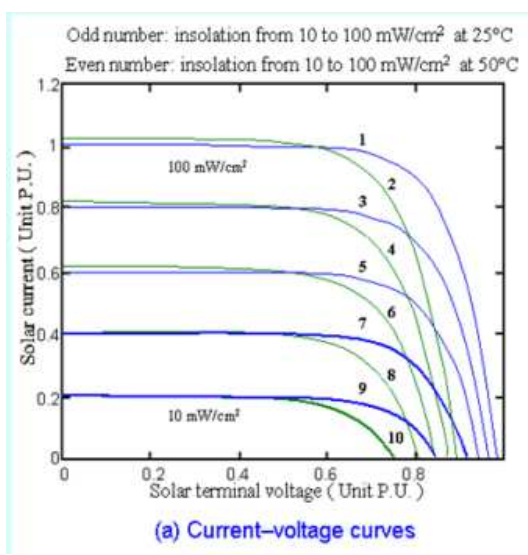


圖 3-3 溫度不同，電流-電壓曲線

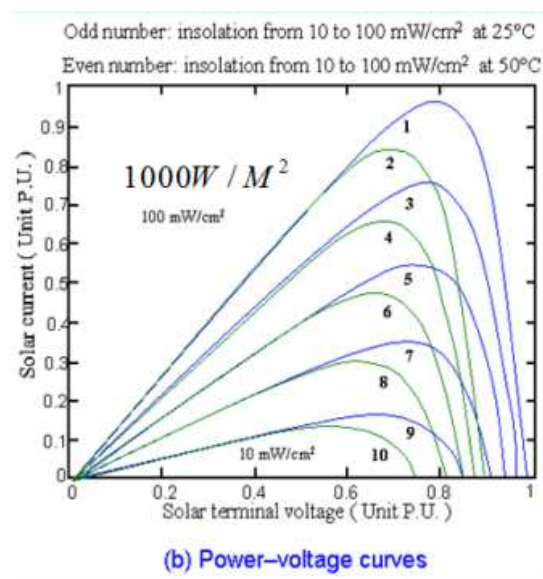


圖 3-4 溫度不同，功率-電壓曲線

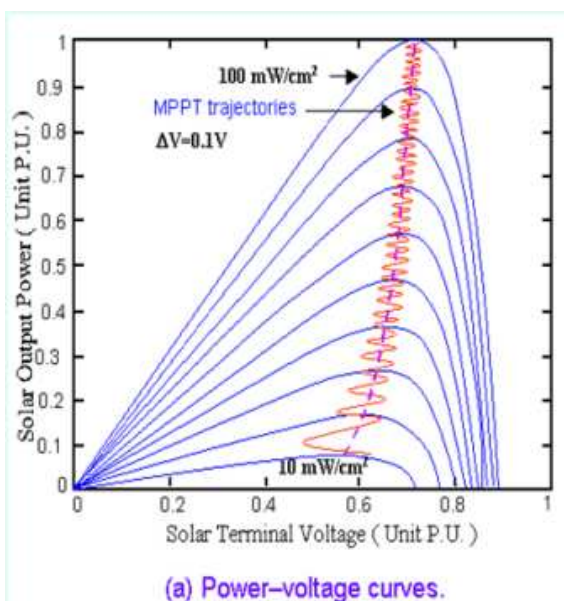


圖 3-5 功率-電壓曲線，最大功率追蹤

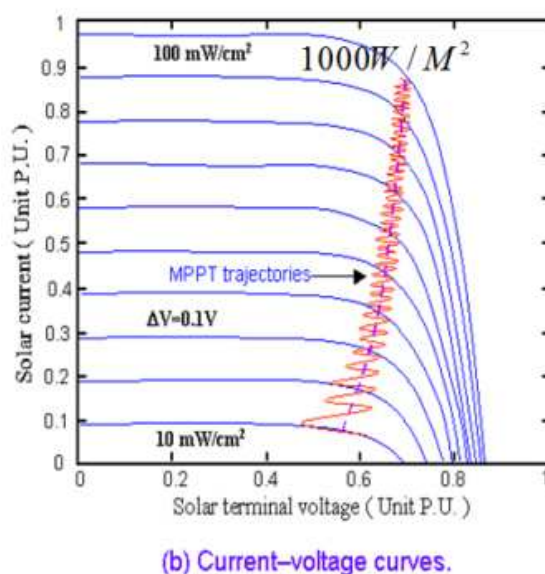


圖 3-6 電流-電壓曲線，最大功率追蹤

2.1 電壓迴授法：可分為固定參考電壓法(圖 3-7)和可變參考電壓法(圖 3-8)。經過事先測試的結果，可得知太陽能電池在某一日照強度及溫度下，最大功率點電壓值 V_{MPP} 的大小，此方法藉由調整太陽能板之端電壓 V_0 ，使其與測試電壓 V_{MPP} 相符，達到最大功率點追蹤的效果。缺點是當日照和溫度等大氣條件改變時，系統不能自動追蹤另一最大功率點。

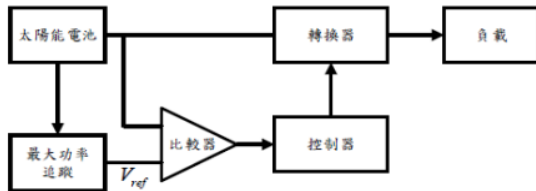


圖 3-7 固定參考電壓法方塊圖

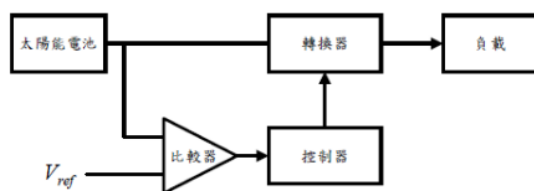


圖 3-8 可變參考電壓法方塊圖

2.2 功率迴授法：電壓迴授法無法在大氣條件改變下自動追蹤到最大功率點，因此功率迴授法加入了輸出功率對電壓變化率的邏輯判斷， $dP/dV=0$ ，即是太陽能電池的最大功率點。此方法需要較複雜的運算過程，但能有效地減少能量損耗並提升效率。

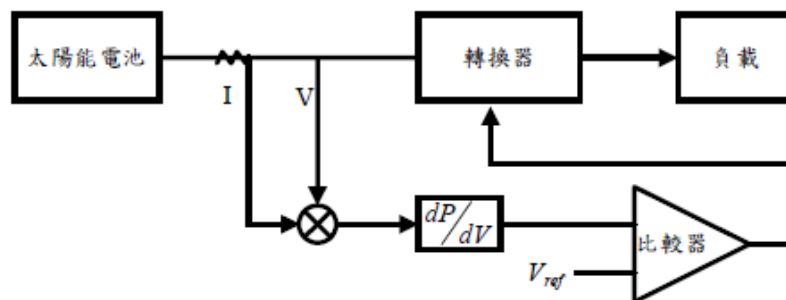


圖 3-9 功率迴授法方塊圖

2.3 擾動觀察法：擾動觀察法迴路架構簡單，控制方法容易，不需要額外使用溫度及日照量感測器，成本低。基本原理為逐步施加太陽電池一些擾動電壓，如果此擾動電壓造成太陽電池輸出功率減少，在下一次控制即適度施加反向電壓擾動以提高太陽電池輸出功率。反之，在下一次的控制時，仍持續適度增加擾動電壓以繼續增加其輸出功率，如圖 3-10 為擾動觀察法最大功率追蹤器之控制流程圖。

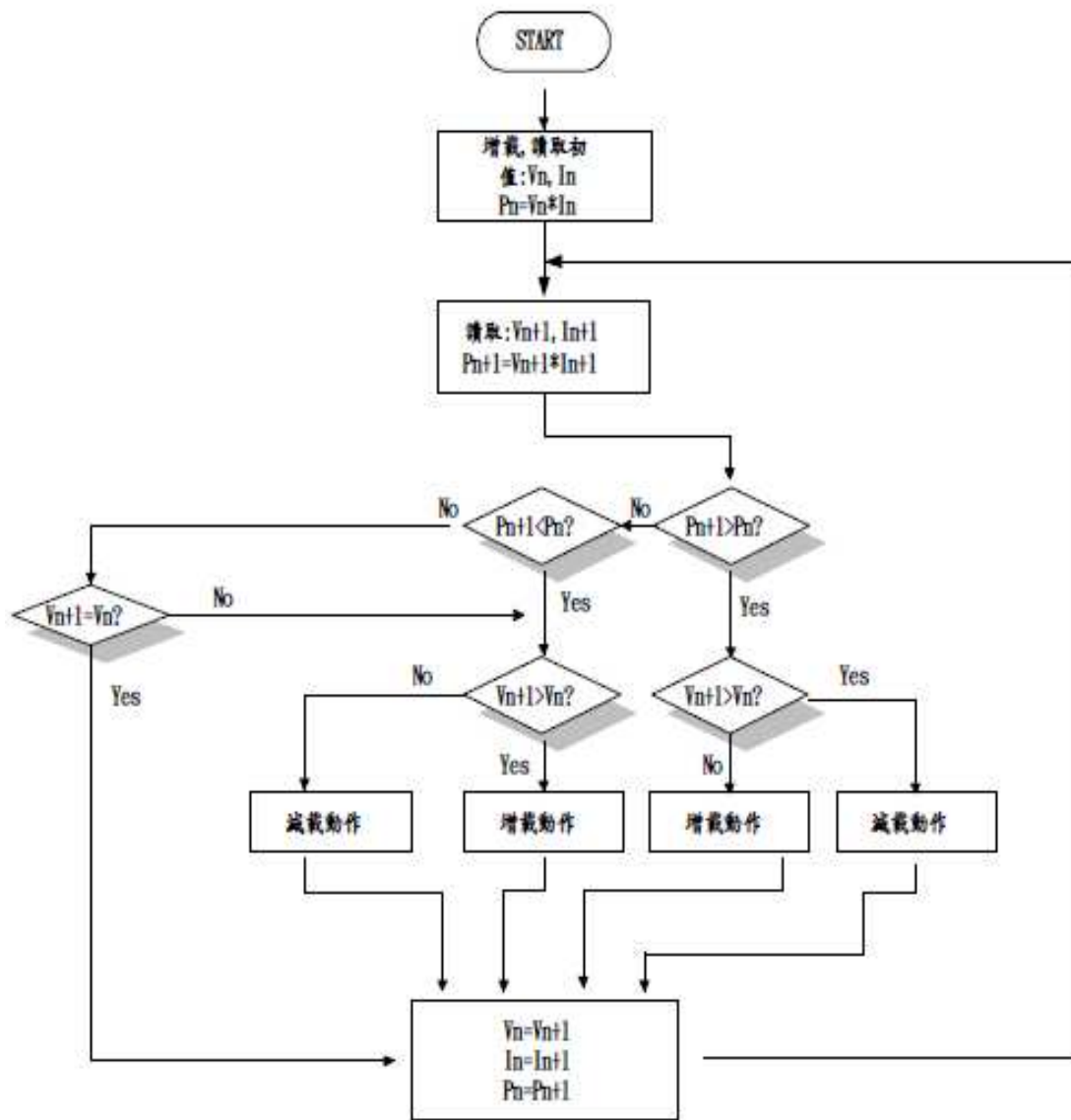


圖 3-10 擾動觀察法 最大功率追蹤的流程圖

2.4 增量電導法：當太陽電池特性曲線在最大功率點左側之定電流區時，其輸出功率與電壓成正比，即斜率 dp/dv 大於 0；最大功率點的右側區，工作特性近似於定電壓，因此其輸出功率近似隨電壓增加而呈線性減少，即斜率 dp/dv 小於 0，故在最大功率點處，其斜率 dp/dv 等於 0，即

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (3-3)$$

由(3-3)式可得

$$-\frac{dI}{dV} \Big|_{V=V_m} = \frac{I}{V} \quad (3-4)$$

定義太陽電池之靜態電導 G_s (Static conductance) 及動態電導 G_d (Dynamic

conductance，或稱為增量電導 Incremental conductance)如下：

$$G_s = \frac{I}{V} \quad (3-5)$$

$$G_d = -\frac{dI}{dV} \quad (3-6)$$

當太陽能電池操作在最大功率輸出點($V=V_m$)時

$$G_d|_{V=V_m} = G_s|_{V=V_m} \quad (3-7)$$

因此只要能確實知道當時的靜態電導和增量電導，則可知太陽能電池是否工作於最大功率點。通常只要測得太陽電池的電壓與電流，靜態電導 G_s 即可求得；同理若知道太陽電池電壓及電流微小的變化，增量電導 G_d 也可求得。

2.5 實際量測-開路電壓法：開路電壓法主要是利用太陽能電池開路電壓與最大功率點電壓的近似線性關係如下：

$$V_{MPP} \approx K_1 \times V_{OC} \quad (3-8)$$

其中 K_1 為一比例常數，會隨著日照強度及太陽能電池表面溫度改變，一般介於 0.71~0.78 之間，一旦決定 K_1 ，便可依(3-8)式來決定最大功率追蹤的工作週期，但其最大的問題在於，週期性的量測開路電壓對系統會造成功率率的損失，穩定度降低。

2.6 實際量測-短路電流法：理念和開路電壓法相同，最大功率點的電流和太陽電池的短路電流同時也存在一比例關係。

$$I_{MPP} \approx K_2 \times I_{SC} \quad (3-9)$$

其中 K_2 為一比例常數，亦會隨著日照強度和太陽電池表面溫度改變，一般介於 0.78~0.92 之間。但如何測得短路電流是一大問題。另外，大容量系統，其短路電流相當的大，容易造成設備損毀。

2.7 直線近似法：其基本理念同樣利用 $dP/dV=0$ 的原理，並利用一直線來近似在某一溫度下各種不同日照強度的最大功率點，只要控制輸出電流在此直線上即可輕易地實現最大功率點追蹤。

2.8 優缺點：由於擾動觀察法其架構較簡單，又不會對設備造成傷害。目前太陽光電系統大多使用擾動觀察法。以上七種方法優缺點，整理如表 3-1。

	優點	缺點
電壓迴授法	簡單	系統不能偵測另一點的最大功率，造成能量損耗。
功率迴授法	減少能量損耗，提升效率	較複雜的運算。
擾動觀察法	架構簡單、控制方法容易、成本低	會在最大功率點附近震盪。
增量電導法	減少在最大功率點附近震盪	需要精密的感測器，否則誤差一樣無法避免。
開路電壓法	簡單且具有一定的準確性	量測開路電壓會造成系統的不穩定。
短路電流法	簡單且具有一定的準確性	量測短路電流會造成系統的不穩定，甚至損壞設備。
直線近似法	容易實現，架構簡單，具有一定的準確性	可能因太陽能電池元件的老化，失去其原有的準確度。

表 3-1 最大功率追蹤法律優缺點比較表

二、電力調節器(Inverter)的架構與原理

1 三相 Inverter 架構：

1.1 三全橋三相三線式 Inverter：此型之 Inverter 架構是採用三組單相全橋式逆變轉換器併聯，採用的功率元件數量較多，並且使用三組變壓器，成本較高，如圖 3-11。

1.2 三相三線式 Inverter 結合變壓器型：主要是利用一個三臂的逆變轉換器，取代上述三組單相全橋式的轉換器，優點為架構簡單、控制容易、體積小和重量輕，如圖 3-12。

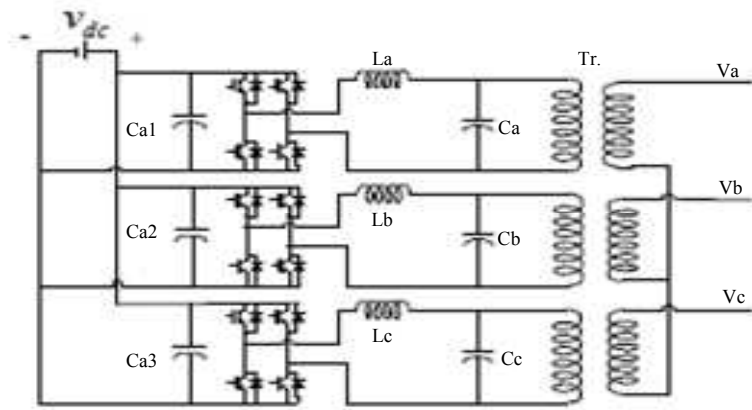


圖 3-11 三全橋三相三線式 Inverter

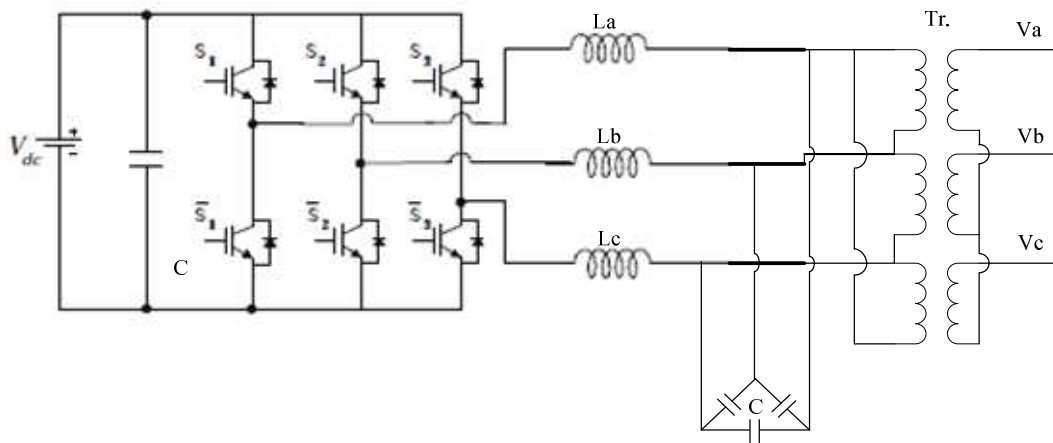


圖 3-12 無輸出變壓器型三相三線式 Inverter

1.3 目前太陽光電系統因考量功能、效率、體積、重量及成本問題，大多使用三相三線式 Inverter 結合變壓器型。然而應用於太陽光電系統必須具備以下特性：

1.3.1 輸入特性方面：由於太陽能電池輸出端之電流-電壓特性是一非線性曲線，根據最大功率轉移定理，所設計之 Inverter 其輸入阻抗要能與太陽能電池之輸出阻抗相互匹配，才能獲得太陽電池之最大輸出功率。但是太陽電池特性亦受太陽照度、溫度影響，因此 Inverter 必須隨著太陽電池特性的變化適當地調整，此即最大功率追蹤控制的重要。

1.3.2 輸出特性方面：太陽光電系統可看成一獨立電流源與市電網路併聯，因此必須與市電電壓同相位、同頻率、且為低諧波失真之弦波電流。

2 正弦波脈寬調變法：正弦波脈寬調變法(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM method)又稱三角波比較控制法，是目前工業上較常用的 PWM 技術。此法利用命令電流 i_u^* 與實際電流 i_u 之誤差量再經比例-積分型控制器計算出電壓命令值 $v_{control}$ ，此值再與一高頻載波信號 v_{tri} 作比較，兩波形相交點來決定功率晶體之切換時機。當控制波大於三

角載波時，功率晶體導通，相反地，若控制波小於三角載波時，功率晶體截止。控制架構簡單，切換頻率固定及電流諧波含量低是此種控制方法的優點，線性範圍不大是其缺點。

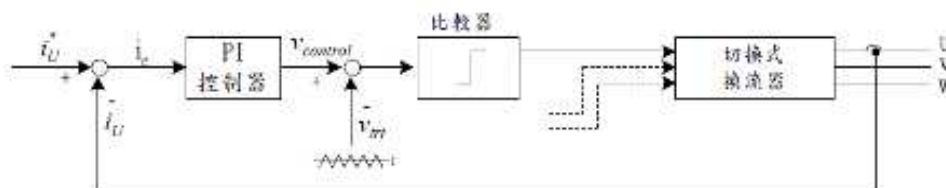


圖 3-13 正弦波脈寬調變法方塊圖

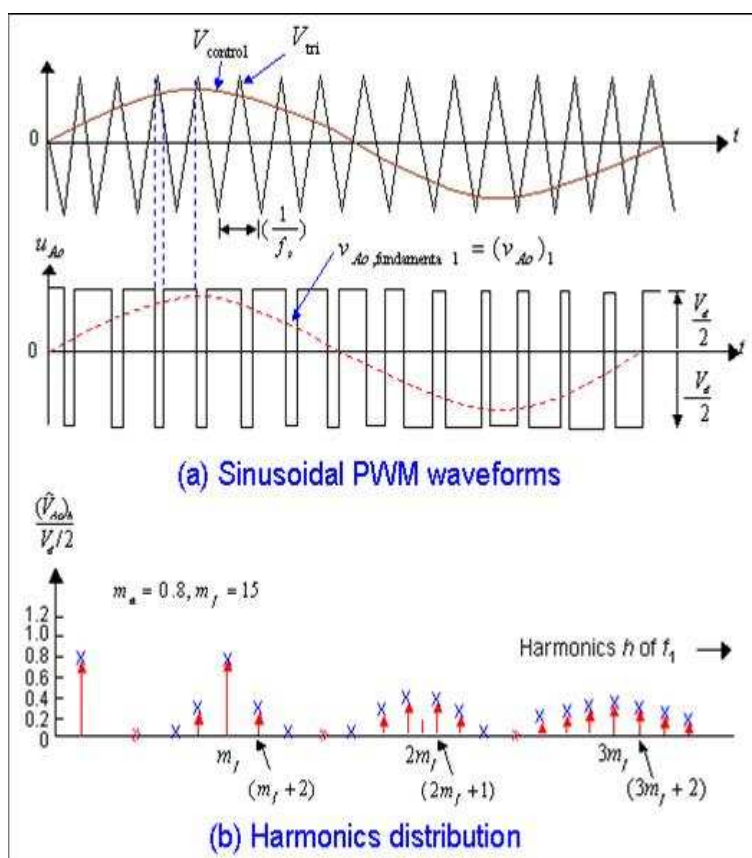


圖 3-14 (a)SPWM 波形 (b)輸出波型諧波強度比較

3 Inverter 工作原理：Inverter 控制信號的調變採用單極式正弦波脈波寬度調變(SPWM)控制技術，如圖 3-13 和 3-14 所示，控制信號為三組平衡之正弦參考信號，其振幅相同，相位差 120 度，與三角波作比較。以二個波形相交點，決定功率元件(IGBT module)切換狀態。當正弦波大於三角波，則該相上臂之開關導通，下臂開關截止，反之則該相下臂之開關導通，上臂開關截止。輸出電壓的大小和頻率由正弦波決定，開關的切換頻率由三角波控制。

另外，須加入導通延遲時間，防止同相上下臂開關同時導通，造成短路。導通延遲時間的取捨會影響低次諧波振幅的大小，為了使總諧波失真減少，縮短導通延遲時間為其必

要，但導通延遲時間若太短會造成同臂功率元件在切換瞬間有短路現象。然而決定導通延遲時間，可由數位信號處理器軟體設定之。

綜合 2、3 所述，正弦波脈波寬度調變方式如圖 3-15，在此定義振幅調變比(Amplitude modulation ratio) m_a ，定義為：

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \quad (3-10)$$

其中

$V_{control}$ ：控制信號之峰值

V_{tri} ：三角載波之峰值

而頻率調變比(Frequency modulation ratio) m_f ，定義為

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (3-11)$$

其中

f_s ：三角載波之頻率，稱為載波頻率

f_1 ：控制信號之頻率，稱為調變頻率

假設控制信號為

$$v_{control} = V_{control} \sin \omega t \quad (3-12)$$

換流器之單臂輸出電壓為

$$v_{UN} = m_a \frac{V_{dc}}{2} \sin \omega t + \text{Bessel functional harmonic} \quad (3-13)$$

當載波頻率夠高時，(3-13)中之貝索(Bessel)函數諧波項經過濾波器後，可忽略不計，三相換流器之各臂輸出電壓大小相同，相位各差 120 度，因此輸出相電壓峰值 V_{UN} 為

$$V_{UN} = m_a \frac{V_{dc}}{2} \quad (3-14)$$

而輸出線電壓之基本波均方根值為 $V_{L-L(rms)}$ 為

$$V_{L-L(rms)} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} V_{UN} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_{dc} \cong 0.612 m_a V_{dc} \quad m_a \leq 1 \quad (3-15)$$

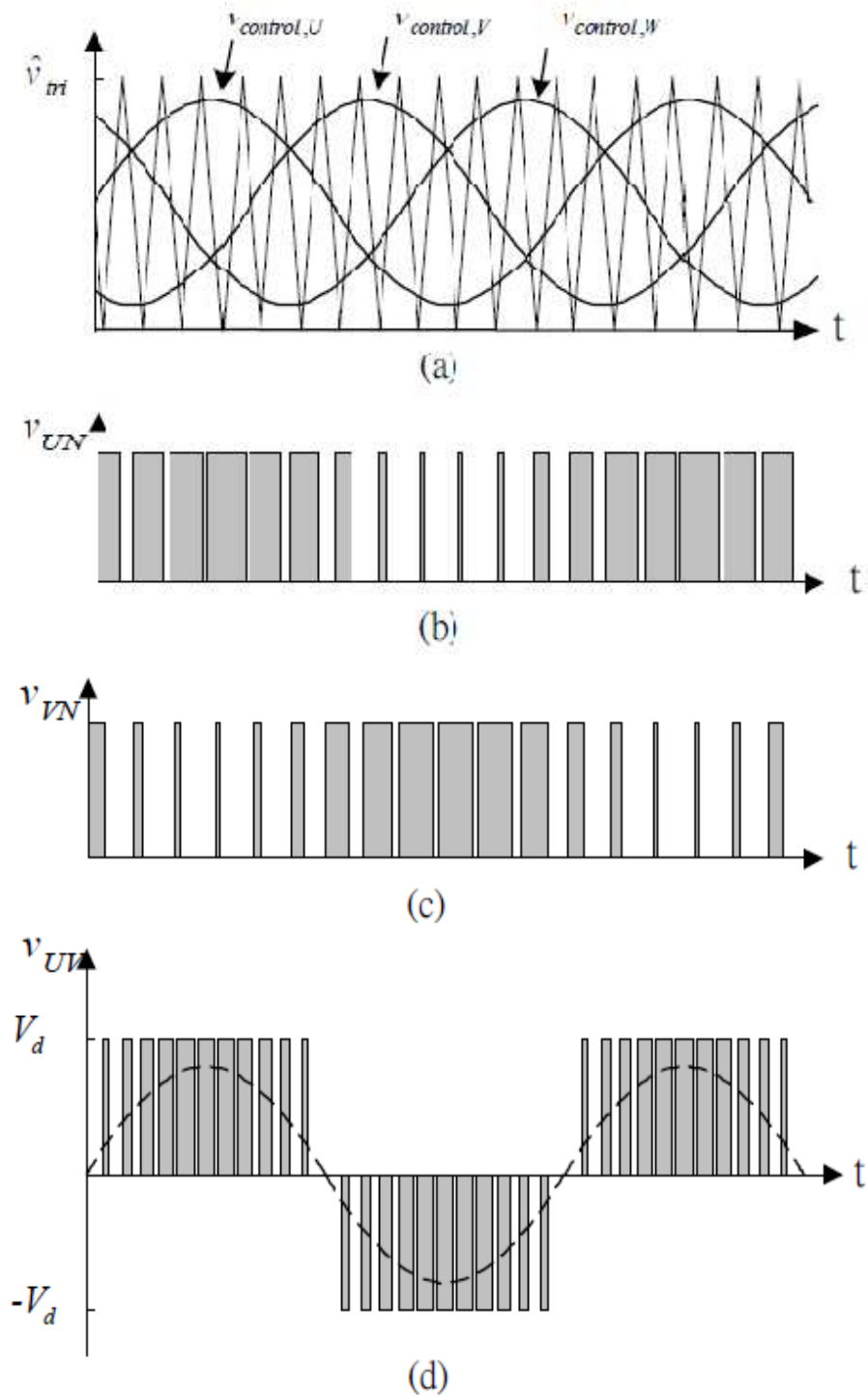
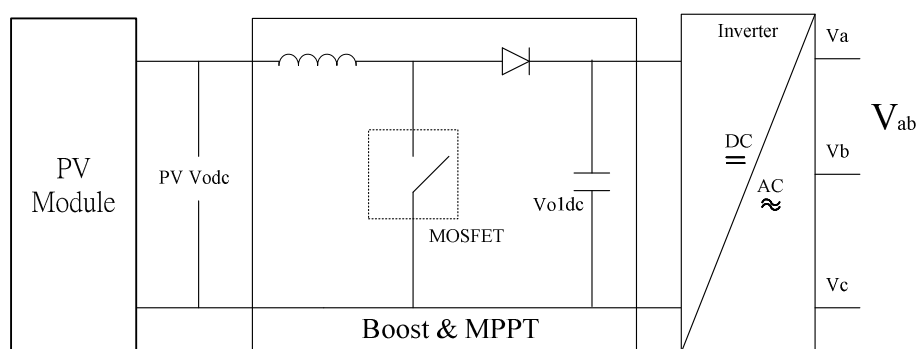


圖 3-15 正弦波脈波寬度調變(a)正弦參考信號及三角波(b)U 相對中性點 N 電壓
(c)V 相對中性點 N 電壓(d)UV 相之線電壓及基本波分量。

三、太陽光電系統的設計與控制原理

1 電力調節器(Inverter)設計架構(小容量太陽光電系統)

小容量太陽光電系統之太陽光電池模組(PV)數少，模組串並聯數較不具彈性，因要與市電並聯必須與有足夠的電壓等級輸出，若 PV 模組串聯電壓(V_{odc})小於並聯線路電壓之 $\sqrt{2} V_{ab}$ ，則在並聯和運轉時會產生電力潮流的問題，為解決此一困境，通常會有一升壓電路和最大功率追蹤(BOOST Circuit & MPPT)設計，將輸入電力調節器電壓(V_{oldc})提升至大於或等於線路電壓之 $\sqrt{2} V_{ab}$ ，如此就可將電力調節器輸出功率因數(PF)維持在 1 左右，如圖 3-16。



30 kw 以下電力調節器架構圖

圖 3-16 Inverter 設計架構(小容量)

2 電力調節器(Inverter)控制原理(小容量太陽光電系統)

小容量之電力調節器輸入/輸出電壓電流等級較低，所以在前端有一升壓電路和最大功率追蹤(BOOST Circuit & MPPT)設計，升壓電路的目的是調整輸入電力調節器電壓，藉以控制輸出功率因數(PF)，而最大功率追蹤最主要是在找出太陽光電模組的動態最大功率點，因此亦須調整太陽光電模組輸入到電力調節器電壓，藉以找尋最大功率點的電壓位置，所以將升壓電路和最大功率追蹤(BOOST Circuit & MPPT)整合設計在一起，是非常的適當和經濟。當我們在前端計算好的最大功率點的電流值，將送到電力調節器控制系統中做為參考值，與電力調節器輸出電流比較，產生誤差信號，經 PID 控制器產生控制命令，與系統端之電壓信號混合，計算出適當頻率之正弦信號，再和載波(三角波)調變輸出 SPWM 信號，控制電力調節器的功率輸出，此型亦稱為電流源型電壓調整器，如圖 3-17。當太陽光變化時，MPPT 會計算出不同的電流值輸入到參考信號端，因此電力調節器可達到自動控制的功能，通常會在早晨太陽光照度足夠時自我起動運轉發電，黃昏或天昏地暗太陽光照度不足時，自行關閉停止運轉。

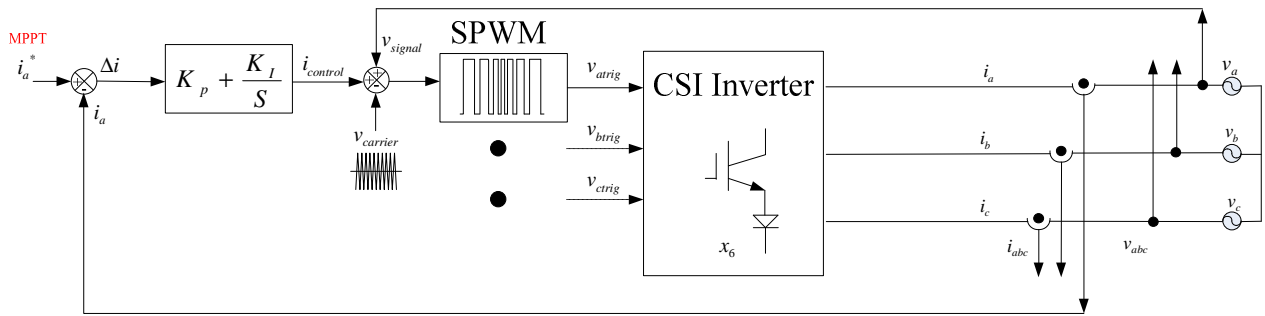
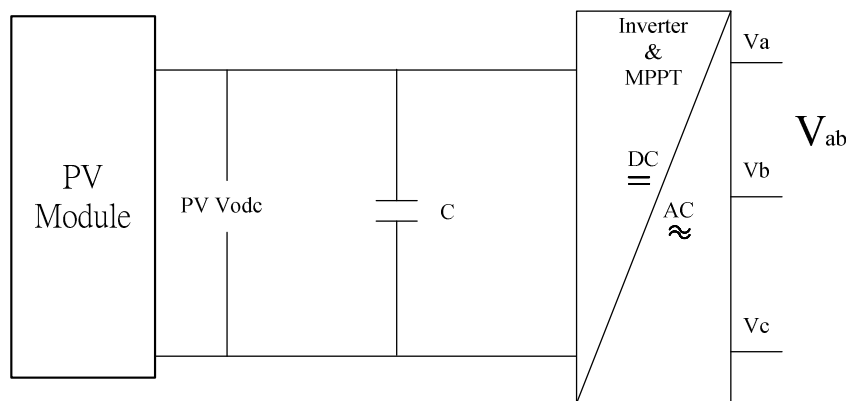


圖 3-17 Inverter 控制方塊圖(小容量)

3 電力調節器(Inverter)設計架構(大容量太陽光電系統)

大容量太陽光電系統之太陽光電池模組(PV)數多，可將模組串聯至足夠的並聯電壓等級輸出，若 PV 模組串聯電壓(V_{dc})大於或等於並聯線路電壓之 $\sqrt{2} V_{ab}$ ，則在並聯和運轉時電力潮流就不會流入電力調節器，又因大容量之電力調節器輸入/輸出電壓電流較大，升壓電路設計昂貴，所以在大容量電力調節器並沒有升壓電路的設計，而將升壓電路和最大功率追蹤(BOOST Circuit & MPPT)整合設計在電力調節器控制系統中，如圖 3-18。



30 kw 以上電力調節器架構圖

圖 3-18 Inverter 設計架構(大容量)

4 電力調節器(Inverter)控制原理(大容量太陽光電系統)

大容量之電力調節器輸入/輸出電壓電流較大，為了設計經濟考量前端未有一升壓電路，而最大功率追蹤設計也隱含在電力調節器的控制系統中，但為了控制電力調節器的有效功率輸出和無功率輸出，必須經由電力向量矩陣轉換的方式，來得到控制的方法。以下為常用的理論方式之一加以說明：

在理想情況下，我們將 PV 端視為 V_1 ，系統線路端為 V_2 ，線路阻抗為 X_s ，如圖 3-19 所示。經由下列 3-16 公式推算，得知若要 PV 端有效功率輸出的必要條件為

$\theta_1 > \theta_2$ 則 P 由 $V_1 \Rightarrow V_2$ ，若要 PV 端無效功率輸出的必要條件為

$|V_1| > |V_2|$ 則 Q 由 $V_1 \Rightarrow V_2$ ，如。因此在前端無升壓電路和最大功率追蹤設計時，爲了要達到控制的目的，就必須藉由電力向量矩陣的方式來轉換解耦，如圖 3-20 和 3-21 中之 3-17 和 3-18 式所示。在實際上解耦的過程中必須先經過 Clarke 矩陣轉換成 $F_{abc} \rightarrow F_{\alpha\beta}$ ，當我們在 $F_{\alpha\beta}$ 向量矩陣中解耦出 P 和 Q 的方程式，發現 P 和 Q 皆含有 i_α 和 i_β 的因數，無法單獨控制 P 或 Q，如 3-19 式所示。因此必須再經 Park 矩陣轉換成 $F_{\alpha\beta} \rightarrow F_{dq}$ ，在 F_{dq} 向量矩陣中解耦出 P 的方程式中只有變數 i_d 和 Q 的方程式中只有變數 i_q ，因此調整 i_d 可單獨控制 P，調整 i_q 可單獨控制 Q，如 3-20 式所示。

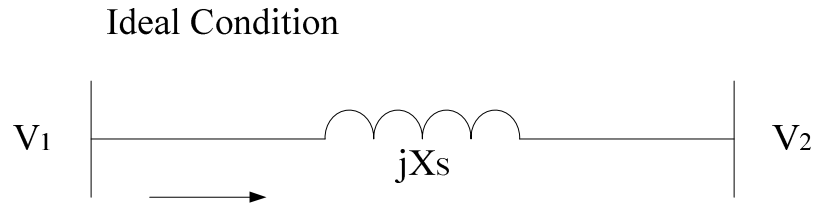
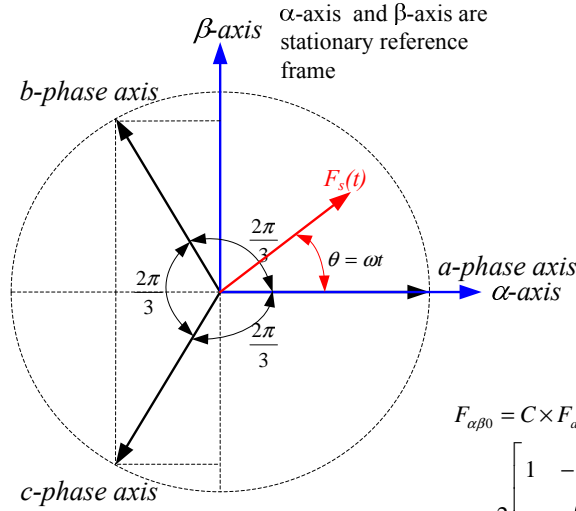


圖 3-19 電路理論

$$\begin{aligned}
 S_{12} &= V_1 I_1^* = V_1 \left(\frac{V_1 - V_2}{jX_s} \right)^* = V_1 \left(\frac{V_1^* - V_2^*}{-jX_s} \right) = j \frac{|V_1|^2}{X_s} - j \frac{V_1 V_2^*}{X_s} \\
 &= j \frac{|V_1|^2}{X_s} - j \frac{|V_1| \angle \delta_1 |V_2| \angle -\delta_2}{X_s} = j \frac{|V_1|^2}{X_s} - j \frac{|V_1| |V_2|}{X_s} \angle \delta_{12} \\
 &= j \frac{|V_1|^2}{X_s} - j \frac{|V_1| |V_2|}{X_s} (\cos \delta_{12} + j \sin \delta_{12}) \\
 &= \frac{|V_1| |V_2|}{X_s} \sin \delta_{12} + j \left(\frac{|V_1|^2}{X_s} - \frac{|V_1| |V_2|}{X_s} \cos \delta_{12} \right) \\
 P &\cong \frac{|V_1| |V_2|}{X_s} \sin \delta_{12} \Rightarrow P \propto \delta_{12} = \delta_1 - \delta_2 \\
 Q &\cong \frac{|V_1|^2}{X_s} - \frac{|V_1| |V_2|}{X_s} \cos \delta_{12} \\
 &= \frac{|V_1|}{X_s} (|V_1| - |V_2|) \Rightarrow Q \propto |V_1| - |V_2| \\
 \theta_1 &> \theta_2 \quad \text{則 } P \text{ 由 Bus1} \Rightarrow \text{Bus2} \\
 |V_1| &> |V_2| \quad \text{則 } Q \text{ 由 Bus1} \Rightarrow \text{Bus2}
 \end{aligned} \tag{3-16}$$



α -axis and β -axis are stationary reference frame

$$F_{\alpha\beta 0} = C \times F_{abc}$$

$$C = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$C^{-1} F_{\alpha\beta 0} = C^{-1} C F_{abc} = F_{abc}$$

$$F_{abc} = C^{-1} F_{\alpha\beta 0}$$

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

設定 α -axis 與 a -phase axis 重疊

$$F_{\alpha} = F_a \cos 0 + F_b \cos \frac{2\pi}{3} + F_c \cos \frac{4\pi}{3}$$

$$F_{\beta} = F_a \sin 0 + F_b \sin \frac{2\pi}{3} + F_c \sin \frac{4\pi}{3}$$

$$F_0 = \frac{1}{2}(F_a + F_b + F_c)$$

$$F_{\alpha} = F_a \times 1 + F_b \times \left(-\frac{1}{2}\right) + F_c \times \left(-\frac{1}{2}\right)$$

$$F_{\beta} = F_a \times 0 + F_b \times \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + F_c \times \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$F_0 = \frac{1}{2}(F_a + F_b + F_c)$$

$$\begin{bmatrix} F_{\alpha} \\ F_{\beta} \\ F_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix} \Rightarrow P_{abcs} = \frac{3}{2} P_{\alpha\beta}$$

$$F_{as}(t) = F_m \cos(\theta_e + 0) = F_m \cos(\omega t + 0)$$

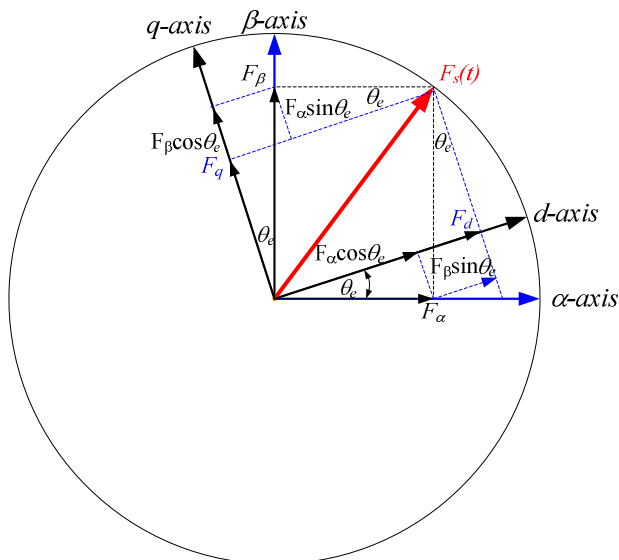
$$F_{bs}(t) = F_m \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) = F_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$F_{cs}(t) = F_m \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) = F_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

$$F_s(t) = F_{as}(t) + F_{bs}(t)e^{j\frac{2\pi}{3}} + F_{cs}(t)e^{-j\frac{2\pi}{3}}$$

(3-17)

圖 3-20 Clarke 矩陣轉換



α -axis and β -axis are stationary reference frame

d -axis and q -axis are synchronous reference frame
 $\theta_e = \omega t$

$$F_d = F_{\alpha} \times \cos \theta_e + F_{\beta} \times \sin \theta_e$$

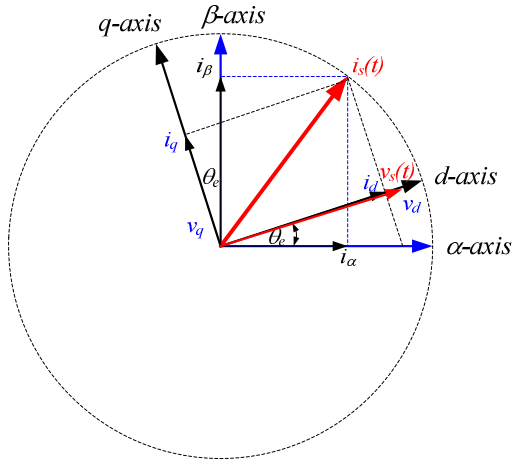
$$F_q = -F_{\alpha} \times \sin \theta_e + F_{\beta} \times \cos \theta_e$$

$$\begin{bmatrix} F_d \\ F_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{\alpha} \\ F_{\beta} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{\alpha} \\ F_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_d \\ F_q \end{bmatrix}$$

(3-18)

圖 3-21 Park 矩陣轉換



$$P_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c$$

$$= \begin{bmatrix} v_a & v_b & v_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$P_{3\phi}(t) = \begin{bmatrix} v_a & v_b & v_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} C^{-1} & \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix}^T \end{bmatrix} C^{-1} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix}, \quad C^{-1} = \frac{3}{2} C^T$$

$$P_{3\phi}(t) = \frac{3}{2} (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) = \frac{3}{2} |v| |i| \cos(\theta_v - \theta_i)$$

$$Q_{3\phi}(t) = \frac{3}{2} (v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) = \frac{3}{2} |v| |i| \sin(\theta_v - \theta_i)$$

控制 i_α 的大小會同時影響 $P_{3\phi}(t)$ 及 $Q_{3\phi}(t)$

同理

控制 i_β 的大小亦會同時影響 $P_{3\phi}(t)$ 及 $Q_{3\phi}(t)$

(3-19)

$$P_{3\phi}(t) = \frac{3}{2} (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta)$$

$$Q_{3\phi}(t) = \frac{3}{2} (v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta)$$

令 $v_s(t)$ 與 d -axis 重疊

則 $v_d = v_s(t)$, 且 $v_q = 0$

$P_{3\phi}$ 及 $Q_{3\phi}$ 可重寫為

$$P_{3\phi}(t) = \frac{3}{2} (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) = \frac{3}{2} v_d i_d$$

$$Q_{3\phi}(t) = \frac{3}{2} (v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) = \frac{3}{2} (v_q i_d - v_d i_q) = -\frac{3}{2} v_d i_q$$

故

控制 i_d 的大小就只會影響 $P_{3\phi}(t)$

同理

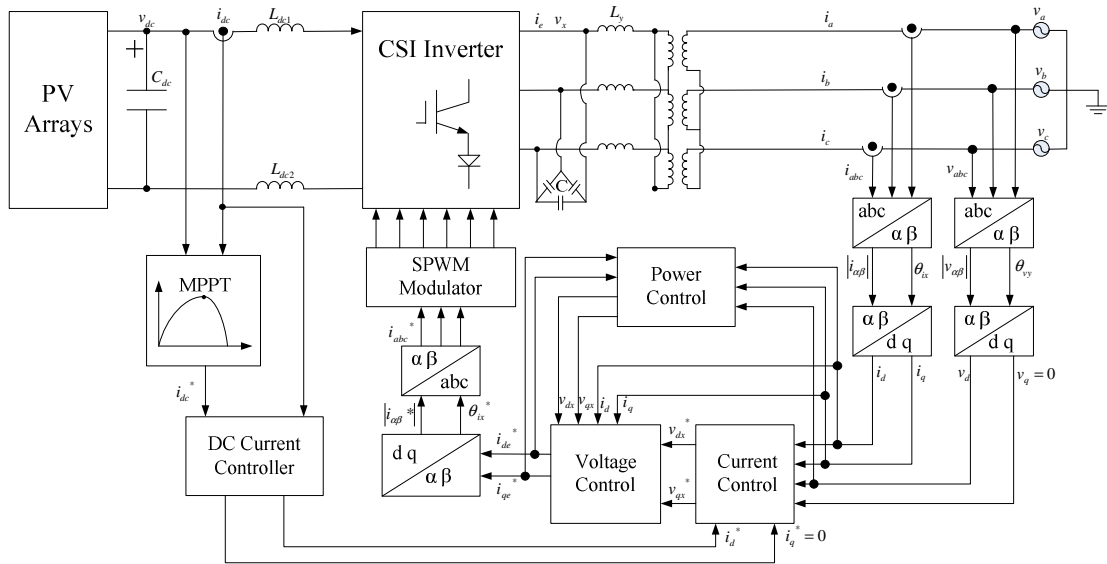
控制 i_q 的大小亦就只會影響 $Q_{3\phi}(t)$

所以有效功率 $P_{3\phi}(t)$ 及無效功率 $Q_{3\phi}(t)$

可以各別單獨控制 (解耦)

(3-20)

在經過 Clarke→Park 的向量矩陣轉換，我們將電力調節器並聯在系統端的迴授電壓電流解耦為 dq 軸上的 V_d 、 V_q 和 i_d 、 i_q 信號，最大功率追蹤計算出最大功率點的電流值 i_d^* ，送到電力調節器控制系統中做為參考值，與電力調節器迴授電流比較，產生誤差信號，由電流和電壓控制器演算後產生控制信號 i_{de}^* 和 i_{qe}^* ，經 $F_{dq} \rightarrow F_{\alpha\beta} \rightarrow F_{abc}$ 反向量矩陣轉換，產生適當功率輸出之正弦信號頻率 i_{abe}^* ，再和載波(三角波)調變輸出 SPWM 信號，控制電力調節器的功率輸出，如圖 3-22 所示。此型亦是為電流源型電壓調整器，因無升壓電路之設計，可達到節省成本之效果，而 MPPT 設置於控制系統中，所以電力調節器亦可如前述小容量電壓調整器達到自動運轉控制的功能。



電流型電力調節器控制系統架構圖

圖 3-22 Inverter 控制方塊圖(大容量太陽光電系統)

肆、出國心得與建議

一、出國心得

- 1 教育訓練(前置作業)：維護保養之前，須先瞭解 Inverter 的理論基礎和工作原理。日常運轉時，若從監視系統中，得知有異常的訊息，可參考原廠家 Trouble Shooting 資料中解讀，並使用檢測儀器電力分析儀輔助如圖 4-1 和 4-2，執行系統故障排除。

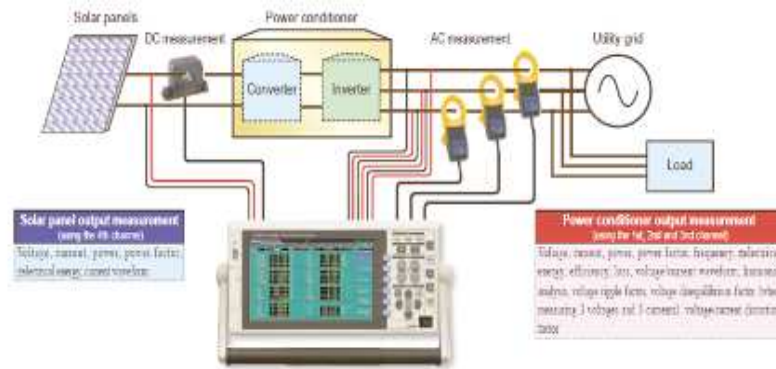


圖 4-1 電力分析儀對太陽光電系統檢測接線

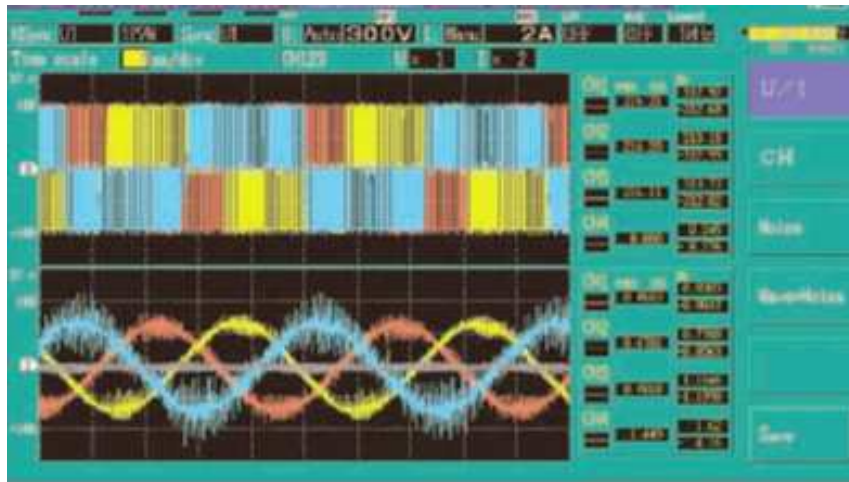


圖 4-2 電力分析儀顯示功能

2 週期性預防維護保養：

- 2.1 目視檢查(三個月)：一般目視檢查，找出存在和潛在的問題，特別是曝露在外的設備。
 - 2.1.1 電纜線：機械或熱造成之損傷或絕緣破壞、動物啃咬或紫外線傷害檢查。
 - 2.1.2 電氣設備：表計、電力調節器、變壓器、開關箱和其他電氣設備動作是否正常。
 - 2.1.3 表計、監控系統和保全系統：目視檢查有無警報觸發和異常的量測紀錄。
- 2.2 紅外線檢測(三個月)：直流分電箱、直流匯流排和 Inverter 須定期以紅外線掃描檢視溫度和電氣室濾網依原廠規定時更換。

2.3 預防維護保養：

2.3.1 電力調節器和電器設備(三個月)：檢查所有電力調節器和電器設備的參數比對，並完成製造商訂定之維護保養。

2.3.2 電氣設備和電纜線(六個月)：檢查項目如下

※電氣設備和電纜線接續鬆緊檢查。

※電氣箱和分電箱的清潔和密封檢查。

※線路損壞和鬆脫、漏電和短路檢查。

※開路電壓和串列電流檢查，在晴天中午（不超出預測值 10%，若超出範圍須個別模組量測，異常模組須更換），確認 PV 模組無髒污。

2.3.3 表計、監控系統和保全系統(六個月)：檢查所有表計、監控系統和保全系統運轉情形，軟體功能和儲存裝置。

2.3.4 電氣保護設備(六個月)：所有開關和電驛依製造商訂定之規範維護保養和符合當地的規定。

2.3.5 接地設備(在乾季執行，週期十二個月)：量測接地端對地電阻、量測(+；-)對地電阻(若有接地線須先拆除)和金屬框架對地電阻。

3 上述的維護保養週期，為參考原廠家說明書，自行擬定的。除了參考這些資料外，還須與電力系統主管單位協調溝通後，再擬定標準作業程序，以利維護保養的推行。

二、出國建議

1 再生能源其發電控制原理與電力電子技術息息相關，公司欲掌握此領域發展，應多培養相關技術人力，才足以應付往後之建置和維護課題。

2 工欲善其事必先利其器，電力分析儀亦是再生能源發電不可或缺之檢修儀器，有其投資購買之必要性，再者因其使用之複雜性較高，亦須事前之教育訓練。

3 透過監控平台收集之資料，可加以研究分析發電系統損失之因素，以期提早發現問題之所在。

4 目前公司太陽光電系統第一期建置計劃已近完成，已併聯運轉之太陽光電系統中，太陽能電池及 Inverter 是否陸續出現問題，尚待時間的考驗。目前，現場維修方面，包含週期性定保、更換新品、備料等等，無任何經驗可循。未來，若有任何原廠技師來台檢修，希望能派人赴現場觀摩學習，累積維修經驗，以期在未來建立自主故障檢修能力。

三、德國太陽光電發展概況

- 1 由德國柏林往南至義大利的路途中，北部常可發現一整片風力機組，南部則是太陽光電系統，可見其發展再生能源的環境優勢。
- 2 未來數年內德國太陽光電系統將陸續建置 3GWp，其中屋頂式(Roof-Top)將占總發電量的 80%，可見德國政府對於再生能源政策的付出，相對於台灣之低電價，我國政府是否能負擔此補助費用?是否應適度地反應在電價上?



圖 4-3 德南沿途屋頂型太陽光電



圖 4-4 柏林往南沿途風機



圖 4-5 柏林往南沿途太陽光電場



圖 4-6 德國柏林中央車站 BIPV

伍、參考文獻

- [一] 中山大學李政勳、盧展南教授，小型太陽光電能能量轉換系統之研製，91年6月。
- [二] 成功大學林悟宏、陳建富教授、梁從主教授，三相三線式數位化光伏能量轉換系統，91年6月。
- [三] 交通大學鄒應嶼教授，太陽光變頻器技術發展現況，2004年8月1日。
- [四] Schneider Xantrex Inverter 技術資料，2010~2011。
- [五] Power One Inverter 技術資料，2011。
- [六] Schneider Xantrex Preventive Maintenance Manual，2011。
- [七] 明志科技大學吳啓耀教授，風力發電和太陽光電發電技術資料，2011。