

綠色能源系統整合
教學平台附錄：
學生實驗教材

目 錄

實驗項次	課堂名稱	時數	頁數
序	各保護原件介紹	1	3
一	單元一、太陽能模組特性:開路電壓 Voc,閉路電壓 Vmp,短路電流 Isc。	1	12
二	單元二、太陽能模組特性:日照係數與溫度係數特性曲線	1	24
三	單元三、遮蔭與發電量變化實驗	1	32
四	單元四、追日系統介紹與實作	1	41
伍	單元五、變流器 MPPT 匹配介紹與轉換效率計算	1	52
六	單元六、風機輸入端電壓、電流量測	1	61
七	單元七、風機輸出端電壓、電流量測與轉換效率計算	1	69
八	單元八、風機保護裝置介紹及手自動切換開關實作	1	75
九	單元九、垂直軸風機 Power Curve 與發電量比較	1	82
十	單元十、水平軸風機 Power Curve 與發電量比較	1	89
十一	課程十一、能源庫(電池組)與 DC BUS 介紹及併聯應用實驗	1	95
十二	課程十二、監控系統介紹與實作	1	100
十三	課程十三、電壓三相不平衡介紹	1	111

(3) 各重要原件介紹

a. 太陽能面板:

主要透過太陽能面板(或稱太陽能電池)進行發電，本系統的單片太陽能面板容量 250W 一共由 2 串 3 並所組成， $250W \times 2 \times 3 = 1.5kW$ (6 片)，體積 (LxWxH)=1639x983x40mm(64.53x38.70x1.57in)，重量=18.5 kg (40.79lbs)。

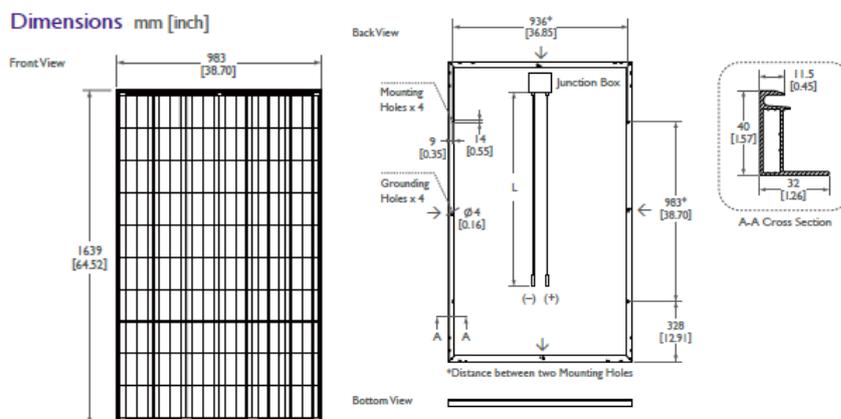


圖 2 單片 250W 太陽能面板示意圖

b. 太陽能發電系統單軸控制器:

追日型支架的追日範圍與角度等資訊，透過中央控制電路板進行設定，進而自動控制追日角度。

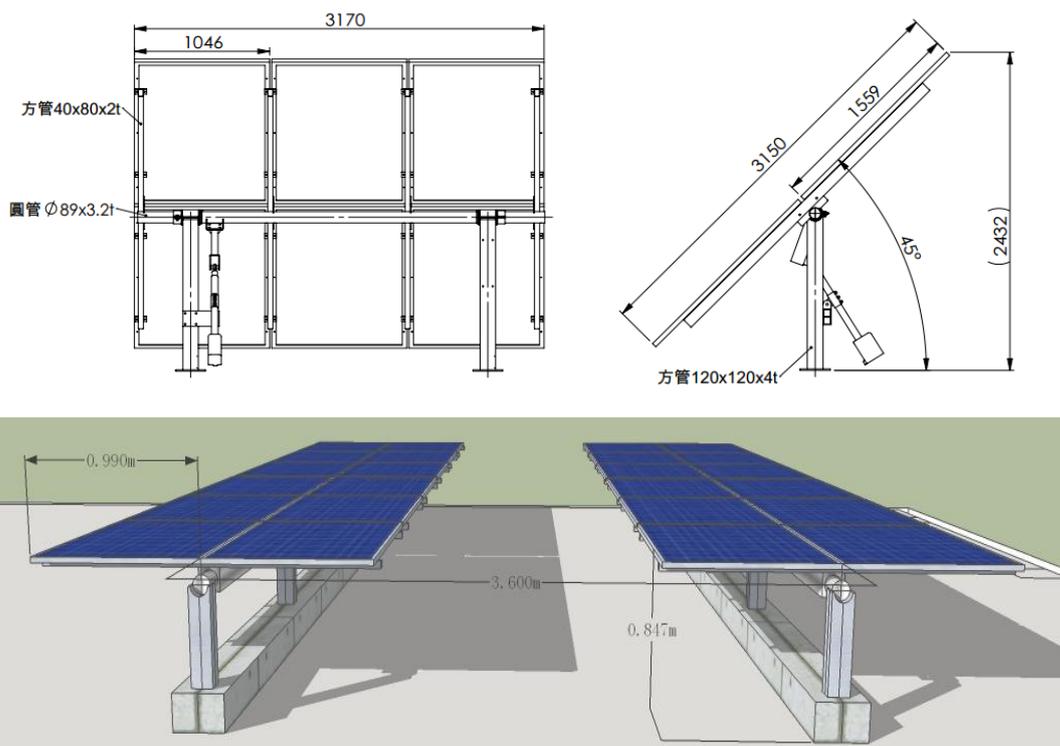


圖 3 追日型支架示意圖



圖 4 追日型支架實體圖

c. 400W 水平軸風力發電

所謂風力發電是利用風力帶動風車葉片旋轉，再透過增速機將旋轉的速度提升，來促使發電機發電。以風車發電原理來敘述風力發電機主要結構包括葉片、發電機、增速裝置、控制系統、塔架機艙...等。本教學平台所使用的 400W 水平軸風力發電機規格如下。



圖 5 400W 水平軸風力發電機實體圖

表 1 400W 水平軸風力發電規格

一般規格	
旋翼直徑=1.55 米	旋翼直徑=1.55 米
重量=18 公斤	重量=18 公斤
啟動風速=2.0 米/秒	啟動風速 2.0 米/秒
切割風速=2.5 米/秒	切割風速=2.5 米/秒
額定風速=12m/ s	額定風速=12m/ s
額定功率=400W	額定功率=400W

d. 300W 垂直軸風力發電

本教學平台所使用的 300W 垂直軸風力發電機規格如下。

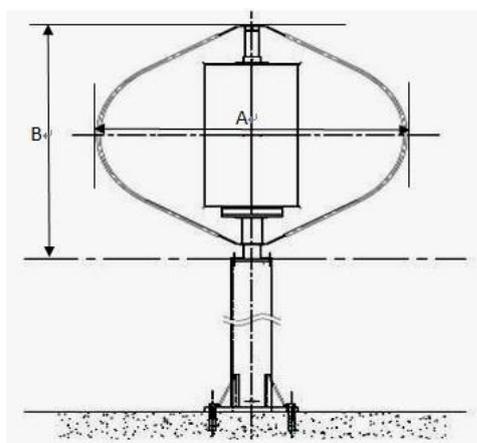


圖 6 300W 垂直軸風力發電機的外觀

表 2 300W 垂直軸風力發電

一般規格			
額定功率	300 瓦	額定風速	13.5 公尺/秒
額定轉速	750 轉/每分	切入風速	<3 公尺/秒
切離風速	15 公尺/秒	耐受極端風速	60 公尺/秒
系統工作條件			
溫度範圍	-10~40℃		
濕度範圍	95%max		

e. 直交流電力轉換器(逆變器)

本案負載端應用為交流 220V 之 LED 燈具，因此搭配三組 800W 正弦波電力轉換器，將儲能系統的直流電源轉為 220V 交流電，自動追蹤市電電壓相位，輸出至雙向電表併聯盤提供至附載 LED 照明使用。



圖 7 直交流電力轉換器(逆變器)

紅色鍵為 ON 打開鍵 開啟併網送電，手動模式則隨時可以按 ON 紅色鍵開啟進行併網供電。當功能設定時為 選項 + 選擇鍵。

黃色鍵為 OFF 關閉鍵 關閉併網，隨時可按下則立即停止並聯供電，轉為手動待命模式。當功能設定時為 選項 - 選擇鍵。

藍色鍵為功能按鍵 預設開機時為 Auto 自動並聯模式，LED 會先顯示輸入電壓如 24.5v。

f. 風力 MPPT

追蹤風機最大功率點(MPPT)，將風力發電所產生之交流電轉為直流電，利用定電流、定電壓及浮充控制對電池系統有效充電，並整合數位晶片，管理風能擷取、PWM 數位控制，控制及通訊介面提供完整風機發電資訊。



圖 8 風力 MPPT

表 3 風力 MPPT 規格

Specifications Summary	
INPUT(AC)	
最大功率	400W
額定輸入電流	7A(AC)
充電開始電壓	6V
輸入電壓範圍	5-38V(3 ψ W)
OUTPUT(DC)	
輸出電壓	24V
額定充電電流	10.41A
SYSTEM	
MPPT 效率	>90%
最大充電效率	>85%
電池低電壓關閉	24V
電池保護電壓	28.8V

g. 風速計

提供 0-10V,-20mA 電流輸出，將風力發電機周遭環境的風向及風速資訊顯示於面板上，並可透過控制介面輸出訊號供監測使用。面板上顯示目前風向風速，並記錄偵測到的最大風速如圖 9。



圖 9 風速計實體圖

h. MPPT 太陽能充電控制器

用於控制太陽能發電系統最大功率追蹤。輸出為純正弦電流波形，全數位信號控制的太陽能逆變器，智慧型電力轉換系統，可自動偵測併電網電壓 (220Vac/230Vac/240Vac)，自動偵測併電網頻率 50/60 Hz Auto-detection，最大轉換效率 > 96%。提供完整太陽能發電資訊。



顯示燈	狀態	SCHG-241500、SCHG-483000
SOLAR (RED LED)	閃爍	充電中每秒閃爍一次
BATTERY (RED LED)	閃爍	停止放電低於負載放電截止電壓以下
BATTERY (RED LED)	恆亮	電池低電位電壓
BATTERY (YELLOW LED)	恆亮	電池中電位電壓
BATTERY (GREEN LED)	恆亮	電池高電位電壓
LOAD (GREEN LED)	閃爍	負載 A、B 放電每秒閃爍一次 僅負載 A 放電每二秒閃爍一次

圖 10 MPPT 太陽能充電控制器

i. 電磁接觸器

電磁接觸器（Magnetic Contactor）簡稱 MC。MC 是利用電磁鐵的作用將電路做接通開啟的一種裝置。當電磁線圈通以額定電壓時，電流通過線圈產生磁場，使線圈內的固定鐵心成為電磁鐵，將上方的活動鐵心往下吸，牽動可動桿，使原來開路的接點變成接通，原來通路的接點變成開啟狀態。若是將原來加在線圈上的電流切斷，可動鐵心經由復歸彈簧的作用而恢復原來狀態，接點同時回復原始狀態。用於控制太陽能發電系統開關控制。

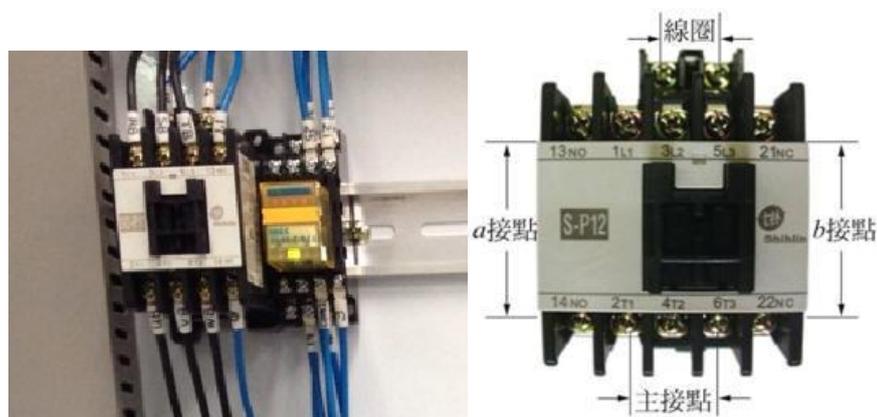


圖 11 電磁接觸器

j. 直流無熔絲開關

用來隔離及啟斷電氣系統；包含發電開關、儲能系統開關。防止過電流導致系統故障。

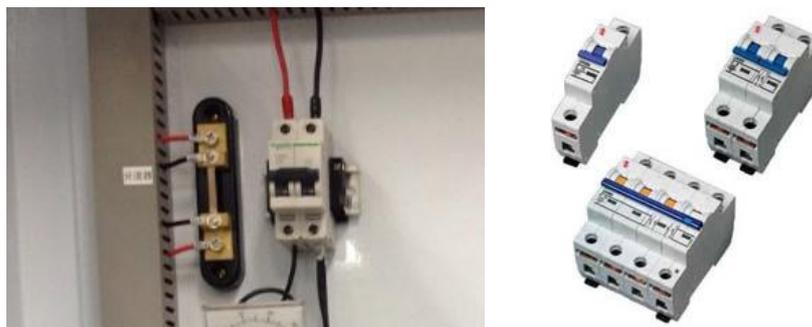


圖 12 直流無熔絲開關

k. 分流器:

用於大電流“直流”,兩端為‘電壓’輸出。主要功能為量測太陽能及時發電電流，並透過數位電表顯示。

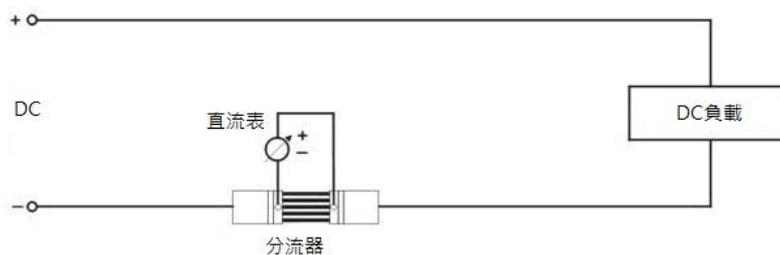


圖 13 分流器

單元一、太陽能模組特性:開路電壓 V_{OC} 、短路電流 I_{SC}

(1) 實驗目的

了解太陽能模組 V_{OC} 開路電壓與短路電流 I_{SC} 之特性以及原理，以及與額定電壓 V_{mp} 、額定電流 I_{mp} 的差異，加強學生對於陽能模組的特性與操作。

(2) 實驗原理

太陽能模組的等效電路圖如圖14所示，對單一太陽能模組而言，可將太陽能模組等效為一個電流源與一個二極體並聯，當 $R_L=0$ 時，所測得之電流即為短路電流 I_{SC} 。短路電流 I_{SC} 與太陽能模組的模板面積大小有關，面積越大， I_{SC} 越大。且對於同一塊太陽能模板而言，其 I_{SC} 值與日照強度成正比關係；當環境溫度升高時， I_{SC} 值也會略有上升。反之，在固定光源下，當 $R_L=\infty$ 時，所測得之電壓即為開路電壓 V_{OC} 。太陽能模組的開路電壓會與日照強度之對數成正比關係，而當環境溫度升高時，太陽能電池的開路電壓值將會略微下降。

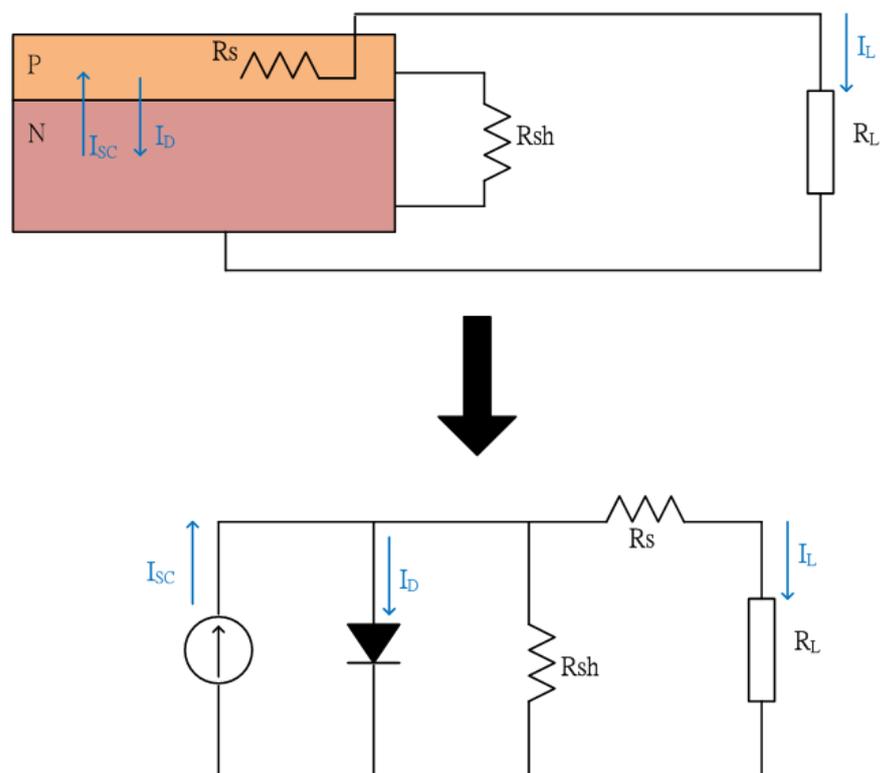


圖14 太陽能模組的等效電路圖

R_S 為串聯電阻，主要由模板本身的體電阻、表面電阻、電極導體電阻和電極與矽表面之接觸電阻所組成。而 R_{Sh} 為旁漏電阻，主要是由矽片邊緣不清潔或是本身缺陷所引起的。一個理想的太陽能模組， R_S 很小，而 R_{Sh} 很大。由於 R_S 及 R_{Sh} 是分別串連及並聯於電路中，故在進行理想計算時，可以忽略不計。此時，流經負載之電流 I_L 為：

當負載開路時， $I_L = 0$ ，此時， $I_{SC} = I_D$ 。將電流勾錶勾於太陽能模組後方之二極體線路上，即可獲得短路電流。而將教學平台上之連接開關斷開後，再將電錶之探棒與平台面板端子台連接後獲得。下面為太陽能模板之原廠資料，紅框圈起部分為 V_{OC} 開路電壓以及 I_{SC} 短路電流資料。

表 4 太陽能模組規格(廠商提供之數據資料)

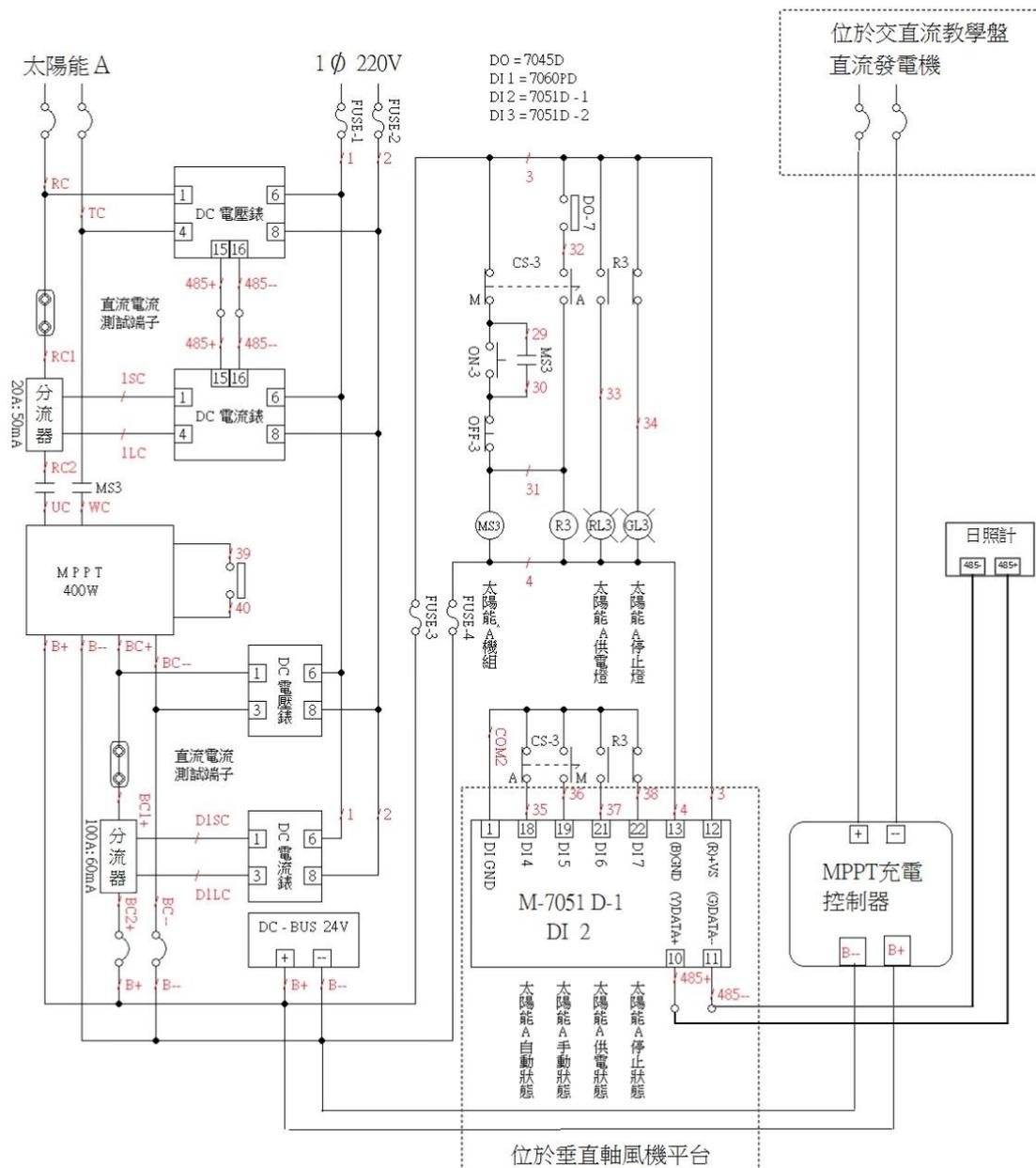
Electrical Data					
Typ. Nominal Power P_N	240 W	245 W	250 W	255 W	260 W
Typ. Module Efficiency	14.9%	15.2%	15.5%	15.8%	16.1%
Typ. Nominal Voltage V_{mp} (V)	29.9	30.3	30.6	30.8	31.2
Typ. Nominal Current I_{mp} (A)	8.03	8.09	8.17	8.28	8.34
Typ. Open Circuit Voltage V_{oc} (V)	37.0	37.2	37.4	37.6	37.7
Typ. Short Circuit Current I_{sc} (A)	8.58	8.64	8.69	8.76	8.83
Maximum Tolerance of P_N	0 / +3%				

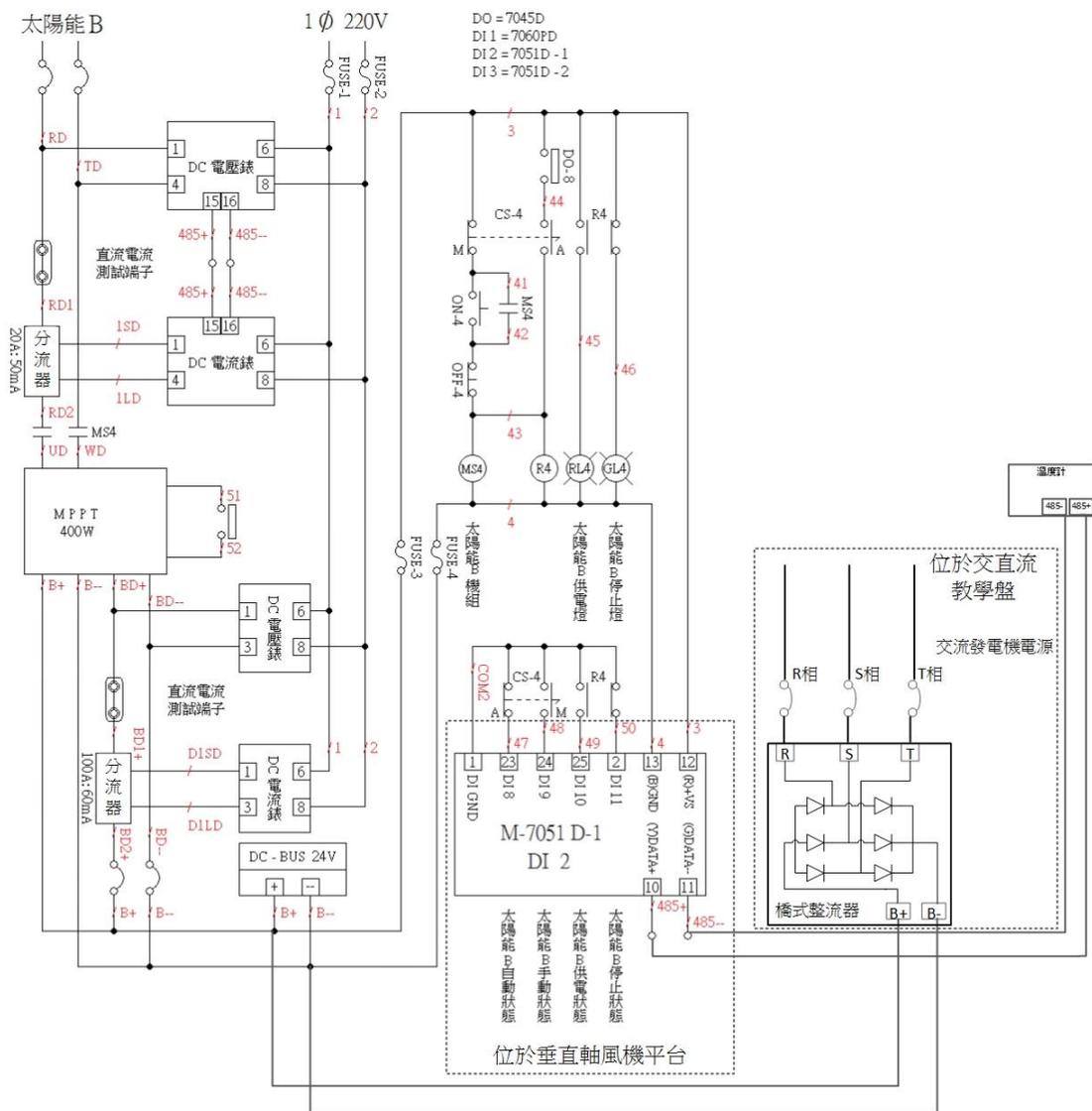
* Above data are the effective measurement at Standard Test Conditions (STC)
 * STC: Irradiance 1000W/m², spectral distribution AM 1.5, temperature 25 ± 2 °C, in accordance with EN 60904-3
 * The given electrical data are nominal values which account for basic measurements and manufacturing tolerances of ±10%, with the exception of P_N . The classifications is performed according to P_N .

Temperature Coefficient	
NOCT	46 ± 2 °C
Typ. Temperature Coefficient of P_N	-0.44 % / K
Typ. Temperature Coefficient of V_{oc}	-0.32 % / K
Temperature Coefficient of I_{sc}	0.04 % / K

* NOCT: Normal Operation Cell Temperature, measuring conditions: irradiance: 800 W/m², AM 1.5, air temperature 20 °C, wind speed 1 m/s

Mechanical Characteristics	
Dimensions (L x W x H)	1639 x 983 x 40 mm (64.53 x 38.70 x 1.57 in)
Weight	18.5 kg (40.79 lbs)
Front Glass	High transparent solar glass (tempered), 3.2 mm (0.13 in)
Cell	60 multicrystalline solar cells, 156 x 156 mm (6" x 6")
Cell Encapsulation	EVA
Back Sheet	Composite film
Frame	Anodized aluminum frame
Junction Box	IP-67 rated with 3 bypass diodes
Connector Type & Cables	TYCO PV4: 1x4mm ² (0.04x0.16 inch ²), Length: each 1.0 m (39.37 inches) YUKITA YS-254/YS-255: 1x4mm ² (0.04x0.16 inch ²), Length: each 1.065 m (41.93 inches)





(3) 實驗設備

- 三用電錶 1 支
- 電流勾表 1 支
- 電壓探棒 1 支



三用電錶



電流勾錶



電壓探棒

(4) 實驗步驟

在了解太陽能電有開路電壓與短路電流特性之後，接著將實際測量 V_{OC} 與 V_{mp} ； I_{sc} 與 I_{mp} 之間的差異，並且紀錄在實驗表格中，時計會出曲現後探討其差異程度與關連性。

目前本太陽能模組系統為 3 串 2 並形式，因此在標準 $1000W/m^2$ 的條件下， V_{mp} 額定電壓為 $30.6*3=91.8(V)$ ； V_{oc} 開路電壓= $37.4*3(V)$ 。所以在做以下實驗時請注意太陽能面板的连接方式與組數，连接方式的不同输出功率也會有所不同。

- a. 如何紀錄 V_{oc} -首先須將太陽能模組切換至停止 STOP 模式將系統開路之後方能測量到 V_{oc} 。步驟如下：

步驟 1:教學平台中的手自動控制平台的機組導通狀態切換至手動模式。



圖 15 模式切換旋鈕之位置圖

步驟 2: 切換至手動模式後，按下停止鍵(Stop)，太陽能發電系統將會自動斷開，電路型成開路。在 Start(ON)的情況下，電壓為 V_{mp} 額定電壓(導通時電壓)， I_{mp} 為額定電流(導通時電流)；反之 Stop(OFF)的情況下，此時則會形成 V_{oc} 開路電壓與 I_{oc} 開路電流。



圖 16 開關切換之位置圖

步驟 3: 所以成功將切換至手動模式之後，就可進行 V_{oc} 的測量了。將三用電錶上之旋鈕調整至量測直流電的狀態(DCV)，並將電壓探棒與三用電表連接。

步驟 4: 將電壓探棒與教學平台模組上之面板端子台連接進行量測。量測位置如下圖所示，紅色端子台為正電(+); 黑色端子台為負電(-)。量測時須注意直流電壓正負極性，避免電壓顯示為負的數值。

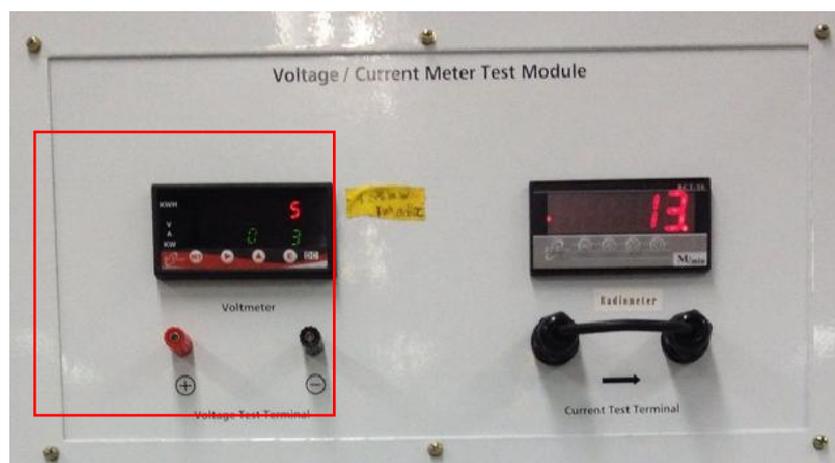


圖 17 教學平台量測太陽能模組 V_{oc} 開路電壓之位置

- b. 如何紀錄 V_{mp} 與 I_{mp} -首先須將太陽能模組切換至啟動 Start 模式將系統開路之後方能測量到 V_{mp} 與 I_{mp} 。步驟如下：
步驟 1: 教學平台中的手自動控制平台的機組導通狀態切換至手動模式。切換至手動模式後，按下啟動鍵(Start)，太陽能發電系統將會啟動。



圖 18 模式切換旋鈕之位置圖



圖 19 開關切換之位置圖

步驟 2:成功將切換至手動模式之後，就可進行 V_{mp} 的測量了。將三用電錶上之旋鈕調整至量測直流電的狀態(DCV)，並將電壓探棒與三用電表連接。

步驟 3: 將電壓探棒與教學平台模組上之面板端子台連接進行量測。量測位置如下圖所示，紅色端子台為正電(+); 黑色端子台為負電(-)。量測時須注意直流電壓正負極性，避免電壓顯示為負的數值。

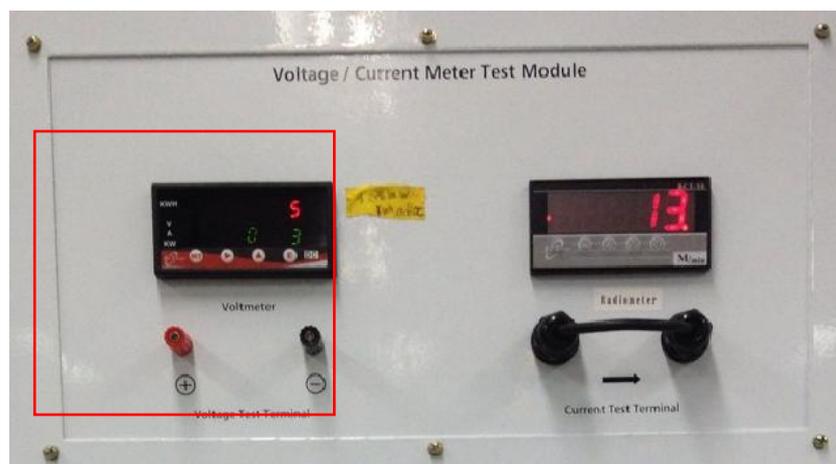


圖 20 教學平台量測太陽能模組 V_{mp} 開路電壓之位置

步驟 4: 接著進行測量 I_{mp} ，首先任一系統同樣在啟動 Start 的模式下，將電流勾錶與教學平台模組上之面板端子台連接進行量測，並將其值記錄於後方圖表中。量測位置如下圖所示，量測時須注意電流方向，避免電流顯示為負的數值。

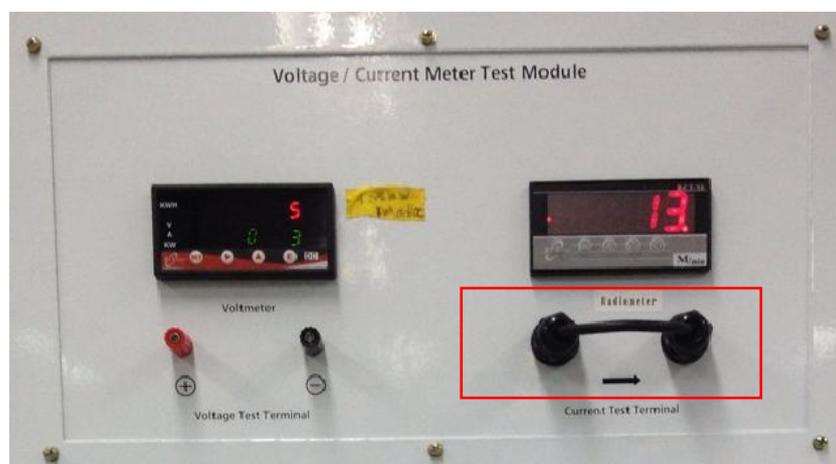


圖 21 教學平台量測太陽能模組 I_{mp} 開路電流之位置

- c. 如何紀錄 I_{oc} -在進行 I_{oc} 短路電流測量時，需特別注意短路情況下的短路電流極大，所以測量 I_{oc} 方面有其特定的儀器設備可量測。因此，在進行本實驗時需注意短路時所產生的電弧火花及人身安全。該實驗步驟禁止個人進行單獨試驗，請特別注意!量測步驟如下:

步驟 1: 將教學平台中的手自動控制平台的機組導通狀態切換至手動模式。



圖 22 模式切換旋鈕之位置圖



圖 23 開關切換之位置圖

步驟 2:將電流勾表勾至電壓電流模組的電流端子台上(Current Test Terminal)。此時要注意電流的流向，以電流勾表顯示錯誤資訊。

步驟 3:透過電壓電流模組的端子台，記錄輸出之電壓與電流。表頭上會顯示即時的電流數值。

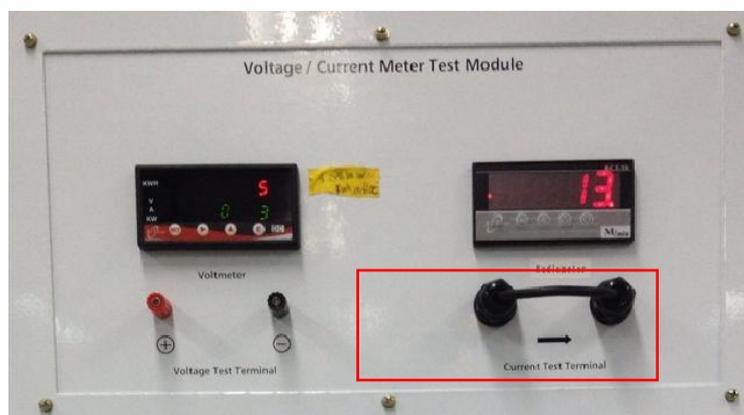


圖 24 教學平台量測太陽能模組電流之位置

註：開始量測電流時，須注意電流勾錶上與直流電壓數值是否歸零，如不為零時，請將電錶校正至零點再進行量測。

步驟 6: 將其量測值 V_{mp} 、 I_{mp} 、 V_{oc} 、 I_{sc} 的測量結果分別記錄於下方表格中，再將其值繪製於下方表格中。

A 額定電壓-時間記錄表

時間									
電壓									
額定電壓 (V_{mp})									

B 額定電流-時間記錄表

時間									
電流									
額定電流 (I_{mp})									

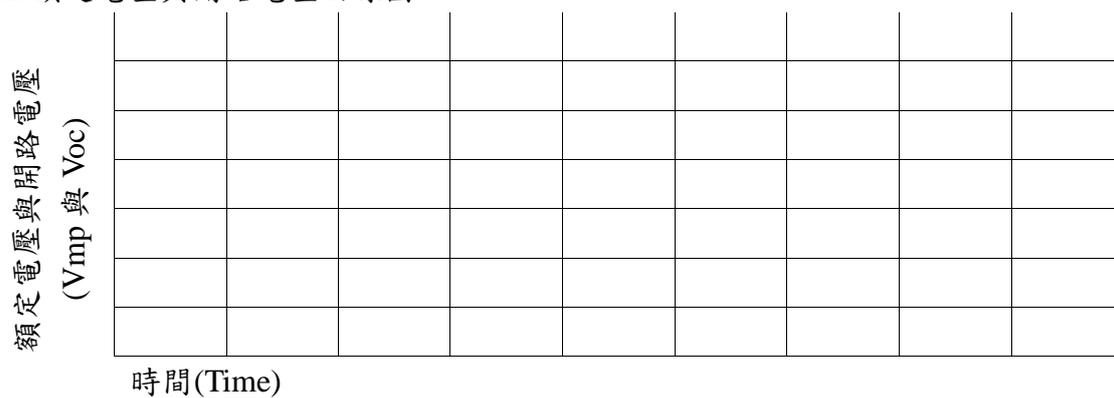
C 開路電壓-時間記錄表

時間									
電壓									
開路電壓 (V_{oc})									

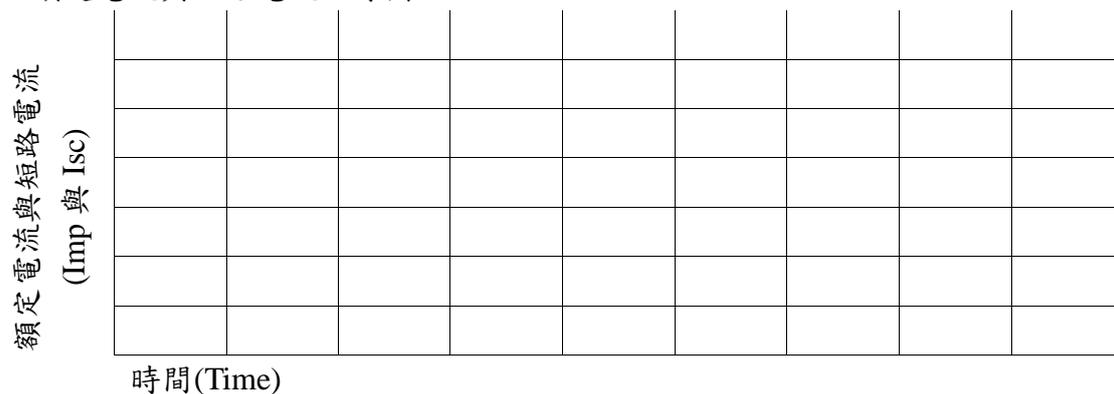
D 短路電流-時間記錄表

時間										
電流										
額定電流 (Isc)										

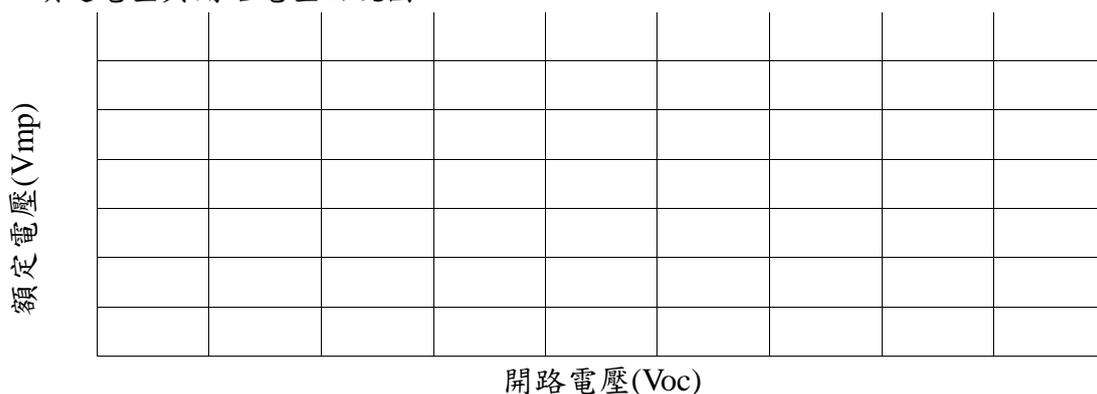
E 額定電壓與開路電壓曲線圖



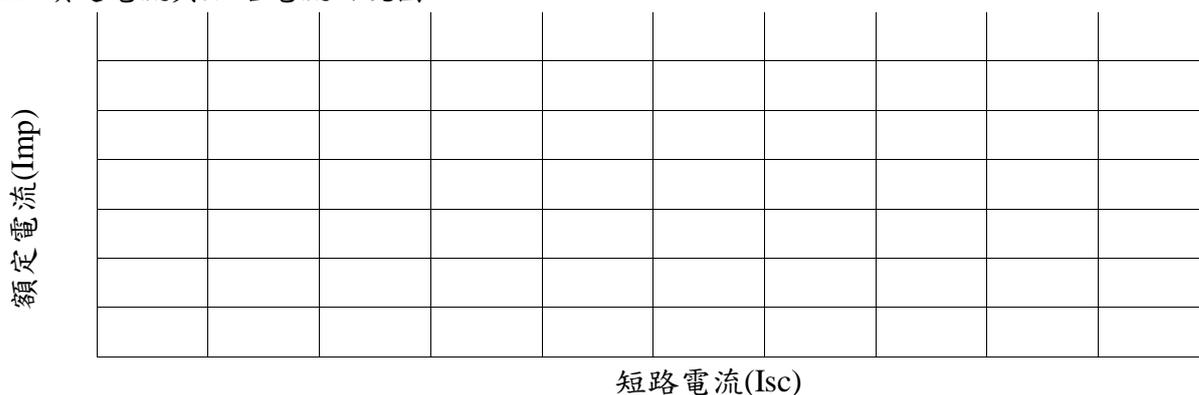
F 額定電流與短路電流曲線圖



G 額定電壓與開路電壓曲現圖



H 額定電流與短路電流曲現圖



(5) 問題

- a. 什麼是開路電壓?什麼是短路電流?
- b. 太陽能面板在導通時為什麼會有開路電壓與短路電流特性?
- c. 目前太陽能發電模組功分為 A 與 B 兩發電模組，各個模組為 3 串 2 並的連接形式，單片額定功率為 250W。所以將其組成 250W*3 串*2 並=1.5kW 容量，A 與 B 兩組加起來為 3kW 的發電量。請探討在該連接模式下 V_{mp} 、 I_{mp} 、 V_{oc} 與 I_{sc} 之間的變化差異?
- d. 承上，如果連接方式變更成 2 串 3 並後， V_{mp} 、 I_{mp} 、 V_{oc} 與 I_{sc} 之間又將如何變化?並繪出相關圖形。

單元二、太陽能模組特性:日照係數與溫度係數特性曲線

(1) 實驗目的:

透過教學平台了解日照係數與溫度係數對於太陽能模組的影響以及意義。並且紀錄太陽能電池在各照度與溫度之下之開路電壓、短路電流，討論其影響。

(2) 實驗原理:

太陽光的日照強度是影響太陽能電池發電量之主要因素，但太陽能電池溫度升高，則會造成輸出電壓下降與輸出功率的降低。故應對氣象局蒐集之全天空日射量進行修正以避免產生過大的誤差，在太陽能電池溫度 25°C 以上，每增加 1°C 所造成整體效率低減。在許多太陽能電池效率的關係式中， T_c 為太陽能電池的溫度，是一個環境變數的函數，例如環境溫度，風速、太陽的輻射量以及前蓋板的穿透性...等參數。台灣的日射量分布情形，整體而言在海拔五百公尺以下的區域，大致上呈現由東北往西南方向遞增的現象。換言之從東北角的基隆年平均日射量每日 $2.2\text{kWh}/\text{m}^2$ 往嘉南平原一直到高雄地區每日 $3.4\text{kWh}/\text{m}^2$ 而增加。另外，在東海岸狹長帶狀平地之日射量，呈現從花蓮一路往南方向遞增直到台東，之後的大武日射量便逐漸下降。台東是東部地區具有最高日射量的地方，年平均日射量達到每日 $4.1\text{kWh}/\text{m}^2$ 之譜。關於台灣日射量氣候特徵。中部及南部地區的測候站之月平均變化呈現丘陵形。當月平均日射量變化曲線呈現丘陵形，代表太陽能系統的發電量變動同樣呈現較為平緩變動的趨勢，可能有利於著重設計全年發電負載的太陽能系統。北部及東北部地區的測候站之月平均變化呈現山形。當月平均日射量變化曲線呈現山形特徵，則太陽能系統的發電量變動同樣呈現較為巨幅變動的趨勢，也由於這個氣候特徵，或許考慮針對紓解夏季尖峰負載而設計的太陽能設備便能發揮功效。

太陽光的強度與光譜，可以用光譜照度(spectrum irradiance)來表示，也就是每單位波長及每單位面積的光照功率，單位為 $\text{W}/\text{m}^2\mu\text{m}$ 。其中太陽能電池電壓-電流的關係式可以表式成以下:

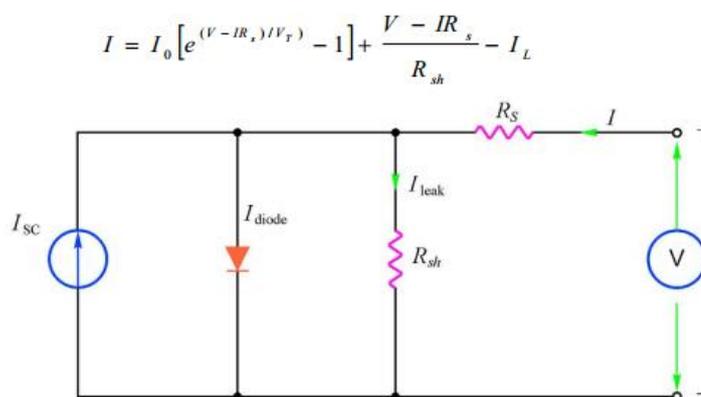


圖 25 太陽能模組等效電路圖

日輻計是一種被設計指向太陽專門測量太陽光度的光度計。經常被用來當作太陽追蹤組件。測定的量稱為直接太陽輻射率。當日照計被安置在地球大氣層，所測

量的輻射率與太陽的輻射率是不相等的，因為大氣層的吸收和散射會使太陽輻射量減少。這些數量之間的關聯可以參考比爾定律。

在此我們將透過日照強度與模板溫度的變化，記錄下當時的發電曲線。以下為原廠提供的資料數據及實體照片。

表 5 日輻計原廠提供產品資料表

Technical Specification	LP PYRA 02 / LP PYRA 12*	LP PYRA 03
Typical sensitivity	10 $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$	
Impedance	33 $\Omega \pm 45 \Omega$	
Measuring range	0 \div 2000 W/m^2	
Viewing field	2 π sr	
Spectral field	305 nm \div 2800 nm W/m^2 (50%)	
Operating temperature	-40 $^{\circ}\text{C} \div 80 ^{\circ}\text{C}$	
Working temperature	0.90 Kg	0.45 Kg
ISO 9060 Specifications		
Response time	< 28 sec	< 30sec
Zero Off-set		
a) Response to thermal radiation (200 W/m^2)	15 W/m^2	25 W/m^2
b) Response to temperature change 5K/h	< $\pm 4 \text{W}/\text{m}^2$	< $\pm 6 \text{W}/\text{m}^2$
3a) Non stability over 1 year	< $\pm 1.5\%$	< $\pm 2.5\%$
3b) Non linearity	< $\pm 1\%$	< $\pm 2\%$
3c) Spectral selectivity	< $\pm 18 \text{W}/\text{m}^2$	< $\pm 22 \text{W}/\text{m}^2$
3e) Response with regard to temperature	< $\pm 5\%$	< $\pm 7\%$
3f) Tilt-response	< 4 %	< 8 %
3f) Risposta in funzione del Tilt	< $\pm 2\%$	< $\pm 4\%$
Shadow ring for LP PYRA 12		
Weight		5.90 Kg
Diameter		570 mm
Height		54 mm
Basis diameter		300 mm

表 6 太陽能模板原廠溫度細數資料表

Temperature Coefficient

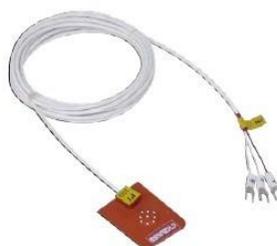
NOCT	46 $\pm 2 ^{\circ}\text{C}$
Typ. Temperature Coefficient of P_N	-0.44 % / K
Typ. Temperature Coefficient of V_{OC}	-0.32 % / K
Temperature Coefficient of I_{SC}	0.04 % / K



圖 26 日輻計實體外觀與資料傳輸線

(3) 使用的模組及設備：

- 三用電表
- 電流勾表
- 電壓探棒
- 日照計
- 溫度計 PT100



(4) 實驗步驟:

藉由上述太陽能面板原廠所提供的溫度修正系數資料可得知，在測量條件為輻照度 800W/m^2 ，溫度為 20°C ，風速 1m/s 下時，太陽能模組的額定電池工作溫度為 $46\pm 2^\circ\text{C}$ ，典型的 PN-溫度係數為 $0.44\%/K$ ；典型的 VOC-溫度係數為 $0.32\%/K$ ；ISC 的溫度係數為 $0.04\%/K$ 。所以本實驗目的在於當不同的溫度條件底下，借由測量 Voc 與 Isc 的變化，了解溫度係數的變化對於該參數的影響。

步驟1. 首先決定開關狀態的選擇，設定為停止 STOP 狀態。

a. 將教學平台中的手自動控制平台的機組導通狀態切換至手動模式。



圖 27 模式切換旋鈕之位置圖

b. 切換至手動模式後，按下停止鍵(Stop)，太陽能發電系統將會自動斷開，電路型成開路。在 Start(ON)的情況下，電壓為 V_{mp} 額定電壓(導通時電壓)， I_{mp} 為額定電流(導通時電流)；反之 Stop(OFF)的情況下，此時則會形成 V_{oc} 開路電壓與。



圖 28 開關切換之位置圖

步驟2. 開路電壓測量 V_{oc} (open circuit voltage)

a. 將三用電錶上之旋鈕調整至量測直流電的狀態(DCV)，並將電壓探棒與三用電表連接。

- b. 將電壓探棒與教學平台模組上之面板端子台連接進行量測。量測位置如下圖所示，紅色端子台為正電(+); 黑色端子台為負電(-)。量測時須注意直流電壓正負極性，避免電壓顯示為負的數值。

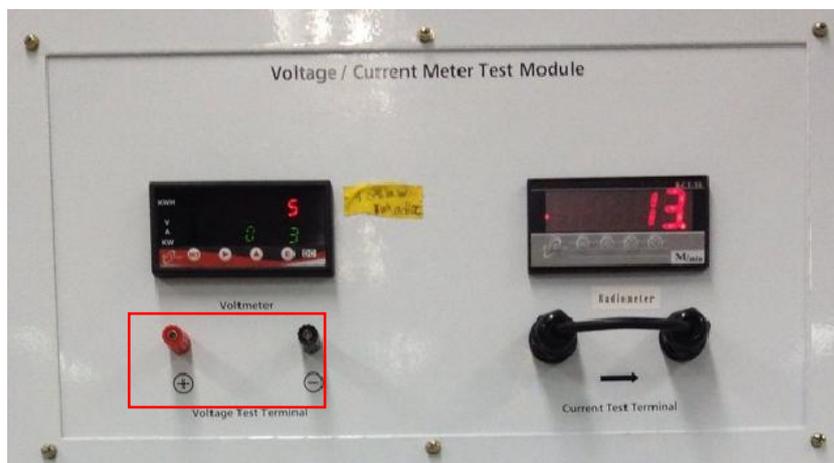


圖 29 教學平台量測太陽能模組電壓之位置

步驟3. 短路電流測量 I_{sc} (short circuit current)

在進行 I_{sc} 短路電流測量時，需特別注意短路情況下的短路電流極大，所以測量 I_{sc} 方面有其特定的儀器設備可量測。因此，在進行本實驗時需注意短路時所產生的電弧火花及人身安全。該實驗步驟禁止個人進行單獨試驗，請特別注意!量測步驟如下:

- a. 將電流勾表勾至電壓電流模組的電流端子台上(Current Test Terminal)。此時要注意電流的流向，以電流勾表顯示錯誤資訊。
- b. 透過電壓電流模組的端子台，記錄輸出之電壓與電流。表頭上會顯示即時的電流數值。

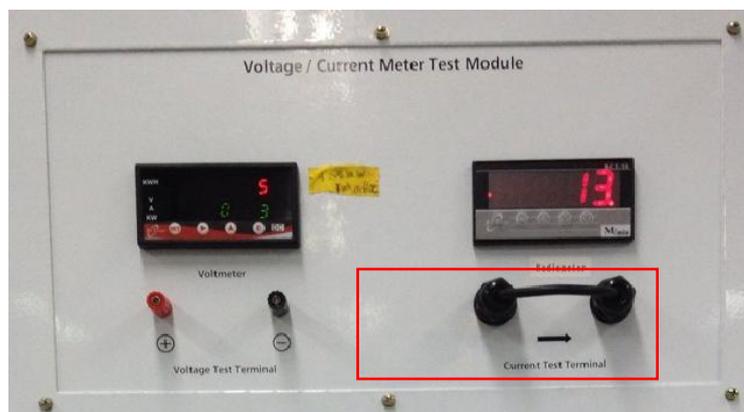


圖 30 教學平台量測太陽能模組電流之位置

- c. 同時紀錄教學平台模組上的溫度計數值與日輻計數值。

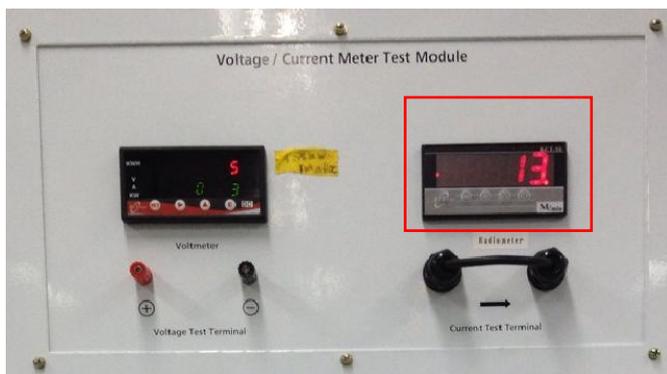


圖 31 溫度計數值與日輻計數值

步驟4. 重復步驟 2 至 3，並將其量測值紀錄記錄於下方表格中，再將其值繪製於下方圖中。

註：開始量測電流時，須注意電流勾錶上與直流電壓數值是否歸零，如不為零時，請將電錶校正至零點再進行量測。

A 電壓紀錄表

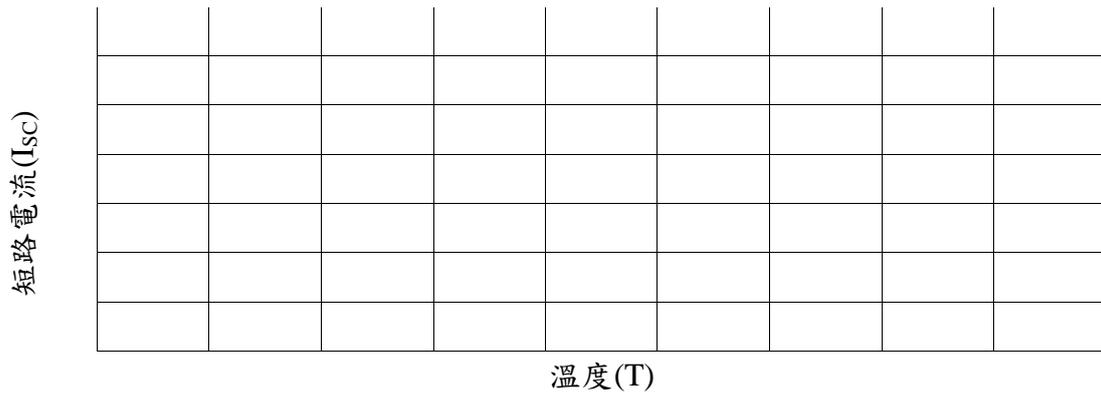
時間									
電壓									
V_{OC} 伏特 (V)									

B I_{SC} 記錄表

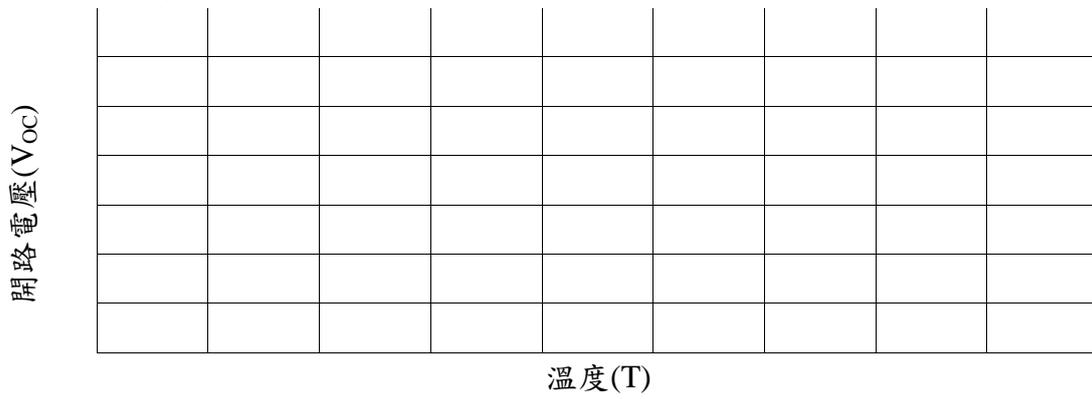
時間									
電流									
I_{SC} 安培 (A)									

步驟5. 分別將短路電流(I_{SC})與開路電壓(V_{OC})對溫度(T)的曲線繪自下圖中，並觀察其中的差異。

A 短路電流(I_{sc})對溫度曲線圖



B 開路電壓(V_{oc})對溫度曲線圖



(5) 問題

- a. 何謂光譜照度(spectrum irradiance)?光譜照度對於太陽能發電效益有何影響?
- b. 溫度係數的定義為何?溫度係數對於太陽能面板的影響為何?請舉例。
- c. 請根據以下產品型錄的日照-電壓電流曲線間的關係，紀錄日照值的變化，繪出合適的曲線，並比較差異。

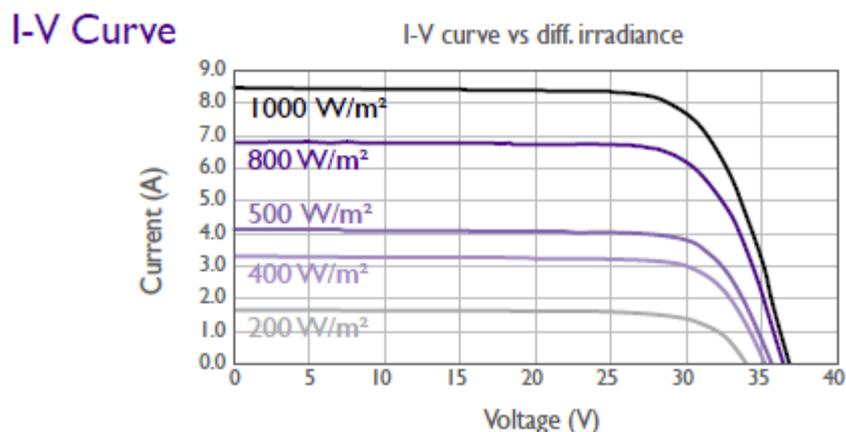


圖 32 日照-電壓電流曲線

- d. 承上，透過本實際模廠的太陽能發電模組 1.5k 實際測量的 Voc 與 Isc；Vmp 與 Imp 的 I-V curve，並比照原廠提供資料(如上圖)繪出相對應的曲線。並探討其中差異。

單元三、太陽能模組特性：遮蔭與發電量變化實驗

(1) 實驗目的

藉由遮蔭實驗來探討得知，串連模組與並聯模組遭到遮蔭後，對於太陽能模組之發電量的有何影響。

(2) 實驗原理

太陽光電板需要陽光才能發電，沒有日照的時候（陰雨天或夜晚）即無法發電供電。架設太陽光電板的場地周圍，須避免高樓、樹林或其他有可能遮蔽太陽光照射太陽光電板的高物遮蔽物，以利太陽光電板可以完全的接收太陽光達到最大的發電效益。太陽光與照物之間的關係如下圖 33 所示。

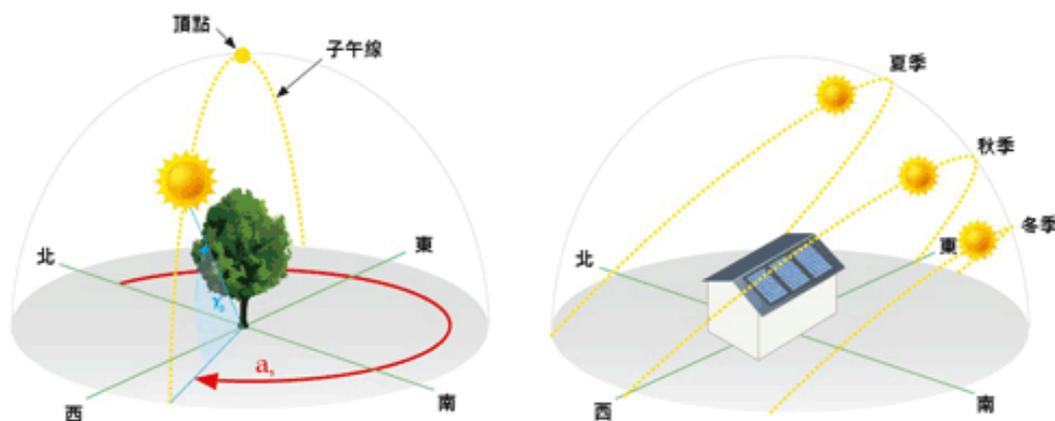


圖33 太陽光與照物之間的關係

太陽能板在架設時，需要注意以下幾點：遮蔭、方向、以及角度。：陰影影響發電量極大，安裝時應避開可能之陰影。

1. 電板正面向正南：在北半球應面向正南以接受最大的陽光照射。在南半球則需面對正北。

2. 傾斜角度：緯度越大，陽光越在南邊，為接受最大的陽光照射，太陽能板安裝應有傾斜角度，就一般而言採用當地緯度作為適當傾斜角度；以獨立系統而言，為使光電板在冬天接受較大陽光通常以緯度加上 度作為傾斜角度，例如在台灣緯度為23度，則需傾斜23度左右。但實際上，台灣冬至時模組合適仰角為47度；春、秋分時模組合適仰角為23.5度；夏至時模組合適仰角為0度，如圖34所示。

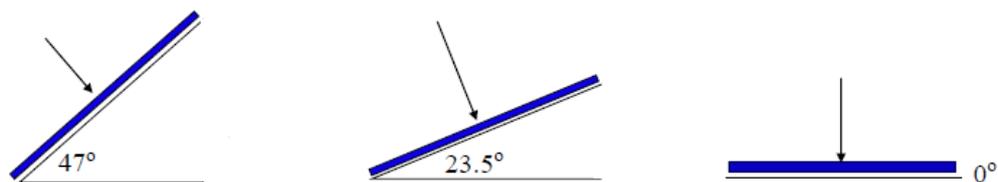


圖34 太陽能面板發電適合角度

因此才會發展出太陽能追日系統(單元五將有詳細說明)。在了解了太陽運形軌跡以及太陽能模組最適合的運行仰角後，我們將作一遮蔭與發電量變化實驗的相關實驗，透過串連模組與並聯模組被遮蔭的條件下，記錄下發電曲線並探討分析。

(3) 實驗設備

- 三用電錶 1 支
- 電流勾錶 1 支
- 電壓探棒 1 支
- 瓦楞紙板 3 片



三用電錶



電流勾錶



電壓探棒



瓦楞紙板

(4) 實驗步驟

步驟一：拿出遮蔭板將教學平台之太陽能模組做部分遮蔭，單片 250W 太陽能變板體積為 1639 mm x 983 mm x 40 mm(L x W x H)，請遮住單片長度的 1/10 面積(1639 mm/10=163.9mm)，遮蔭部分示意如圖 35 所示。紀錄面板遭受部分遮蔭時有何影響。

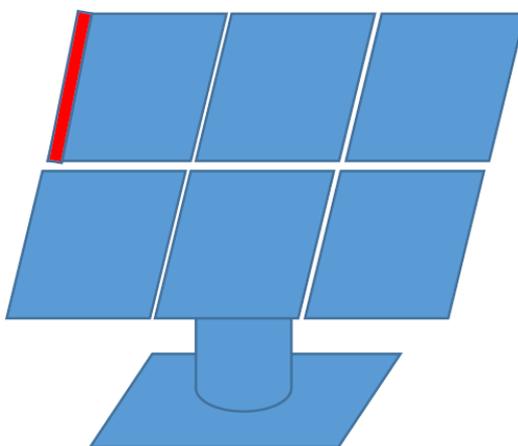


圖 35 單片長度的 1/10 面積(1639 mm/10=163.9mm)

步驟二：將教學平台中的手自動控制平台的機組導通狀態切換至手動模式。



圖 36 切換至手動模式

步驟三：切換至手動模式後，按下開啟鍵(Start)(若教學平台上之太陽能發電系統已在開啟狀態則忽略此步驟)。



圖 37 按下開啟鍵(Start)

步驟四：將三用電錶上之旋鈕調整至量測直流電的狀態(DCV)，並將電壓探棒與三用電表連接。

步驟五：將電壓探棒與教學平台模組上之面板端子台連接進行量測。量測位置如下圖所示，紅色端子台為正電(+);黑色端子台為負電(-)。量測時須注意直流電壓正負極性，避免電壓顯示為負的數值。

步驟六：將電流勾錶與教學平台模組上之面板端子台連接進行量測，並將其值記錄於後方圖表中。量測位置如圖 38 所示，量測時須注意電流方向，避免電流顯示為負的數值。

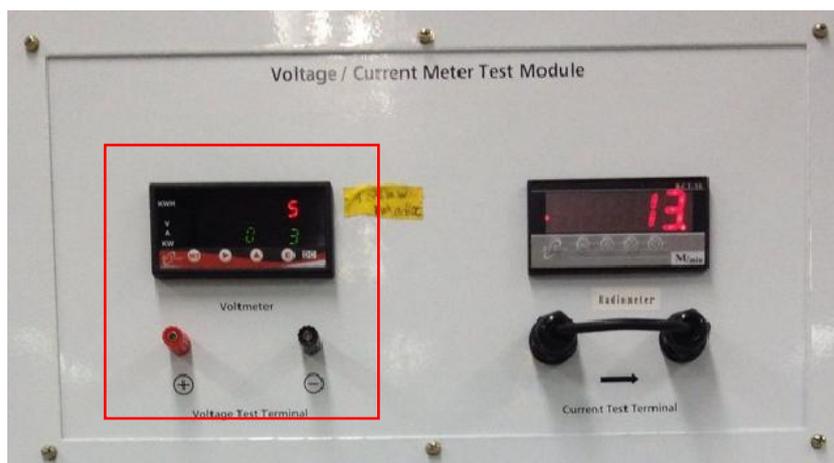


圖 38 教學平台量測太陽能模組電壓之位置

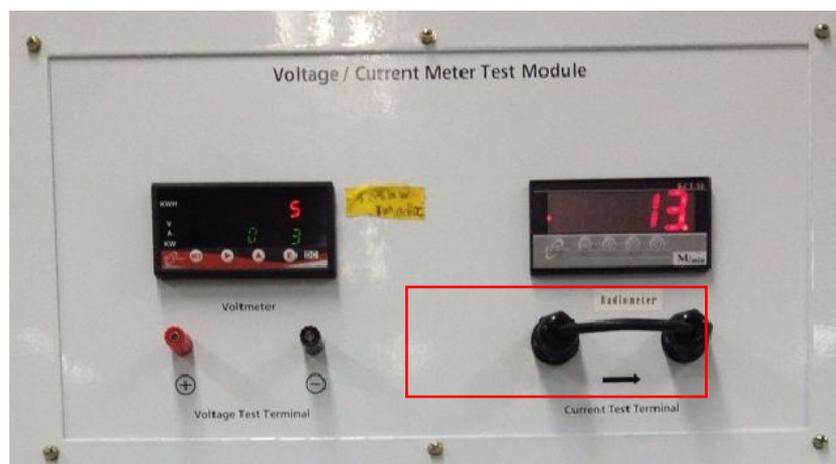


圖 39 教學平台量測太陽能模組電流之位置

步驟七：重複步驟五至六，並將其量測值紀錄記錄於下方表格中，每一筆記錄資料之時間為 5 分鐘。

步驟八：接著請遮住單片寬度的 1/5 面積($983\text{mm}/5=196.6\text{mm}$)，遮蔭部分示意圖如圖 40 所示。紀錄面板遭受部分遮蔭時有何影響。實驗步驟重複五至七進行紀錄。

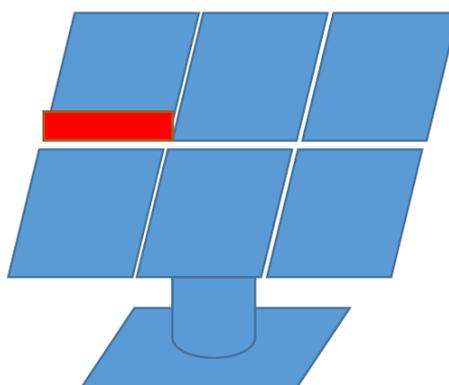


圖 40 單片寬度的 1/5 面積($983\text{mm}/5=196.6\text{mm}$)

步驟九：自訂太陽能板遮蔭的部分，重複步驟五至七。再比較與前兩者之差異。

註：開始量測電流時，須注意電流勾錶上與直流電壓數值是否歸零，如不為零時，請將電錶校正至零點再進行量測。

(a) 遮蔭第一部分

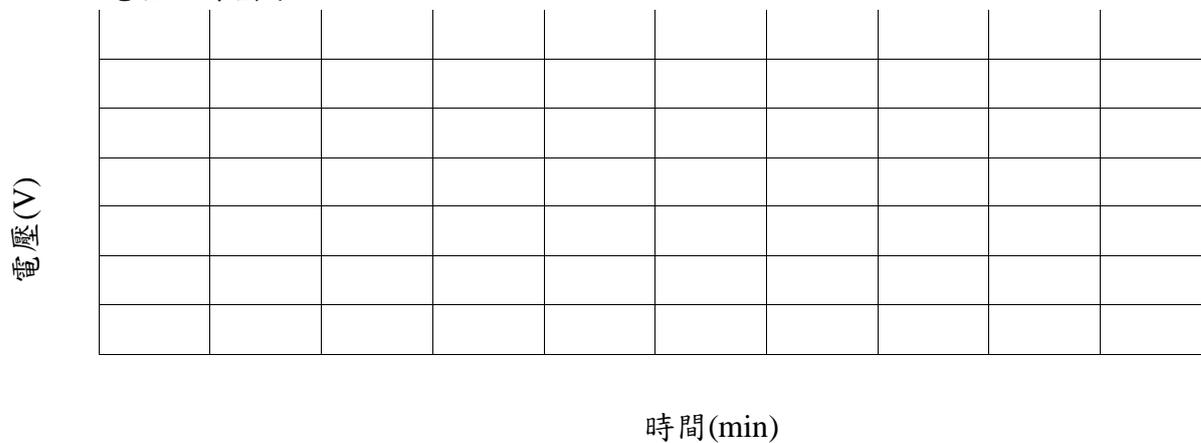
A 電壓-時間記錄表:

時間									
電壓									
伏特 (V)									

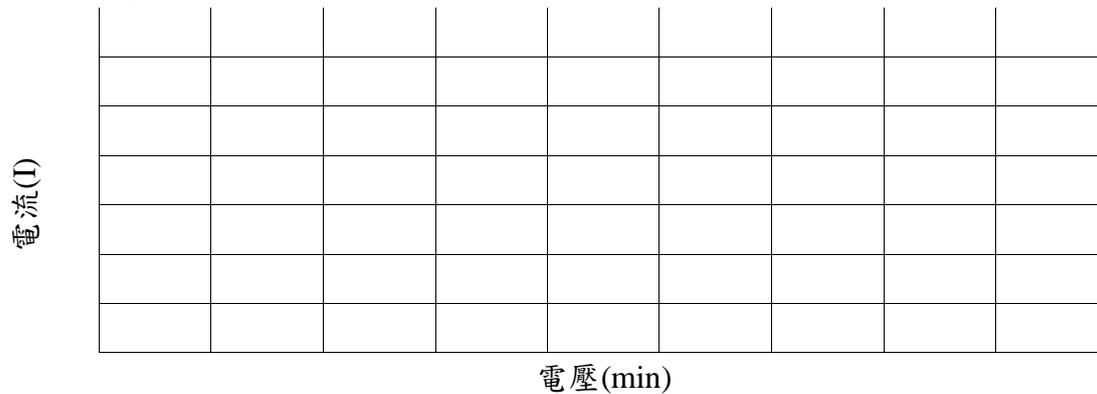
B 電流-時間記錄表:

時間									
電流									
安培 (A)									

C 電壓紀錄圖形:



D 電流-電壓記錄:



(b) 遮蔭第二部分

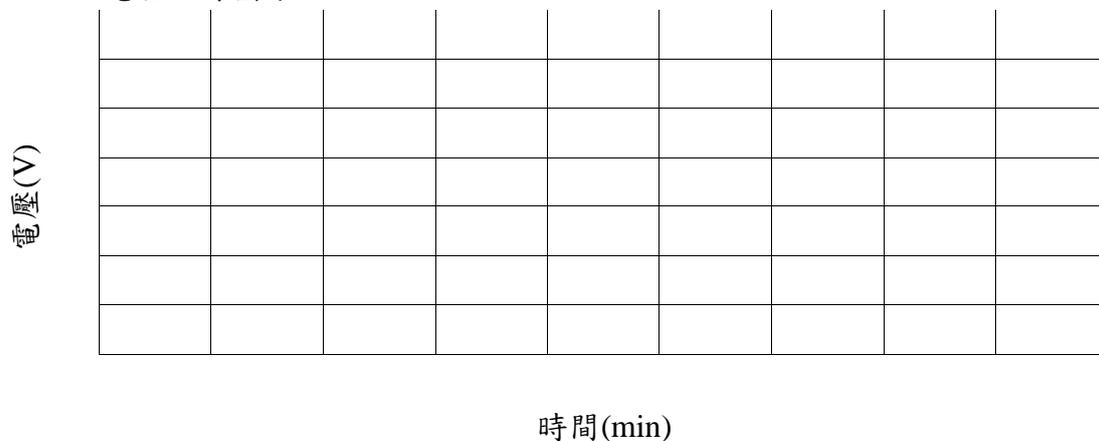
A 電壓-時間記錄表:

時間									
電壓									
伏特 (V)									

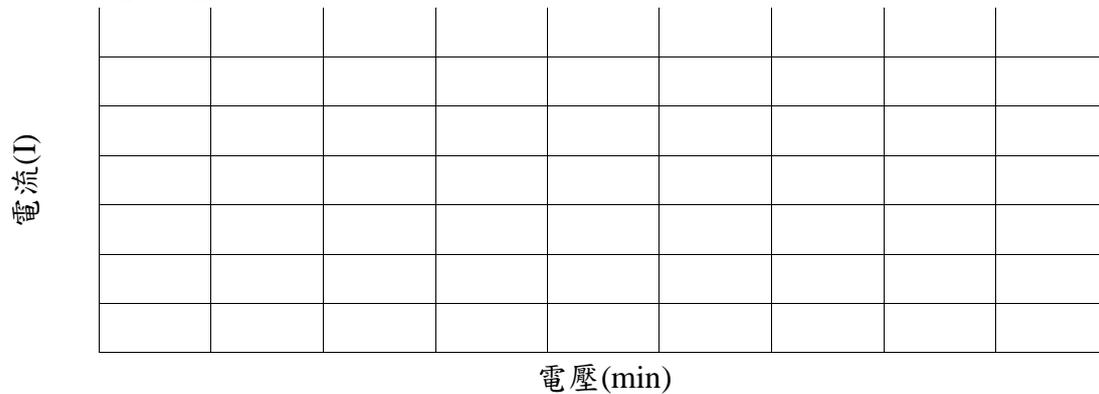
B 電流-時間記錄表:

時間									
電流									
安培 (A)									

C 電壓紀錄圖形:



D 電流-電壓記錄:



(c) 自訂遮蔭

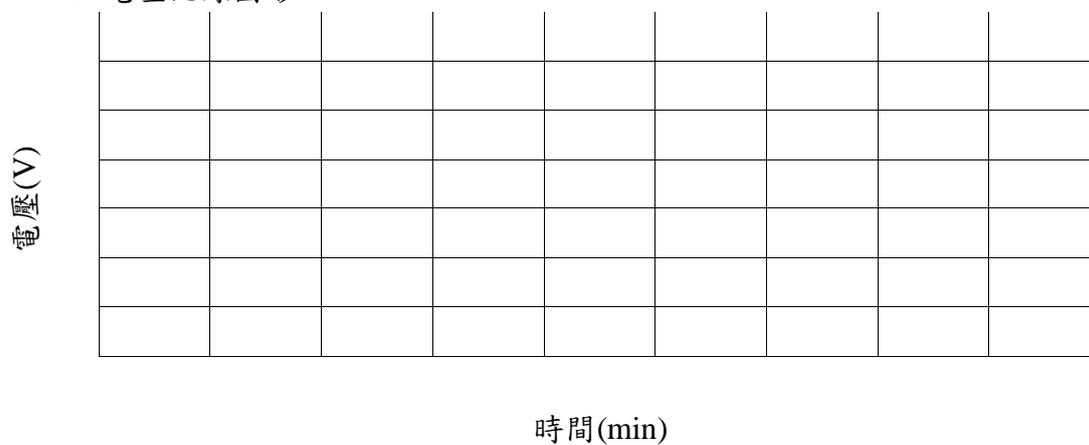
A 電壓-時間記錄表:

時間									
電壓									
伏特 (V)									

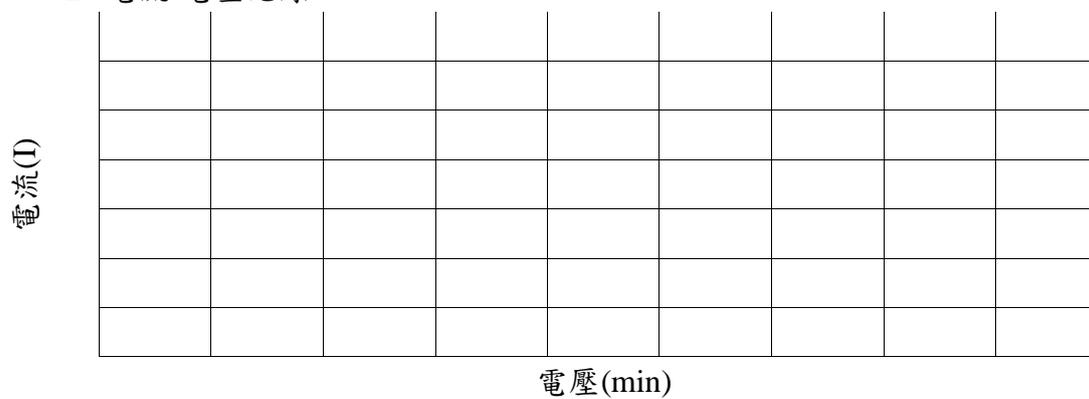
B 電流-時間記錄表:

時間									
電流									
安培 (A)									

C 電壓紀錄圖形:



D 電流-電壓記錄:



(5) 問題

- a. 實驗裡前兩個遮蔭部分之功率輸出比例何者較高，原因為何？

- b. 這個實驗設定的最大電流是多少？為何電流到達這個位準？
- c. 如果一個太陽能板完全被遮蔭，電流會是多少？
- d. 有被遮蔭與沒被遮蔭的模組相比，功率輸出低多少比例？

單元四、追日系統介紹與實作

(1) 實驗目的

透過遮蔭實驗可得知遮蔭對於太陽能發電有著顯著影響後。接著將透過太陽能追日支架來進行自動追日實驗。

(2) 實驗原理

目前3kW太陽發電模組是由兩個發電模組所構成，太陽能A模組為1.5kW追日型模組，太陽能B模組為1.5kW追日型模組，合計兩組太陽能追日支架共3kW。追日型支架的追日範圍與角度等資訊，透過中央控制電路板進行設定，進而自動控制追日角度。

A. 原廠所提供的中控版外觀如圖41所示。

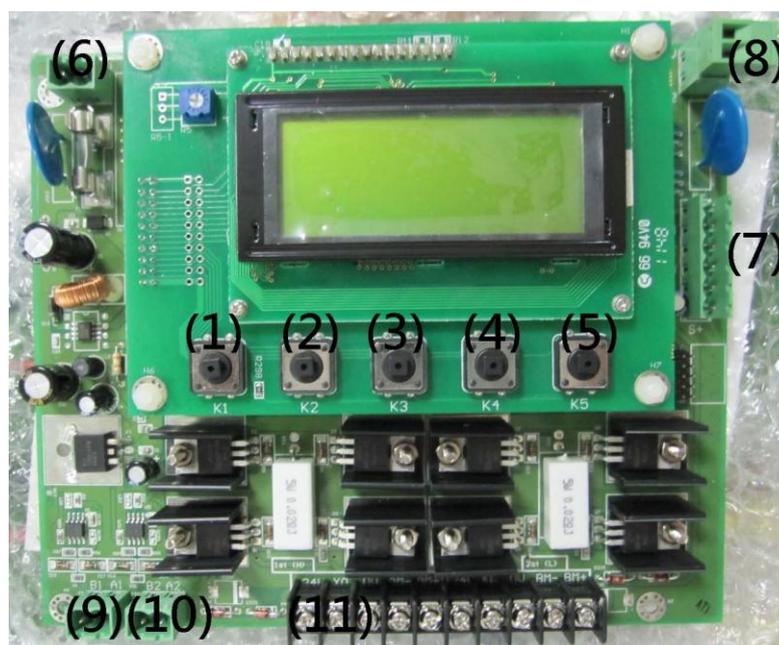


圖41 原廠所提供的中控版外觀

尺寸: W 152mm*L 177mm*H 70mm

(1)=>K1 按鍵

(2)=>K2 按鍵

(3)=>K3 按鍵

(4)=>K4 按鍵

(5)=>K5 按鍵

(6)=>TR1:電源輸入端子台

(7)=>TR2:sun sensor 訊號輸入端子台

(8)=>TR3:風速過高輸入端子台

(9)=>TR4:485 通訊端子台

(10)=>保留

(11) =>TR5:馬達輸入端子台

B 畫面說明

自動模式畫面:單軸角度水平為180度，往東減少，往西增加。顯示為現在單軸追日系統的角度。

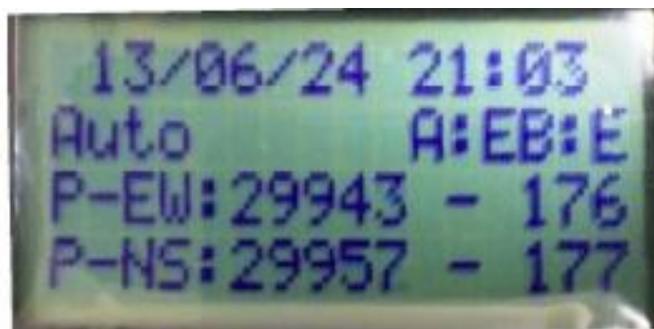


圖42 現在單軸追日系統的角度

自動模式畫面-2方位角正南為180度，順時針為角度增加，逆時針為角度減少。仰角水平為0度，天頂為90度，顯示的方位角和仰角為電控板記算的太陽位置角度:



圖43顯示的方位角和仰角為電控板記算的太陽位置角度

寸動模式畫面:代表使用者選中方位角做寸動操作記錄下發電曲線並探討分析。

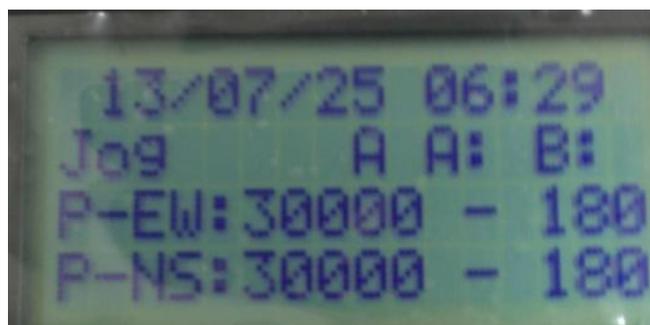


圖 44 寸動模式畫面

管理者模式畫面:反白的位數為使用者目前正在調整的位數。



圖 45 管理者模式畫面

設定模式畫面(經度): 如台灣E:121.35度，畫面設定為E12135，其中E12135都可調整。



圖46 設定模式畫面

C. 功能模式種類說明

i 按鍵操作說明

- K1: 西/加1
- K2: 東/減1
- K3: 換軸/換位數
- K4: 切畫面/不儲存退出
- K5: 確認/儲存退出

ii 主功能簡介

- 1 自動模式(Auto) 2 寸動模式(Jog) 3 手動模式(Move)
- 4 復歸原點(Origin) 5 管理者模式(Admin) 6 設定模式(Mode Set)
- 7 設定模式1(Mode Set1) 8 移動到自訂位1(Go goal1) 9 移動到自訂位2(Go goal2)
- 10 移動到自訂位3(Go goal3) 11 錯誤查詢(Warning) 12 內部測試模式(test)

iii按鍵功能簡介:

表7 所有功能清單

1 自動模式(Auto)	2 寸動模式(Jog)	3 手動模式(Move)
4 復歸原點(Origin)	5 管理者模式(Admin.)	6 設定模式(Mode Set)
7 錯誤查詢(Warning)	8 設定自訂位置 1(Go goal1)	9 移動到自訂位置 1(Goal1RTN)
10 設定自訂位置 2(Go goal2)	11 移動到自訂位置 2(Goal2RTN)	

表8 模式操作功能鍵說明

模式	按鍵	功能
1 自動模式	K1	模式加 1
	K2	模式減 1
	K3	無
	K4	無
	K5	進入模式
1 自動模式進入後	K1	無
	K2	無
	K3	無
	K4	切換顯示
	K5	退出模式
2 寸動模式	K1	模式加 1
	K2	模式減 1
	K3	無
	K4	無
	K5	進入模式
2 寸動模式進入後	K1	往西
	K2	往東
	K3	換軸
	K4	無
	K5	退出模式
3 手動模式	K1	模式加 1
	K2	模式減 1
	K3	無
	K4	無

	K5	進入模式
3 手動模式進入後	K1	往西
	K2	往東
	K3	換軸
	K4	停止
	K5	退出模式
4 復歸原點	K1	模式加 1
	K2	模式減 1
	K3	無
	K4	無
	K5	進入模式
4 復歸原點進入後	K1	無
	K2	無
	K3	無
	K4	無
	K5	退出模式
5 管理者模式模式	K1	模式加 1
	K2	模式減 1
	K3	無
	K4	無
	K5	進入模式
5 管理者模式進入後	K1	數值加 1
	K2	數值減 1
	K3	換位調整
	K4	不存儲返回上一參數
	K5	存儲往下一參數
6 設定模式	K1	模式加 1
	K2	模式減 1
	K3	無
	K4	無
	K5	進入模式
6 設定模式進入後	K1	數值加 1
	K2	數值減 1
	K3	換位調整
	K4	不存儲返回上一參數
	K5	存儲往下一參數
7 錯誤查詢	K1	模式加 1

	K2	模式減 1
	K3	無
	K4	無
	K5	進入模式
7 錯誤查詢進入後	K1	查看組數加 1
	K2	查看組數減 1
	K3	無
	K4	無
	K5	退出模式
8 設定自訂位置 1	K1	模式加 1
	K2	模式減 1
	K3	無
	K4	無
	K5	進入模式
8 設定自訂位置 1 進入後	K1	往西
	K2	往東
	K3	換軸
	K4	不儲存位置退出模式
	K5	儲存位置退出模式
9 移動到自訂位 1	K1	模式加 1
	K2	模式減 1
	K3	無
	K4	無
	K5	進入模式
9 移動到自訂位 1 進入後	K1	無
	K2	無
	K3	無
	K4	無
	K5	退出模式
10 設定自訂位置 2 模式	K1	模式加 1
	K2	模式減 1
	K3	無
	K4	無
	K5	進入模式
10 設定自訂位置 2 進入後	K1	往西
	K2	往東
	K3	換軸

	K4	不儲存位置退出模式
	K5	儲存位置退出模式
11 移動到自訂位置 2	K1	模式加 1
	K2	模式減 1
	K3	無
	K4	無
	K5	進入模式
11 移動到自訂位置 2 進入後	K1	無
	K2	無
	K3	無
	K4	無
	K5	退出模式

(3) 實驗設備

- 無需實驗設備

(4) 實驗步驟

步驟一：進入復歸原點模式進行追日支架移動實驗。馬達自動往東走直到撞到硬體極限，後過幾秒會更新 pulse 數值。更新完成後自動退出。如果要在未更新完成前退出，可按 k5 不更新 pulse 值退出。



圖 47 進入復歸原點模式畫面

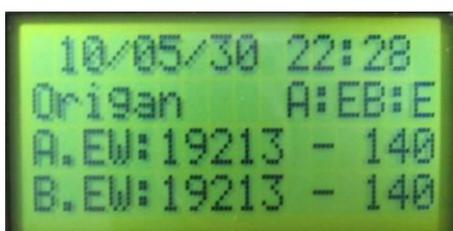


圖 48 按下 k5 直接復歸原點模式

步驟二：進入寸動模式進行手動操作追日支架移動實驗。首先切換至寸動(Jog)模式後，按下確認鍵(k5)進入。



圖 49 吋動模式畫面

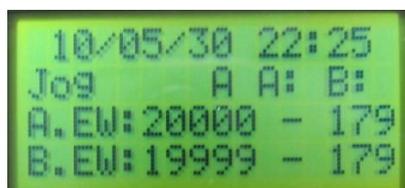


圖 50 按下 k5 進入吋動畫面

接著，手動控制追日系統往東走或往西走(須有人員在現場使用，支架移動時須先注意現場四周環境是否有人員走動)。按住 k1 選到組數追日系統往西(放開停止)；按住 k2 選到組數追日系統往東(放開停止)；按下 k3 換組數控制。如要退出吋動模式(Jog)時，按下 k5 鍵即可退出該模式。

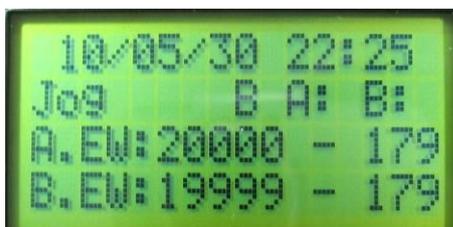


圖 51 按下 k5 退出吋動模式

步驟三：進入手動控制進行手動操作追日支架移動實驗。首先設定手動控制追日系統往東走或很西走。

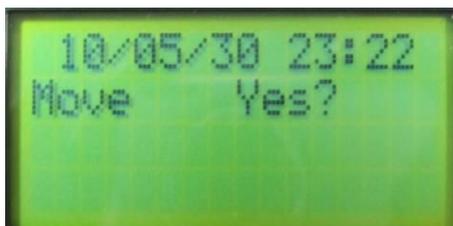


圖 52 進入手動模式畫面



圖 53 按下 k5 進入手動畫面

- a. 手動模式會受 pulse 保護，使用前要做過復歸原點。
- b. 按下 k1 選到組數追日系統往西
- c. 按下 k2 選到組數追日系統往東
- d. 按下 k3 換組數控制且追日系統動作停止
- e. 移動自指定位置後，按下 k5 鍵便會退出手動模式



圖 54 按下 k5 退出寸動模式

步驟四：設定時間和經度及緯度。再進行經度與緯度設定時，需事先備份原先設定數值後再進入設定模式進行修改，避免設定出現錯誤時無法回復原始設定值。受先進行時間設定作業。



圖 55 進入手動模式畫面



圖 56 時間修正畫面

- a. 按 k1 選到數字加 1
- b. 按 k2 選到數字減 1

- c. 按 k3 換位數
- d. 按 k4 不儲存設定值退出設定模式
- e. 按 k5 儲存設定值進入設定經度
- f. 時間設定:設定格林威治時間
- g. 如台灣 2010 年 7 月 7 日 9 點 30 分
- h. 畫面設定為 10/07/07
- i. 01/30/00
- j. 設定完成後按 k5

按下 k5 鍵後會直接進入下一個經度設定畫面，畫面如下:

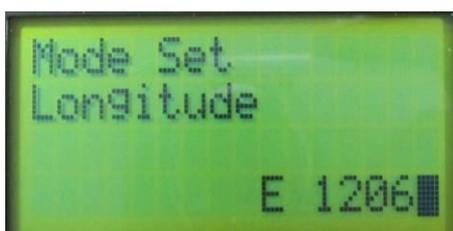


圖 57 經度設定畫面

- a. 按 k1 選到數字加 1
- b. 按 k2 選到數字減 1
- c. 按 k3 換位數
- d. 按 k4 不儲存設定值進入設定時間
- e. 按 k5 儲存設定值進入設定緯度
- f. 經度設定
- g. 如台灣 E:120.65 度
- h. 畫面設定為 E 12065
- i. 設定完成後按 k5

按下 k5 鍵後會直接進入下一個緯度設定畫面，畫面如下:

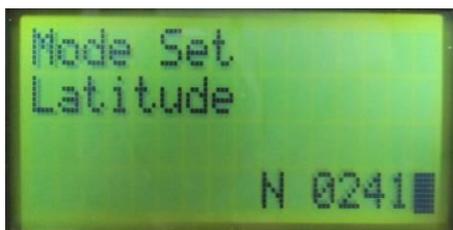


圖 58 緯度設定畫面

- a. 按 k1 選到數字加 1

- b. 按 k2 選到數字減 1
- c. 按 k3 換位數
- d. 按 k4 不儲存設定值進入設定經度
- e. 按 k5 儲存設定值退出設定模式
- f. 緯度設定
- g. 如台灣 N:24.11 度
- h. 畫面設定為 N 02411
- i. 按下 k5 退出設定模式

(5) 問題

- a. 進入手動操作模式後，將追日型太陽能 A 支架設定至東邊 145 度位置。追日型太陽能 A 支架設定至西邊 205 度位置。並紀錄兩支架移動後太陽能的發電變化量。
- b. 進入經度設定模式，將經度設定值改成 E:130.25 度。實驗結束後並回復到原始設定前數值。
- c. 進入經度設定模式，將緯度設定值改成 N:23.03 度。實驗結束後並回復到原始設定前數值。

單元五、太陽能模組特性：變流器、MPPT 介紹與轉換效率計算

(1) 實驗目的

了解太陽能模組的變流器的轉換原理、MPPT 介紹以及實際量測和轉換效率。

(2) 實驗原理

教學平台內之太陽能變流器為DC-DC之直流轉換器，其作用是在太陽能板之發電電壓與負載輸出變動之情況下能調整輸出電壓所設計的位準。按照原廠提供的單片250W太陽能面板發電的額定電壓標準，進行三串兩並後發電容量為1.5kW，一共建置兩組為1.5kW+1.5kW=3kW。所以此控制系統為降壓型之電力轉換器電路(Buck)需選擇符合電壓標準的等級。所以太陽能板所產生之直流電(90V~110V)轉換為電池及匯流排之電壓(23V~25V)。其單組太陽能等效電路圖如圖59所示：

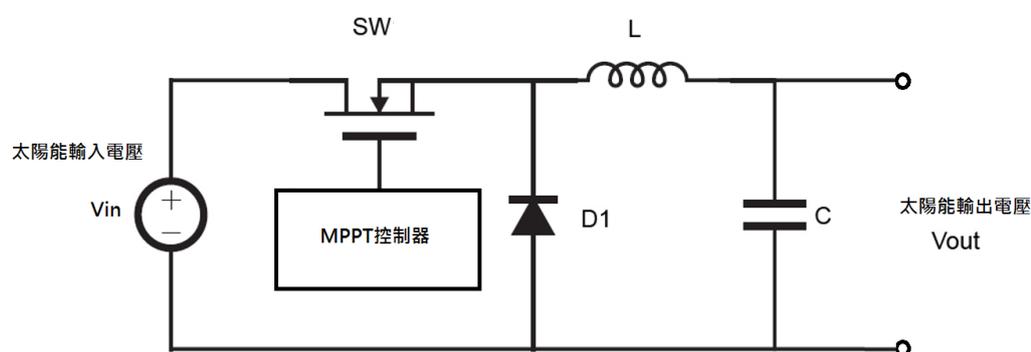


圖59 變流器之等效電路圖

接著要計算判別太陽電池效率的參數，首先最大輸出功率 P_m (單位為瓦特, Watts)。最大輸出功率為：

$$P_m = V_m \times I_m$$

轉換效率定義為進入太陽電池之太陽輻射光能量(P_{in})與太陽電池的輸出電能(P_m) 的百分比，可以由以下的計算公式表示之。

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100\% = \frac{V_m \times I_m}{P_{in}} \times 100\%$$

表 9 250W 太陽能面板廠商提供之數據資料

Electrical Data

Typ. Nominal Power P_{N}	240 W	245 W	250 W	255 W	260 W
Typ. Module Efficiency	14.9%	15.2%	15.5%	15.8%	16.1%
Typ. Nominal Voltage V_{mp} (V)	29.9	30.3	30.6	30.8	31.2
Typ. Nominal Current I_{mp} (A)	8.03	8.09	8.17	8.28	8.34
Typ. Open Circuit Voltage V_{oc} (V)	37.0	37.2	37.4	37.6	37.7
Typ. Short Circuit Current I_{sc} (A)	8.58	8.64	8.69	8.76	8.81
Maximum Tolerance of P_{N}	0 / +3%				

* Above data are the effective measurement at Standard Test Conditions (STC)
 * STC: Irradiance 1000W/m², spectral distribution AM 1.5, temperature 25 ± 2 °C, in accordance with EN 60904-3
 * The given electrical data are nominal values which account for basic measurements and manufacturing tolerances of ±10%, with the exception of P_{N} . The classifications is performed according to P_{N} .

Temperature Coefficient

NOCT	46 ± 2 °C
Typ. Temperature Coefficient of P_{N}	-0.44 % / K
Typ. Temperature Coefficient of V_{oc}	-0.32 % / K
Temperature Coefficient of I_{sc}	0.04 % / K

* NOCT: Normal Operation Cell Temperature, measuring conditions: irradiance: 800W/m², AM 1.5, air temperature 20 °C, wind speed 1 m/s

Mechanical Characteristics

Dimensions (L x W x H)	1639 x 983 x 40 mm (64.53 x 38.70 x 1.57 in)
Weight	18.5 kg (40.79 lbs)
Front Glass	High transparent solar glass (tempered), 3.2 mm (0.13 in)
Cell	60 multicrystalline solar cells, 156 x 156 mm (6" x 6")
Cell Encapsulation	EVA
Back Sheet	Composite film
Frame	Anodized aluminum frame
Junction Box	IP-67 rated with 3 bypass diodes
Connector Type & Cables	TYCO PV4: 1x4mm ² (0.04x0.16 inch ²), Length: each 1.0 m (39.37 inches) YUKITA YS-254/YS-255: 1x4mm ² (0.04x0.16 inch ²), Length: each 1.065 m (41.93 inches)

由於太陽能板之發電量容易受到外在因素影響，如日照強度、溫度、遮蔭等等。故在考慮此情況下，科學家發展出了一個最大功率點追蹤(Maximum Power Point Tracking)之方法，簡稱 MPPT，使變流器能夠在這些外在因素影響下能夠調整內部轉換開關，使其輸出為最大功率之狀態。由上述得知，本系統分為兩組，個別為命名為太陽能 A 模組與太陽能 B 模，單個模組的發電容量為 1.5kW，合計 3kW 的發電容量。所以在選擇 MPPT 時，首先必須注意額定容量是否符合系統設計，接著輸入電壓範圍需選擇在 91.8V(30.6V*3 串=91.8V)以上，如果電壓範圍選錯則會導致 MPPT 無法正常啟動。並且須針對負載儲能設備(電池組)的電壓作設計匹配，以本實驗平台為例，本實驗平台的儲能庫(電池組)的電壓等級為 24VAC，因此 MPPT 在系統設計的選擇上，需注意以上幾項，才能使 MPPT 正常作業。因此本次實驗將透過教學平台上之端點，來獲得變流器 MPPT 一次測與二次測之電壓和電流，並計算功率，計算其轉換器之效率多寡。

表 10 太陽能 MPPT 充電器規格原廠提供參數

Specifications Summary		
型號	SCHG-241500	SCHG-483000
額定輸出功率	1500W	3000W
輸入電壓範圍	30~150V	60~300V
充電啟動/停止電壓	30V/25V	60V/50V
額定輸入電流	20A	
最大充電器效率/MPPT效率	>85%/>90%	
待機電源	<5W	
輸出電壓	24V	48V
電池浮充電壓	27.6Vdc±0.5V	55.2Vdc ±1V
電池保護電壓	28.8V ±0.5V, 1min charging per 10min	57.6V ±1V, 1min charging per 10min
負載放電截止電壓	23Vdc±0.5V	46Vdc±1V
Sleep Mode 電池電壓	20Vdc±0.5V	40Vdc±1V
額定充電電流	62.5A	
負載接點	獨立接點，可當啟動交流變頻器用	
人機介面	LED/LCD status Indications	
操作溫度	-40C~40C	
防潮防濕	IP43	
介面包裝	For a 20cm cable, use copper wire with PVC insulation	
尺寸(長×寬×高) mm	400×325×130	
重量	15kg	

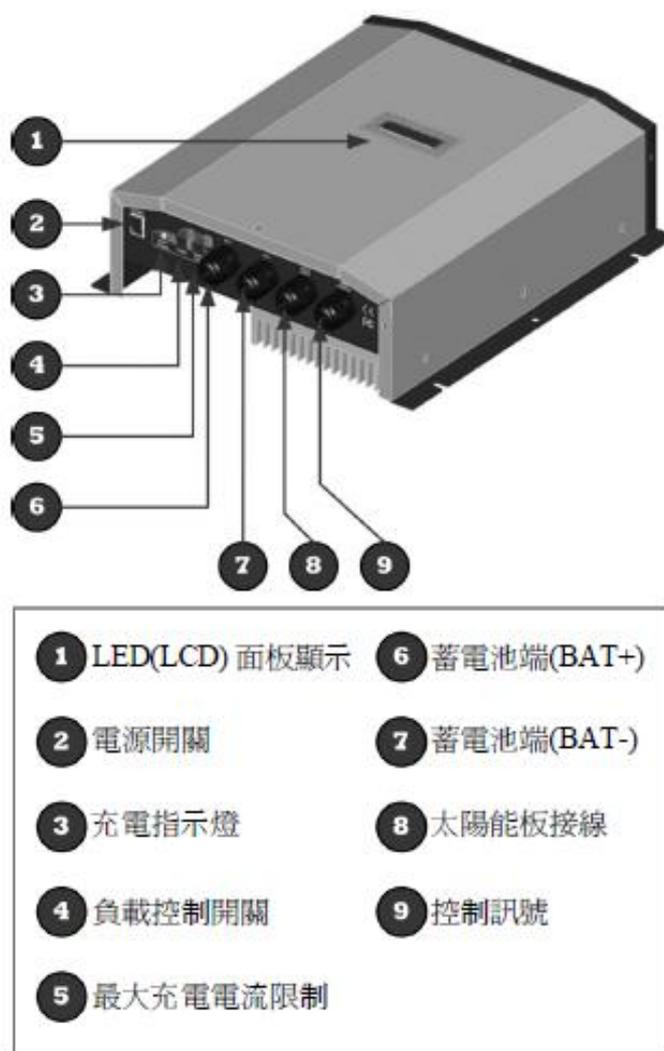


圖 60 原廠提供太陽能 MPPT 充電器外觀

(3) 實驗設備

- 三用電錶 2 支
- 電流勾表 2 支
- 電壓探棒 2 組



三用電錶

電流勾錶

電壓探棒

(4) 實驗步驟

步驟一:將教學平台中的手自動控制平台的機組導通狀態切換至手動模式。

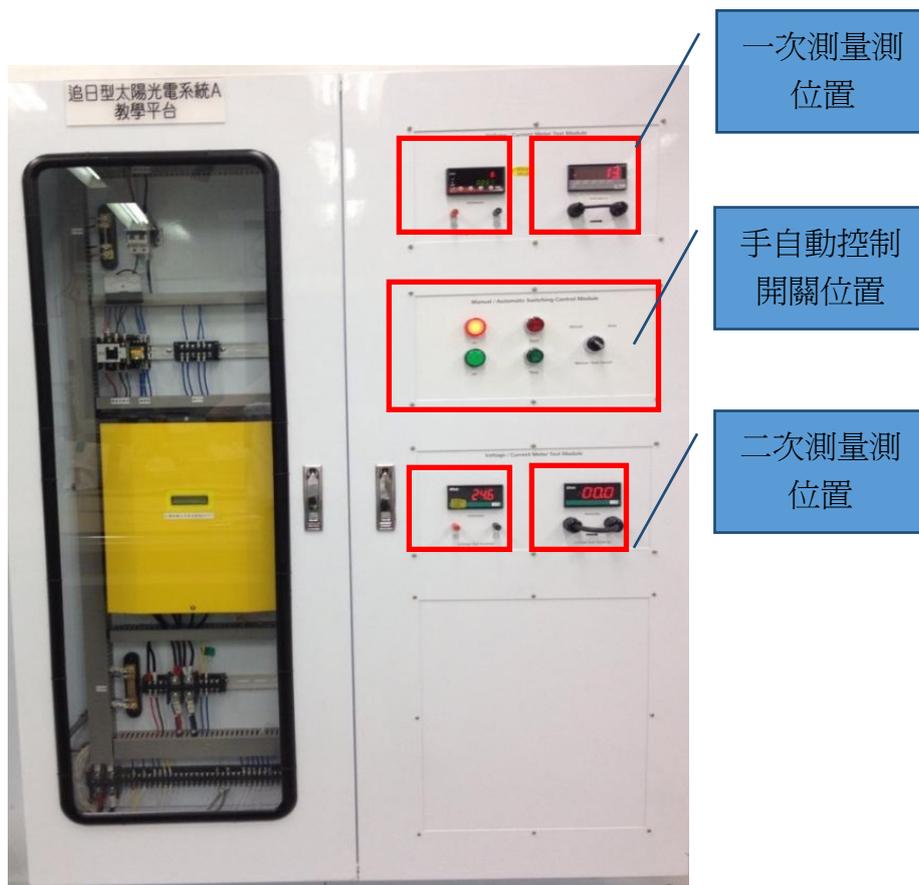


圖 61 太陽能模組教學平台之量測點位置圖

步驟二：切換至手動模式後，按下開始鍵(Start)，太陽能發電系統將會自動連結，此時太陽能模組將會發電經過變流器傳至直流匯流排。

步驟三：將三用電錶上之旋鈕調整至量測直流電的狀態(DCV)，並將電壓探棒與三用電表連接。

步驟四：將電壓探棒與教學平台模組上之面板端子台連接進行變流器一次側之電壓量測。量測位置如上頁圖所示，紅色端子台為正電(+); 黑色端子台為負電(-)。

步驟五：將電流勾錶與教學平台模組上之面板端子台連接進行變流器一次側之電流量測。

步驟六：將電壓探棒與教學平台模組上之面板端子台連接進行變流器二次側之電壓量測。量測位置如上頁圖所示，紅色端子台為正電(+); 黑色端子台為負電(-)。

步驟七：將電流勾錶與教學平台模組上之面板端子台連接進行變流器二次側之電流量測。

步驟八：重覆步驟四至五，並將其變流器一次側、二次側之量測值紀錄於下方表格中。

步驟九：將所有已記錄到之量測值，分別進行計算兩側之功率，並計算其轉換效率。

註：開始量測電流時，須注意電流勾錶上與直流電壓數值是否歸零，如不為零時，請將電錶校正至零點再進行量測。

a. 變流器一次側量測記錄：

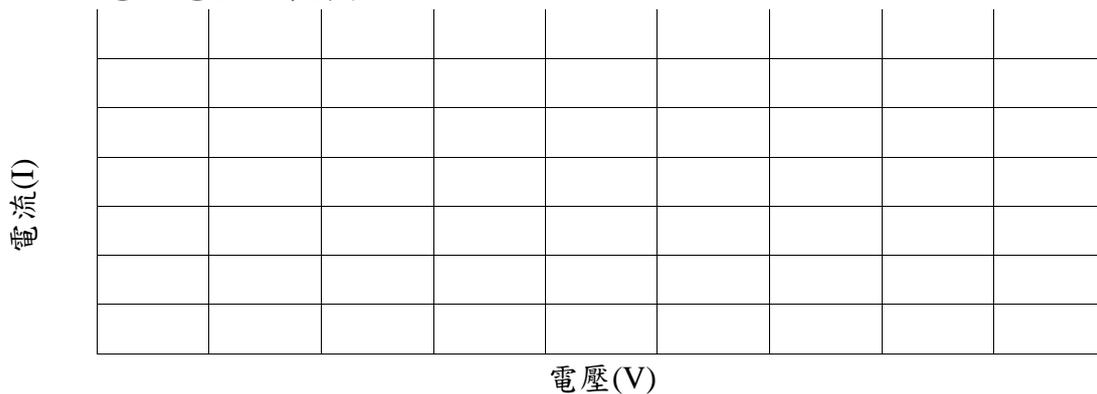
A 電壓-時間記錄表

時間									
電壓									
伏特 (V)									

B 電流-時間記錄表

時間									
電流									
安培 (A)									

C 電流-電壓紀錄圖形



b. 變流器二次側量測記錄：

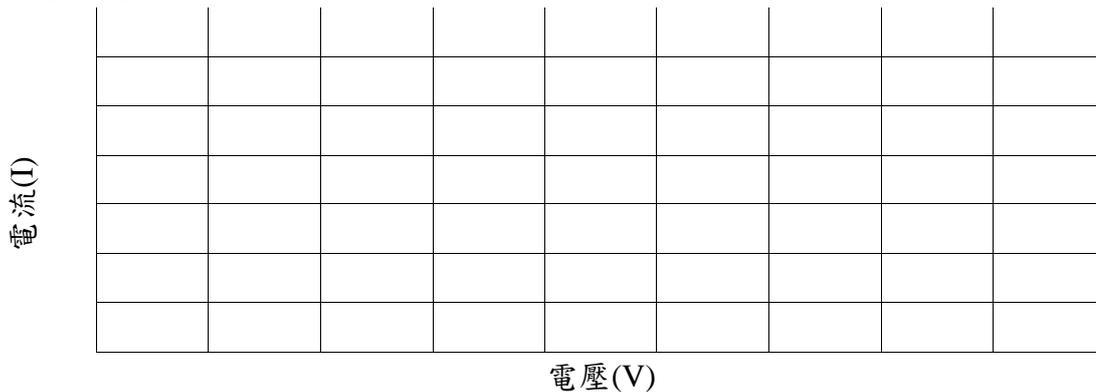
A 電壓-時間記錄表

時間 電壓									
伏特 (V)									

B 電流-時間記錄表

時間 電流									
安培 (A)									

C 電流-電壓紀錄圖形

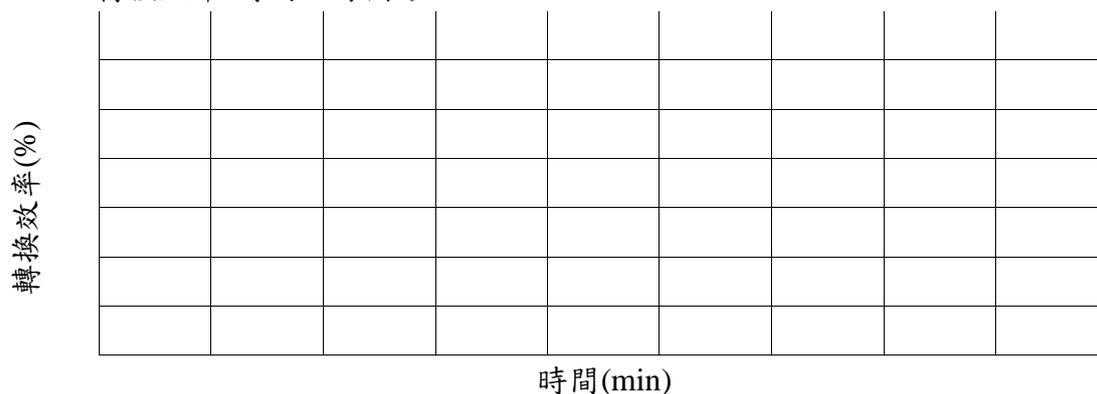


c. 轉換效率記錄：

A 效率-時間記錄表

時間									
效率									
百分比 (%)									

B 轉換效率-時間紀錄圖形



(5) 問題

- a. 若一組太陽能板之連接方式為四串三並，則變流器之規格耐壓須為多少伏特？
- b. MPPT 的主要功用為何？系統在設計 MPPT 時需注意哪些事項？
- c. 系統加入 MPPT 後與未加入時，轉換效率的差異為何？請繪出曲線圖觀察，並計算兩者差異的百分比。

單元六、風機輸入端電壓、電流量測

(1) 實驗目的

本實驗目的在於透過 400W 水平軸與 300W 垂直軸風力發電機模組進行 V-I 特性曲線紀錄。了解自然風場對於風力發電機所產生效益，並藉由風力發動機把風的動能轉化為有用的電力，透過傳動軸，將轉子（由以空氣動力推動的扇葉組成）的旋轉動力傳送至發電機。藉由這樣的發電過程中了解系統發電程度，並建立學生對於風能的概念。

(2) 實驗原理

a. 首先我們要先了解風力發電機各項特性分析，才能開始進行實驗。

i. 風力機的輸入功率：風力機的輸入功率(P_A)，它的定義是單位時間內穿過風力機掃掠面積的動能。

$$P_A = \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 = \frac{\pi}{8} \cdot \rho \cdot D^2 \cdot V^3$$

其中 m 為流動空氣的質量(kg)

V 為風速(m/sec)

ρ 為空氣密度(3kg/m)

A 為葉片旋轉面積(2 m)

D 為風力機直徑(m)。

ii. 風力機的輸出功率：風力機的輸出功率(P)是指轉變為機械能的功率。

$$P = C_P \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot V^3$$

其中 1.當 V =常數, P 正比於 D 的平方,即風速一定時,風力機的輸出功率和風力機的直徑平方成正比。

2.當 D =常數, P 正比於 V 的立方,即風力機的直徑固定時,風力機的輸出功率和風速的立方成正比。

3.當風力機直徑,風速不變時,風力機的輸出與 C_P 成正比。

4.當風力機輸出功率和風力機葉片數無關,但與空氣密度成正比。

- iii. 風能利用係數 C_p : 風能利用係數 $C_p = \text{風力機的輸入功率 } P / \text{風力機的輸出功率 } P_A$ ，而根據貝茲(Betz)理論，理論上風能利用係數的最大值為 0.593；一般水平軸風力機的 C_p 約為 0.2~0.5；一般垂直軸風力機的 C_p 約為 0.3~0.4。
 - iv. 風力機的轉矩係數: 風力機的輸出功率(P)也可以用風力機的轉矩與其旋轉角速度的乘積來表示。即 $P = T \cdot \omega$ 。其中 T 為風力機轉矩(N·m)。
- b. 接著本實驗平台是由 400W 水平軸風力發電機與 300W 垂時式風力發電機所串連組成，一共 $400W+300W=700W$ 的發電容量。以下將介紹兩種風力發電機的外觀預特性。
- i. 400W 水平軸風力發電機

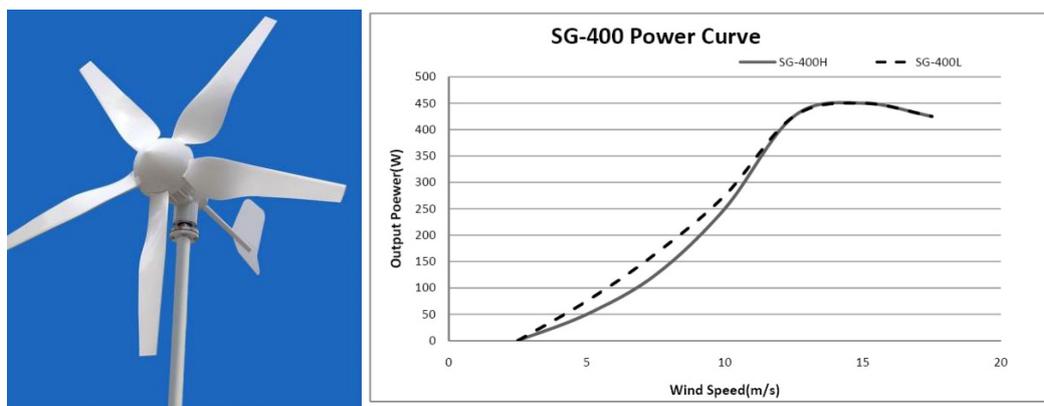


圖 62 水平風力發電機示意圖、發電功率曲線

表 11 原廠 400W 水平軸風力發電機規格

Rotor diameter: 1.55m	High Efficiency, High reliability Start Up in Gentle Breeze Long Lifetime up to 15 years, Maintenance- free Light Weight, Easy to Install Heavy Wind Resistance, Low Noise Anti-Rust, Anti-Corrosion Damp-Proof, Water-Proof, Sand-Proof
Weight: 18kgs	
Start-up wind speed: 2.0m/s	
Cut-in wind speed: 2.5m/s	
Rated wind speed: 12m/s	
Rated power: 400W	
Rated voltage: DC 12V/24V	
Rated speed: 750 rpm	
Kilowatt hours/month: 54kWh/Mmonth (monthly average wind speed 5.5m/s)	
Maximum wind speed: 50m/s	
Over-speed protection: blade aerodynamic elastic, electromagnetic braking and dump load	
Certification: CE, RoHS, ETL, ISO9001:2000 etc.	

ii. 300W 垂時式風力發電機

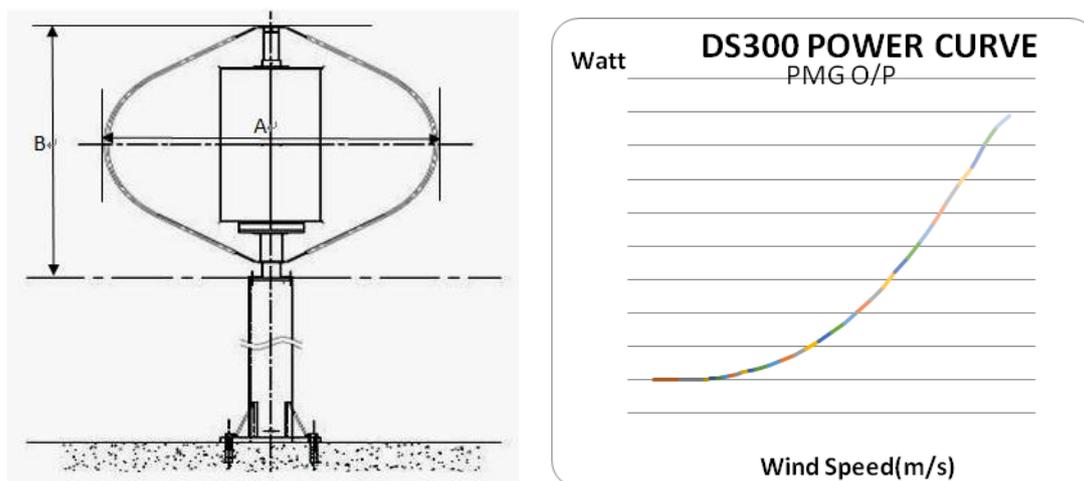


圖 63 垂直風力發電機示意圖、發電功率曲線

表 12 300W 垂直軸風力發電機規格

一般規格			
額定功率	300 瓦	額定風速	13.5 公尺/秒
額定轉速	750 轉/每分	切入風速	<3 公尺/秒
切離風速	15 公尺/秒	耐受極端風速	60 公尺/秒
尺寸/重量			
葉片直徑(A)	1.25 公尺		
風車高度 (B)	1.06 公尺		
塔架高度 (選配)	建議高度 3 公尺		
風車重量	25 公斤		
風車規格			
外揚力型葉片	3 葉		
內阻力型葉片	2 層		
葉片材質	全鋁化經陽極處理		
轉軸材質	全鋁化經陽極處理		

(3) 實驗設備:

- i. 電壓表
- ii. 電流勾表
- iii. 電壓探棒



(4) 實驗步驟:



圖 64 水平軸風力發電機實際照和水平軸風力發電機系統教學平台



圖 65 垂直軸風力發電機實際照和垂直軸風力發電機系統教學平台

- 步驟1. 首先各別在量測實際400W水平軸與300W垂直軸風力發電機模組的發電電壓，需在水平軸風力發電模組的數位電表測試模組面板上進行。
- 步驟2. 數位電表測試模組透過面板上的端子台進行量測。左邊為電壓表(紅色端子台為正電+；黑色端子台為負電-)。



圖 66 數位電表測試模組

- 步驟3. 使用數位電表測試模組，透過面板上的電流端子進行量測。右邊為電流勾表。



圖 67 數位電表測試模組

- 步驟4. 開始量測直流電壓時，須注意電壓表上數值是否歸零，如不為零時，請將電表校正至零點再進行量測。
- 步驟5. 開始量測電流時，須注意電流表上數值是否歸零，如不為零時，請將電表校正至零點再進行量測

(5) 實驗紀錄：將量測結果記錄到以下表格中。

a. 400W 水平軸風力發電機組實驗紀錄：

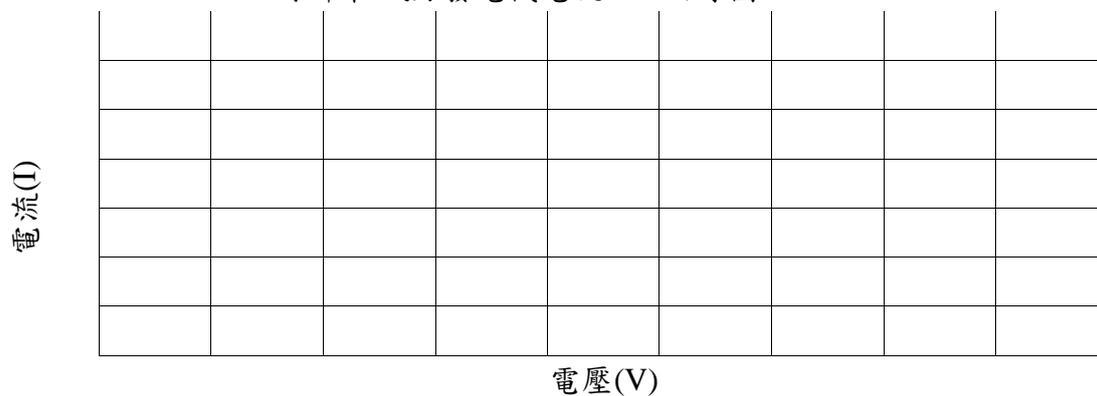
A. 400W 水平軸風力發電機電壓 V 數據紀錄表

時間									
電壓									
伏特 (V)									

B. 400W 水平軸風力發電機電流 I 數據紀錄表

時間									
電流									
安培 (A)									

C. 400W 水平軸風力發電機電流 I-V 曲線圖



b. 300W 垂直軸風力發電機組實驗紀錄:

A. 300W 垂直軸風力發電機電壓 V 數據紀錄表

時間									
電壓									
伏特 (V)									

B. 300W 垂直軸風力發電機電流 I 數據紀錄表

時間									
電流									
安培 (A)									

C. 300W 垂直軸風力發電機電流 I-V 曲線圖



(6) 問題

- a. 量測電壓與電流時須注意極性嗎?為什麼?
- b. 試著按原廠提供的水平軸風力發電機組的發電功率曲線,繪出經由實驗過程中所量測到的功率曲線。並比較其中差異程度。
- c. 試著按原廠提供的垂直軸風力發電機組的發電功率曲線,繪出經由實驗過程中所量測到的功率曲線。並比較其中差異程度。
- d. 承上題,比較水平軸與垂直軸發電機兩者之功率曲線差異。

單元七、風機輸出端電壓、電流量測與轉換效率計算

(1) 實驗目的

本實驗目的在於了解與 400W 水平軸與 300W 垂直軸風力發電機模組之變流器之動作原理，同時透過實際量測到之電壓與電流，了解其輸出功率，並同時可計算其轉換效率。

(2) 實驗原理

教學平台內之風力發電機變流器為AC-DC的轉換器，其作用是將風力發電機發電所產生之交流電壓與交流電流轉換成直流電並將其傳輸至儲能電池中。由原廠資料顯示，風力發電機變流器所接受之輸入電壓範圍大約在5V~38V，但是變流器之啟動電壓為6V，故當風力發電機轉動產生之電壓大於6 V時變流器才會導通開始送電至儲能電池。其變流器等效電路圖如圖68所示：

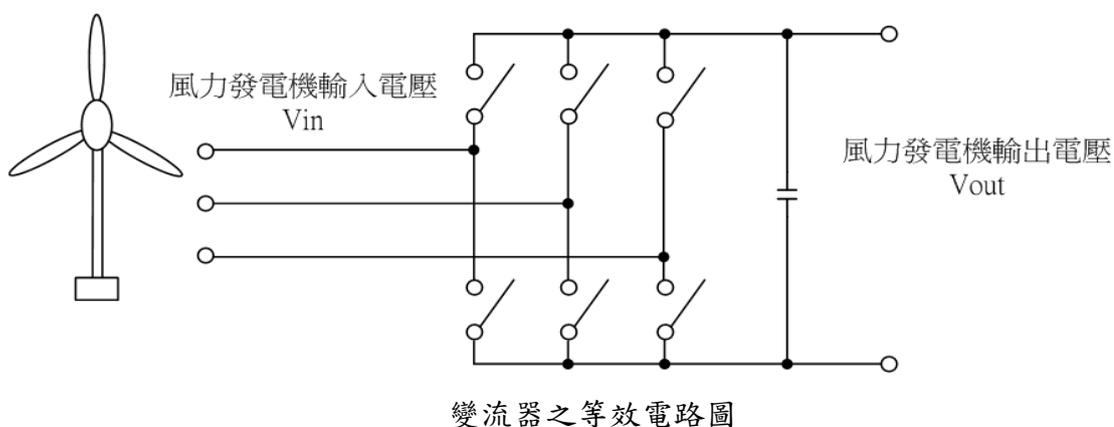


圖 68

由於風力發電與太陽能發電一樣容易也受到外在因素影響。所以風力發電與太陽能一樣也有發展出最大功率點追蹤(Maximum Power Point Tracking)之方法，簡稱MPPT，使變流器能夠在這些外在因素影響下能夠調整內部轉換開關，使其輸出為最大功率之狀態。

本次實驗將透過教學平台上之端點，來獲得變流器MPPT一次側與二次側之電壓和電流，並計算功率，計算其轉換器之效率多寡。計算輸入與輸出的能量轉換效率的方式如下

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$



圖 69 水平軸風力發電機實際照和水平軸風力發電機系統教學平台



圖 70 垂直軸風力發電機實際照和垂直軸風力發電機系統教學平台

(3) 實驗設備

- 三用電錶 2 支
- 電流勾表 2 支
- 電壓探棒 2 組



三用電錶



電流勾錶



電壓探棒

(4) 實驗步驟:

請選擇其中一台風力機組來作量測。

步驟一:將教學平台中的手自動控制平台的機組導通狀態切換至手動模式。



圖 71 風力發電機模組教學平台之量測點位置圖

步驟二：切換至手動模式後，按下開始鍵(Start)，風力發電系統將會自動連結，此時太陽能模組將會發電經過變流器傳至直流匯流排。

步驟三：將電壓探棒與教學平台模組上之面板端子台連接進行變流器一次側之電壓量測。

步驟四：將電流勾錶與教學平台模組上之面板端子台連接進行變流器一次側之電流量測。

步驟五：將電壓探棒與教學平台模組上之面板端子台連接進行變流器二次側之電壓量測。量測位置如上頁圖所示，紅色端子台為正電(+); 黑色端子台為負電(-)。

步驟六：將電流勾錶與教學平台模組上之面板端子台連接進行變流器二次側之電流量測。

步驟七：重覆步驟三至六，並將其變流器一次側、二次側之量測值紀錄於下方表格中。

步驟八：將所有已記錄到之量測值，分別進行計算兩側之功率，並計算其轉換效率。

註 1：開始量測電流時，須注意電流勾錶上與直流電壓數值是否歸零，如不為零時，請將電錶校正至零點再進行量測。

註 2：變流器一次側為交流電源，二次側為直流電源，故在量測時，請注意電表的狀態是量測直流還是交流。

a. 變流器一次側量測記錄：

A 電壓-時間記錄表

時間									
電壓									
伏特 (V)									

B 電流-時間記錄表

時間									
電流									
安培 (A)									

C 電流-電壓紀錄表

電流(I)									

電壓(V)

b. 變流器二次側量測記錄：

A 電壓-時間記錄表

時間									
電壓									
伏特 (V)									

B 電流-時間記錄表

時間									
電流									
安培 (A)									

C 電流-電壓紀錄表

電流(I)									

電壓(V)

c. 轉換效率記錄：

A 效率-時間記錄表

時間									
效率									
百分比 (%)									

B 轉換效率-時間記錄表

轉換效率(%)									

時間(min)

(5) 問題:

- 在相同風速下，哪一種風力發電機之發電量較高?原因為何?
- 若風機轉速超出了額定轉速，則風力發電機會發生什麼結果?
- 計算能量轉換效率時，根據能量守恆，輸入應等於輸出，為何輸入與輸出不相等?請分析能量消耗之原因。

單元八、風機保護裝置介紹及手自動切換開關實作

(1) 實驗目的

本實驗目的在於介紹一獨立的風力發電機系統需具備哪些保護裝置。保護裝置在風力發電機系統中扮演什麼角色。如何有效的保護系統，並維持系統正常運作。

(2) 實驗原理

在每一個系統中，都一定會有許多的保護裝置，目的在於防止系統遭受到外力或者內部因數，導致系統無法正常運作或系統癱瘓。所以如何正確的保護系統則顯得非常重要。下圖為風力發電機系統的接線相內部設備。以及內部線路設計單線圖。其中保護元件包含了交流無熔絲開關與煞車電阻。



圖 72 風力發電機系統的接線相內部設備與配線

交流無熔絲開關：用來隔離及啟斷電氣系統，包含剎車系統開關、風力發電開關、儲能系統開關。無熔絲開關簡稱 N.F.B.，在其額定容量下，能瞬間啟斷線路電流之故障，得以確保用電安全。且由於其係為一種利用電磁動作原理之斷路器，而作為線路之過電流保護裝置，在故障排除後，不會有更換熔絲之麻煩，故為目前一般屋內配線之接戶開關。一般有單極、兩極（2P）及三極（3P）三種，如下圖所示。此種開關現在已逐漸取代閘刀開關，其最大優點就是不必換裝保險絲，而其過載保護乃利用電磁或電熱作用自動跳脫，切斷電路，當故障排除後，可再切入使用。

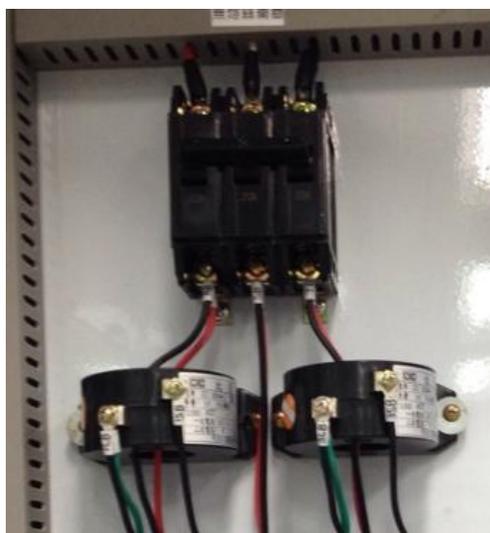


圖 73 交流無熔絲開關實體圖與接法

剎車電阻：剎車電阻的保護措施主要用在機組發生異常振動、過速、電網異常、出現極限風速等故障時，須啟動煞車保護對系統進行保護，手動的保護開關如下圖所示。

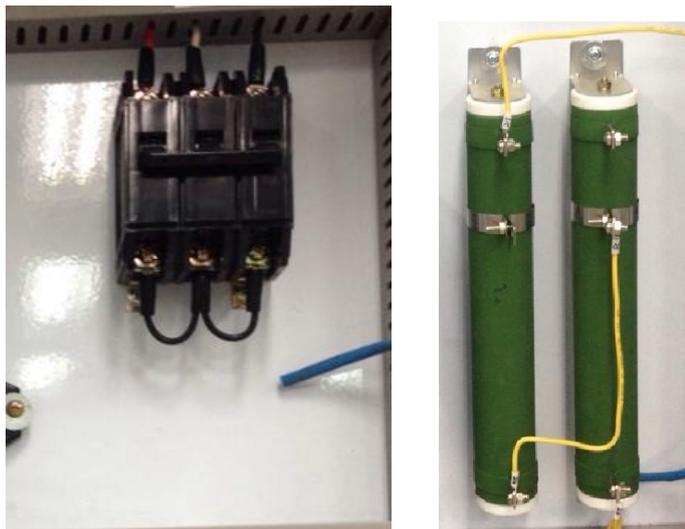


圖 75 煞車開關與煞車電阻

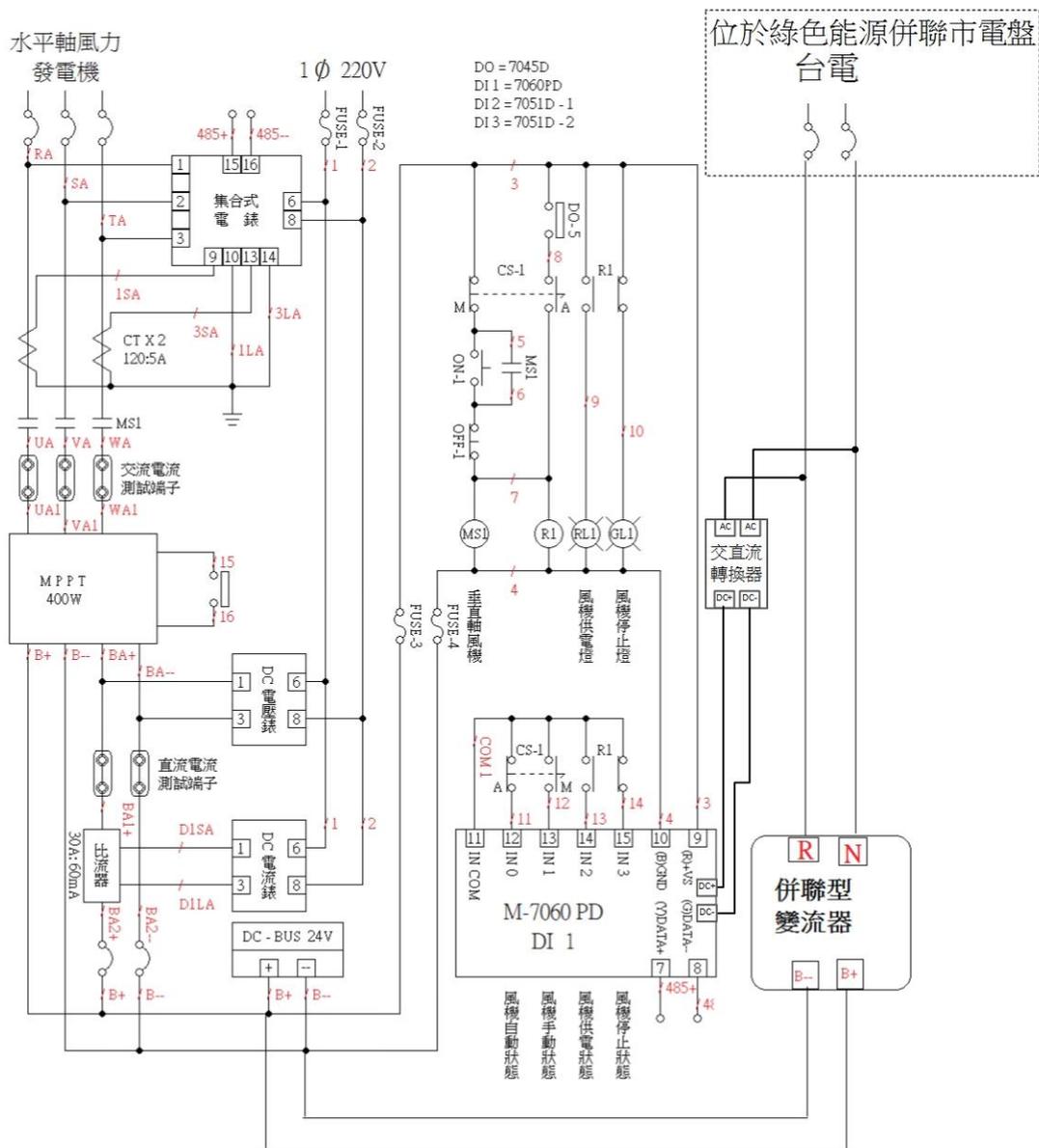


圖 77 水平風力發電機單線圖

(3) 實驗設備

- 本實驗無需準備

(4) 實驗步驟

本實驗主要藉由開關控制器的切換，認識開關的控制與運作原理，教學面板的手自動切换控制器設計如圖 79 所示。

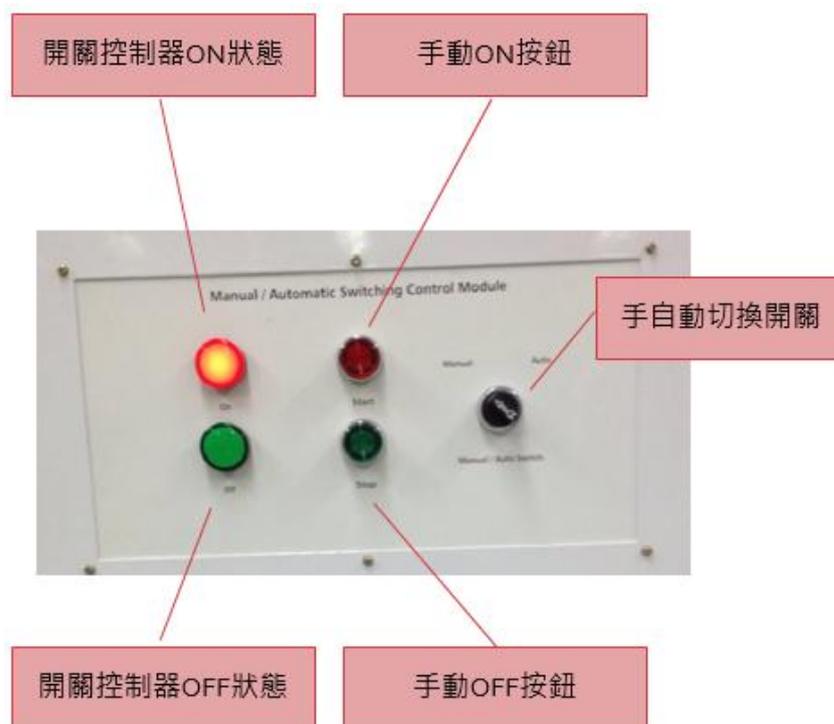


圖 79 手動自動切换控制模組

- 步驟1. 設定開關狀態的選擇，設定為開啟 Start 狀態。
- a. 將教學平台中的手自動控制平台的機組導通狀態切换至手動模式。



圖 80 模式切换旋鈕之位置圖

- b. 切換至手動模式後，按下啟動鍵(Start)，風力發電機發電系統將會自動投入(導通)。在 Start(ON)的情況下，一次測的電壓將會透過保護裝置進到 MPPT 與負載。



圖 81 啟動(Start)開關切換之位置圖

步驟2. 設定開關狀態的選擇，設定為開啟 Stop 狀態。

- a. 將教學平台中的手自動控制平台的機組導通狀態切換至手動模式。



圖 82 模式切換旋鈕之位置圖

- b. 切換至手動模式後，按下停止鍵(Stop)，風力發電機發電系統將會自動斷開(形同斷路)。在 Stop(OFF)的情況下，一次測的電壓不會進到 MPPT 與負載，系統形同斷路。



圖 83 停止(Stop)開關切換之位置圖

單元九、垂直軸風機 Power Curve 與發電量比較

(1) 實驗目的

本實驗目的在於介紹垂直軸風力發電機系統 Power Curve 的變化。藉由實驗了解風速對於風力發電的影響，以及實際發電情況。

(2) 實驗原理

一般來說，風力發電機上所標示的額定功率，通常指的是在 12m/s 風速下運轉的所產生的即時功率，稱之為額定功率。以本教學平台的 300W 垂直軸風力發電機來說，廠商所提供的資料顯是為額定容量 300W 垂直軸風力發電機，指的就是輸出額定容量為 300W，也就是說現場的風場在 12m/s 風速下，輸出功率為 300W；如果在風速僅 2~4m/s 的條件下，輸出的功率就達不到 300W。所以說，不論是垂直軸風力機或水平軸風力發電機，所發出的電能不用一直處在滿載發電的情形。其中風速的分級如陸上應用之蒲福風級表所示。實際所產出的即時功率與當下的風速密切相關，所以說功率曲線(power curve)即是在描述此一關係。換句話說，每家廠商或不同發電容量等級的風機，它的功率曲線也又有所不同。而本教學平台的 300W 垂直軸風力發電機，原廠商提供的功率曲線(power curve)與外觀如圖 84。



圖 84 300W 垂直軸風力發電機的功率曲線(power curve)

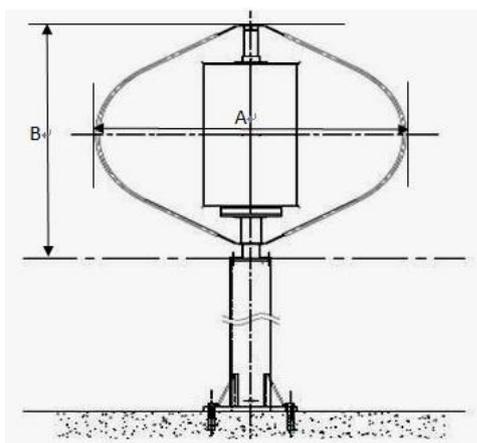


圖 85 300W 垂直軸風力發電機的外觀

表 13 300W 垂直軸風力發電機規格

一般規格			
額定功率	300 瓦	額定風速	13.5 公尺/秒
額定轉速	750 轉/每分	切入風速	<3 公尺/秒
切離風速	15 公尺/秒	耐受極端風速	60 公尺/秒
系統工作條件			
溫度範圍	-10~40°C		
濕度範圍	95% max.		

表 14 陸上應用之蒲福風級表

蒲福風級	風之稱謂	一般敘述	每秒公尺(m/s)
0	無風 calm	煙直上	不足 0.3
1	軟風 light air	僅煙能表示風向，但不能轉動風標。	0.3-1.5
2	輕風 slight breeze	人面感覺有風，樹葉搖動，普通之風標轉動。	1.6-3.3
3	微風 gentle breeze	樹葉及小枝搖動不息，旌旗飄展。	3.4-5.4
4	和風 moderate breeze	塵土及碎紙被風吹揚，樹之分枝搖動。	5.5-7.9
5	清風 fresh breeze	有葉之小樹開始搖擺。	8.0-10.7
6	強風 strong breeze	樹之木枝搖動，電線發出呼呼嘯聲，張傘困難。	10.8-13.8
7	疾風 near gale	全樹搖動，逆風行走感困難。	13.9-17.1
8	大風 gale	小樹枝被吹折，步行不能前進。	17.2-20.7
9	烈風 strong gale	建築物有損壞，煙囪被吹倒。	20.8-24.4
10	狂風 storm	樹被風拔起，建築物有相當破壞。	24.5-28.4
11	暴風 violent storm	極少見，如出現必有重大災害。	28.5-32.6
12	颶風 hurricane		32.7-36.9

了解功率曲線(power curve)與風速之間的關係後，接著就可以計算發電量了。所謂的發電量指的是輸出的功率與發電的時間乘積所得到結果。所以說，只要比對原廠所提供的功率曲線後(見上圖)，便可以估算 300W 垂直軸風力發電機的發電量。

在此先假設當地年平均風速為 8m/s，在對照功率曲線後可得知實際輸出功率約為 75W，則可以估計一年的年發電量大約是 1,051 度。

日發電量：

$$0.075(\text{kW}) \times 1(\text{天}) \times 24(\text{小時}) \times 100\%(\text{風力機組的妥善率}) = 1.8 \text{ kWh}$$

年發電量：

$$0.075(\text{kW}) \times 365(\text{天}) \times 24(\text{小時}) \times 100\%(\text{風力機組的妥善率}) = 640.8 \text{ kWh}$$

(3) 實驗設備

- 三用電錶 1 支
- 電流勾表 1 支
- 電壓探棒 1 支



三用電錶



電流勾錶



電壓探棒

(4) 實驗步驟

實驗對象為 300W 風力發電機教學平台中，針對量測一次測電力資訊的電壓電流模組，進行電壓(V)-電流(I)記錄，並得知實際功率(kW)後，變可以計算出發電量為多少。認識開關的控制與運作原理，教學面板的手自動切換控制器設計如圖 86 所示。

步驟1. 記錄 300W 垂直軸風力發電機一次測電壓資訊。

- a. 設定開關狀態的選擇，設定為開啟 Start 狀態。將教學平台中的手自動控制平台的機組導通狀態切換至自動模式，或者進入到手動模式後，將開關接換至 ON(Start)下。



圖 86 模式切換旋鈕之位置圖

切換至手動模式後，按下啟動鍵(Start)，風力發電機發電系統將會自動投入(導通)。在 Start(ON)的情況下，一次測的電壓將會透過保護裝置進到 MPPT 與負載。



圖 87 啟動(Start)開關切換之位置圖

- b. 數位電表測試模組透過面板上的端子台進行量測。左邊為電壓表(紅色端子台為正電+；黑色端子台為負電-)。



圖 88 開始量測電壓時，須注意電壓表上數值是否歸零，如不為零時，請將電表校正至零點再進行量測。

步驟2. 記錄 300W 垂直軸風力發電機一次測電流資訊。

設定開關狀態的選擇，設定為開啟 Start 狀態。將教學平台中的手自動控制平台的機組導通狀態切換至自動模式，或者進入到手動模式後，將開關接換至 ON(Start)下。

使用數位電表測試模組，透過面板上的電流端子進行量測。右邊為電流勾表。



圖 89 開始量測電流時，須注意電流表上數值是否歸零，如不為零時，請將電表校正至零點再進行量測。

步驟3. 記錄風速資料:

在垂直軸風力發電機平台中，有架設一風向風速計，在液晶螢幕上即可看到各項即時數據，如圖 90 所示。將觀察到的數值記錄後，接著測量垂直軸風力發電系統的發電資訊。



圖 90 風速風向計實體圖

步驟4. 300W 垂直軸風力發電機組實驗紀錄:

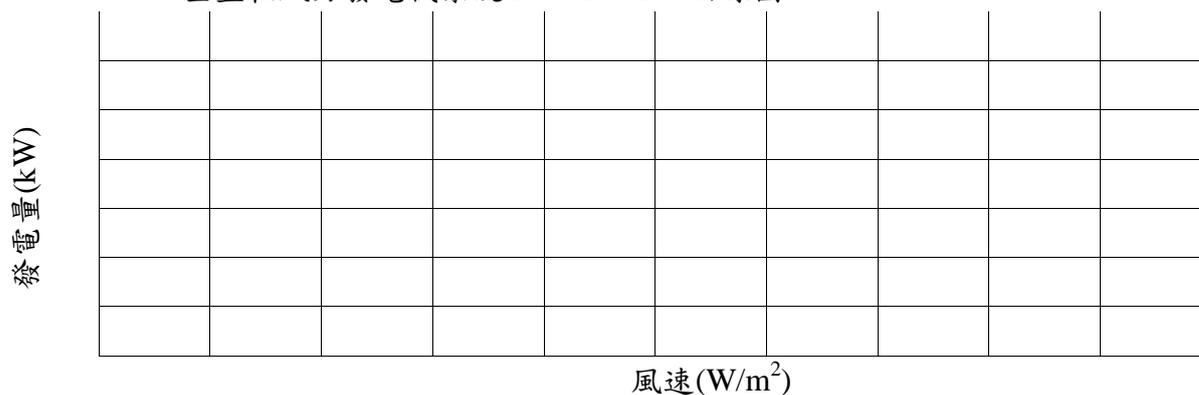
A 300W 垂直軸風力發電機電壓 V 數據紀錄表

時間									
電壓									
伏特 (V)									

B 300W 垂直軸風力發電機電流 I 數據紀錄表

時間									
電流									
安培 (A)									

C 300W 垂直軸風力發電機系統 Power Curve 曲線圖



(5) 問題

- a. 透過實驗繪出 300W 垂直軸風力發電機系統 Power Curve 後，原廠所提供之 Power Curve 進行比較，是否有所差異?並討論所造成的差異原因。
- b. 計算日發電量、月發電量、年發電量。
- c. 承上提，試算出發電成本與發電成本如何?

單元十、水平軸風力發電機 Power Curve 與發電量比較

(1) 實驗目的

本實驗目的在於介紹水平軸風力發電機系統 Power Curve 的變化。藉由實驗了解風速對於風力發電的影響，以及實際發電情況。

(2) 實驗原理

一般來說，風力發電機上所標示的額定功率，通常指的是在 12m/s 風速下運轉的所產生的即時功率，稱之為額定功率。以本教學平台的 400W 水平軸風力發電機來說，廠商所提供的資料顯是為額定容量 400W 水平軸風力發電機，指的就是輸出額定容量為 400W，也就是說現場的風場在 12m/s 風速下，輸出功率為 400W；如果在風速僅 2~4m/s 的條件下，輸出的功率就達不到 400W。所以說，不論是垂直軸風力機或水平軸風力發電機，所發出的電能不用一直處在滿載發電的情形。其中風速的分級如陸上應用之蒲福風級表所示。實際所產出的即時功率與當下的風速密切相關，所以說功率曲線(power curve)即是在描述此一關係。換句話說，每家廠商或不同發電容量等級的風機，它的功率曲線也又有所不同。而本教學平台的 400W 水平軸風力發電機，原廠商提供的功率曲線(power curve)與外觀如圖 91。



圖 91 400W 水平軸風力發電機實體圖

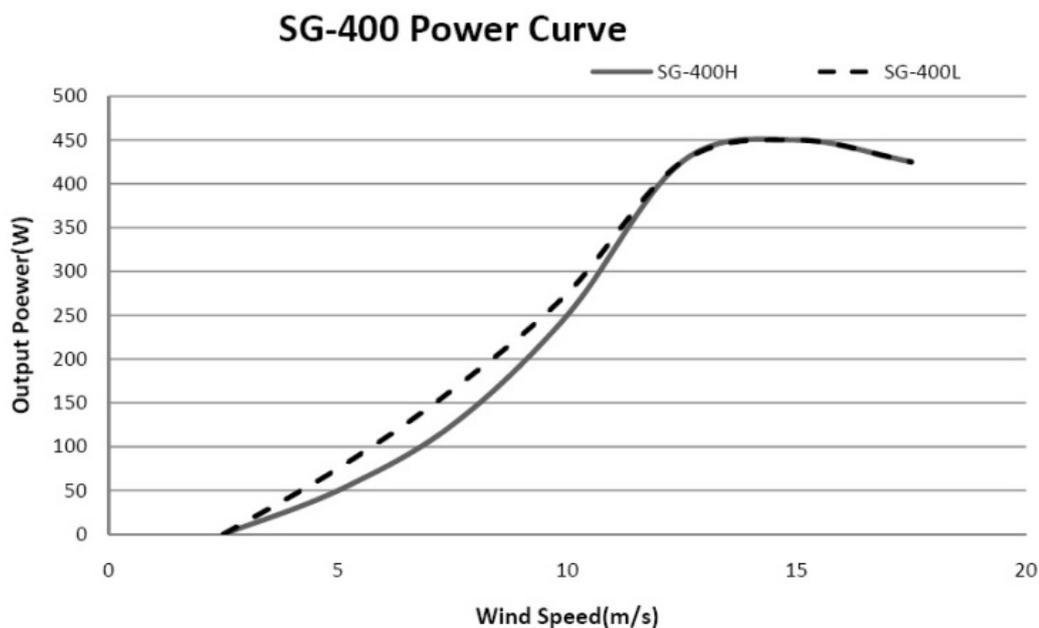


圖 92 400W 水平軸風力發電機的功率曲線(power curve)

表 14 400W 水平軸風力發電機規格

一般規格	
旋翼直徑：1.55 米	旋翼直徑：1.55 米
重量：18 公斤	重量：18 公斤
啟動風速：2.0 米/秒	啟動風速：2.0 米/秒
切割風速：2.5 米/秒	切割風速：2.5 米/秒
額定風速：12m/ s 的	額定風速：12m/ s 的
額定功率：400W	額定功率：400W

了解功率曲線(power curve)與風速之間的關係後，接著就可以計算發電量了。所謂的發電量指的是輸出的功率與發電的時間乘積所得到結果。所以說，只要比對原廠所提供的功率曲線後，便可以估算 400W 水平軸風力發電機的發電量。在此先假設當地年平均風速為 5m/s，在對照功率曲線後可得知實際輸出功率約為 50W，則可以估計一年的年發電量大約是 1,051 度。

日發電量：

$$0.05(\text{kW}) \times 1(\text{天}) \times 24(\text{小時}) \times 100\%(\text{風力機組的妥善率}) = 1.2 \text{ kWh}$$

年發電量：

$$0.05(\text{kW}) \times 365(\text{天}) \times 24(\text{小時}) \times 100\%(\text{風力機組的妥善率}) = 4\text{kWh}$$

(3) 實驗設備

- 三用電錶 1 支
- 電流勾表 1 支
- 電壓探棒 1 支



三用電錶



電流勾錶



電壓探棒

(4) 實驗步驟

實驗對象為 400W 風力發電機教學平台中，針對量測一次測電力資訊的電壓電流模組，進行電壓(V)-電流(I)記錄，並得知實際功率(kW)後，變可以計算出發電量為多少。認識開關的控制與運作原理，教學面板的手自動切换控制器設計如下圖所示。

步驟5. 記錄 400W 水平軸風力發電機一次測電壓資訊。

- a. 設定開關狀態的選擇，設定為開啟 Start 狀態。將教學平台中的手自動控制平台的機組導通狀態切换至自動模式，或者進入到手動模式後，將開關接換至 ON(Start)下。



圖 93 模式切换旋鈕之位置圖

切换至手動模式後，按下啟動鍵(Start)，風力發電機發電系統將會自動投入(導通)。在 Start(ON)的情況下，一次測的電壓將會透過保護裝置進到 MPPT 與負載。



圖 94 啟動(Start)開關切換之位置圖

- b. 數位電表測試模組透過面板上的端子台進行量測。左邊為電壓表(紅色端子台為正電+；黑色端子台為負電-)。



圖 95 開始量測電壓時，須注意電壓表上數值是否歸零，如不為零時，請將電表校正至零點再進行量測。

步驟6. 記錄 400W 水平軸風力發電機一次測電流資訊。

設定開關狀態的選擇，設定為開啟 Start 狀態。將教學平台中的手自動控制平台的機組導通狀態切換至自動模式，或者進入到手動模式後，將開關接換至 ON(Start)下。

使用數位電表測試模組，透過面板上的電流端子進行量測。右邊為電流勾表。



圖 96 開始量測電流時，須注意電流表上數值是否歸零，如不為零時，請將電表校正至零點再進行量測。

步驟7. 記錄風速資料:

在水平軸風力發電機平台中，有架設一風向風速計，在液晶螢幕上即可看到各項即時數據，如圖 97 所示。將觀察到的數值記錄後，接著測量垂直軸風力發電系統的發電資訊。



圖 97 風速風向計實體圖

步驟8. 400W 垂直軸風力發電機組實驗紀錄:

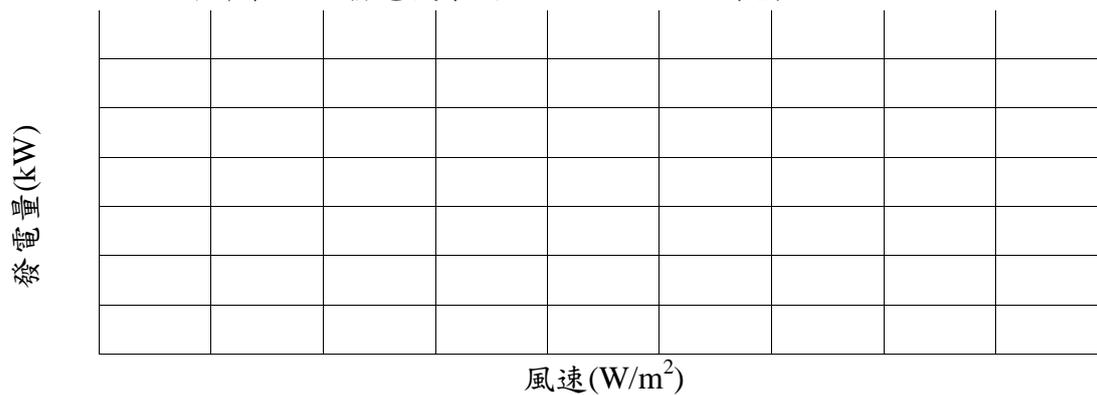
A 400W 垂直軸風力發電機電壓 V 數據紀錄表

時間									
電壓									
伏特 (V)									

B 400W 垂直軸風力發電機電流 I 數據紀錄表

時間									
電流									
安培 (A)									

C 400W 水平軸風力發電機系統 Power Curve 曲線圖



(5) 問題

- a. 透過實驗繪出 400W 水平軸風力發電機系統 Power Curve 後，原廠所提供之 Power Curve 進行比較，是否有所差異？並討論所造成的差異原因。
- b. 計算日發電量、月發電量、年發電量。
- c. 承上提，試算出發電成本與發電成本如何？

單元十一、能源庫(電池組)與 DC BUS 介紹及併聯應用實驗

(1) 實驗目的

本實驗目的在於了解電池組與 DC BUS 匯流排於整體系統內之功能以及學會在系統併聯市電時得知系統電壓電流等參數資訊之相關操作。

(2) 實驗原理

在教學平台內，有太陽能發電模組、風力發電機等發電電源端，發電端透過各別的變流器MPPT使其傳至DC BUS匯流排，再將其電能儲存至電池內，如圖98所示。由圖中可發現，DC BUS匯流排還有一條路線透過一個變流器，再經由一個雙向電表和並聯盤，再與市電做連接。

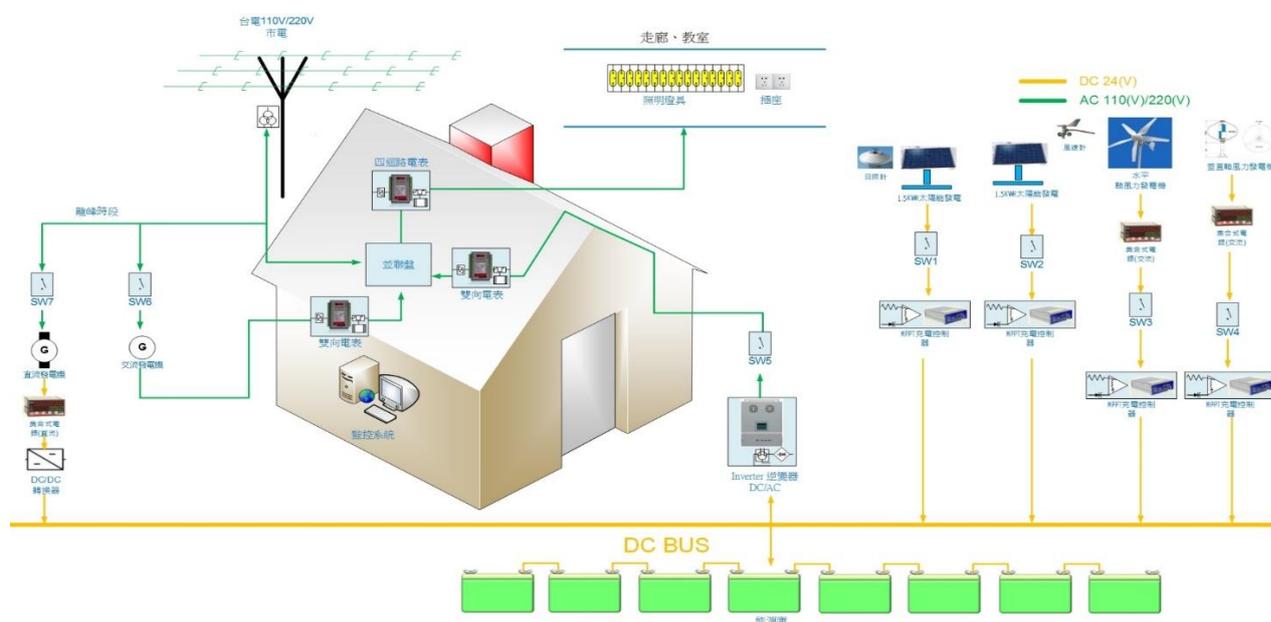


圖98 教學平台之系統電路圖

當開關開啟時，由太陽能發電模組和風力發電機所產生儲存於電池之電能將會開始經由DC BUS、變流器、和一雙向電表及並聯盤來提供電力至市電。而其相關數值將會顯示於雙向電表上。如下圖99所示。本次實驗將透過教學平台上之雙向電表，來獲得即時的參數資訊。



圖 99 系統教學平台之儲能系統併聯市電電表及開關位置

(3) 實驗設備

無

(4) 實驗步驟:

步驟一:將教學平台中的手自動控制平台的開關狀態切換至手動模式。

步驟二: 切換至手動模式後，按下開始鍵(ON)，儲能系統併聯市電系統將會自動連結，此時電流將會由 DC BUS 匯流排經過變流器流至並聯盤至台電電網。

步驟三: 將教學平台上之雙向電表開啟後即可進入主畫面，其電表主畫面如圖 100。



F1	測量 . 記錄	進入量測或記錄子功能表
F2	諧波 . 設定	進入諧波或設定子功能表
F3	電能 . 維護	進入電能或維護子功能表
F4	波形 . 訊息	進入資訊子功能表
F5	↓ . ↑	第一 . 第二主頁面切換

圖 100 雙向電表之主畫面

步驟四：於主畫面中點選量測(F1)選項，即可看到電壓、電流、功率、電能、需量、I/O等即時參數資訊。請每隔5分將三相相電壓、三相相電流及其相角、各相即時功率、正相電能及反相電能記錄於下。

a. 三相電壓量測記錄：

時間 電壓									
Va (V)									
Vb (V)									
Vc (V)									

b. 三相電流量測記錄：

時間 電流									
Ia (A)									
Ib (A)									
Ic (A)									

c. 三相電流相角量測記錄：

時間 相角									
A 相 相角 ($^{\circ}$)									
B 相 相角 ($^{\circ}$)									
C 相 相角 ($^{\circ}$)									

d. 三相即時功率量測記錄：

時間 瓦數									
Wa (W)									
Wb (W)									
Wc (W)									

e. 正向與反向電能記錄：

時間 電度									
正向 (Kwh)									
反向 (Kwh)									

單元十二、監控系統介紹與操作

(1) 實驗目的

使學生了解電能監控系統中各頁面功能，以及系統記錄之各參數資訊之相關操作。

(2) 操作說明

電腦由維護人員證常開機後，系統即自動執行程式，請連結至教學平台的電能監控系統網站首頁後，即可發現首頁會定時輪播即時資訊，使操作者能夠迅速了解到目前系統概況。如圖101所示。



圖101 教學平台之系統首頁圖

當滑鼠移至首頁，系統設定之功能列時，其功能列下方將會產生於此項目中之子項目連結。其連結項目與其子項目一覽表如圖102所示。接下來將會針對各頁面做說明。

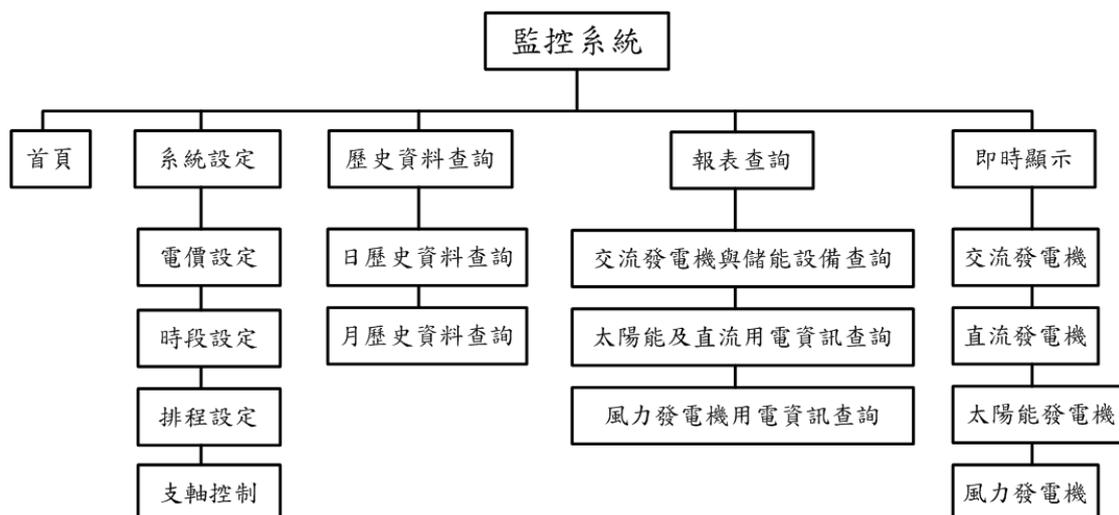


圖102 監控系統項目一覽表

a. 電價設定：



各時段電價價格設定

	月份	日期	時段	買/賣電	價格
<input type="button" value="編輯"/>	夏月	平日	尖峰	買電	4.00
<input type="button" value="編輯"/>	夏月	平日	半尖峰	買電	5.6
<input type="button" value="編輯"/>	夏月	平日	離峰	買電	3.75
<input type="button" value="編輯"/>	夏月	週六	半尖峰	買電	3.75
<input type="button" value="編輯"/>	夏月	週六	離峰	買電	3.75
<input type="button" value="編輯"/>	夏月	假日	離峰	買電	3.75
<input type="button" value="編輯"/>	夏月	平日	尖峰	賣電	10.5
<input type="button" value="編輯"/>	非夏月	平日	尖峰	買電	3.75
<input type="button" value="編輯"/>	非夏月	平日	半尖峰	買電	3.75
<input type="button" value="編輯"/>	非夏月	平日	離峰	買電	3.75
<input type="button" value="編輯"/>	非夏月	週六	半尖峰	買電	3.75
<input type="button" value="編輯"/>	非夏月	週六	離峰	買電	3.75
<input type="button" value="編輯"/>	非夏月	假日	離峰	買電	3.75

圖 103 電價設定之網頁顯示

電價設定之頁面顯示，由於現今用電在各季節以及各時段其電價皆會有不同之價格，若要設定價格，將要修改之項目點選編輯鍵即可做編輯之動作，編輯後再點選更新鍵，系

統就會將操作者剛剛於編輯介面之值輸入至所選取之項目內。圖 104 為電價設定之編輯圖片。



各時段電價價格設定

	月份	日期	時段	買/賣電	價格
<input type="button" value="編輯"/>	夏月	平日	尖峰	買電	4.00
<input type="button" value="更新"/> <input type="button" value="取消"/>	夏月	平日	半尖峰	買電	5.6
<input type="button" value="編輯"/>	夏月	平日	離峰	買電	3.75
<input type="button" value="編輯"/>	夏月	週六	半尖峰	買電	3.75

圖 104 電價設定之編輯畫面

b. 時段設定：



時間相關設定

夏月時間設定

*其他沒選取到的日期則會被系統歸類為非夏月

名稱	起始日期	結束日期
<input type="button" value="編輯"/> 夏月	06 / 01	09 / 30

尖峰與半尖峰時段設定

*其他沒選取到的時間則會被系統歸類為離峰時間

	時段名稱	月份類型	日期類型	時段種類	起始時間	結束時間
<input type="button" value="編輯"/> <input type="button" value="刪除"/>	夏月_平日尖峰1	夏月	平日	尖峰	10 : 00	12 : 00
<input type="button" value="編輯"/> <input type="button" value="刪除"/>	夏月_平日尖峰2	夏月	平日	尖峰	13 : 00	17 : 00

圖 105 時段設定之畫面

時段設定之畫面如圖 105 所示，其功能為設定夏月，以及其他天數種類、尖峰、半尖峰等時段的區段時間設定。若要做更新設定，請點選要更新之項目的編輯鍵後，即可進入編輯畫面，再將要更新之值輸入至方格內，再點選更新鍵即可完成。

c. 排程設定：

嘉義大學 機械與能源工程學系
綠色能源系統整合教學平台-智慧電表監控分析

首頁 系統設定 歷史資料查詢 報表查詢 即時顯示

目前系統所用之排程：[系統預設排程](#) 目前傳送資料之位址：[140.130.92.89:503](#)

設定排程：
 系統預設排程 自訂排程

設定傳送資料位址：
 :

目前自訂排程列表：

		時段名稱	月份類型	日期類型	時段種類	起始時間	結束時間
<input type="button" value="編輯"/>	<input type="button" value="刪除"/>	夏月-平日-尖峰	夏月	平日	尖峰	09 : 30	20 : 30

Copyright since 2013 新暉科技

圖 106 排程設定之畫面

排程設定之畫面，畫面一進來及可讓操作者得知目前系統所採用之排程為系統預設排程還是操作者之自訂排程以及目前系統會將收集到之資訊傳送至哪個 IP 位址，若要更改系統所採用之排程，請於畫面左邊之設定排程下方點選要使用之排程，再點選送出鍵，即可完成動作。若要更改傳送資料之 IP 位址，操作者可於設定傳送資料位址下方輸入 IP 以及 Port，再點選送出鍵，即可完成動作。而下方頁面則會出現目前操作者自訂排程所使用之排程資料，操作可以做編輯或刪除之動作。

d. 支軸設定：

圖 107 為支軸設定之頁面，此頁面切為兩部分，上半部分為控制太陽能支軸部分，下半部分為顯示目前太陽能支軸之狀態。當操作者點選其中一個按鈕時，其他按鈕將會暫時無效化，直到所點選之太陽能支軸完成指令後才會回復。



圖 107 支軸設定之畫面

e. 日歷史資料查詢：

圖108為日歷史資料查詢之畫面，操作者一進入此頁面後，選擇要監看之能源類型後，機組名稱將會跳出所選項目之相對應選項，再次點選完機組名稱後，則欲查詢資訊會再跳出相對應之查詢選項，接著再選擇日期、時間、以及所選取之時間間隔，再點選查詢鍵，就可以看到下方會出現系統有記錄之選項，操作者勾選後，頁面將會跳出相對應之圖。如圖109所示。

嘉義大學 機械與能源工程學系
綠色能源系統整合教學平台-智慧電表監控分析

首頁 系統設定 歷史資料查詢 報表查詢 即時顯示

日歷史資料查詢 月歷史資料查詢

日歷史資料查詢

請選擇能源類型：請選擇

請選擇機組名稱：

請選擇欲查詢資訊：

請選擇日期：

請選擇時間：時 分至 時 分 查詢

請選擇時間間隔：請選擇

圖 108 日歷史資料查詢頁面 1

嘉義大學 機械與能源工程學系
綠色能源系統整合教學平台-智慧電表監控分析

首頁 系統設定 歷史資料查詢 報表查詢 即時顯示

交流發電機與儲能設備查詢 太陽能及直流用電資訊查詢 風力發電機用電資訊查詢

日歷史資料查詢

請選擇能源類型：太陽能發電機

請選擇機組名稱：追日型太陽能系統A

請選擇欲查詢資訊：用電參數資訊

請選擇日期：2013/12/06

請選擇時間：08 時 00 分至 16 時 00 分 查詢

請選擇時間間隔：每15分

請選擇顯示項目：

- 累計電度(Kwh)
- 即時瓦數(W)
- 即時電壓(V)
- 即時電流(A)

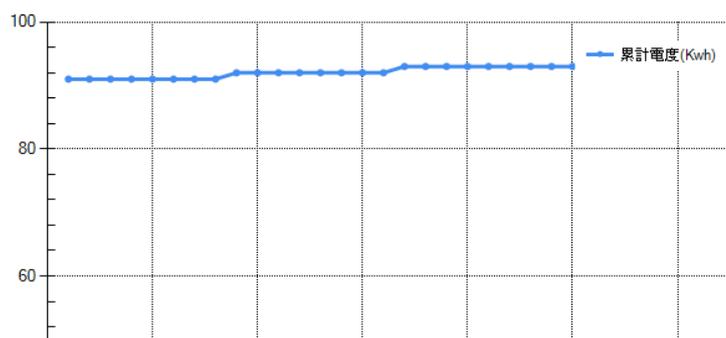


圖 109 日歷史資料查詢頁面 2

f. 月歷史資料查詢：

圖110為月歷史資料查詢之畫面，操作者一進入此頁面後，選擇要監看之能源類型後，機組名稱將會跳出所選項目之相對應選項，再次點選完機組名稱後，則欲查詢資訊會再跳出相對應之查詢選項，接著再選擇年份、月份，再點選查詢鍵，就可以看到下方會出現系統有記錄之選項，操作者勾選後，頁面將會跳出相對應之圖。

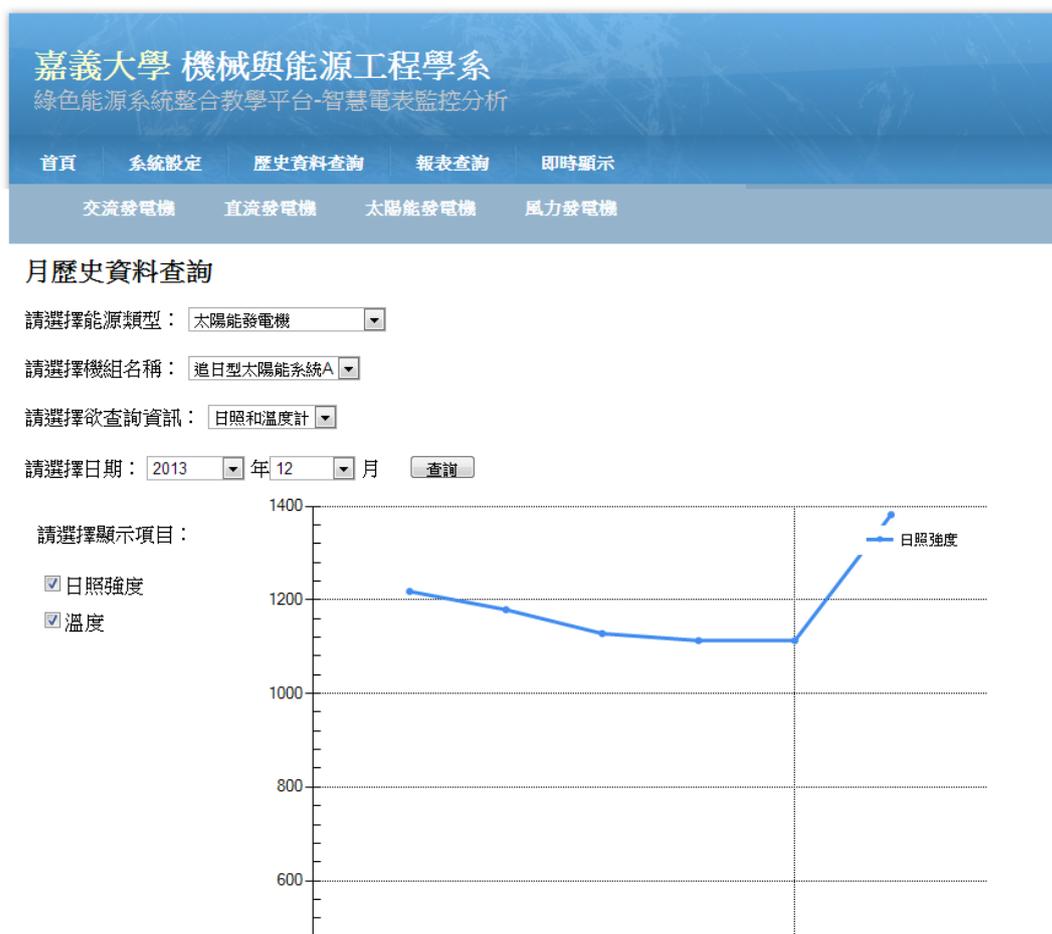


圖 110 月歷史資料查詢之畫面

g. 交流發電機與儲能設備查詢、太陽能及直流用電資訊查詢、風力發電機用電訊查詢：

由於此三個頁面其操作方法一樣，故放在一起說明，並以交流發電機與儲能設備查詢之頁面來做說明，如圖 111 所示。操作者一進入此頁面後，選擇報表種類後，電表類型將會跳出相對應之選項，且相對應之查詢日期選項也會出現。輸入日期後，再點選查詢按鈕則會跳出報表，如圖 112 所示。當報表頁面顯現後，操作者將滑鼠點選於畫面紅框處，即可匯出報表，且匯出檔案之類型可以轉成其他檔案類型。



圖 111 交流發電機與儲能設備查詢之畫面

日期	Ia	Ib	Ic	Vab	Vbc	Vca	Vav	pfa	pfb	pfc	pfav	fn	angla
0:0:0	0.00	0.00	0.00	194.15	195.34	195.10	194.99	1.00	1.00	1.00	1.00	60.05	0.00
0:5:0	0.00	0.00	0.00	193.67	195.04	194.73	194.51	1.00	1.00	1.00	1.00	59.96	0.00
0:10:0	0.00	0.00	0.00	194.08	194.83	195.15	194.52	1.00	1.00	1.00	1.00	59.99	0.00
0:15:0	0.00	0.00	0.00	193.56	194.66	194.87	194.45	1.00	1.00	1.00	1.00	60.04	0.00
0:20:0	0.00	0.00	0.00	193.58	194.60	194.56	194.31	1.00	1.00	1.00	1.00	60.01	0.00
0:25:0	0.00	0.00	0.00	194.81	195.73	195.52	195.23	1.00	1.00	1.00	1.00	60.00	0.00
0:30:0	0.00	0.00	0.00	193.84	195.01	194.96	194.55	1.00	1.00	1.00	1.00	60.03	0.00
0:35:0	0.00	0.00	0.00	193.70	194.83	194.62	194.42	1.00	1.00	1.00	1.00	59.93	0.00
0:40:0	0.00	0.00	0.00	193.86	195.00	194.83	194.43	1.00	1.00	1.00	1.00	59.97	0.00
0:45:0	0.00	0.00	0.00	194.81	196.01	195.88	195.50	1.00	1.00	1.00	1.00	59.90	0.00
0:50:0	0.00	0.00	0.00	193.63	194.69	194.76	194.48	1.00	1.00	1.00	1.00	59.99	0.00
0:55:0	0.00	0.00	0.00	193.93	194.99	194.88	194.52	1.00	1.00	1.00	1.00	59.94	0.00
1:0:0	0.00	0.00	0.00	193.95	195.19	195.24	194.69	1.00	1.00	1.00	1.00	59.97	0.00
1:5:0	0.00	0.00	0.00	194.28	195.40	195.61	195.14	1.00	1.00	1.00	1.00	59.96	0.00
1:10:0	0.00	0.00	0.00	194.04	195.16	195.53	195.79	1.00	1.00	1.00	1.00	59.91	0.00
1:15:0	0.00	0.00	0.00	195.70	196.65	196.76	196.85	1.00	1.00	1.00	1.00	60.00	0.00
1:20:0	0.00	0.00	0.00	195.19	195.94	195.93	195.61	1.00	1.00	1.00	1.00	60.00	0.00
1:25:0	0.00	0.00	0.00	194.82	195.68	196.04	195.60	1.00	1.00	1.00	1.00	59.98	0.00
1:30:0	0.00	0.00	0.00	194.38	195.32	195.63	194.98	1.00	1.00	1.00	1.00	59.93	0.00
1:35:0	0.00	0.00	0.00	195.41	196.42	196.65	195.94	1.00	1.00	1.00	1.00	59.96	0.00
1:40:0	0.00	0.00	0.00	195.53	196.70	196.56	195.98	1.00	1.00	1.00	1.00	60.01	0.00
1:45:0	0.00	0.00	0.00	194.40	195.52	195.63	195.18	1.00	1.00	1.00	1.00	59.99	0.00
1:50:0	0.00	0.00	0.00	195.80	196.84	196.97	196.61	1.00	1.00	1.00	1.00	60.11	0.00
1:55:0	0.00	0.00	0.00	195.02	195.98	196.09	195.74	1.00	1.00	1.00	1.00	59.90	0.00
2:0:0	0.00	0.00	0.00	194.62	195.50	195.51	195.22	1.00	1.00	1.00	1.00	59.97	0.00
2:5:0	0.00	0.00	0.00	195.57	196.60	196.69	196.05	1.00	1.00	1.00	1.00	60.03	0.00
2:10:0	0.00	0.00	0.00	196.58	197.40	197.48	197.20	1.00	1.00	1.00	1.00	60.04	0.00
2:15:0	0.00	0.00	0.00	194.68	195.73	195.85	195.49	1.00	1.00	1.00	1.00	59.93	0.00
2:20:0	0.00	0.00	0.00	195.01	196.11	196.79	195.62	1.00	1.00	1.00	1.00	59.95	0.00
2:25:0	0.00	0.00	0.00	195.32	196.13	196.53	196.06	1.00	1.00	1.00	1.00	59.99	0.00
2:30:0	0.00	0.00	0.00	196.78	197.78	197.82	197.54	1.00	1.00	1.00	1.00	60.07	0.00
2:35:0	0.00	0.00	0.00	194.21	195.53	195.63	195.56	1.00	1.00	1.00	1.00	60.10	0.00

圖 112 交流發電機與儲能設備查詢之報表查詢畫面

h. 交流發電機：

操作者點選此頁面後，系統將會顯示交流發電機之最新一筆資料。如圖 113 所示。



圖 113 交流發電機即時顯示之頁面

i. 直流發電機：

操作者點選此頁面後，系統將會顯示直流發電機之最新一筆資料。如下圖 114 所示。



圖 114 直流發電機即時顯示之頁面

j. 太陽能發電機：

操作者點選此頁面後，系統將會顯示太陽能發電機之最新一筆資料。如圖 115 所示。



圖 115 太陽能發電機即時顯示之頁面

k. 風速限制設定：

若偵測到之風速大於限制設定值，則系統將會使太陽能板打平。



圖 116 模擬風速過大保護功能

1. 風力發電機：

操作者點選此頁面後，系統將會顯示風力發電機之最新一筆資料。如圖 116 所示。



圖 117 風力發電機即時顯示圖

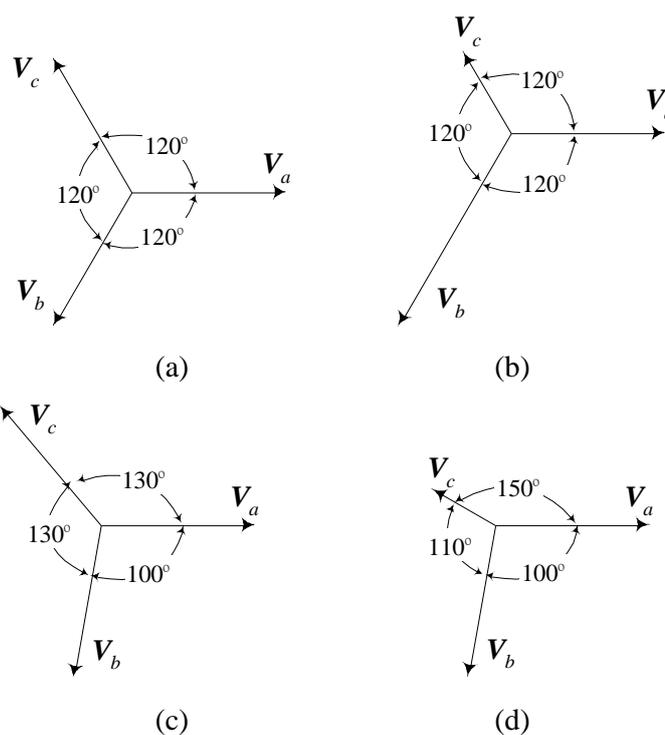
單元十三、電壓三相不平衡介紹

(1) 實驗目的

使學生了解何謂三相不平衡，並解說發生原因。

(2) 原理說明

良好的三相電壓除了振幅、頻率、諧波成份都符合標準之外，三相電壓的對稱性也是重要的指標之一。理想的三相電壓是三相電壓的大小相等，任兩相之間的相位相差 120° ，如果三相電源偏離了這兩個條件，我們就稱為三相電壓不平衡。



- (a)平衡三相電壓；
- (b)相位平衡但大小不相等；
- (c)大小相等但相位差不等；
- (d)大小、相位差均不等

圖 118 任兩相之間的相位相差 120°

A. 三相電壓不平衡的成因:

電力公司不論在發電、輸電或配電的階段，均致力於維持三相電壓的平衡，一般來說，造成三相電壓不平衡的原因可分為結構性、功能性與故障性三類。

1. 結構性因素:

結構性因素(structural cause)是指輸配電線路阻抗的非對稱。如果三相輸配電線路中的電流為平衡，但是三相線路的阻抗卻不相等，則所產生的壓降也不相等，致使受電端的三相電壓產生不平衡。變壓器的連接方式有時也是造成阻抗不平衡的原因。

I. 變壓器的連接所造成的阻抗不平衡:

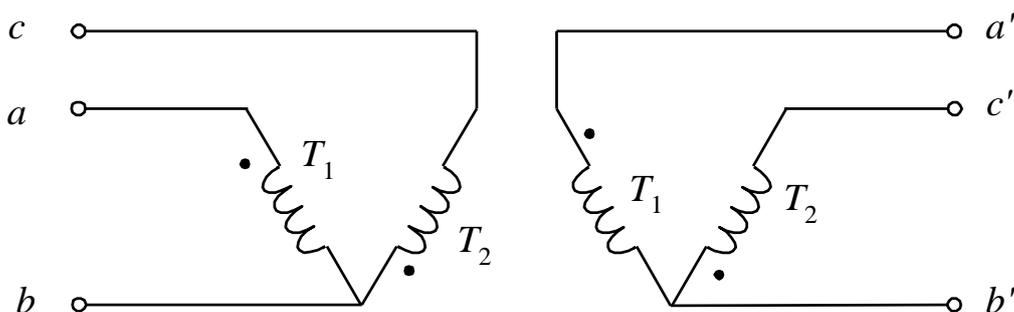


圖 119 V-V 連接

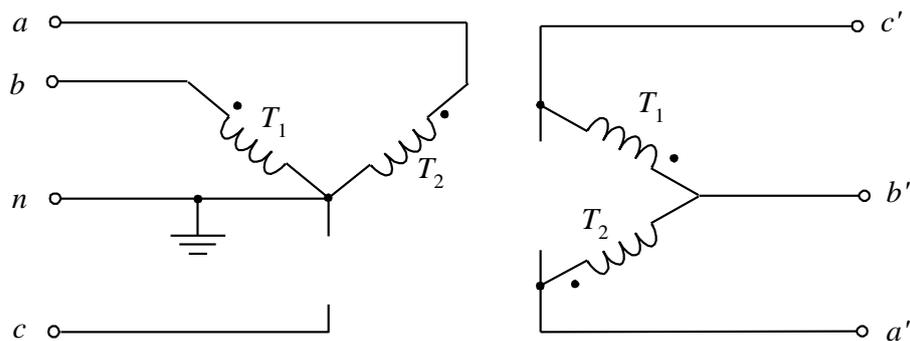


圖 120 開-Y 開-D 連接

II. 變壓器的連接所造成的阻抗不平衡

另一個由變壓器所引起的電壓不平衡為三相變壓器的激磁電流。內鐵式三相變壓器(three-phase core-type transformer)之鐵芯為三足(three limbs)之磁路，由於各足磁路之長度不完全相同，鐵芯之磁阻就不相等，致使各相之磁化電抗也不相等，因此三相激磁電流就不平衡。如果變壓器的 Y 接端中性點未接地，變壓器的相電壓就會呈現輕微的不平衡。

2. 功能性因素:

功能性因素(functional cause)是指三相傳輸的有效及無效功率不平衡，簡單的說，就是負載的不平衡。一般的住宅及商業用戶，不可避免的會有許多單相設備。電力公司在分配單相負載時，雖然儘量將負載均勻的分配在各相上，但是即使負載的分配是三相完全相等，也無法保證所有的單相負載都在同一時間消耗相等的功率。

3. 故障性因素

故障性因素是指由電力系統元件故障所導致的電壓不平衡。引起電壓不平衡最常見的故障為三相功因修正電容器熔絲熔斷，使某一相線路無法補償而電壓降低，有補償的相則電壓較高。單相設備過載、短路、接地故障等，也會引起嚴重的電壓不平衡。

B. 電壓不平衡之影響

不平衡的三相電壓含有額外的零相序及負相序電壓。對三相無中性線之負載而言，零相序阻抗為無限大，因此零相序電壓對這類負載沒有明顯的影響。許多低壓商業及住宅配電系統都有大量的單相負載，這些負載饋入三相系統之後大多會有相當程度的不平衡，饋線的中性線電流和負載不平衡的程度有密切的關係，過大的中性線電流會影響保護電驛對接地故障的偵測，因此電力公司必須經常檢討單相負載的分配，以避免中性線電流過大。

C. 電壓不平衡對旋轉電機之影響

以最常用的三相感應電動機為例，其負相序阻抗遠小於正相序阻抗，所以即使是輕微的電壓不平衡也會引起可觀的負相序電流，導致電動機定子繞組額外之銅損，使電機之溫升過高。負相序電流引起的過熱，會破壞繞組之絕緣，使繞組產生捷路，致使有效匝數減少，最後引起故障。如果在不平衡的供電狀態下想要避免電動機過熱，就必須減少其機械負荷，其效果相當於減少電動機的有效容量，我們稱這樣的情形為「減額運轉」(derating)，例如一部額定 10 馬力的電動機在不平衡電壓下，可能只能輸出 7.5 馬力。

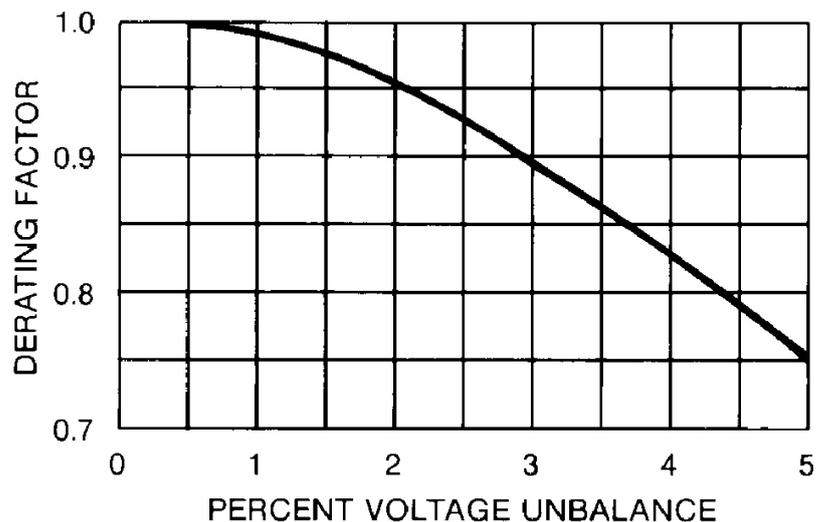


圖 121 NEMA GM 1-1993 對感應電動機操作，在不平衡電壓下所建議的減額因

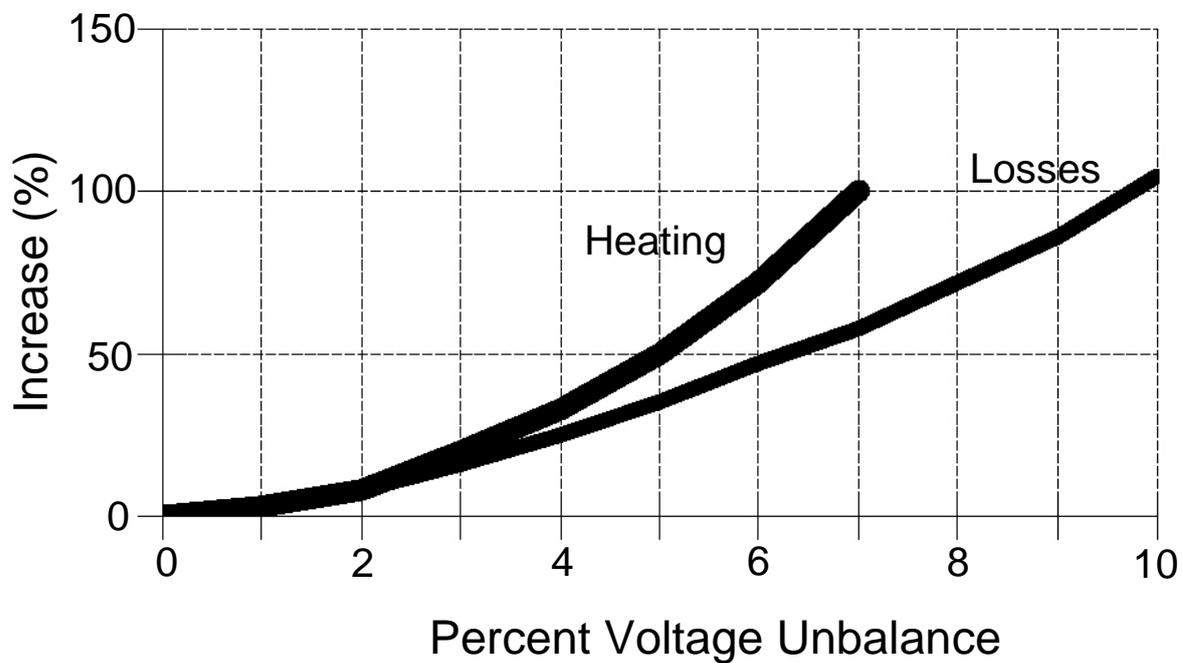


圖 122 電壓不平衡使電動機的溫升與損失都快速增加

D. 電壓不平衡對旋轉電機之影響

除了溫升的問題，負相序電流所產生的旋轉磁場正好與轉子的轉動方向相反，電動機的輸出轉矩因而減弱。正、負相序電流產生兩個旋轉方向相反的磁勢波在氣隙中互相作用，兩個旋轉磁勢波都是以同步速度旋轉，其互相作用的頻率正好是電源頻率的兩倍，所以電動機會出現一個 120-Hz 的脈動轉矩，其大小和電壓不平衡的程度成正比。脈動轉矩會造成電機轉軸額外的應力負擔，也是電機振動(vibration)的來源之一。當三相電壓不平衡時，電動機的合成氣隙磁勢波會隨著磁場轉動的位置而改變，所以會造成電機鐵芯的局部飽和，諧波電流因而產生。

E. 電壓不平衡的改善

配電系統的負載可使用自動或手動轉供開關來改變系統的架構，以降低負載不平衡的程度。對於大容量的單相負載如電氣鐵路等，或是三相隨機變動的不平衡負載如電弧爐等，則可以考慮使用專線供電，以減少對其他用戶的干擾。並聯式的靜態無效功率補償器(SVC)可快速的調整電壓，已經用來改善由於變動負載所引起的電壓不平衡，。

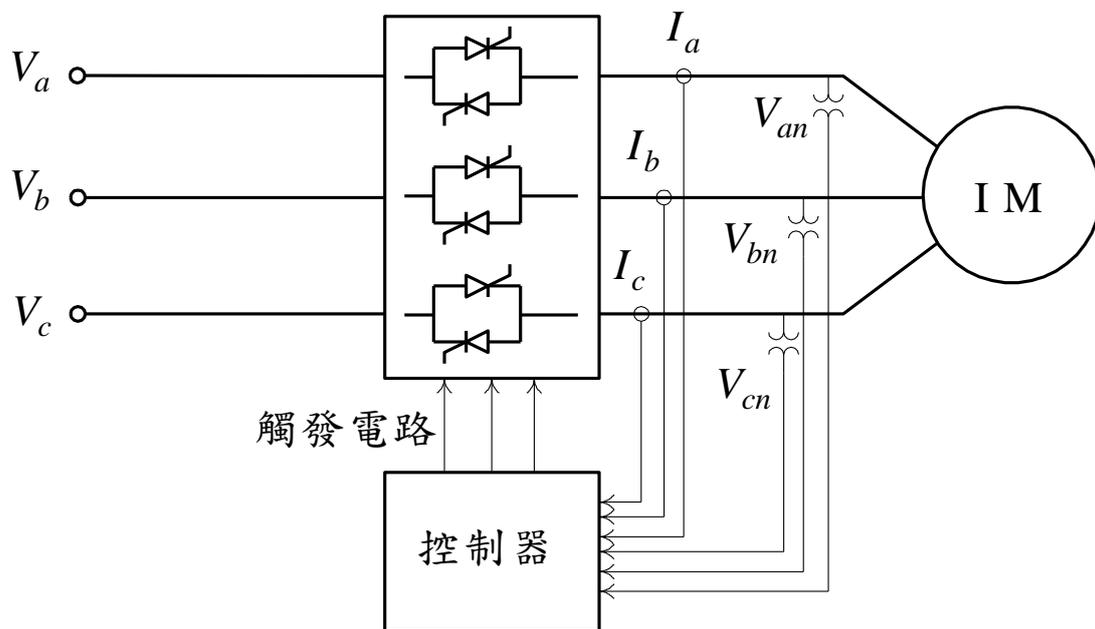


圖 123 利用雙向閘流體控制感應電動機之電源電壓以修正電壓不平衡