

國立臺灣大學工學院機械工程學系

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



獨立型太陽光發電系統的太陽電池匹配設計與充電增
強技術研究

PV selection and battery charging enhancement of
independent solar power system

王泰權

Wang, Tai-Chiuan

指導教授：黃秉鈞 教授

Advisor: Huang, Bin-Juine

中華民國 103 年 7 月

July, 2014

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

獨立型太陽光發電系統的太陽電池匹配與充電增強技術研究

PV selection and battery charging enhancement of independent solar power system

本論文係王泰權 (R01522819) 在國立臺灣大學機械工程學系完成之碩士學位論文，於民國一百零三年七月十六日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

黃秉鈞

(簽名)

李坤序 (指導教授)

李綱

陳一宏

系主任

楊耀坤

(簽名)

誌謝



在這碩士這兩年裡說長不長、說短也不短，但所經歷過的每一件事與每一個人深深影響我往後的想法與發展。Lab106 是個非常特別的實驗室，兩年下來如脫胎換骨般的成長，這要感謝實驗室經年累月所傳承下來的傳統，感謝每個實驗室的成員對這個傳統的遵循與認同。

感謝黃秉鈞老師改變了我的學習態度與做研究的想法，建立起真正何謂有實質效益的研究，而非現在學術僅想進行可以投稿而無實質成果的研究；感謝實驗室中的每位認真的學弟，黃旭偉、王建智、王譯鴻、蔡宗翰以及陳威仁，任勞任怨、協助學長分擔雜事；另外特別感謝許伯堅、莊逸宏、張仕林學長在研究上的協助；感謝同屆的鄭宏彥、鄭士儀、林偉荃、張佑任同學，雖然我支援的部分比較多，讓我實驗不會無聊；最後感謝學妹邱煒琄，讓研究生活不至於太過嚴肅。

獨立型太陽光發電系統的太陽電池匹配設計與充電增強技術研究



王泰權* 黃秉鈞**

國立臺灣大學

機械工程研究所

中文摘要

本研究指在利用電容與鋰電池並聯，並聯接太陽板來進行充電研究，主要希望能透過這樣的方式來增強太陽能板鋰電池充電的發電量，提高充電的性能，研究內容包含了鋰電池的動態模型之系統識別、過去研究文獻模擬比較分析、以及戶外實際測試比對分析。

在研究中也提出了針對 nMPPO 系統匹配的性能指標，以協助在進行 nMPPO 系統匹配之太陽能板篩選時的依據。並透過這性能指標開發了一套圖型化使用者介面，讓在進行太陽能板篩選時能更加快速與比對。最後在透過戶外實驗，建立 MPPT 與 nMPPO 兩套系統進行比對測試，實驗結果顯示，nMPPO 的發電效率最低的情況僅低於 MPPT 系統下 5% 左右，而在高累積發電量的情況，nMPPO 系統的發電效率反而會超越 MPPT 系統的發電效率。

* 研究生

** 指導教授

PV selection and battery charging enhancement of independent solar power system



Wang, Tai-Chiuan* Huang, Bin-Juine**

Department of Mechanical Engineering

National Taiwan University

Abstract

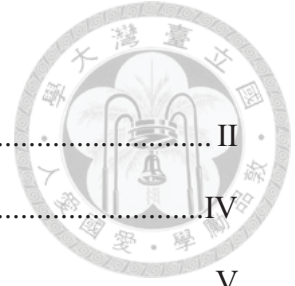
The research focuses on how to enhance charge performance of PV power generation system, for use in independent solar power system. Investigates increasing energy storage of PV power generation system by paralleling capacitor. Outdoor experimental results indicate that lithium battery in parallel capacitor system can improve the charge efficiency of PV power generation system. Then use effects of changes in radiation to explain why paralleling capacitor can improve the charge efficiency.

In the research also proposed to explore nMPPO matching system performance to help match making system based nMPPO screening of the solar panels. Performance indicators through which developed a graphical user interface, making solar panels so that screening can be more quickly and comparison. Finally, through the outdoor experiments

* Graduate student

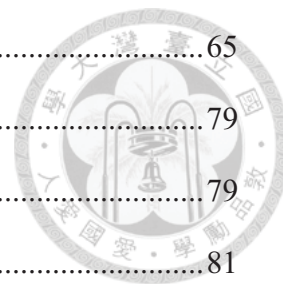
** Adviser

目錄



誌謝.....	II
中文摘要.....	IV
Abstract.....	V
目錄.....	VI
圖目錄.....	VIII
表目錄.....	XII
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 文獻回顧.....	3
1.3 研究內容.....	14
第二章 獨立型太陽能發電系統設計匹配研究.....	15
2.1 近最大功率點操作基本原理.....	15
2.2 獨立型太陽能發電系統 nMPPO 分析匹配.....	17
2.3 太陽能模組模型與實驗比對.....	21
2.4 nMPPO 系統匹配設計軟體.....	24
2.5 nMPPO 實驗驗證.....	31
第三章 鋰電池動態系統識別.....	44
3.1 太陽能板模組數學模型.....	44
3.2 鋰電池動態模型與系統識別.....	45
第四章 鋰電池並聯電容之太陽能充電增強分析.....	51
4.1 鋰電池並聯電容之太陽能充電系統模型.....	51
4.2 鋰電池並聯電容之太陽能充電系統模擬.....	57
4.3 鋰電池並聯電容之太陽能充電系統長程性能分析.....	60
第五章 鋰電池並聯電容之太陽能充電系統戶外比對測試分析.....	65

5.1	實驗設計.....	65
第六章	討論、結論與未來展望.....	79
6.1	討論與結論.....	79
6.2	未來展望.....	81
	參考文獻.....	82



圖目錄

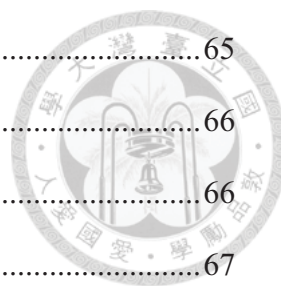


圖 1.1. 1 2004 年全球能源使用比例.....	1
圖 1.2. 1 太陽能板特性曲線.....	4
圖 1.2. 2 三段式充電.....	5
圖 1.2. 3 單日表現比較.....	7
圖 1.2. 4 超級電容長時間比較測試 58F 與 288F.....	7
圖 1.2. 5 無超級電容之發電量.....	8
圖 1.2. 6 太陽能發電量與超級電容之容量使用.....	8
圖 1.2. 7 太陽能發電量 VS 超級電容容量.....	9
圖 1.2. 8 長期比較測試結果.....	9
圖 1.2. 9 太陽能發電系統效率比較測試.....	10
圖 1.2. 10 蓄電池系統總內阻.....	10
圖 1.2. 11 Phase 2 充電 Duty cycle 表現.....	11
圖 1.2. 12 太陽能發電比較(2011/2/22).....	11
圖 1.2. 13 太陽能發電比較(2011/2/22).....	12
圖 1.2. 14 系統總等效電阻比較(2011/2/28).....	12
圖 1.2. 15 系統總等效電阻比(2011/2/22).....	13
圖 2.1. 1 NSP 45°C 太陽能板電壓-電流特性曲線.....	15
圖 2.1. 2 NSP 45°C 太陽能板電壓-功率特性曲線.....	16
圖 2.2. 1 太陽能板之電壓-功率特性曲線與蓄電池電壓操作範圍關係圖	20
圖 2.3. 1 太陽能板等效電路.....	21
圖 2.3. 2 太陽能板之 Simulink Block diagram.....	23
圖 2.3. 3 模擬之電壓-電流特性曲線.....	23
圖 2.4. 1 nMPPO 系統匹配之圖型化使用者介面.....	24

圖 2.4.2 太陽能板參數設定介面.....	26
圖 2.4.3 蓄電池充電電壓之操作範圍.....	27
圖 2.4.4 nMPPO 之系統匹配計算結果顯示介面.....	28
圖 2.4.5 性能指標儲存.....	28
圖 2.4.6 四種太陽能板之規格.....	29
圖 2.5.1 nMPPO 驗證實驗之系統架構.....	31
圖 2.5.2 NSP245W 比對測試-當日瞬時發電量.....	33
圖 2.5.3 NSP245 之 nMPPO 相對於 MPP 發電效率.....	34
圖 2.5.4 NSP245 之 MPPT 與 nMPPO 瞬時發電比較.....	34
圖 2.5.5 NSP245W 連續四天的累積發電量.....	35
圖 2.5.6 PCM130W 比對測試-當日瞬時發電量.....	36
圖 2.5.7 PCM130 之 nMPPO 相對於 MPP 發電效率.....	36
圖 2.5.8 PCM130 之 MPPT 與 nMPPO 瞬時發電比較.....	37
圖 2.5.9 PCM130 之累積發電量損失.....	37
圖 2.5.10 ASEC130W 比對測試-當日瞬時發電量.....	39
圖 2.5.11 ASEC130 之 nMPPO 相對於 MPP 發電效率.....	39
圖 2.5.12 PCM130 之 MPPT 與 nMPPO 瞬時發電比較.....	40
圖 2.5.13 ASEC130 之累積發電量損失.....	40
圖 2.5.14 PCM60W 比對測試-當日瞬時發電量.....	42
圖 2.5.15 PCM60 之 nMPPO 相對於 MPP 發電效率.....	42
圖 2.5.16 PCM60 之 MPPT 與 nMPPO 瞬時發電比較.....	43
圖 2.5.17 PCM60 之累積發電量損失.....	43
圖 3.2.1 鋰電池之等效電路模型.....	45
圖 3.2.2 PCT 實驗紀錄器.....	46
圖 3.2.3 PSI15Ah 鋰電池.....	46
圖 3.2.4 PCT 系統配線圖.....	47

圖 3.2. 5 PCT 實驗結果之電壓變化	47
圖 3.2. 6 PCT 實驗之 SOC 50%電壓變化	48
圖 3.2. 7 不同 SOC 下的鋰電池電壓變特性曲線	48
圖 3.2. 8 不同 SOC 的 OCV 與 R_s	49
圖 3.2. 9 不同 SOC 下的 R_1 、 C_1	50
圖 3.2. 10 不同 SOC 下的 R_2 、 C_2	50
圖 4.1. 1 SOC 之 Simulink Block diagram	51
圖 4.1. 2 OCV 之 Simulink Block diagram	52
圖 4.1. 3 RC 等效電路模型之 Simulink Block diagram (1)	52
圖 4.1. 4 RC 等效電路模型之 Simulink Block diagram (2)	53
圖 4.1. 5 不同 SOC 下的 V_s 之 Simulink Block diagram	53
圖 4.1. 6 鋰電池完整 simulink block diagram	54
圖 4.1. 7 鋰電池模組之 Simulink Block diagram	55
圖 4.1. 8 充電增強系統 Simulink Block diagram	55
圖 4.1. 9 太陽能板 Simulink Block Diagram	55
圖 4.1. 10 太陽能增強系統之 Simulink Block Diagram	56
圖 4.2. 1 鋰電池芯模擬曲線與實際測試比較圖	57
圖 4.2. 2 PSI 24V30Ah 鋰電池模組	58
圖 4.2. 3 鋰電池模組模擬與實際曲線圖	58
圖 4.2. 4 2013/6/2 鋰電池之太陽能系統模擬與實驗結果比較	59
圖 4.3. 1 太陽能板在鋰電池容量 30Ah 下發電效率	60
圖 4.3. 2 2014/6/1 數據比較	62
圖 4.3. 3 2014/6/2 數據比較	62
圖 4.3. 4 2014/6/3 數據比較	62
圖 4.3. 5 2014/6/4 數據比較	63
圖 4.3. 6 30Ah Cap Sys 與 60Ah Cap Sys 的太陽能板發電效率	64

圖 5.1.1 充放電控制器 i-sCon2.....	65
圖 5.1.2 充放電控制器之電腦連線軟體.....	66
圖 5.1.3 控制器的系統 PID 回授方塊圖	66
圖 5.1.4 紀錄器.....	67
圖 5.1.5 專用紀錄器之電腦連線軟體.....	67
圖 5.1.6 50V22000uF 電解電容	68
圖 5.1.7 PSI 24V30Ah 鋰電池模組.....	68
圖 5.1.8 NSP 太陽能板	69
圖 5.1.9 鹵素燈(含燈座).....	70
圖 5.1.10 充電增強技術之系統架構.....	70
圖 5.2.1 2014/6/2	71
圖 5.2.2 2014/6/3	71
圖 5.2.3 2014/6/4	72
圖 5.2.4 2014/6/5	72
圖 5.2.5 2014/6/6	73
圖 5.2.6 2014/6/7	73
圖 5.2.7 2014/6/8	73
圖 5.2.8 2014/6/9	74
圖 5.2.9 2014/6/10	74
圖 5.2.10 2014/6/11	75
圖 5.2.11 2014/6/12	75
圖 5.2.12 2014/6/13	75
圖 5.2.13 2014/6/14	76
圖 5.2.14 Strengthen 系統相對於 Normal 系統之發電量增益圖	77



表目錄

表 2.4.1 不同規格太陽能板的性能指標.....	29
表 2.5.1 NSP245 太陽能板規格	33
表 2.5.2 科風 130W 太陽能板規格表.....	36
表 2.5.3 ASEC130 太陽能板規格.....	38
表 2.5.4 PCM60 太陽能板規格	41
表 3.2.1 不同 SOC 下鋰電池內部參數值.....	49
表 4.3.1 30Ah 鋰電池每日發電量、輻射量與發電效率.....	61
表 4.3.2 結果比較表.....	64
表 4.3.1 30Ah 鋰電池每日發電量、輻射量與發電效率.....	61
表 4.3.2 結果比較表.....	64
表 5.1.1 NSP245 規格	69
表 5.2.1 Cap 相對於 No-Cap 系統之發電量增益	77



第一章 緒論



1.1 前言

依據 1997 年第三屆京都國際環保會議(COP3)結論，2002~2012 年 10 年間，二氧化碳等溫室氣體排放量需逐年減少 6%(與 1990 年比)，才能有效減緩地球暖化所帶來的破壞。要想做到這一點，必須開發新能源，其中首選的是太陽能 and 風能。

太陽能是地球最多的能源，到達大氣圈外的太陽光強度為 1.38kW/m^2 ，其中有 30% 向宇宙反射，殘餘的 70% 可到達地球。太陽的壽命據推算達幾十億年，所以太陽能可稱為無窮大能源。根據資料統計，2004 年全球使用電量為 0.471 ZJ ($Z = 10^{21}$)，而每一年可利用太陽能為 3850 ZJ，換言之，如將一年之太陽能全部收集，可讓全部人類使用 8,000 年。然而，[1][2] 現今人類仍然以煤，天然氣，核能等能源為主要發電來源，2004 年全球能源使用比例，如圖 1.1.1。因此如何研究開發太陽能的運用，以節省現有儲存能源的消耗是非常重要的事。

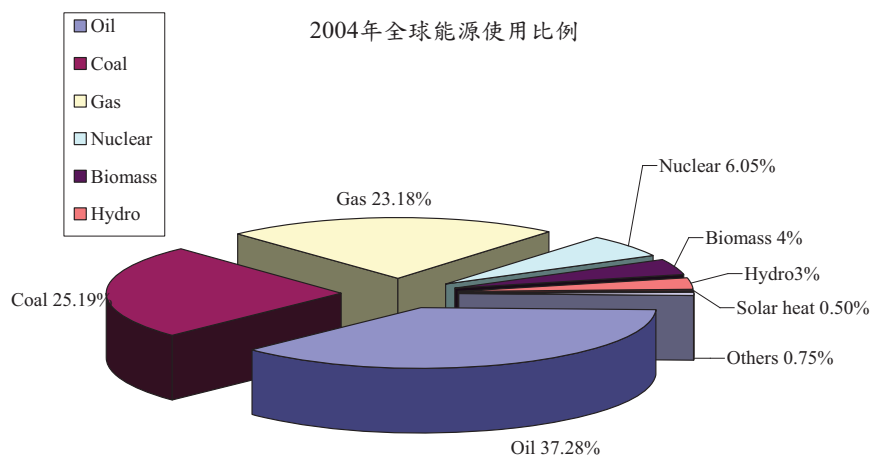



圖 1.1.1 2004 年全球能源使用比例

太陽能發電系統可分為混合、併聯與獨立三大類型。混合型是太能電池發電系統與其他發電系統併聯搭配使用，通常裝有蓄電池，常作為防災型電力系統，可提供緊急用電需求。併聯型是太陽能電池發電系統與市電併聯，當太陽



能電池發電系統用戶有多餘電力，可回送到市電，反之則由市電供應電力。獨立型是指未與其他電力網或發電組併聯的太陽能電池發電系統，常使用於公共電力網(市電)無法到達之處，如高山或沙漠等。因獨立型太陽能系統不受電網的影響，為最安全的供電系統，且在許多特殊的場合，如緊急應用之通訊、照明、供水與給油等等，獨立型太陽能發電系統具有優勢。少了配線成本，獨立型太陽能發電系統具有極大的經濟誘因。

獨立型太陽能發電系統的實用性取決於系統的續航力與可靠度。續航力指的是太陽能系統的連續運轉時間，可靠度指的是獨立型太陽能發電系統的損壞或停載的機率。而如何提昇蓄電池的充電效率，為影響續航力的最主要關鍵。另外，可靠度也很重要，如何在複雜環境下正常運作需複雜的技術。

1.2 文獻回顧

獨立型太陽能發電系統常應用於太陽能 LED 路燈或偏遠地區用電等，主要硬體包含有太陽能板、蓄電池、充放電控制器與負載。在設計太陽能系統時需考慮許多事項，諸如負載多寡、太陽能板的發電量、天氣條件以及蓄電池的續航力等等，隨不同的系統設計和控制，太陽能發電系統的使用效率有很大的差異，一般太陽能板的使用壽命約 20 年，但所搭配的蓄電池如鉛酸電池，其平均壽命約 2~3 年，此差異無疑地增加了太陽能發電系統的成本，如何增加蓄電池的續航力與可靠度，是重要的課題。

一般市面上的太陽能充電控制器為了發揮太陽能板最大的發電功率，皆會加入最大功率點追蹤(Maximum power point tracking, MPPT)控制器，此 MPPT 控制器在操作時會有能量損耗，目前最佳的 MPPT 控制器轉換效率約為 95%，但你在全載運轉時才會發生，在實際使用時太陽輻射瞬息萬變，MPPT 控制器無法任何時刻都在全載運轉，故實際上其轉換效率可能低於 95%且加入了 MPPT 控制器不僅增加發電成本，也降低了系統的可靠度。台大孫輔笙[3][4]利用太陽能板的電壓-電流操作特性曲線，如圖 1.2.1，和鉛酸電池操作電壓進行匹配，發展了「近最大功率點操作(Maximum Power Point Operation, nMPPO)」設計，並由實驗結果得知在良好的匹配下其操作可達到理想最大功率點追蹤率發電量的 97%以上，節省了使用 MPPT 控制器的成本，同時也提升了系統硬體的可靠度。而本研究所使用的太陽能發電系統皆以 nMPPO 的方式座太陽能系統的匹配。回顧[3][4]文獻中，檢討 nMPPO 的設計方法，利用長期系統模擬匹配電壓(Battery)，但使用上不便，希望開發一個簡便的 nMPPO 設計方法，為本研究目的之一。

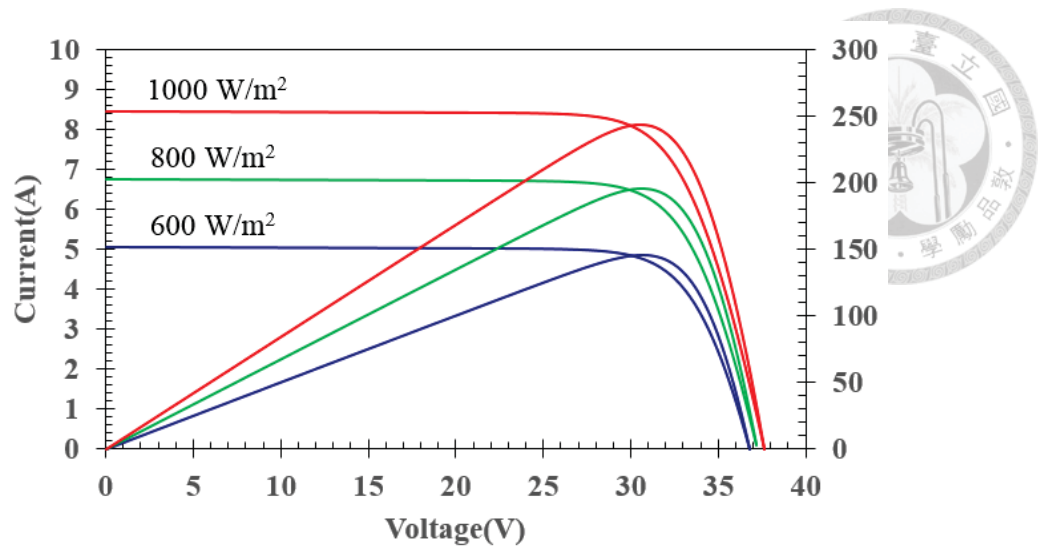


圖 1.2.1 太陽能板特性曲線

在蓄電池充電控制的部分，由台大吳民聖[4]所設計之三階段充電控制 (Phase1、Phase2 和 Phase3)，如圖 1.2.2，一般蓄電池都會有規定的充電電壓，當鉛酸電池在大於此電壓操作時，會造成蓄電池在充電過程中產生損壞，嚴重可能導致蓄電池爆炸的危險，如使用鋰電池必須更加注意。有鑑於此，一般傳統的控制器當蓄電池電壓到達規定電壓上限後會關閉充電，但此時蓄電池之充電量狀況(State of Charge, SOC)可能只到達 90%以下，並未充飽。而三段式充電在電池達到規定電壓點時，將利用脈波寬度調變(Pulse Width Modulation, PWM)與回授控制來限制蓄電池的充電電壓，使電池在規定之安全的操電壓下繼續充電。由實驗的結果得知，三段式充電較傳統的充電發式增加約 18%的充電量，故在不影響電池壽命的操作下讓整體系統有更高的使用效率[4]。

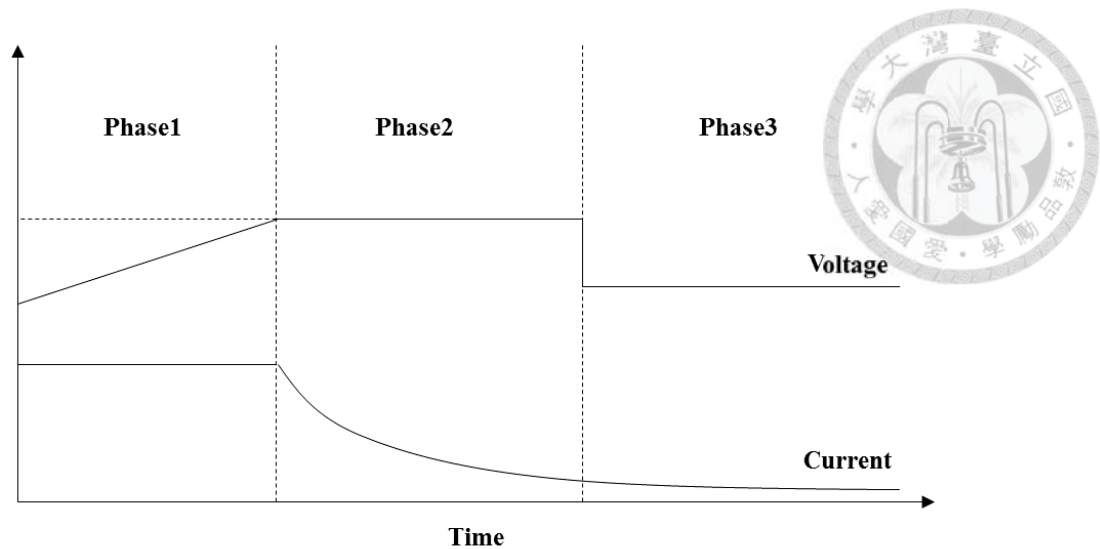


圖 1.2.2 三段式充電

由於蓄電池佔整套太陽能發電系統的成本很高的比重，在台大曾偉民[5]採用超級電容並聯鉛酸電池的混合式儲能裝置，研究有無超級電容的太陽能發電情形，圖 1.2.3、圖 1.2.4、圖 1.2.5，發現加入超級電容的系統會降低蓄電池的總內阻，並在 nMPPO 的太陽能系統匹配下，讓蓄電池的操作電壓更接近最大功率點而獲得更多能量；台大廖子豪[6]的研究指出，瞬間的輻射量變化可能使鉛酸電池的充電電流過大，長期運作會對鉛酸電池的充電電極板造成衝擊，近而損害電池的壽命。另外在放電部分，若有並聯超級電容的系統中，當電壓放電至截止電壓後，鉛酸電池所回升的電壓較高，使得次日在對此系統充電時，其蓄電池電壓更接近太陽能板最大功率點，研究結果證實並聯超級電容的系統可提升約 16% 的充電效率。台大張哲偉[7]利用系統識別求出鉛酸電池與超級電容的轉移函數，在頻域響應分析中指出，並聯超級電容的系統在動態操作時有較低的阻抗，圖 1.2.10、圖 1.2.14，因鉛酸電池電壓對於變動的電流反應時間較慢，所以並聯超級電容有助於緩和在動態操作下蓄電池之電壓對電流的響應，提升充電量。在戶外實驗發現並聯超級電容的法拉數越大，其提升的充電量越大，且所提升的充電量與天氣有關，當天氣越晴朗輻射量越大時，提升的充電量越明顯。

圖 1.2.3 表示兩個太陽能充電系統採鉛酸電池在單日的表現比較，其中一套系統並聯了 288F 的超級電容，可以清楚的看出，利用超級電容做為混合式儲能

與沒有超級電容的系統相比，增加了太陽能充電量 21.8%。圖 1.2.4 是比較並聯超級電容 288F 與 58F 的系統，可以看出每日太陽能充電量在 288F 系統中比 58F 增加了 25%，在圖 1.2.5 為無並聯超級電容的系統的總充電量，在此期間天氣多雲，每日發電量幾乎不足 300Wh。

從 2011 年 2 月 11 日到 2011 年 4 月 2 日的長期實驗顯示，隨著超級電容的容量增大，太陽能平均每日所增加的充電量如圖 1.2.6 所示。而在圖 1.2.7 顯示出當超級電容的容量超過 100F 後，增加的太陽能充電量則越趨平緩。

混合式儲能的總內阻是通過對混合式系統以 8A 的電流來測量，並以不同之鉛酸電池 SOC 下做相同的實驗，其結果指出整個系統的總內阻低於 30mΩ，如圖 1.2.10 所示。

圖 1.2.11 表示在 Phase2 階段充電時，有加入超級電容的系統在進行 PWM 充電時電流的 Duty Cycle 比無超級電容的系統要來得高，代表能流進鉛酸電池的電流越大。

圖 1.2.14、圖 1.2.15 說明 R_{BAT} 在 Phase2 充電階段增加，而有並聯超級電容的系統如 288F 系統中具有較低的 R_{BAT} ，這意味著有著較低的阻抗。

過去的蓄電池充電技術研究皆以鉛酸電池為主，其充電技術已有相當程度的掌握，但相較於鋰電池而言，鋰電池擁有高功率、高容量與壽命長之優點，目前已廣泛應用於電動車中，故使用鋰電池作為蓄電池是未來的趨勢。太陽能充電增強技術[8]原是以鉛酸電池作為太陽能發電系統的蓄電池，由於鉛酸電池的反應較慢，故將鉛酸電池並聯超級電容可獲得較多的充電量。本研究擬以鋰電池取代鉛酸電池，由於鋰電池的反應較鉛酸電池快，超級電容又貴不符合經濟效益，本研究擬探討以電解電容代替超級電容來做為鋰電池充電增強的可行性。

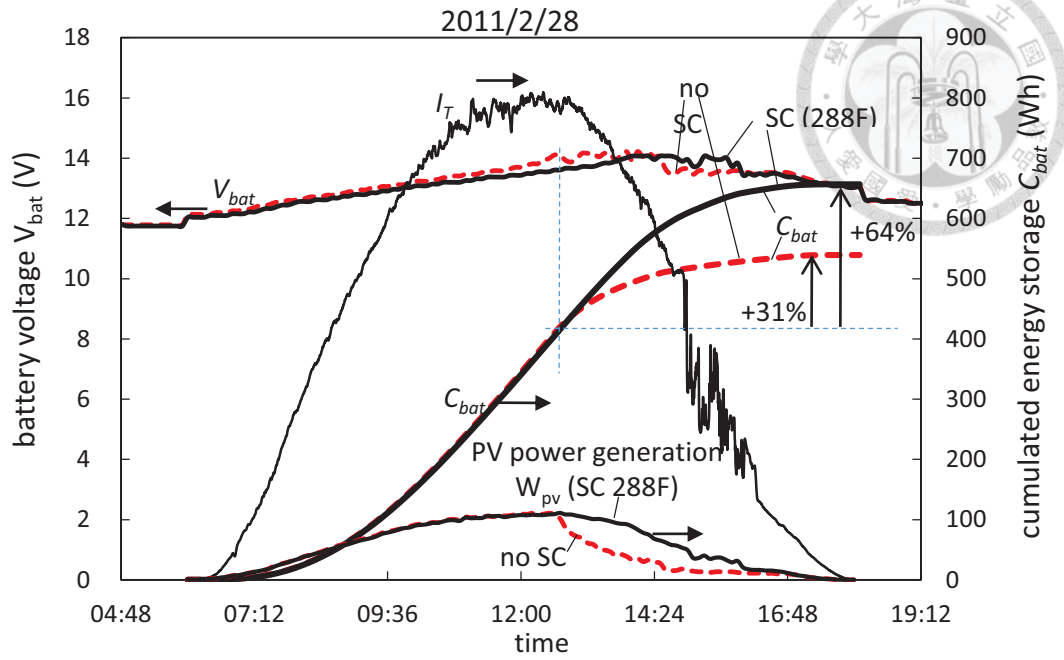


圖 1.2.3 單日表現比較

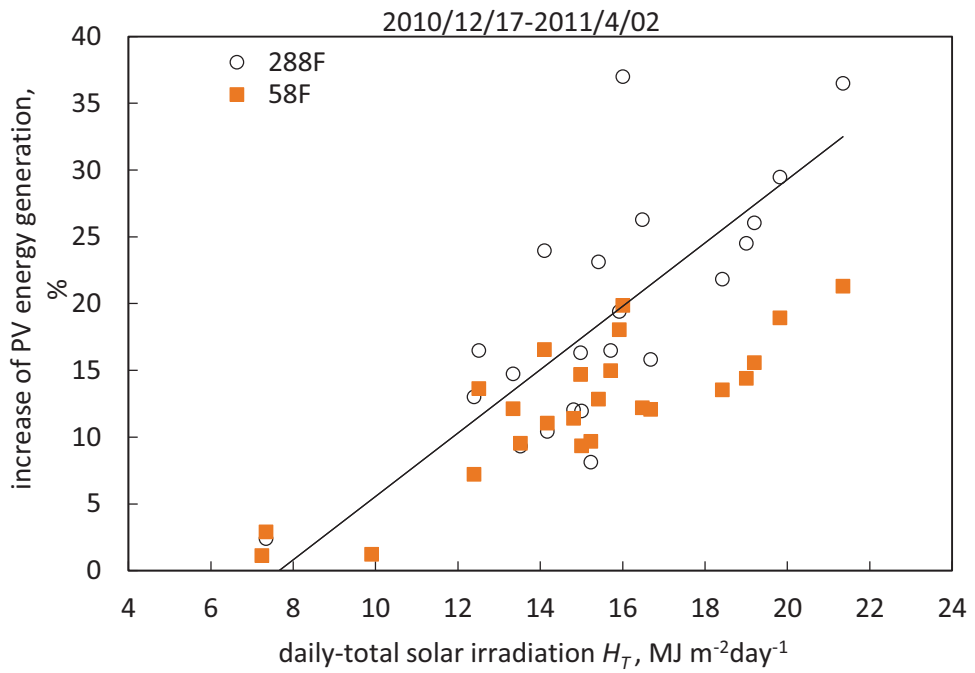


圖 1.2.4 超級電容長時間比較測試 58F 與 288F

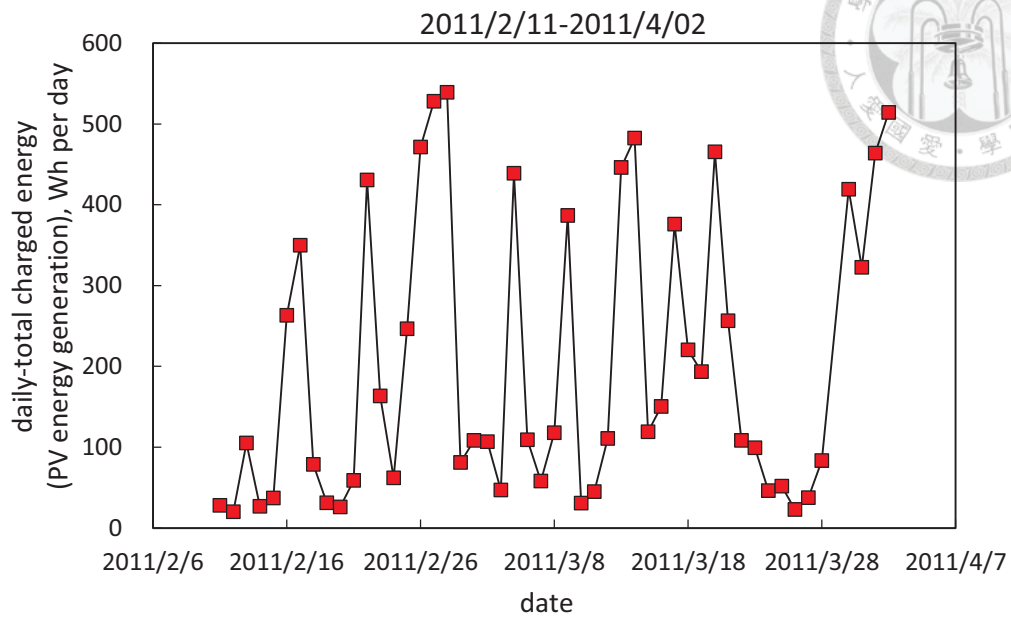


圖 1.2.5 無超級電容之發電量

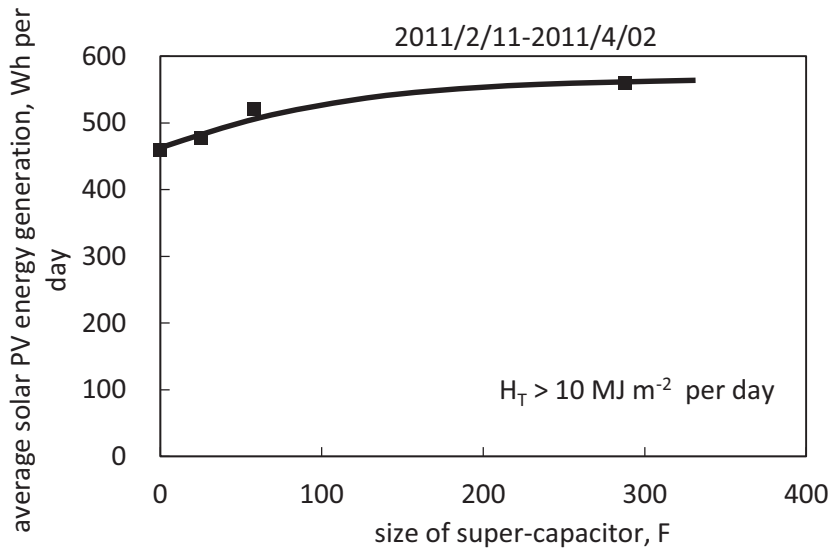


圖 1.2.6 太陽能發電量與超級電容之容量使用

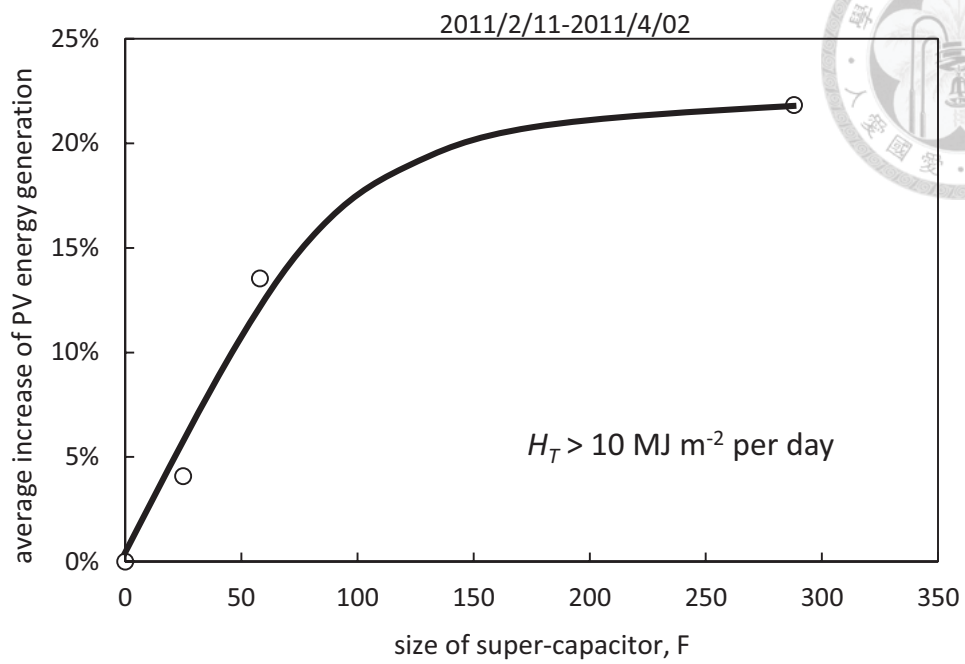


圖 1.2. 7 太陽能發電量 VS 超級電容容量

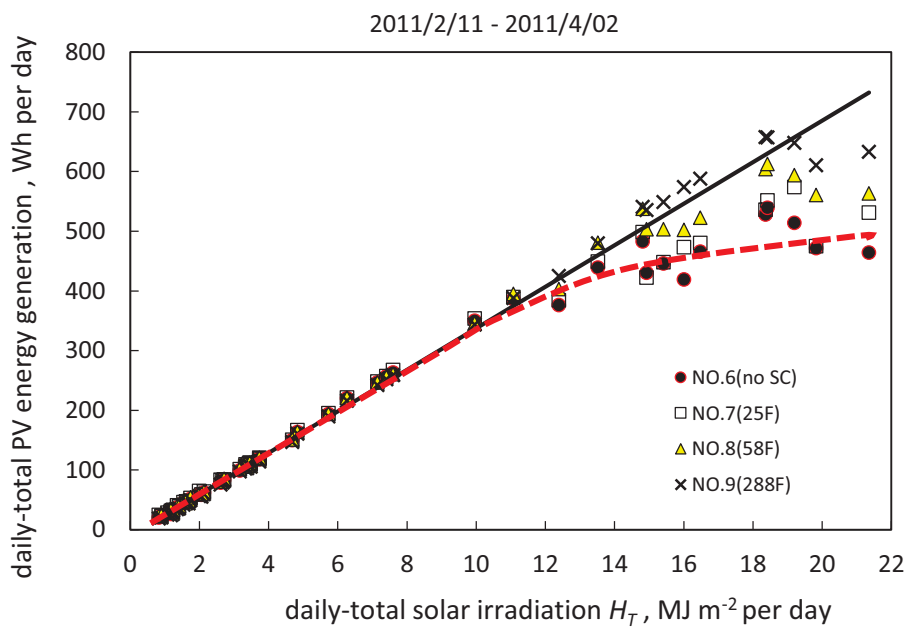


圖 1.2. 8 長期比較測試結果

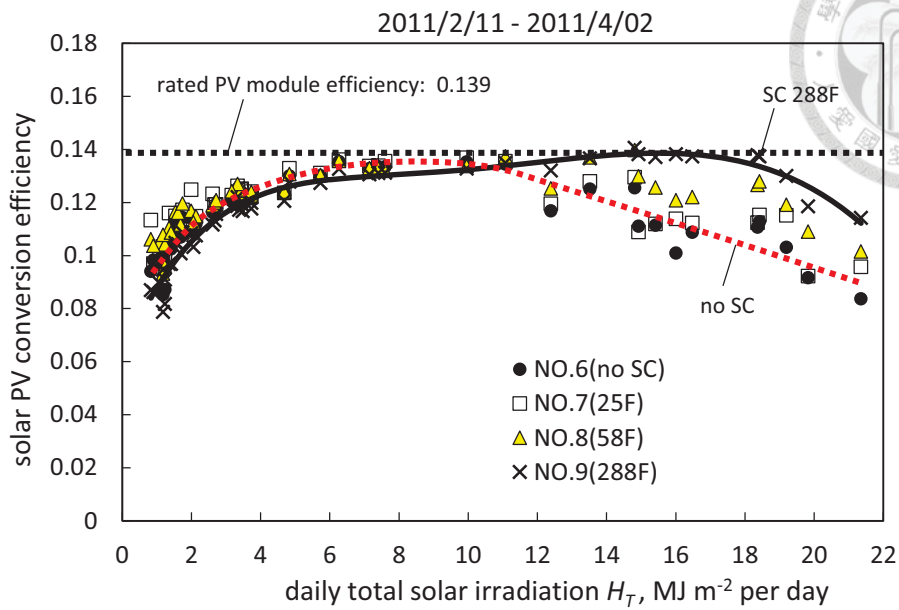


圖 1.2.9 太陽能發電系統效率比較測試

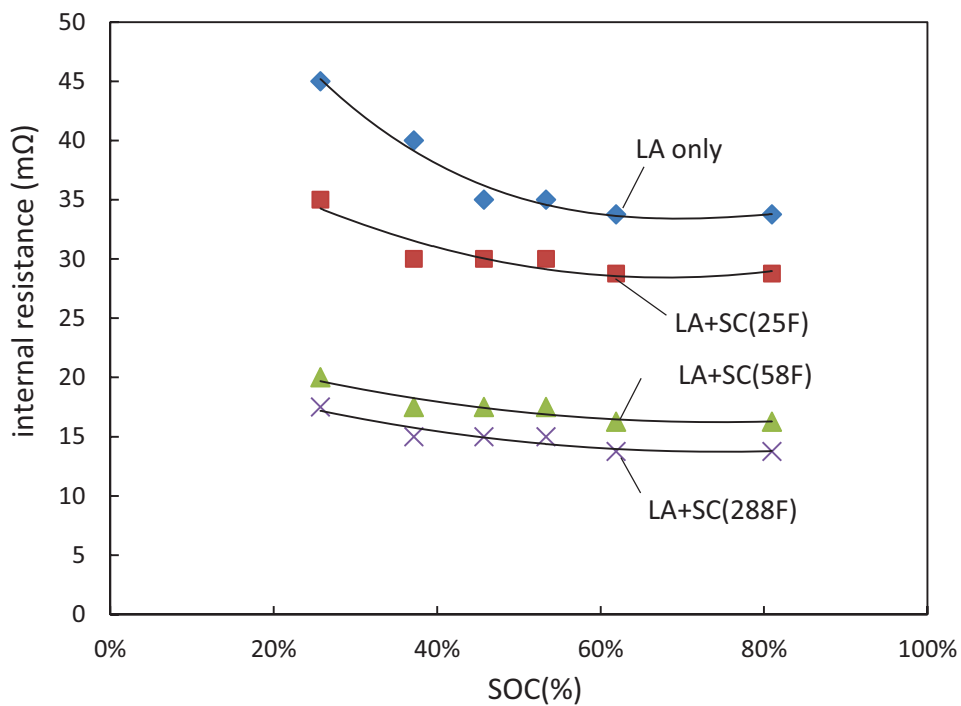


圖 1.2.10 蓄電池系統總內阻

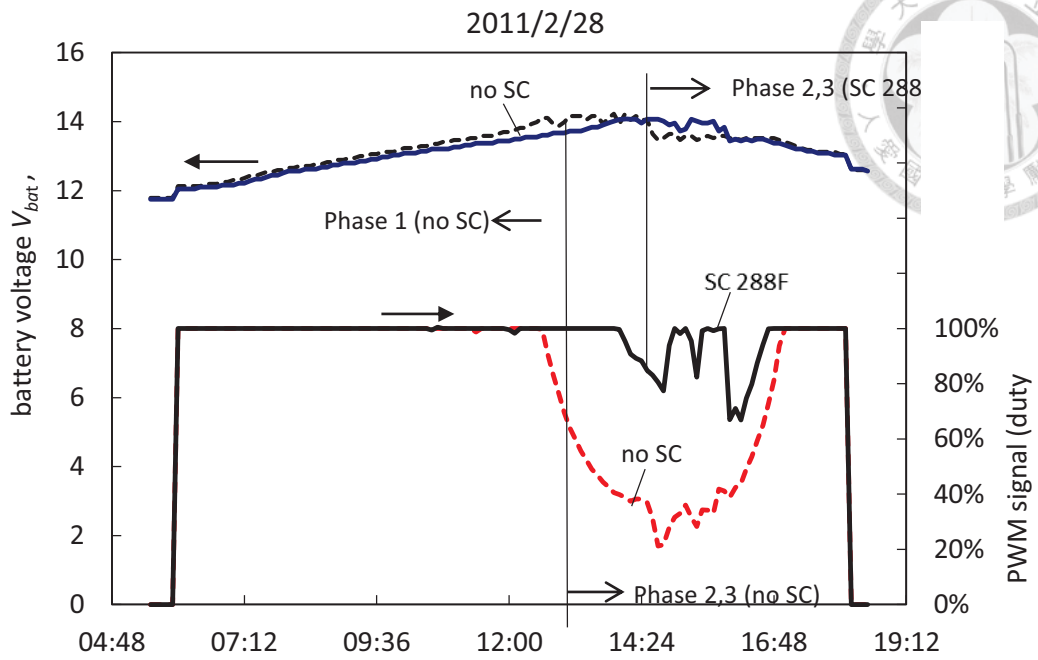


圖 1.2. 11Phase 2 充電 Duty cycle 表現

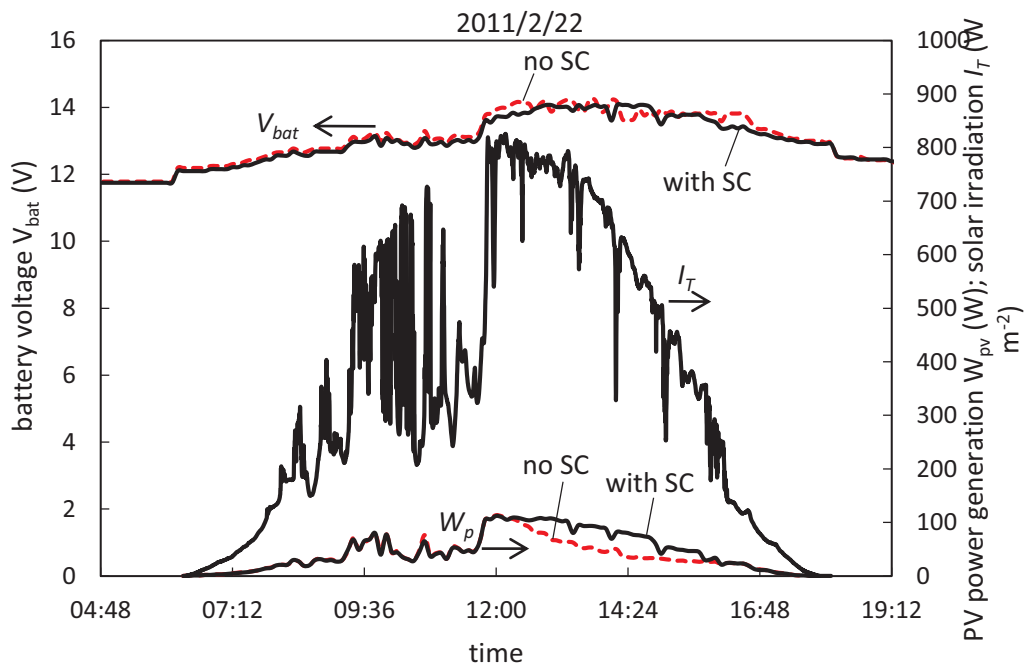


圖 1.2. 12 太陽能發電比較(2011/2/22)

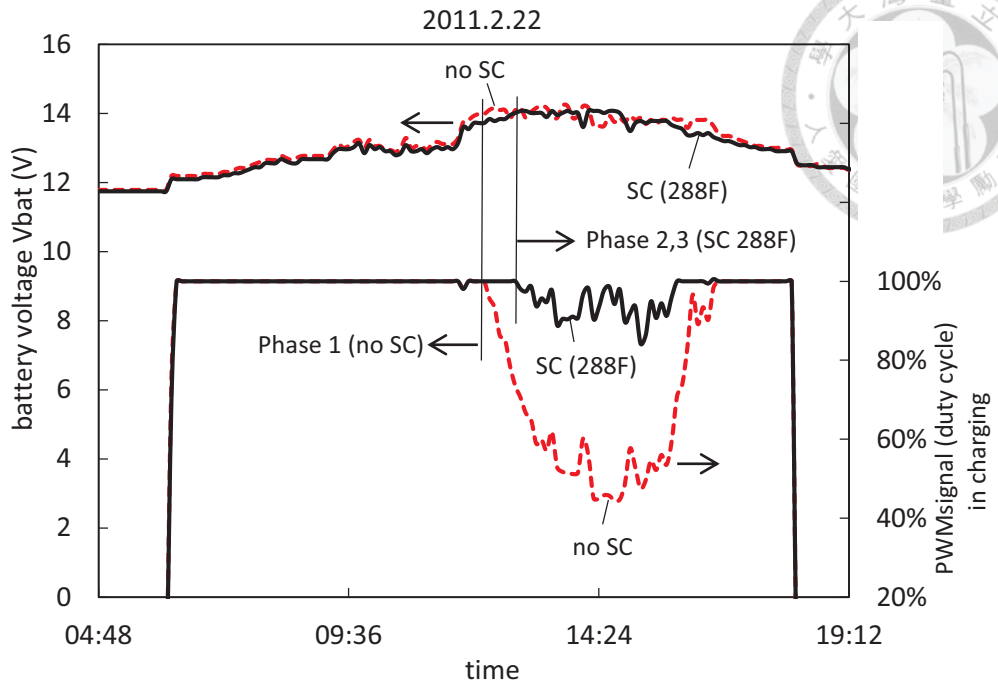


圖 1.2.13 太陽能發電比較(2011/2/22)

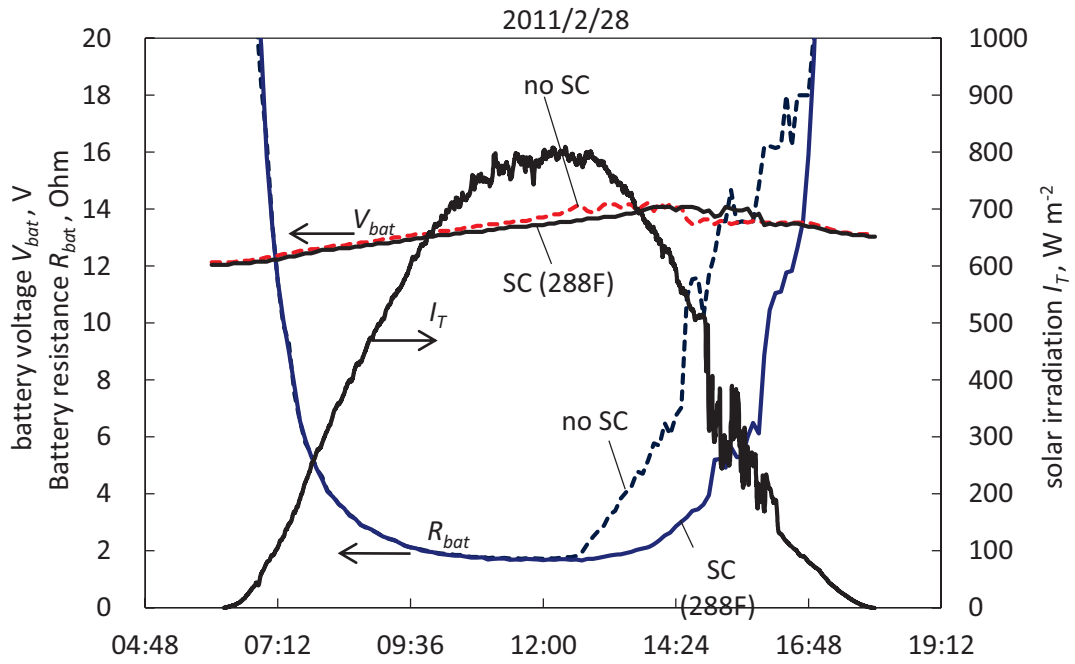


圖 1.2.14 系統總等效電阻比較(2011/2/28)

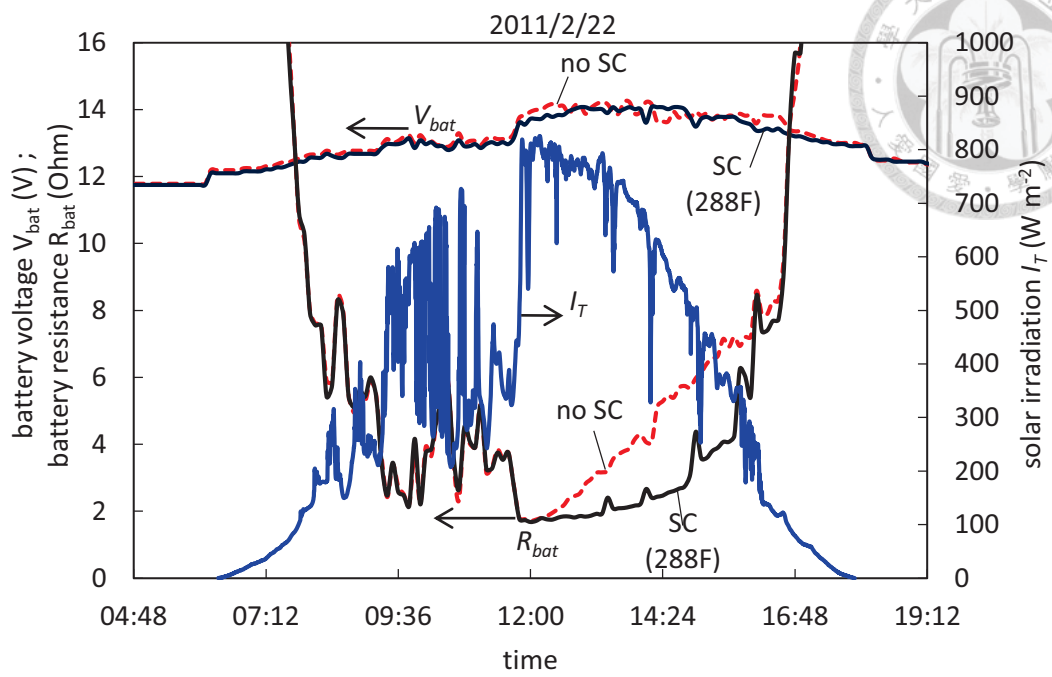


圖 1.2. 15 系統總等效電阻比(2011/2/22)

1.3 研究內容

包括兩項：(1)並聯電解電容來增強太陽能發電系統性能的可行性；(2)開發一簡易的 nMPPO 系統匹配設計方法，以供實際設計應用。



第二章 獨立型太陽能發電系統設計匹配研究



2.1 近最大功率點操作基本原理

太陽能板(Photovoltaic module, PV)的輸出會隨太陽輻射強度變化，輸出電壓與電流也會因為負載的特性產生變化。以新日光(NSP)公司所生產的多晶矽太陽能板 D6P245A3A 為例，圖 2.1.1 是由廠商所提供的在戶外以陽光進行測試的電壓與電流特性曲線，其表面溫度為 45°C，可以看出不同的太陽輻射強度有不同的發電量，其電壓與電流變化呈非線性。

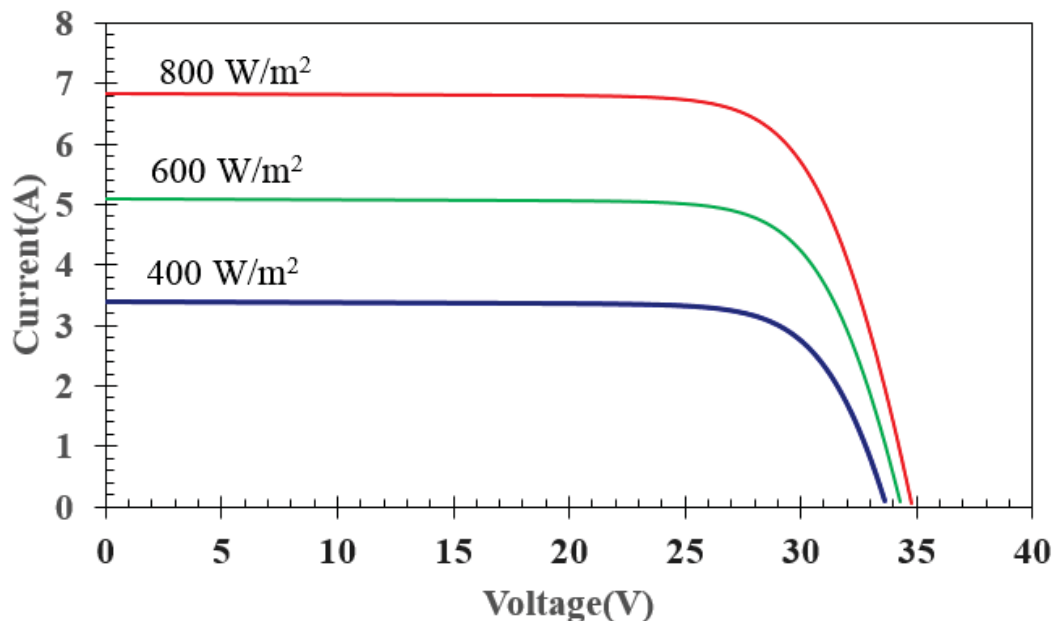


圖 2.1.1 NSP 45°C 太陽能板電壓-電流特性曲線

若將電壓與電流相乘即可得到太陽能板的輸出功率(W_p)，將輸出功率對輸出電壓作圖可以得到圖 2.1.2 的關係，可以看出在每一個太陽輻射強度照射與 PV 溫度下都存在一個最大的功率輸出，在最佳的電壓與電流條件下操作稱為太陽能板的最大功率點(MPP)。當太陽能板的輸出電壓偏離最大功率點電壓時，太陽能板的輸出功率將減少且偏離越遠則造成的損失越大。因此若我們能透過適當的電壓控制，使之與太陽能板匹配，就可以讓太陽能板保持在最大功率點做輸出，即最大功率點追蹤(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制。

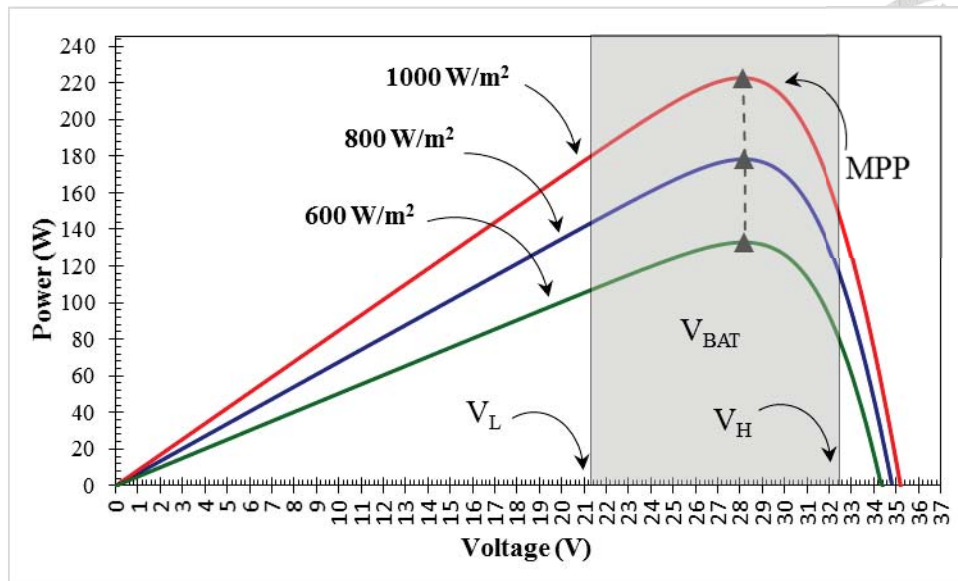


圖 2.1.2 NSP 45°C 太陽能板電壓-功率特性曲線

MPPT 是一種直流電源轉換器(DC/DC Converter)，有能量損失，如果設置的最大功率點追蹤器所提升的發電效率無法補足追蹤器所消耗的能量，則最大功率點追蹤器便形同虛設。

由圖 2.1.2 中看出，隨著太陽入射強度的變化，最大功率點電壓雖然有變化，但仍然集中在 26~29V 之間，其他的太陽能板特性曲線也有類似的情形。

太陽能發電系統近最大功率點操作(near Maximum Power Point Poeration, nMPPO)的概念是利用蓄電池的電壓，使系統的操作電壓範圍接近太陽能板的最大功率點，圖 2.1.2 所示。因此在此系統中蓄電池有兩個主要功能，一為鎖定太陽能板輸出電壓，二則為電能儲存。藉由蓄電池與太陽能板的適當的匹配，可使太陽能發電系統在近最大功率點操作，本研究擬利用幾個指標參數來做為系統匹配的重要。



2.2 獨立型太陽能發電系統 nMPPO 分析匹配

進行 nMPPO 之太陽能充電系統設計匹配時，必須先了解蓄電池的充電電壓操作範圍，如圖 2.1.1 所示，包括 V_L 、 V_{av} 與 V_{max} 等三個電壓點，以及太陽能板的重要規格 V_{mp} 、 V_{oc} ，依據蓄電池與太陽能板規格可定義三個重要的 nMPPO 系統匹配性能指標。

$$dV_{mp} = V_{mp} - V_{av} \quad (2.1-1)$$

$$\gamma_{mp} = \frac{dV_{mp}}{V_{mp}} \quad (2.1-2)$$

$$\rho_{loss} = P_{mp} - P(V_{av}) \quad (2.1-3)$$

$$dV_{max} = V_{oc} - V_{max} \quad (2.1-4)$$

V_{mp} : 太陽能板最大功率點電壓

V_L : 蓄電池充電之最低操作電壓

V_{av} : 蓄電池充電之平均操作電壓

V_{max} : 蓄電池充電之最大操作電壓

dV_{mp} : V_{mp} 到 V_{av} 之偏移距離

r_{mp} : 系統匹配之損失指標

P_{mp} : 太陽能板最大功率

$P(V_{av})$: 蓄電池充電平均操作電壓對應之太陽能板功率

L_{mps} : P_{mp} 與 $P(V_{av})$ 之間的損失

V_{oc} : 太陽能板的開路電壓

dV_{max} : 蓄電池之 V_{max} 到 V_{oc} 的偏移距離

C_i : 太陽能充電系統可充電程度之性能指標,簡稱”可充電度”

定義 nMPPO 能量損失 L_{mp} 如式 2.2-5，式中 $P(V_{av})$ 表示太陽能板在 V_{av} 的發電功率； P_{mp} 表示為 MPP 的功率。

$$L_{mp} \equiv \frac{P_{mp} - P(V_{av})}{P_{mp}} \quad (2.2-5)$$

太陽能板模組的功率-電壓曲線，如圖 2.2.1，可以將(0,0)、 (V_{mp}, P_{mp}) 、

$(V_{oc},0)$ 三個座標點連成一個三角形，其中 $(0,0)$ 至 (V_{mp},P_{mp}) 直線上可標定一個 (V_{av},P_{av}) ， P_{av} 很接近 $P(V_{av})$ 。

因蓄電池 V_{av} 與太陽能板 V_{mp} 的差距代表 nMPPO 與 MPP 的偏離量，故定義「 V_{av} 電壓偏離率」為 r_{mp} 如式 2.2-6。

$$r_{mp} = \frac{dV_{mp}}{V_{mp}} = \frac{V_{mp}-V_{av}}{V_{mp}} = 1 - \frac{V_{av}}{V_{mp}} \quad (2.2-6)$$

$$\text{由三角函數關係：} \quad \frac{V_{av}}{V_{mp}} = \frac{P_{av}}{P_{mp}} \quad (2.2-7)$$

$$\text{故式(2.2-6)可改寫成：} \quad r_{mp} = \frac{P_{mp}-P_{av}}{P_{mp}} \quad (2.2-8)$$

因此 r_{mp} 也可以代表近似的 nMPPO 能量損失，相當於以太陽能板的線性近似功率-電壓曲線下的損失。通常 $P(V_{av}) > P_{av}$ ，因此 r_{mp} 所代表的 nMPPO 能量損失高於實際值(L_{mp})，故 r_{mp} 也可以用來代表“最大 nMPPO 能量損失”。

以太陽能板進行充電時，蓄電池最高操作電壓 V_{max} 必須小於太陽能板的開路電壓 V_{oc} ，否則便無法充電。因此， V_{max} 與 V_{oc} 相對於 V_{mp} 的位置與差異量代表能否充電，故定義一個「可充電度 C_i 」如下式 2.2-9：

$$C_i = \frac{dV_{max}}{V_{oc}-V_{mp}} = \frac{V_{max}-V_{mp}}{V_{oc}-V_{mp}} \quad (2.2-9)$$

當 $V_{max} = V_{oc}$ 時， $C_i = 1$ ，代表蓄電池與太陽能板的電壓全面匹配。當 $V_{mp} \leq V_{max} \leq V_{oc}$ 時， $0 \leq C_i \leq 1$ ，代表充電電壓匹配可以接受。如果 $V_{max} < V_{mp}$ ，即 $C_i < 0$ (負值) 代表充電電壓範圍在 MPP 左側， V_{av} (蓄電池最常操作電壓) 不可能達到 V_{mp} ，nMPPO 能量損失會增加。如果 $V_{max} > V_{oc}$ ， $C_i > 1$ ， V_{av} 可能接近 V_{oc} ，太陽能發電功率可能急遽下降，如大於 V_{oc} 充電在失效。

透過 L_{mp} 、 r_{mp} 、 C_i 性能指標，即可以針對特定蓄電池進行太陽能板的篩選，完成 nMPPO 的系統匹配設計。

可充電度 C_i 是 nMPPO 技術關鍵之一， C_i 值應介於 0 與 1 之間，但如接近 0，nMPPO 能量損失會增大；接近 1，則有可能進入充電失效區。因此合理 C_i 值可能介於 0 與 0.5 之間。

V_{\max} 與 V_{oc} 相對位置有關衝電失效問題為亦於了解，定義蓄電池最高電壓 V_{\max} 偏離率如式 2.2-10，於 V_{\max} 處的太陽能發電功率損失可定義為如式 2-2-11，而在圖 2.2.1 功率-電壓曲線由 (V_{mp}, P_{mp}) 至 $(V_{oc}, 0)$ 連線可標定一個 (V_{\max}, P_{\max}) ， P_{\max} 很接近 $P(V_{\max})$ 。由三角函數關係可得式 2.2-13。

因此 r_{oc} 代表近似的 V_{\max} 功率損失，可以輕易求得，又由式 2.2-14 所示， $C_i=0\sim 0.5$ 代表 $r_{oc}=0.5\sim 1$ 。若 $C_i=0.5$ ，則 $r_{oc} = \frac{P_{\max}}{P_{mp}} = 0.5$ ，相當於 V_{\max} 處之最大發電損失為 50%(因 $P_{\max} < P(V_{\max})$)。如 $C_i=0.1$ ，則 $r_{oc}=0.9$ ，相當於 V_{\max} 處最大損失為 10%。因此光從 r_{oc} 值也可大略判斷 nMPPO 的匹配是否合適。

上述分析採用的參數 L_{mp} 、 L_{\max} 是利用太陽能板的功率-電壓曲線求得，其可由實測或由功是計算求得。

$$r_{oc} \equiv \frac{V_{oc}-V_{\max}}{V_{oc}-V_{mp}} \quad (2.2-10)$$

$$L_{\max} \equiv \frac{P_{mp}-P(V_{\max})}{P_{mp}} = 1 - \frac{P(V_{\max})}{P_{mp}} \quad (2.2-11)$$

$$\frac{P_{\max}}{P_{mp}} = \frac{V_{oc}-V_{\max}}{V_{oc}-V_{mp}} \quad (2.2-12)$$

$$r_{oc} = \frac{P_{\max}}{P_{mp}} \quad (2.2-13)$$

$$r_{oc} = \frac{V_{oc}-V_{\max}}{V_{oc}-V_{mp}} = \frac{(V_{oc}-V_{mp})-(V_{\max}-V_{mp})}{V_{oc}-V_{mp}} = 1 - C_i \quad (2.2-14)$$

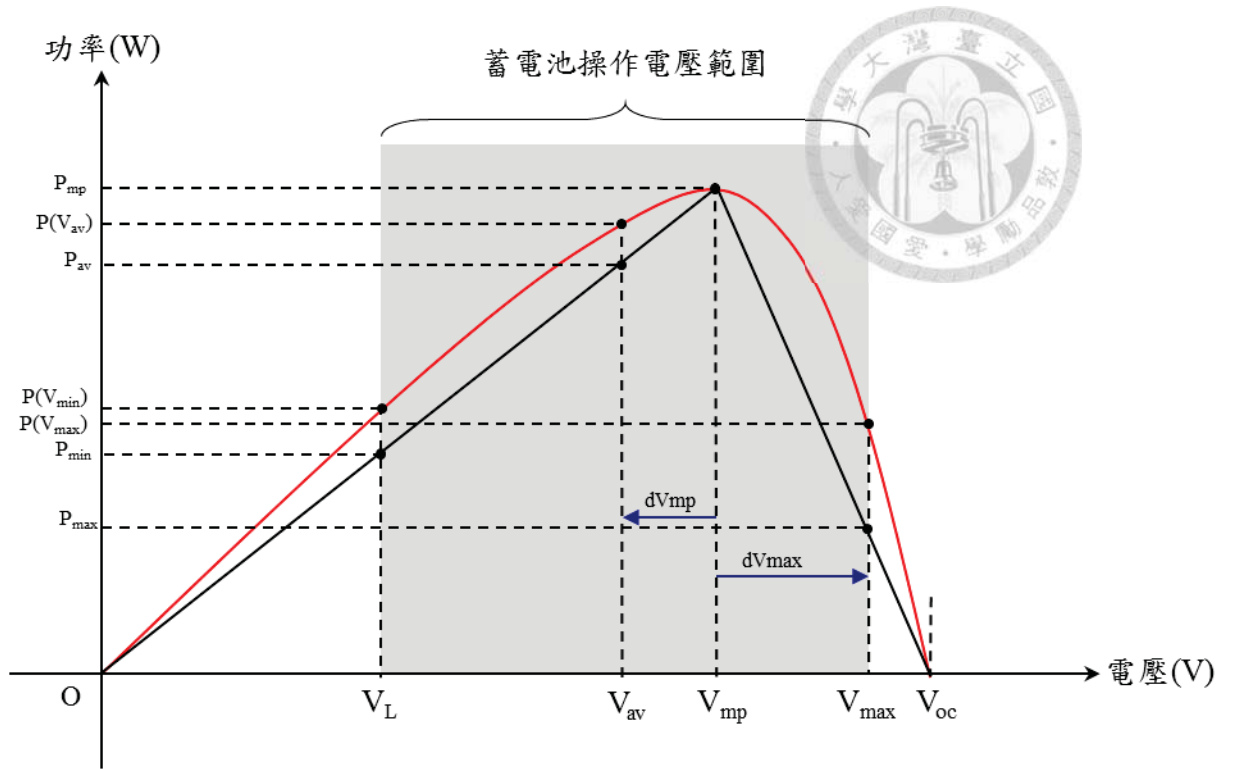


圖 2.2.1 太陽能板之電壓-功率特性曲線與蓄電池電壓操作範圍關係圖

2.3 太陽能模組模型與實驗比對

太陽能板是利用光伏特效應(photovoltaic effect)直接將太陽光能轉換成電能。操作特性可用等效電路來表示。理想的太陽能板之等效電路可以視為一個電流源並聯一個二極體，但實際上並非理想狀態，內部還有一個並聯內阻 R_{SH} 和串連內電阻 R_S ，如圖 2.3.1 所示。

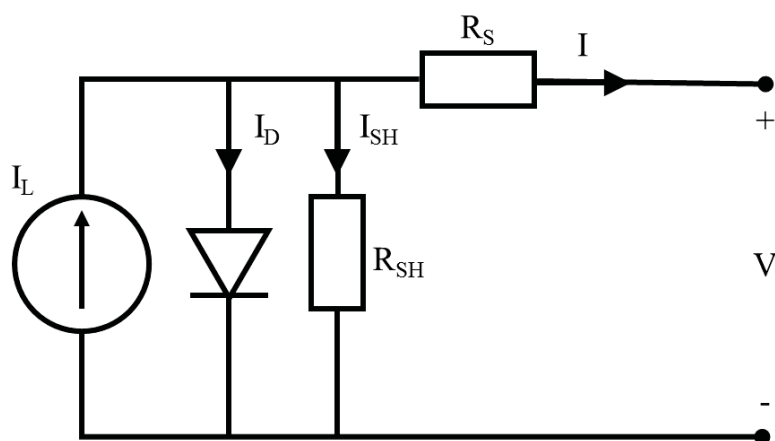


圖 2.3.1 太陽能板等效電路

R_S : 太陽能板內部串連電阻， Ω

R_{SH} : 太陽能板內部並電阻， Ω

I_L : 太陽能板產生的電流，A

I_D : 太陽能板的反向飽和電流，A

I_{SH} : 流經過太陽能板內部阻抗的電流，A

I : 太陽能板對外輸出的電流，A

V : 太陽能板對外正負兩極的電壓差，V

由克希何夫定律(Kirchhoff's circuit laws)可以知道進入任意交點的電流等於離開交點的電流，所以電流關係式如式 2.3-1，其中 I_L 是太陽輻射值和溫度的函數，關係式如式 2.3-2， I_D 為流經過蕭特基二極體(Shockley diode)的電流，滿足蕭特基二極體公式，關係式如式 2.3-3 和式 2.3-4， I_{SH} 關係式為歐姆定律，關係式如 2.3-5。最後將是式 2.3-2 至式 2.3-5 帶入式 2.3-1 可得到太陽能板關係方程式。



$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (2.3-1)$$

$$I_L = \frac{I_{sc} + K_i(T - T_r)}{1000} \times S_i \quad (2.3-2)$$

$$I_D = I_0 \times \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right] - 1 \right\} \quad (2.3-3)$$

$$I_0 = I_{rr} \times \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \times \exp \left[\frac{qE_{gap}}{kA} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.3-4)$$

$$I_{SH} = \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (2.3-5)$$

$$I = \frac{I_{sc} + K_i(T - T_r)}{1000} \times S_i - I_{rr} \times \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \times \exp \left[\frac{qE_{gap}}{kA} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \times \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (2.3-6)$$

I_{sc} : 太陽能板對於太陽輻射量 1000W/m^2 、溫度 25°C 條件下之短路電流，A

K_i : 太陽能板的短路電流溫度係數，A/K

T_r : 太陽能板的參考溫度 298K

S_i : 日照強度， W/m^2

q : 電荷量， $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$

n : 太陽能板串聯的數量

k : 波茲曼常數， $1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$

T : 太陽能板溫度，K

I_{rr} : 二極體的反向飽和電流，A

E_{gap} : 半導體材料跨越能帶間隙所需能量(矽 $\doteq 1.1\text{eV}$)，eV

本研究利用式 2.3.6 太陽能板特性方程式、太陽能板供應商提供的相關參數與 R_S 、 R_{SH} 值，再利用 Matlab Simulink 來模擬太陽能板的操作特性曲線，給予三個輸入，包括太陽能板的操作電壓與太陽日照輻射量的大小，以及太陽能板表面溫度，來求得太陽能板輸出的電流與相應之電壓。圖 2.3.2 為太陽能板 Simulink Block diagram 內部流程圖。

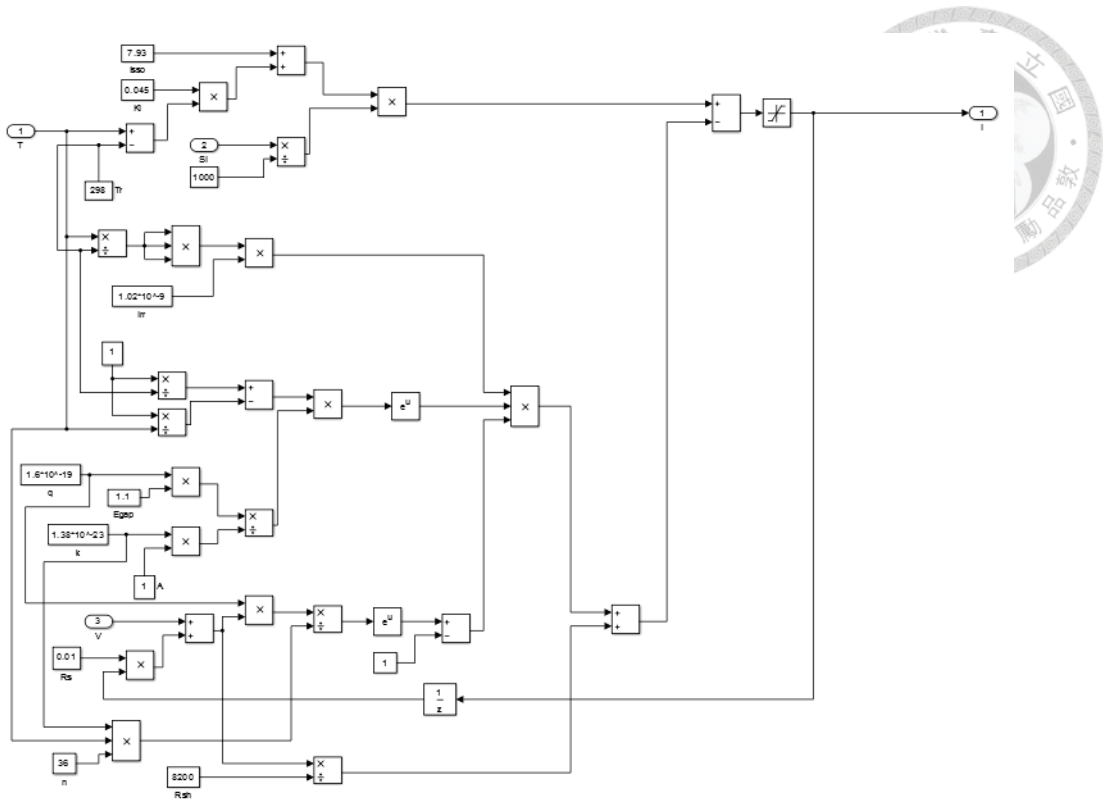


圖 2.3. 2 太陽能板之 Simulink Block diagram

為驗證上述太陽能板 Simulink Block diagram 的準確度，輸入溫度 25°C，不同太陽輻射 200、400、600、800 與 1000W/m²，求得電壓-電流特性曲線，如圖 2.3.3，並與廠商所提供的太陽能板測試之電壓-電流曲線，如圖 3.1.5 進行比較，兩者極為接近。

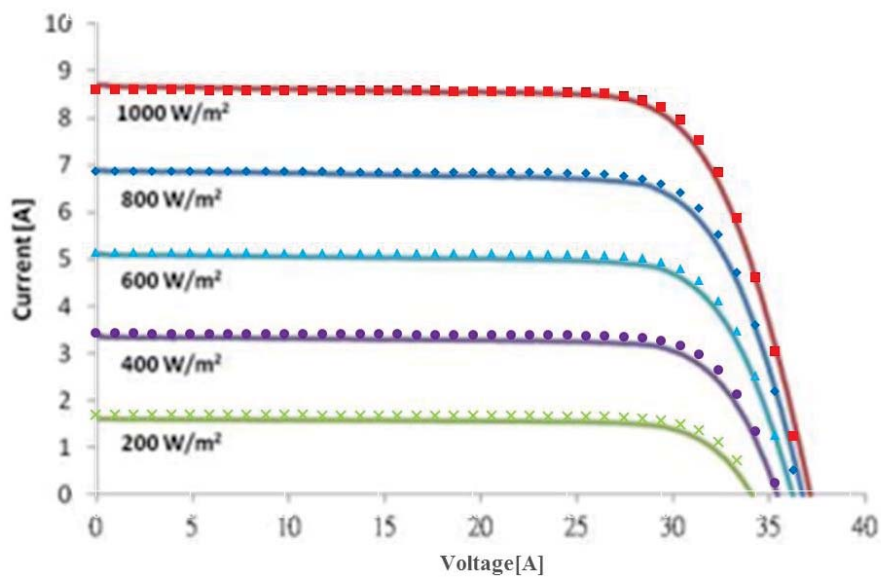


圖 2.3. 3 模擬之電壓-電流特性曲線



2.4 nMPPO 系統匹配設計軟體

以 nMPPO 方法來進行系統匹配時，太陽能板的篩選是一大關鍵，若無法篩選出符合蓄電池操作電壓的太陽能板，則整個系統的發電損失會增加；上一節所提及的 nMPPO(r_{mp} 、 P_{mp} 、etc)性能指標來進行太陽能板的篩選，但在使用這些性能指標之前還必須先找出每片太陽能板的發電特性曲線，然後再透過這些曲線來計算 nMPPO 性能指標。不同廠商所製造的太陽能板，其特性曲線與內部參數皆不相同，不同效率的太陽能板之特性曲線更是差異極大，故這些 nMPPO 指標的計算在實際使用時並不方便，故本研究發展一套便利的套裝軟體如圖 2.4.1，可以加速篩選太陽能板，找出符合 nMPPO 的太陽能板，本節將說明此軟體的設計與操作方法。

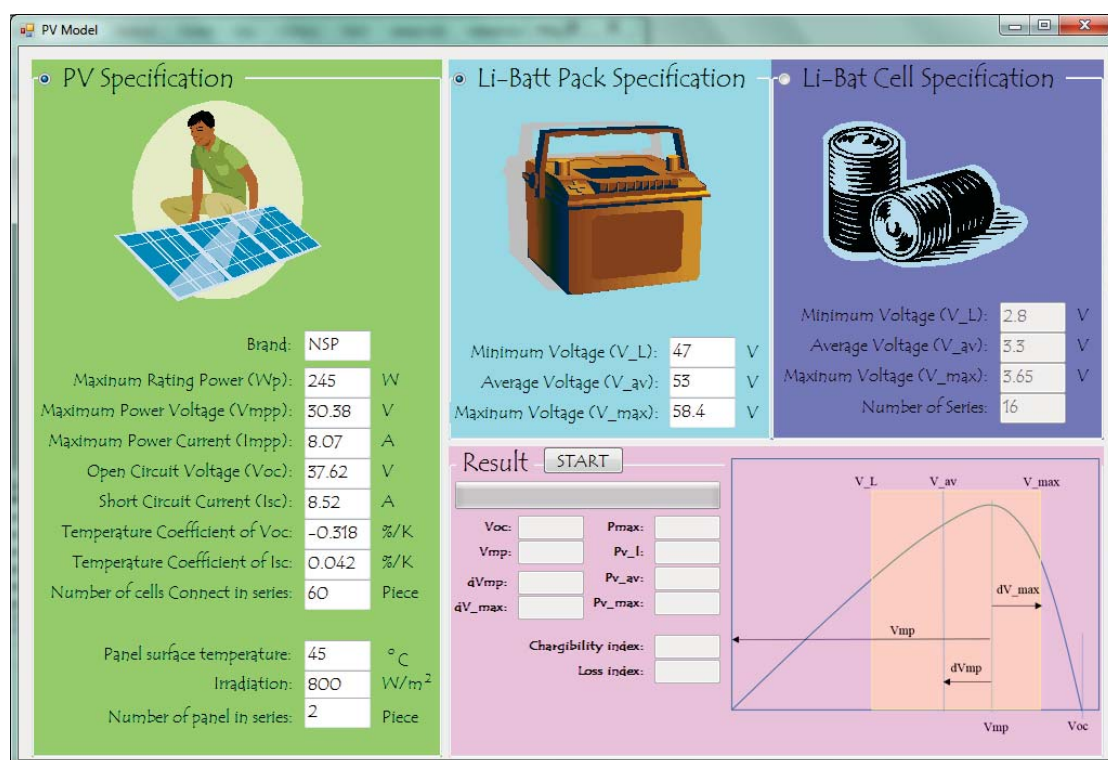


圖 2.4.1 nMPPO 系統匹配之圖型化使用者介面

2.4.1 太陽能板規格設定介面

(1) 太陽能板基本參數

Brand: 太陽能板廠商名稱

Maximum rating power(W_p): 在輻射量 $1000W/m^2$ 、 $25^{\circ}C$ 下之最大功率

Maximum power voltage(V_{mpp}): 在輻射量 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 、 25°C 下最大功率點電壓

Maximum power current(I_{mpp}): 在輻射量 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 、 25°C 下最大功率點電流

Open circuit voltage(V_{oc}): 在輻射量 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 、 25°C 下的開路電壓

Short circuit current(I_{sc}): 在輻射量 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 、 25°C 下的短路電流

Temperature coefficient of V_{oc} : V_{oc} 之溫度係數，單位%/K

Temperature coefficient of I_{sc} : I_{sc} 之溫度係數，單位%/K

Number of cells connect in series: 太陽能板串連數量

(2) 使用之環境與設計參數

PV panel temperature: 太陽能板特性曲線之表面溫度，單位 $^\circ\text{C}$


Irradiation: 太陽能板特性曲線之輻射量，單位 W/m^2

Number of panel in series: 太陽能板串連數，輸入 1 表示僅一片太陽能板。

在圖 2.4.1.1 中，軟體介面 PV 規格區塊分為兩部分，第一部份為輸入由太陽能板製造廠商所提供的在輻射量 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 與板溫 25°C 下的標準測試參數 (V_{oc} 、 V_{mp} 、 I_{mp} 、...)，有了這八個參數就可以計算出太陽能板在任何輻射量 (W/m^2) 與任何板溫 ($^\circ\text{C}$) 下的特性曲線。第二部份輸入為使用環境參數，主要包括輸入太陽能板溫度、輻射量與太陽能板的串聯數量(與系統電壓有關)。

結合了這兩部份的資料，即可計算出太陽能板的特性曲線。

PV Specification



Brand:	NSP	
Maximum Rating Power (Wp):	245	W
Maximum Power Voltage (Vmpp):	30.38	V
Maximum Power Current (Impp):	8.07	A
Open Circuit Voltage (Voc):	37.62	V
Short Circuit Current (Isc):	8.52	A
Temperature Coefficient of Voc:	-0.318	%/K
Temperature Coefficient of Isc:	0.042	%/K
Number of cells Connect in series:	60	Piece
Panel surface temperature:	45	°C
Irradiation:	800	W/m ²
Number of panel in series:	2	Piece



圖 2.4.2 太陽能板參數設定介面

2.4.2 鋰電池規格設定介面

此介面有兩種設定選擇：(1)電池標準模組、(2)客製規格(電芯單元)。

(1) 鋰電池標準模組

Minimum voltage(V_L): 鋰電池模組之最低操作電壓(V)

Average voltage(V_{av}): 鋰電池模組之平均操作電壓(V)

Maximum voltage(V_{max}): 鋰電池模組之最大操作電壓(V)

(2) 客製規格(電芯單元)

Minimum voltage(V_L): 鋰電池芯之最低操作電壓(V)

Average voltage(V_{av}): 鋰電池芯之平均操作電壓(V)

Maximum voltage(V_{max}): 鋰電池芯之最大操作電壓(V)

Number of series: 鋰電池芯串連數量

如圖 2.4.3，軟體介面的功能主要是讓使用者輸入蓄電池標準模組(Pack)之操作電壓範圍，包括 V_L 、 V_{av} 與 V_{max} 等。也可以輸入客製蓄電持基本資料(電芯)，讓 nMPPO 的系統匹配更加靈活。

輸入介面主要分為兩種選項，只能選擇一組來輸入，左邊選項為標準規格

蓄電池模組之操作電壓，僅需輸入三個基本電壓(V_L 、 V_{av} 、 V_{max})；右邊選像係針對客製電池，主要輸入單電芯的三個基本電壓以及總串聯的數量。

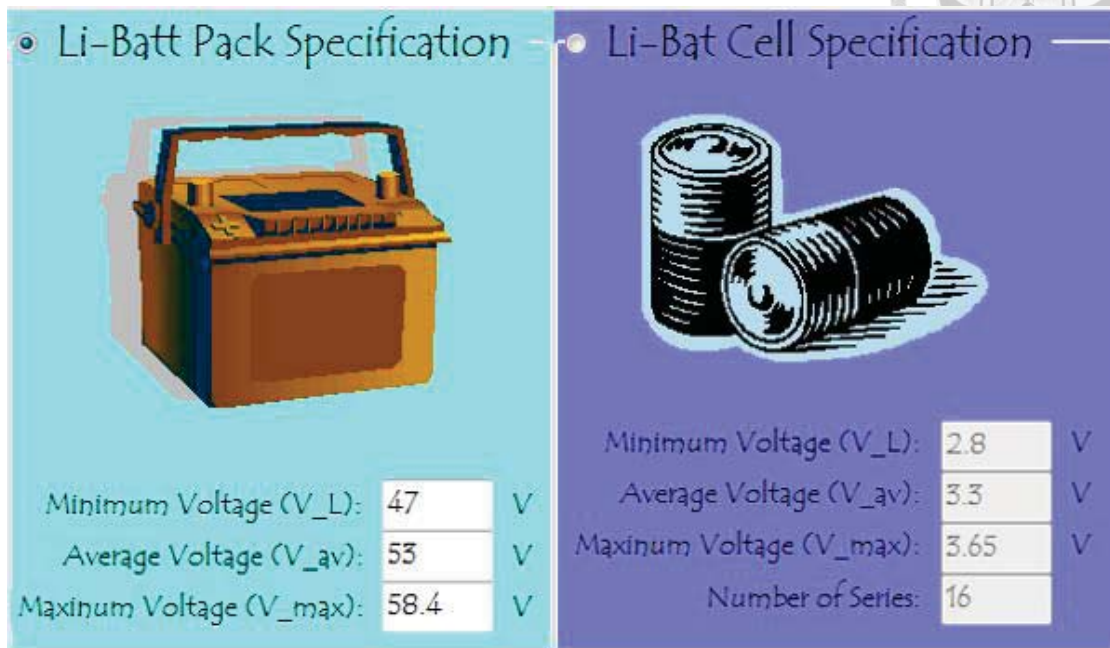


圖 2.4.3 蓄電池充電電壓之操作範圍

2.4.3 輸出結果

圖 2.4.4，當 PV Specification 介面與 Li-Batt Pack Specification 或 Li-Bat Cell Specification 介面中的參數輸入完畢後，即可點擊在 Result 介面中的 START 按鈕來開始進行太陽能板的特性曲線與 nMPPO 指標計算。介面將顯示目前最新一筆的性能指標數值。要再進行第二次以上的計算時，若只更改 Li-Batt Pack Specification 或 Li-Bat Cell Specification 介面中的相關參數，則計算時間較短，因為太陽能板沒有改變，將跳過太陽能板特性曲線的計算。如果更改 PV Specification 介面的參數，則軟體的會因需要重新計算太陽能板特性曲線而花費較長的時間

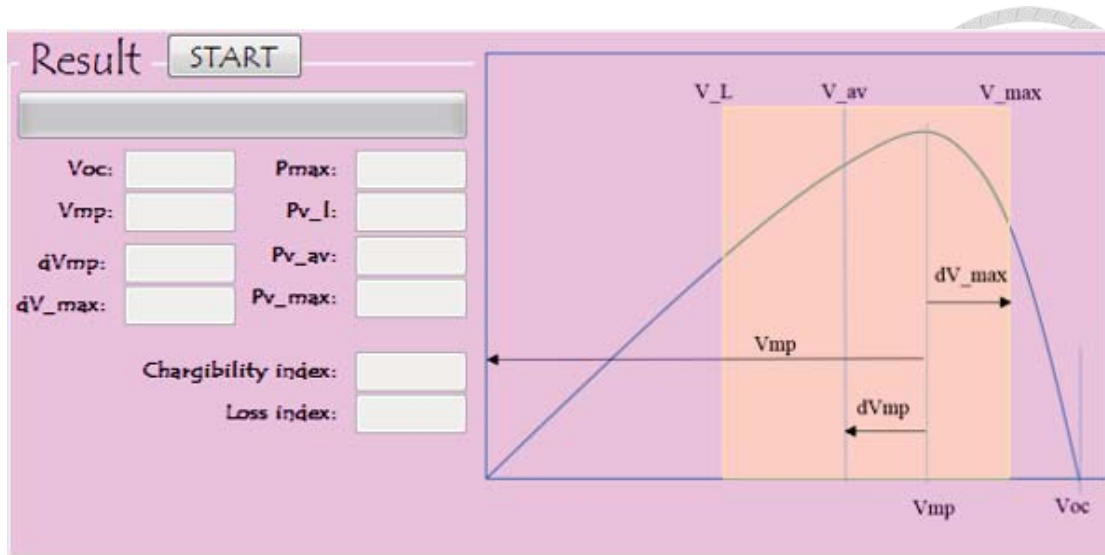


圖 2.4. 4 nMPPO 之系統匹配計算結果顯示介面

V_{oc} : 太陽能板的開路電壓(V)

V_{mp} : 太陽能板最大功率點電壓(V)

dV_{mp} : V_{mp} 到 V_{av} 之偏移距離(V)

dV_{max} : 蓄電池之 V_{max} 到 V_{mp} 的偏移距離(V)

P_{max} : 太陽能板最大功率(W)

P_{V_L} : 蓄電池最低操作電壓所對應的太陽能板功率(W), $P(V_L)$

$P_{V_{av}}$: 蓄電池平均操作電壓所對應的太陽能板功率(W), $P(V_{av})$

$P_{V_{max}}$: 蓄電池最高操作電壓所對應的太陽能板功率(W), $P(V_{max})$

	Brand	Wp	Irradianc	Tempera	Voc	V_L	V_av	V_max	N_cells	Pmax	Pv_l	Pv_av	Pv_max	Vt
	NSP	245	800	45	69.6	47	53	58.4	-	178.35	157.7	174.37	175.97	56.
	NSP	245	800	45	69.6	42	56	60	-	178.35	141.41	178.3	169.89	56.

圖 2.4. 5 性能指標儲存

如圖 2.4.5，在進行 nMPPO 系統匹配分析時，一般會選擇兩種以上之太陽能板，或考慮不同的蓄電池操作電壓範圍，然後再利用所計算的 nMPPO 性能指標來進行的評比以找尋最適設計，故本軟體提供了一個匯出分析數據表格以儲存不同匹配的性能指標。該表格可以匯出為 EXCEL 的檔案格式，以方便進一步分析。

2.4.4 應用實例

表 2.4.1 列出四種不同規格的太陽能板，計算條件設定為輻射量 800W/m²、板溫 45°C，其中 NSP245W 太陽能板試驗的蓄電池為 24V100Ah 鉛酸電池，其他 130W 與 60W 太陽能板試驗的蓄電池為 12V100Ah 鉛酸電池。

	NSP245	PCM130	ASEC130	ASEC130	
Maximum Rating Power (P_{max})	245	130	130	130	Wp
Open Circuit Voltage (V_{oc})	37.62	22	21.66	21.66	V
Maximum Power Voltage (V_{pm})	30.38	17.7	17.54	17.54	V
Short Circuit Current (I_{sc})	8.52	8.1	7.93	7.93	A
Maximum Power Current (I_{mp})	8.07	7.4	7.45	7.45	A
Temperature Coefficient of I_{sc}	0.046	0.046	0.046	0.046	%/K
Temperature Coefficient of V_{oc}	-0.313	-0.313	-0.313	-0.313	%/K

圖 2.4.6 四種太陽能板之規格

Model	$I_{rr}(W/m^2)$	$T_{pv}(^{\circ}C)$	P_{mp}	V_{oc}	V_{mp}	V_L	V_{av}	V_{max}	dV_{mp}	dV_{max}	P_{max}	P_{av}	L_{mp}	r_{mp}	C_i	r_{oc}
NSP245	800	45	170.5	33.6	26.9	23.5	26.5	29.2	0.4	2.3	157.3	170.2	0	0.01	0.34	0.66
CM13	800	45	90	19.6	15.7	11.8	13.2	14.4	2.5	-1.3	86.8	80.8	0.1	0.16	-0.33	1.33
ASEC130	800	45	90.1	19.3	15.5	11.8	13.2	14.4	2.3	-1.1	87.5	81.5	0.1	0.15	-0.29	1.29
PCM60	800	45	41.21	19.7	16.4	11.8	13.2	14.4	3.2	-2	37.74	34.78	0.16	0.2	-0.61	1.61

表 2.4.1 不同規格太陽能板的性能指標

比較上面表 2.4.1，NSP245 的太陽能板有相當優異的 L_{mp} ，其值為 0(趨近於 0)，代表蓄電池的 $V_{av}(26.5V)$ 相當接近 $V_{mp}(26.9V)$ ，而 $C_i(0.34)$ 落在建義的區間 0 到 0.5 內，此 nMPPO 匹配非常接近太陽能板的最大發電功率點，故在使用上幾乎能夠發揮太陽能板的發電能力。

而另外兩片 130W 與 60W 的太陽能板其 C_i 皆小於 0(負值)，表示蓄電池的

V_{\max} 小於 V_{mp} ，代表充電電壓範圍在 MPP 左側， V_{av} (蓄電池最常操作電壓)不可能達到 V_{mp} ，nMPPO 能量損失會增加。而由於兩者的 L_{mp} 皆為 0.1， V_{av} 電壓偏離率 r_{mp} 為 0.15~0.16，代表 nMPPO 相對於 MPP 的能量損失約為 16%左右，綜合以上性能指標可以了解到，此太陽能板相對蓄電池操作電壓而言太遠，在 nMPPO 匹配是較差的。



2.5 nMPPO 實驗驗證

為驗證上節 nMPPO 系統匹配分析結果，本研究特別設計一個戶外比對實驗台，其架構如圖 2.5.1。

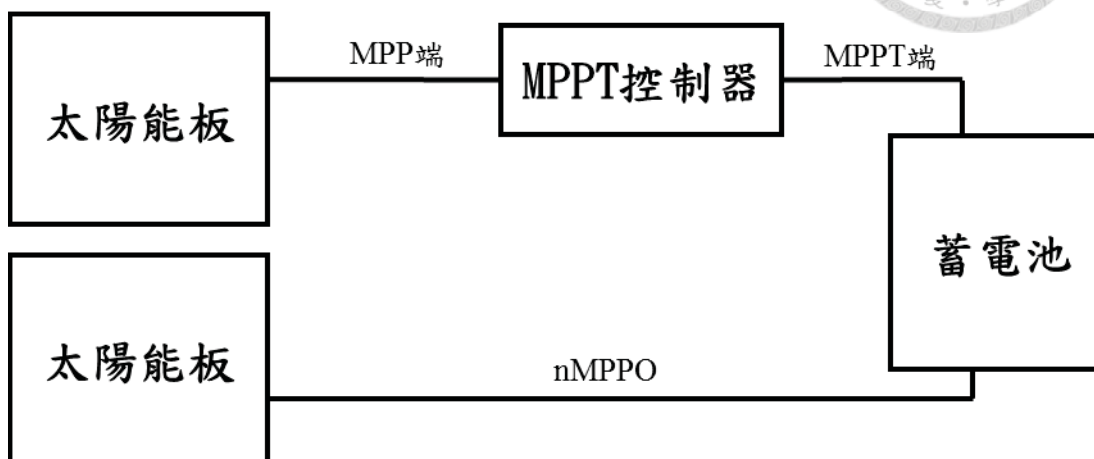


圖 2.5.1 nMPPO 驗證實驗之系統架構

選定兩片相同太陽能板，其中一片太陽能板加入 MPPT 控制器後再並聯於蓄電池，而另外一片太陽能板直接並聯於蓄電池，而兩片太陽能板共用同一顆蓄電池，以維持相同電壓，並且僅在 Phase1(全力充電階段)充電進行比對，當蓄電池電壓接近飽充電壓點時停止實驗與充電，並對蓄電池進行放電，待蓄電池電壓降到一定程度後再繼續實驗，蓄電池電壓與兩片太陽能板的電流以 0.1Hz 的速度紀錄儲存，以進行分析比較。nMPPO 的性能指標比對測試分析有兩種方法(1)瞬時性能，(2)日累積性能。量測瞬時的充電電流可以分析 nMPPO 與 MPP 兩者的性能比，

$$R_n(t) = \frac{P_{nMPPO}(t)}{P_{MPPT}(t)} = \frac{I_n(t)}{I_M(t)} \quad (2.5-1)$$

由於太陽輻射式變動的，影響充電電流的穩定度，因此瞬時性能比 $R_n(t)$ 可改以平均值來定義：

$$\bar{R}_n = \frac{\bar{I}_n}{\bar{I}_M} \quad (2.5-2)$$

\bar{I}_n 與 \bar{I}_M 可取為移動平均值。另外定義 nMPPO 效率為式 2.5-3 所示， \bar{P}_{MP} (太陽能發電峰值)可由測量 MPPT 控制器前端的太陽能板發電電流 I_{mp} 與電壓 V_{mp}

獲得。

$$\eta_{nMPPO} = \frac{\bar{P}_{nMPPO}}{\bar{P}_{MP}} \quad (2.5-3)$$

日累積性能則是直接量測全天性能並加以積分來求得發電比：

$$R_{no} = \frac{\int P_{nMPPO}(t)dt}{\int P_{MPPT}(t)dt} = \frac{E_{nMPPO}}{E_{MPPT}} \quad (2.5-4)$$

同樣可定義全天 nMPPO 效率為：

$$\eta_{no} = \frac{\int P_{nMPPO}(t)dt}{\int I_{mp} \times V_{mp} dt} \quad (2.5-5)$$

2.5.1 新日光 245Wp 太陽能板

第一組的實驗是選擇新日光的 NSP245 太陽能板來進行比對測試，其規格如表 2.5.1 所示。利用本研究所開發的 nMPPO 系統匹配軟體進行先計算，設定太陽輻射為 800W/m² 與操作溫度 45°C，以貼近實際情形，蓄電池電壓操範圍為 V_L=23.5V、V_{av}=26.4V 以及 V_{max}=29.2V，在這些條件下所計算出來的性能指標 Ci=0.34、r_{oc}=0.66、Lmp=0、r_{mp}=0.01，如 2.4.4 節所述，算是相當優異的 nMPPO 匹配。由於兩套系統共用同一顆蓄電池，故在發電量差異只需要比較兩片太陽能板輸出電流即可，其結果顯示兩套系統的電流相差無幾。

如圖 2.5.3 所示，nMPPO 系統在任何瞬間的發電量與 MPPT 相比幾乎到達 90%以上，在高發電量時的發電量(W)甚至到達 100%。圖 2.5.4 表示 nMPPO 系統與 MPPT 系統兩者發電的接近程度，圖中的點偏於 45° 線時，當靠右邊則表示 MPPT 系統比較好，靠左邊則表示 nMPPO 系統較好，若接近 45° 線則表示兩者差異不大，故由此圖亦可發現兩者的差異並不明顯，由此實測的結果與軟體計算出來的結果相符。

而在圖 2.5.5 為多天的比較測試結果，X 軸表示有裝設 MPPT 控制器的太陽能累積發電量，Y 軸為無裝設 MPPT 控制器之太陽能板與有裝設 MPPT 控制器之太陽能板累積發電量(Wh)的損失(%)，其結果顯示損失不超過 5%。而此電壓操作範圍是目前在針對 24V 太陽能系統中，常見的蓄電池的電壓操作範圍。



Maximum Rating Power (P_{max})	245	Wp
Module Efficiency	15	%
Open Circuit Voltage (V_{oc})	37.62	V
Maximum Power Voltage (V_{pm})	30.38	V
Short Circuit Current (I_{sc})	8.52	A
Maximum Power Current (I_{mp})	8.07	A
Temperature Coefficient of I_{sc}	0.046	%/K
Temperature Coefficient of V_{oc}	-0.313	%/K

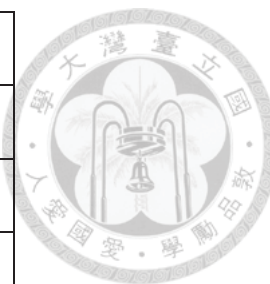


表 2.5.1 NSP245 太陽能板規格

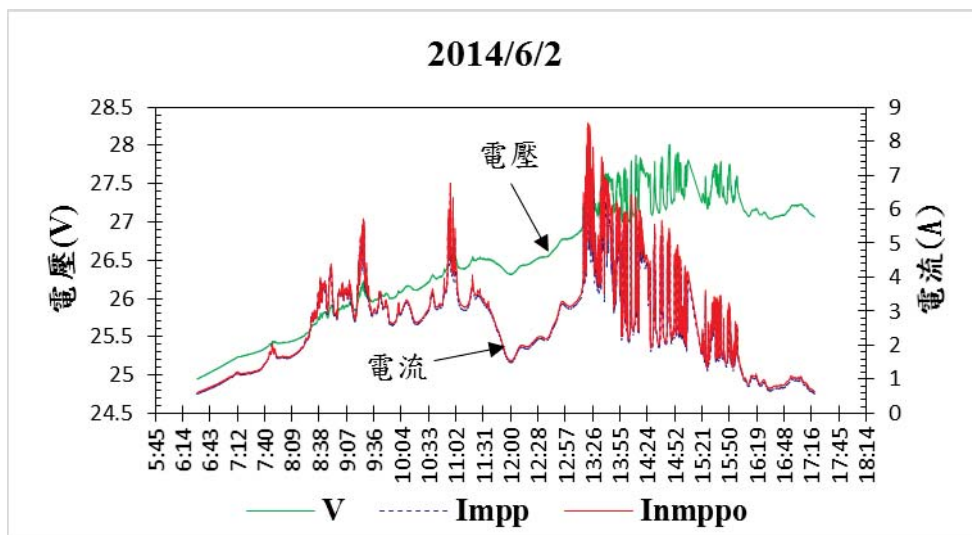


圖 2.5.2 NSP245W 比對測試-當日瞬時發電量

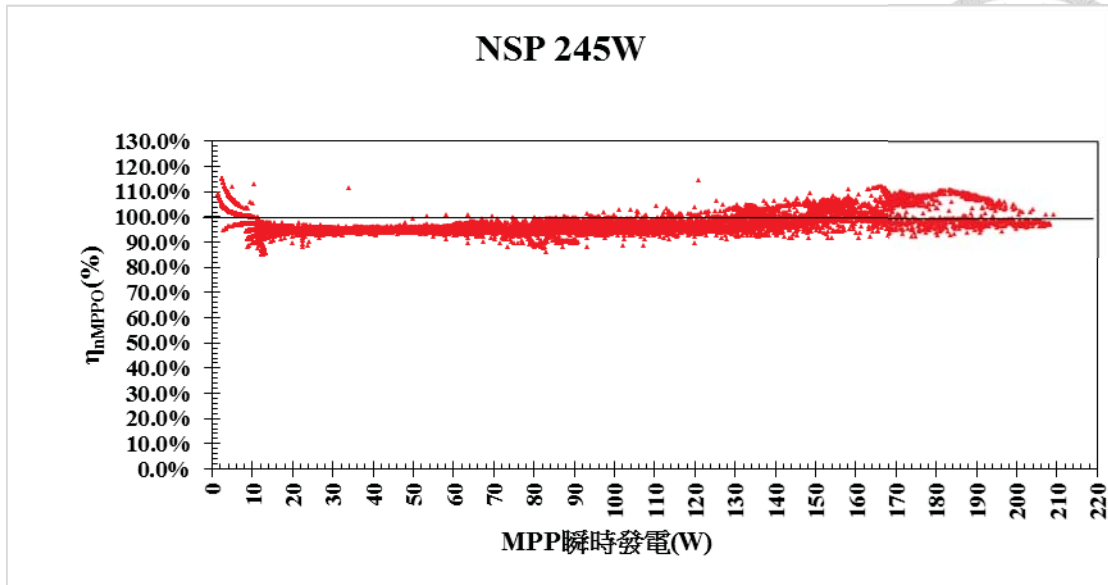


圖 2.5.3 NSP245 之 nMPPO 相對於 MPP 發電效率

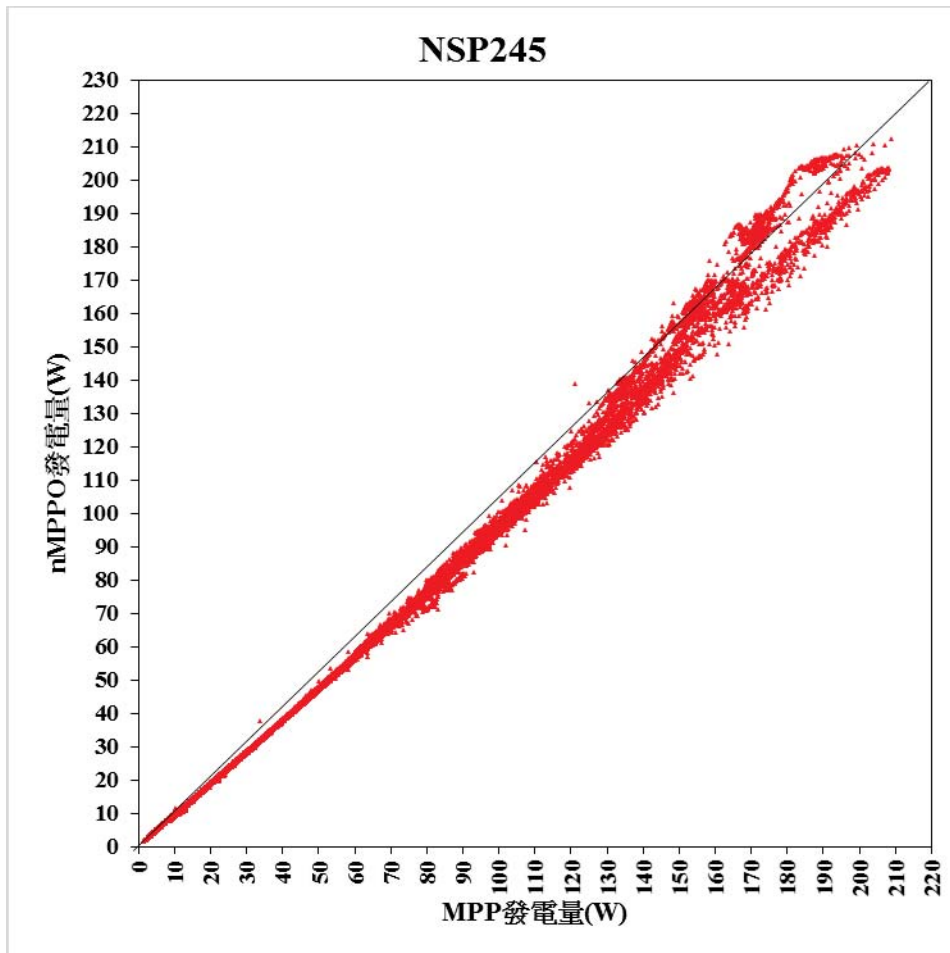


圖 2.5.4 NSP245 之 MPP 與 nMPPO 瞬時發電比較

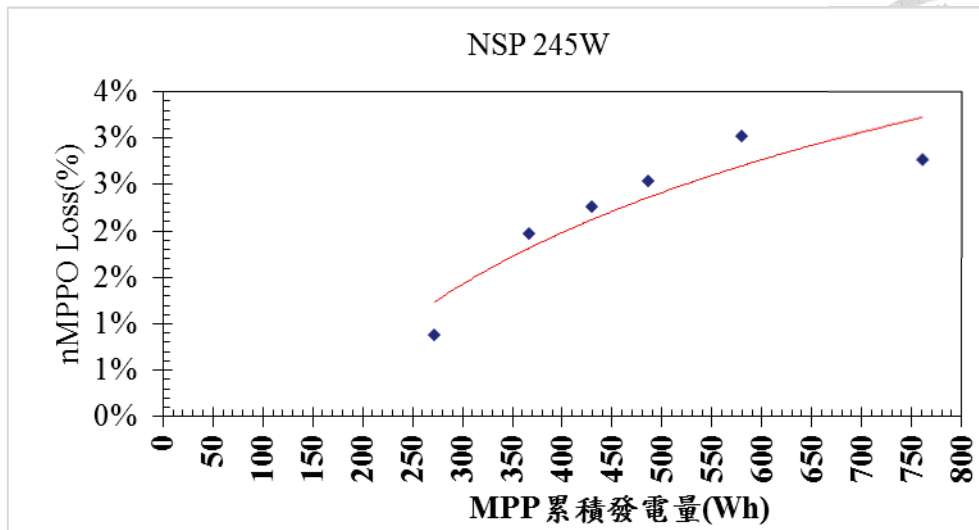


圖 2.5.5 NSP245W 連續四天的累積發電量

2.5.2 科風 130W 太陽能板

第二組的實驗是選擇科風的 PCM130 太陽能板來進行比對測試，其規格如表 2.5.2 所示。利用本研究所開發的 nMPPO 系統匹配軟體進行先計算，設定太陽輻射為 800W/m² 與操作溫度 45°C，以貼近實際情形，蓄電池電壓操範圍為 $V_L=11.8V$ 、 $V_{av}=13.2V$ 以及 $V_{max}=14.4V$ ，在這些條件下所計算出來的性能指標 $C_i=-0.33$ 、 $roc=1.33$ 、 $L_{mp}=0.1$ 、 $r_{mp}=0.16$ ，如 2.4.4 節所述，算是相當不良的 nMPPO 匹配。由於兩套系統共用同一顆蓄電池，故在發電量差異只需要比較兩片太陽能板輸出電流即可，其結果顯示兩套系統的電流相差無幾。

如圖 2.5.7 所示，nMPPO 系統在任何瞬間的發電量與 MPP 相比大約落在 85% 左右，只在高發電量時的發電量 (W) 才會接近 90%。如圖 2.5.8 所示，此系較偏右，即表示較 MPPT 的效率明顯較好，由此實測的結果與軟體計算出來的結果相當接近。

而在圖 2.5.8 為多天的比較測試結果，結果顯示此太陽能板在 nMPPO 系統上有較多的發電損失。

Maximum Rating Power (P_{max})	130	Wp
Module Efficiency	15	%

Open Circuit Voltage (V_{oc})	22	V
Maximum Power Voltage (V_{pm})	17.7	V
Short Circuit Current (I_{sc})	8.1	A
Maximum Power Current (I_{mp})	7.4	A
Temperature Coefficient of I_{sc}	0.046	%/K
Temperature Coefficient of V_{oc}	-0.313	%/K

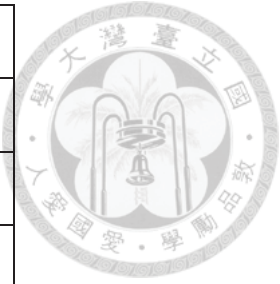


表 2.5.2 科風 130W 太陽能板規格表

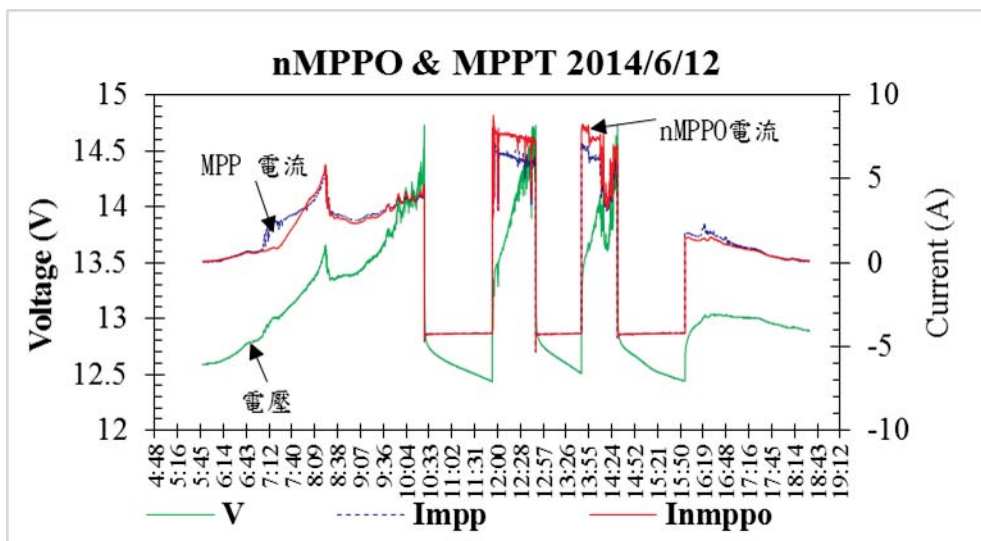


圖 2.5.6 PCM130W 比對測試-當日瞬時發電量

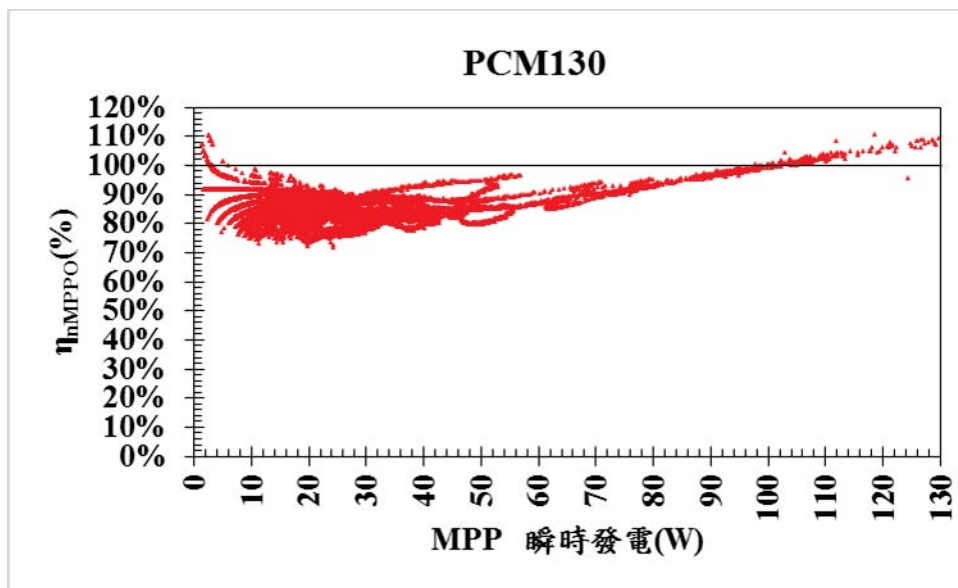


圖 2.5.7 PCM130 之 nMPPO 相對於 MPP 發電效率

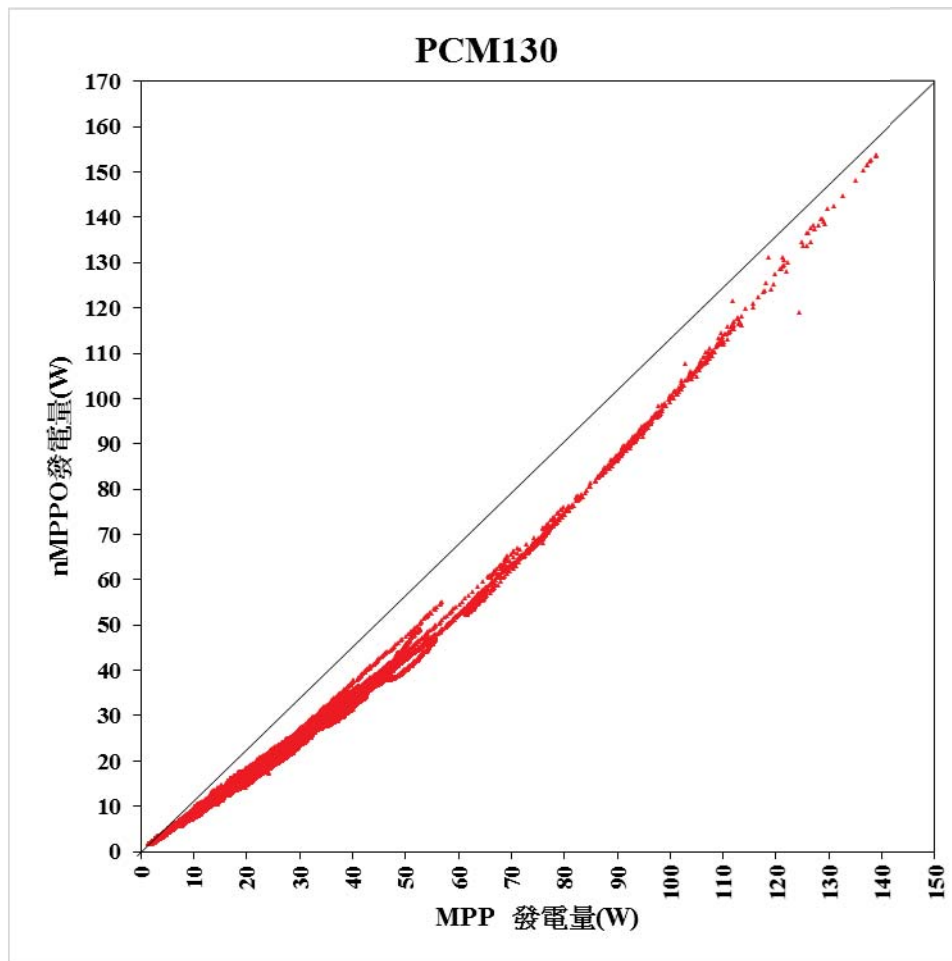


圖 2.5. 8 PCM130 之 MPP 與 nMPPO 瞬時發電比較

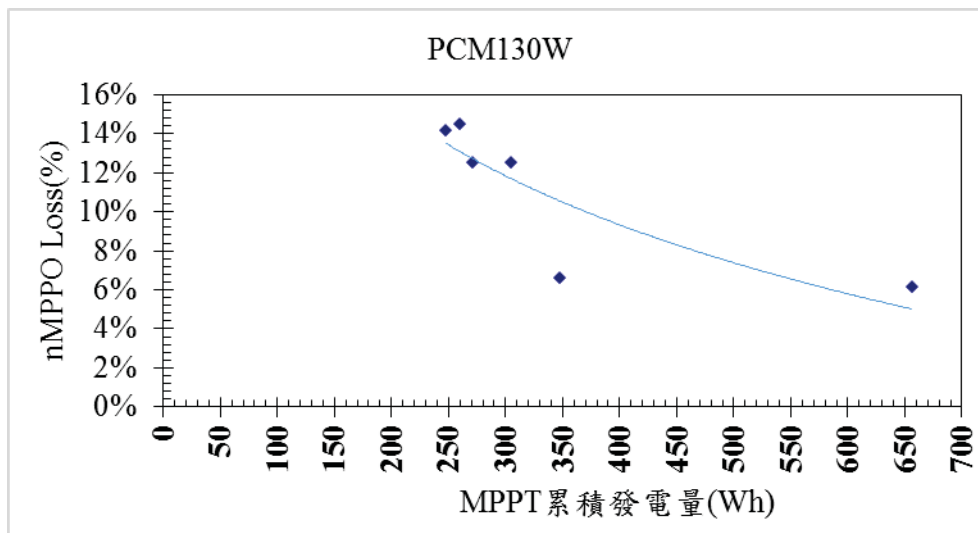


圖 2.5. 9 PCM130 之累積發電量損失

2.5.3 知光 ASEC130 太陽能板

第三組的實驗是選擇知光的 ASEC130 太陽能板來進行比對測試，其規格如

表 2.5.3 所示。利用本研究所開發的 nMPPO 系統匹配軟體進行先計算，設定太陽輻射為 $800\text{W}/\text{m}^2$ 與操作溫度 45°C ，以貼近實際情形，蓄電池電壓操範圍為 $V_L=11.8\text{V}$ 、 $V_{av}=13.2\text{V}$ 以及 $V_{max}=14.4\text{V}$ ，在這些條件下所計算出來的性能指標 $C_i=-0.29$ 、 $r_{oc}=1.29$ 、 $L_{mp}=0.1$ 、 $r_{mp}=0.15$ ，如 2.4.4 節所述，算是相當不良的 nMPPO 匹配。由於兩套系統共用同一顆蓄電池，故在發電量差異只需要比較兩片太陽能板輸出電流即可，其結果顯示兩套系統的電流相差無幾。

如圖 2.5.11、圖 2.5.12 與圖 2.5.13 所示，由於這片太陽能板的規格與軟體計算出來的性能指標與 PCM130 相差無幾，故其結果亦接近，此匹配的有較大的發電損失。

Maximum Rating Power (P_{max})	130	Wp
Module Efficiency	14.5	%
Open Circuit Voltage (V_{oc})	21.66	V
Maximum Power Voltage (V_{pm})	17.45	V
Short Circuit Current (I_{sc})	7.93	A
Maximum Power Current (I_{mp})	7.54	A
Temperature Coefficient of I_{sc}	0.046	%/K
Temperature Coefficient of V_{oc}	-0.313	%/K

表 2.5. 3 ASEC130 太陽能板規格

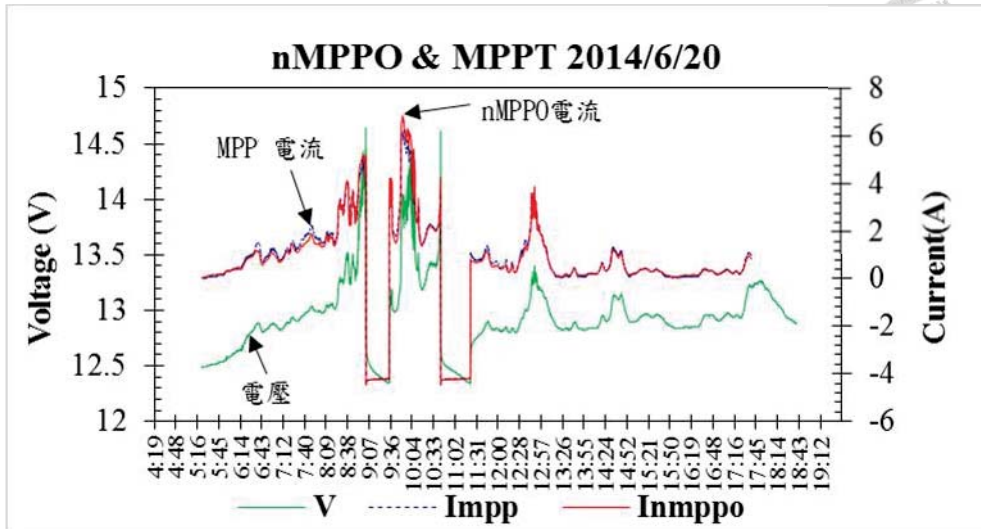


圖 2.5. 10 ASEC130W 比對測試-當日瞬時發電量

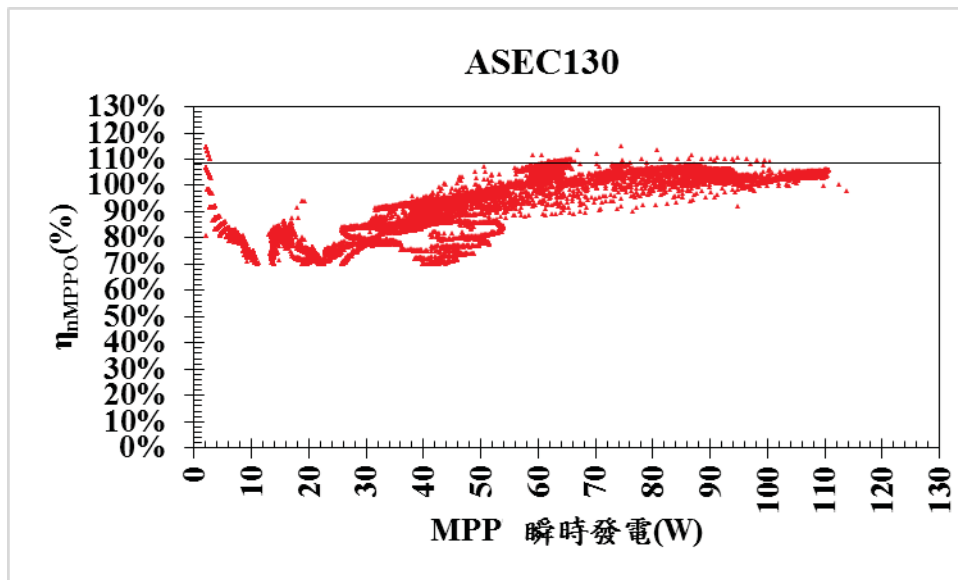


圖 2.5. 11 ASEC130 之 nMPPO 相對於 MPP 發電效率

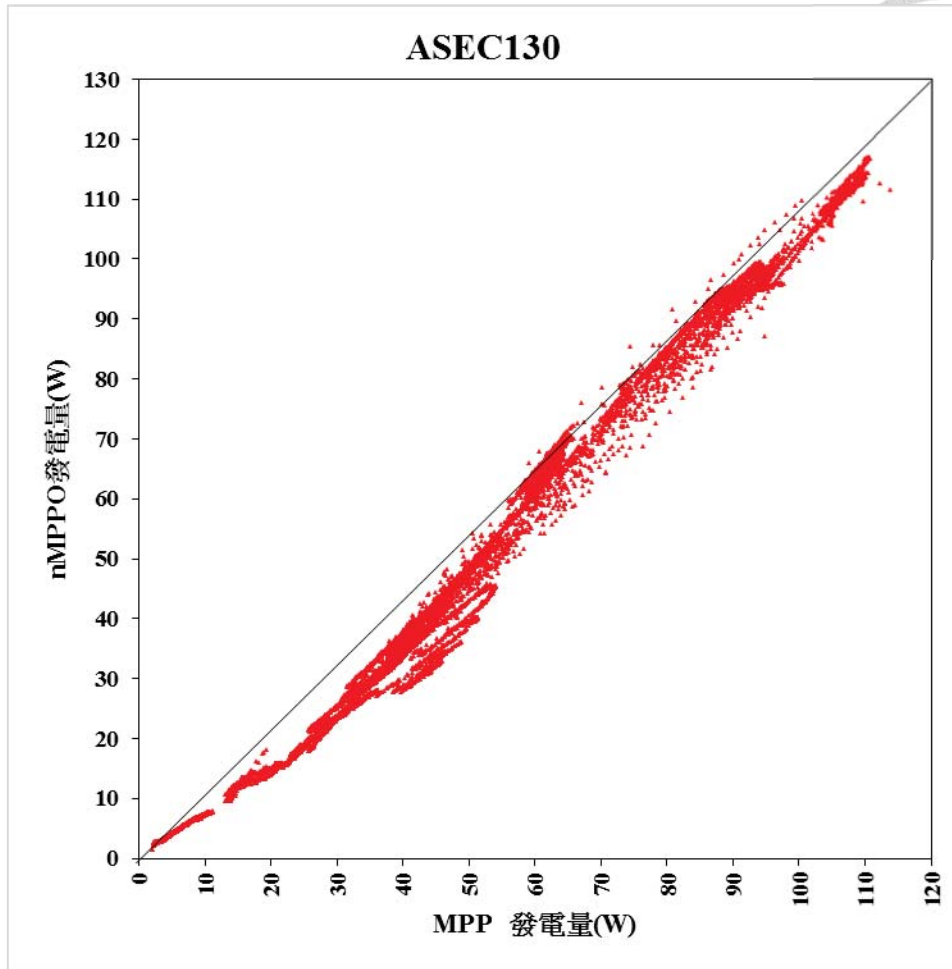


圖 2.5. 12 PCM130 之 MPP 與 nMPPO 瞬時發電比較

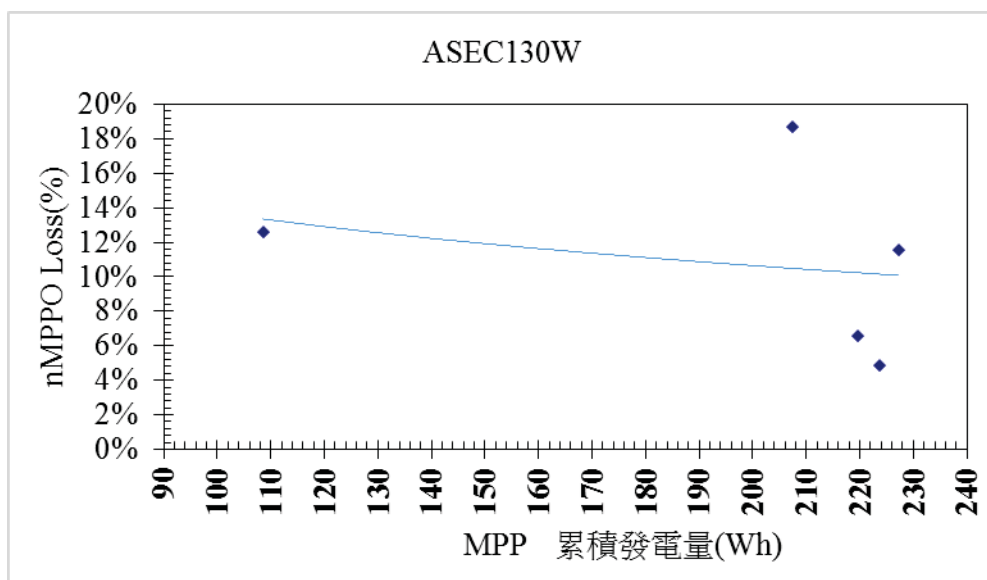


圖 2.5. 13 ASEC130 之累積發電量損失

2.5.4 科風 PCM60

第三組的實驗是選擇科風的 PCM60 太陽能板來進行比對測試，其規格如表 2.5.4 所示。利用本研究所開發的 nMPPO 系統匹配軟體進行先計算，設定太陽輻射為 $800\text{W}/\text{m}^2$ 與操作溫度 45°C ，以貼近實際情形，蓄電池電壓操範圍為 $V_L=11.8\text{V}$ 、 $V_{av}=13.2\text{V}$ 以及 $V_{max}=14.4\text{V}$ ，在這些條件下所計算出來的性能指標 $C_i=-0.61$ 、 $r_{oc}=1.61$ 、 $L_{mp}=0.16$ 、 $r_{mp}=0.2$ ，如 2.4.4 節所述，算是相當不良的 nMPPO 匹配。由於兩套系統共用同一顆蓄電池，故在發電量差異只需要比較兩片太陽能板輸出電流即可，其結果顯示兩套系統的電流相差無幾。

如圖 2.5.15、圖 2.5.16 與圖 2.5.17 所示，由於這片太陽能板的規格與軟體計算出來的性能指標與 PCM130 與 ASEC130 更差，故其結果亦接近，此匹配的有更大的發電損失。

Maximum Rating Power (P_{max})	60	Wp
Module Efficiency	15	%
Open Circuit Voltage (V_{oc})	22	V
Maximum Power Voltage (V_{pm})	18.43	V
Short Circuit Current (I_{sc})	3.518	A
Maximum Power Current (I_{mp})	3.316	A
Temperature Coefficient of I_{sc}	0.046	%/K
Temperature Coefficient of V_{oc}	-0.313	%/K

表 2.5. 4 PCM60 太陽能板規格

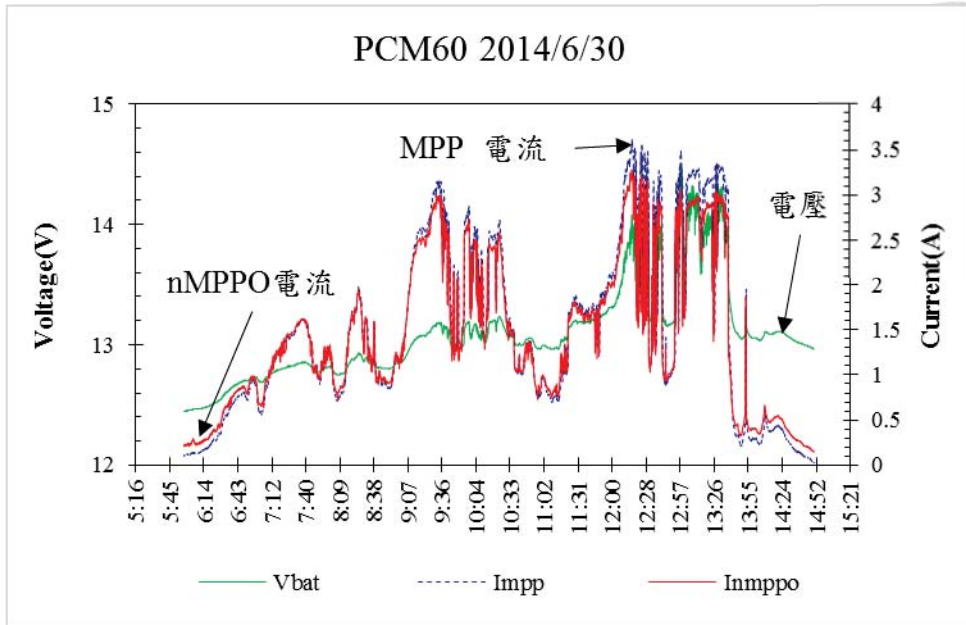


圖 2.5. 14 PCM60W 比對測試-當日瞬時發電量

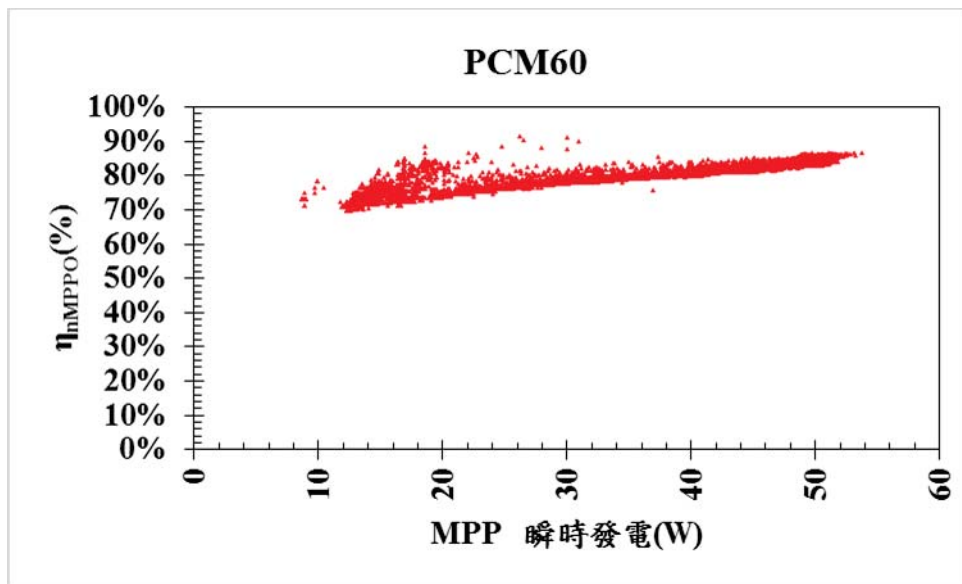


圖 2.5. 15 PCM60 之 nMPPO 相對於 MPP 發電效率

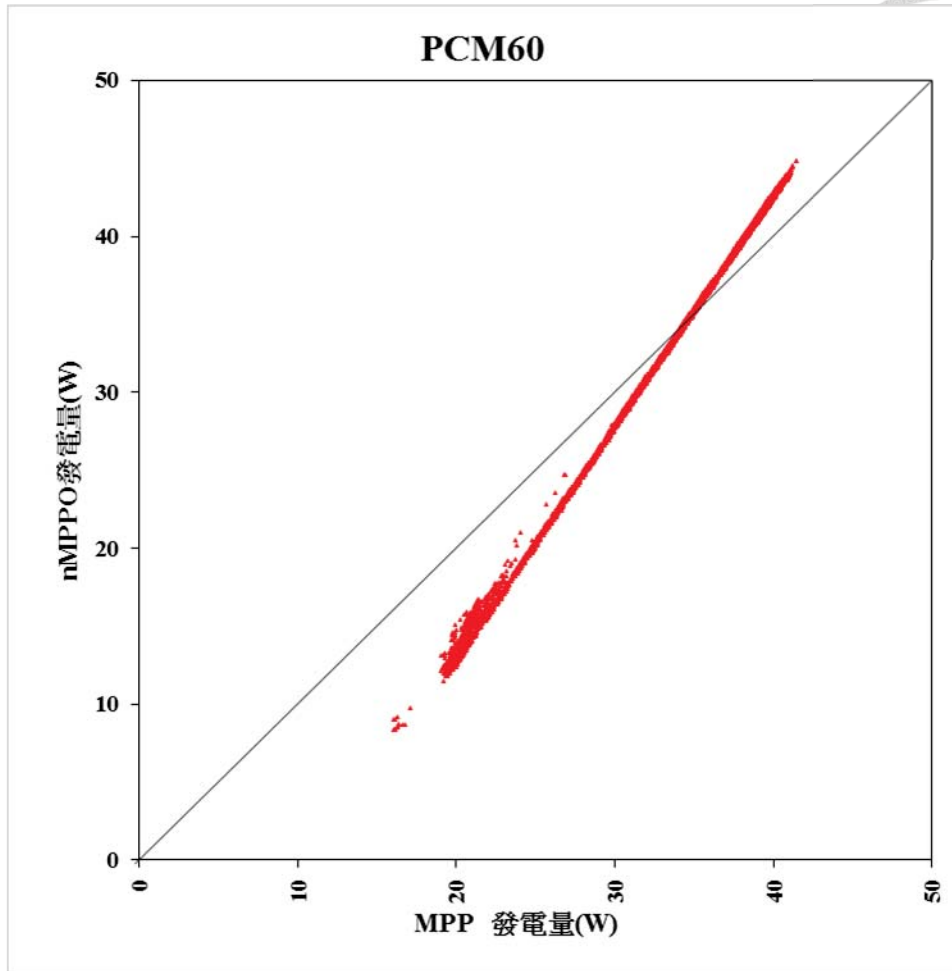


圖 2.5.16 PCM60 之 MPPT 與 nMPPO 瞬時發電比較

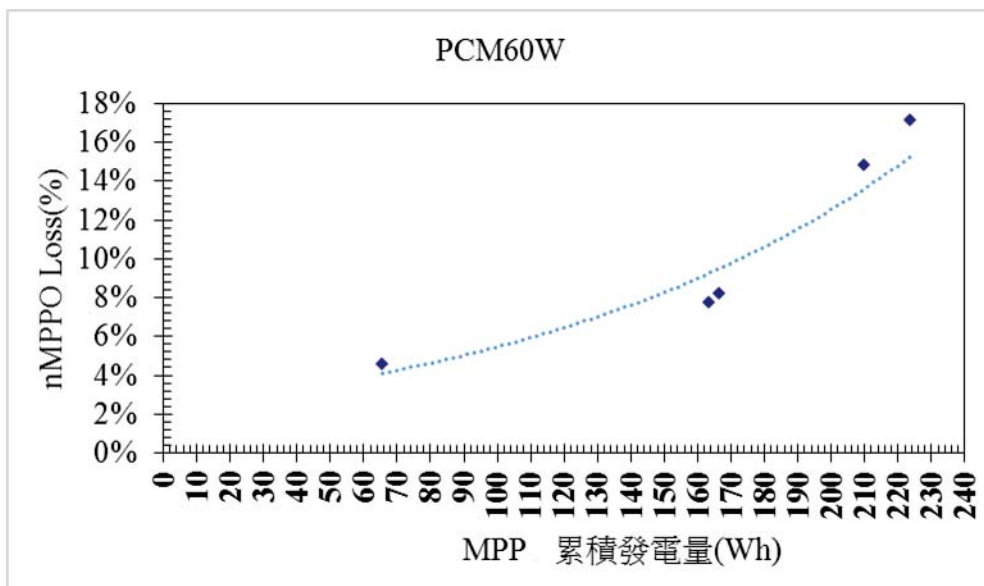


圖 2.5.17 PCM60 之累積發電量損失

第三章 鋰電池動態系統識別



3.1 太陽能板模組數學模型

本章節所用到的太陽能模組之數學模型如 2.3 節所述，然而在進行模型時，若直接帶入公式去計算將會耗費太多時間，故本節的太陽能模組模型在使用時將其表格化，即預先將任何輻射量(以 $5\text{W}/\text{m}^2$ 間隔為一組)之電壓-電流特性曲線求出並建立表格，待進行系統模擬時再將以查表的方式獲得該輻射量下的特性曲線，如此一來可將模擬的時間大幅縮短。

3.2 鋰電池動態模型與系統識別

鋰電池有較大的能量密度和功率密度，被廣泛應用於電子產品中。應用於太陽能系統時，必須先建立鋰電池的動態模型，用以掌握鋰電池的特性變化。

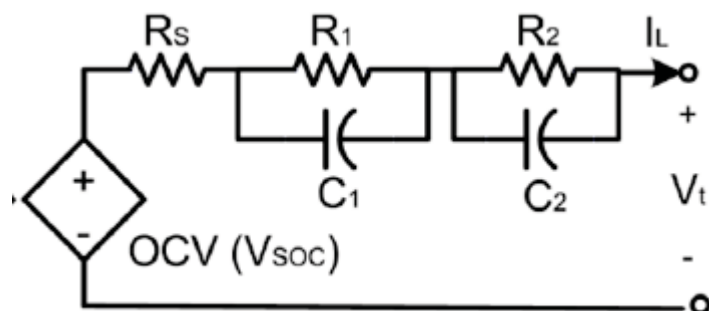


圖 3.2.1 鋰電池之等效電路模型

鋰電池的等效電路結構是由一個串聯電阻 R_s 、串聯 RC 並聯電路與鋰電池開路電壓 OCV 所組成[11]，整體來看為一個二階系統，圖 3.2.1 為鋰電池的等效電路模型。

鋰電池內部中的參數 OCV、 R_s 、 R_1 、 C_1 、 R_2 、 C_2 在充電過程中並非保持不變，在不同的 SOC(State of Charge)下這些參數皆不相同。首先必須先測量電池電壓與 SOC 的關係：

- (i) 將鋰電池 SOC 放電至 0%
- (ii) 定電流充電，每當鋰電池 SOC 充電至 10%後停止充電並靜置 30 分鐘並記錄兩端開路電壓。
- (iii) 重複步驟(ii)直到鋰電池 SOC 充電至 100%為止。

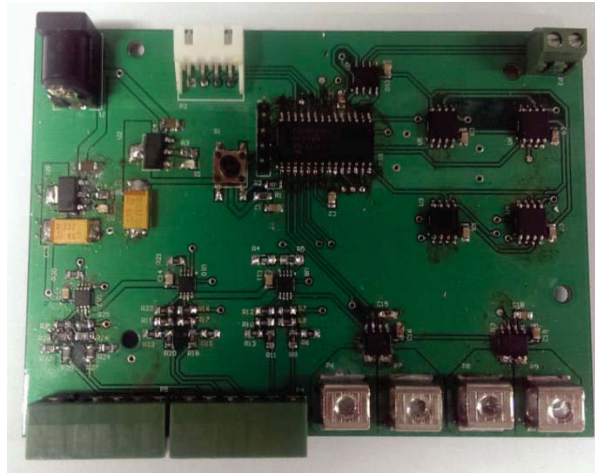


圖 3.2. 2 PCT 實驗紀錄器

由於鋰電池的端電壓變化量較小，且變化快速，所使用的記錄器解析度需要較高，本研究開發了一套高解析度與高採樣時間之單 Channel 記錄器，如圖 3.2.2，此紀錄器的解析度為 12bit，測量電壓範圍為 0 到 5V，也就是說記錄器將 0 到 5V 的電壓分割為 4096 等份，最小可測量到的電壓變化為 0.002V，鋰電池的電壓變化為 2.8V~3.65V，故只要記錄器的解析度可以判斷到小數點以下第二位則足夠用來觀察鋰電池的電壓變化。



圖 3.2. 3 PSI15Ah 鋰電池

在本研究中，選擇昇陽 PSI 鋰電池 15Ah 的電芯如圖 3.2.3，在放電之前先將此電池充電至 SOC100%後再以定電流 3 安培放電 5 小時，即以 0.2C 放電，最終將鋰電池的 SOC 將降至 0%，然後進行 PCT(Pulse charge test)實驗。

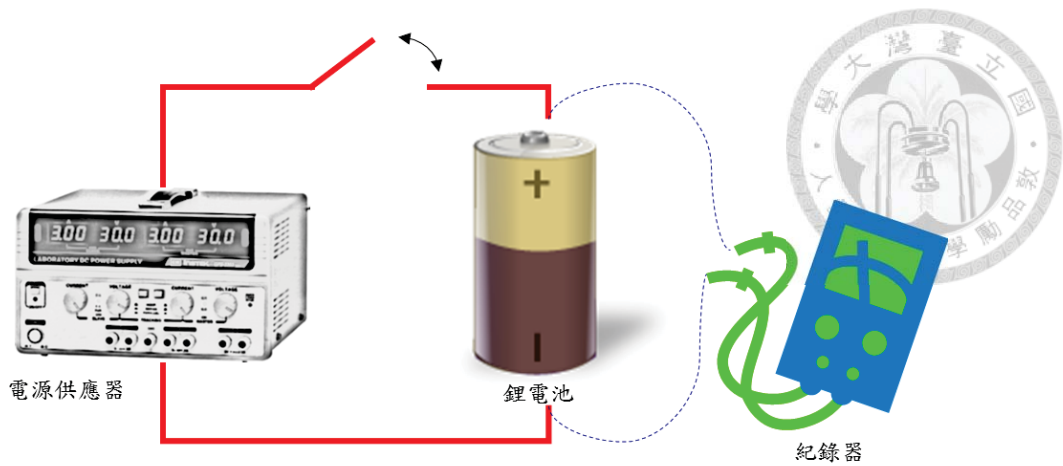


圖 3.2. 4 PCT 系統配線圖

圖 3.2.4 為實驗配線圖，PCT 實驗中將充電之電流以 $0.2C$ 充電 30 分鐘後停止並靜置 30 分鐘，而記錄器之採樣時間間隔為 0.2 秒來記錄電壓變化，重複循環 10 次，實驗之總時間為 10 小時，圖 3.2.5 為鋰電池進行 PCT 的實驗結果。

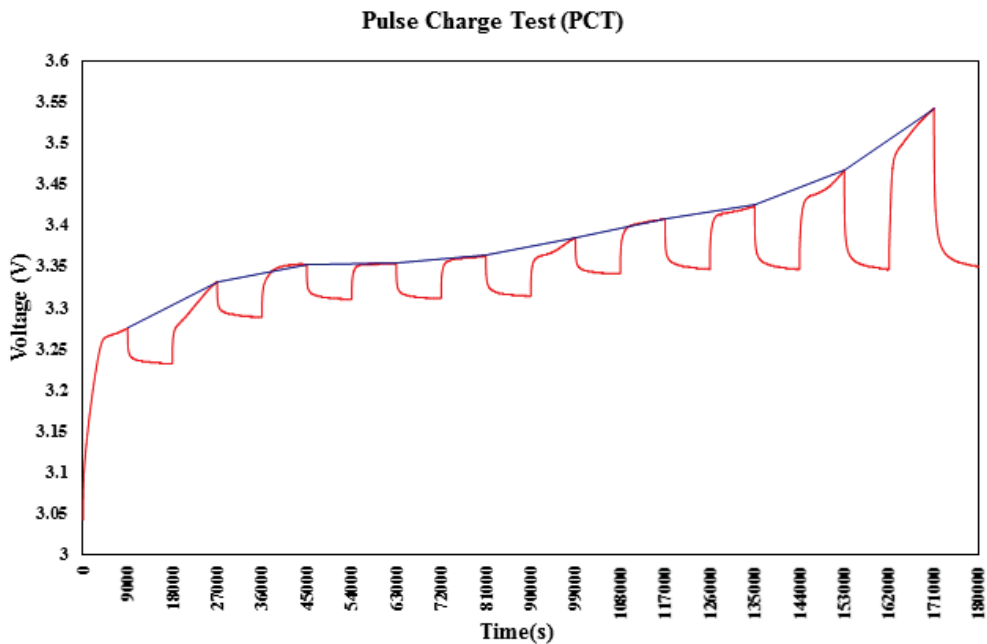


圖 3.2. 5 PCT 實驗結果之電壓變化

圖 3.2.5 中每小時皆有兩個相反的電壓變化方向，若方向為上升表示正在充電，反之若方線下降表示正在靜置中。實驗結果可以發現充電時電壓變化的曲線並非遵循一個固定規律，反而在靜置時的曲線皆呈現典型的 RC 電路模型與較為不明顯的電壓斜率。

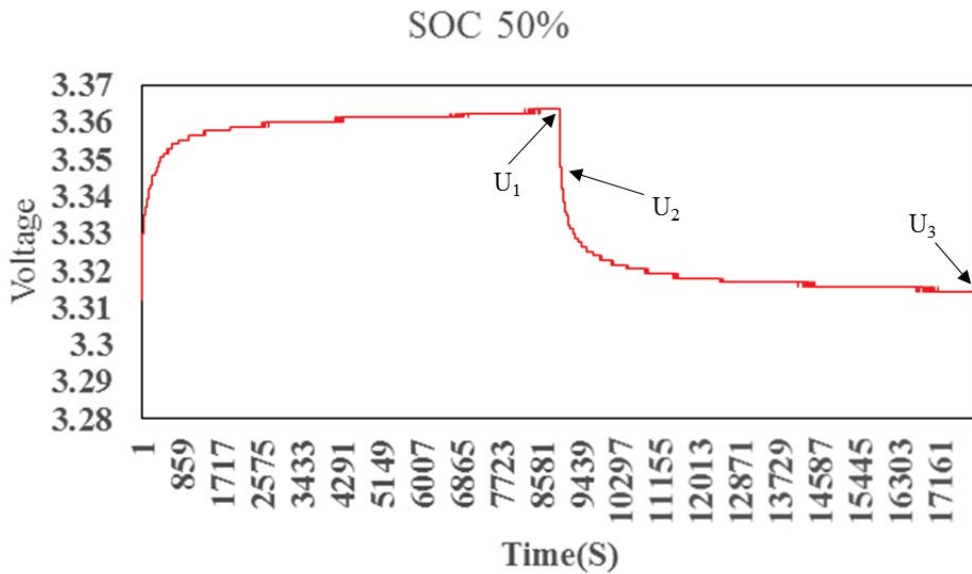


圖 3.2. 6 PCT 實驗之 SOC 50%電壓變化

不同SOC下的0.2C充電與靜置之電壓變化

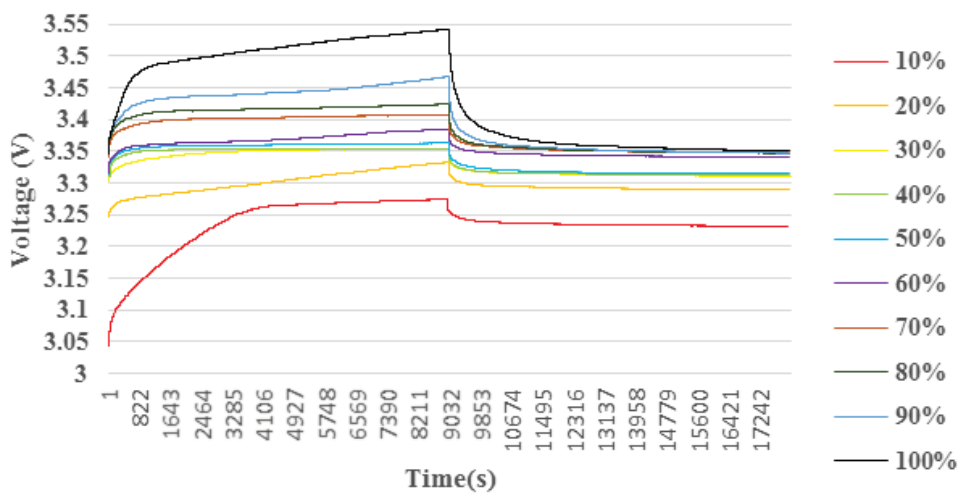


圖 3.2. 7 不同 SOC 下的鋰電池電壓變特性曲線

在圖 3.2.6 中， U_1 到 U_2 的變化斜率是由鋰電池等效電路中的 R_s 造成的結果， R_s 的值可由式 3.2-2 求出，其中 I 為實驗的電流，本實驗的電流 $I=3A$ ； U_2 到 U_3 的電壓曲線即為典型的 RC 並聯電路，有了這條曲線即可利用 MATLAB 中的 Curve fitting toolbox 將鋰電池等效電路中的 R_1 、 C_1 、 R_2 、 C_2 參數以線性擬合的方式找出，如式 3.2.4，其中 I 亦為實驗的電流； U_3 即為鋰電池之開路電壓 OCV。有了這些數據資料。圖 3.2.7 為在不同 SOC 下的鋰電池特性曲線，圖

3.2.8 到圖 3.2.10 為不同 SOC 下鋰電池等效電路之內部參數值。



$$V_s = U_1 - U_2 \quad (3.2-1)$$

$$R_s = \frac{V_s}{I} \quad (3.2-2)$$

$$V_{RC} = V_1 + V_2 \quad (3.2-3)$$

$$V_n = I \times R_n e^{-\frac{1}{R_n C_n} t}, n = 1, 2 \quad (3.2.4)$$

SOC	Rs	R1	C1	R2	C2	OCV
10%	0.0044	0.003127	160103.7	0.004931	9392.051	3.2327
20%	0.0044	0.003598	137232.9	0.004633	8649.264	3.2891
30%	0.0044	0.003518	135304.7	0.004352	9101.258	3.3107
40%	0.0044	0.003512	116207.8	0.004747	7973.471	3.3119
50%	0.0044	0.003787	141114.1	0.006384	7241.408	3.3143
60%	0.0044	0.003602	104012.9	0.00512	5980.713	3.3419
70%	0.0056	0.004775	123216	0.007612	5408.519	3.3467
80%	0.0076	0.006	87301.15	0.009924	4225.097	3.3467
90%	0.0096	0.00873	56218.64	0.016922	2516.614	3.3467
100%	0.0116	0.016215	26473.32	0.030342	1683.356	3.3503

表 3.2.1 不同 SOC 下鋰電池內部參數值

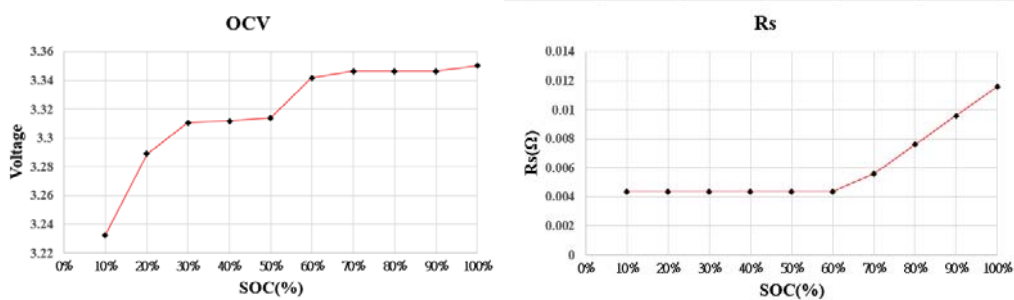


圖 3.2.8 不同 SOC 的 OCV 與 R_s

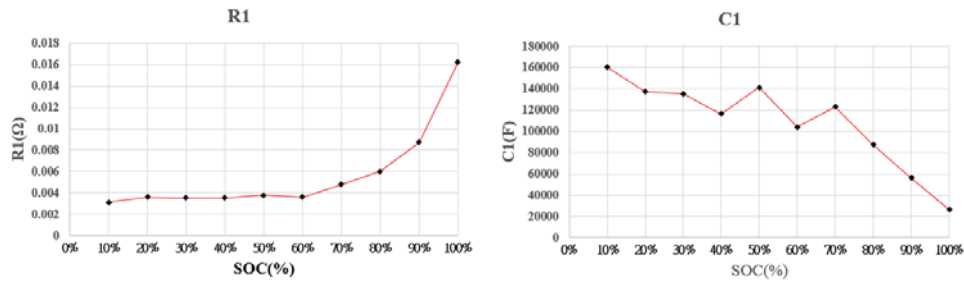


圖 3.2.9 不同 SOC 下的 R_1 、 C_1

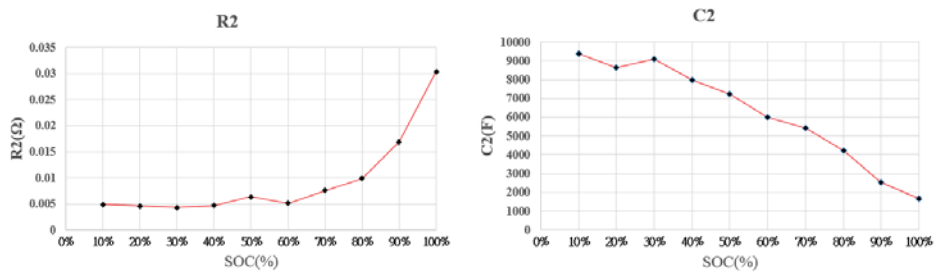


圖 3.2.10 不同 SOC 下的 R_2 、 C_2

第四章 鋰電池並聯電容之太陽能充電增強分析



4.1 鋰電池並聯電容之太陽能充電系統模型

由第三章中利用 PCT 實驗方法找出鋰電池等效電路內部參數後，即可以利用這些參數來建立鋰電池的電腦模擬之鋰電池模型與太陽能板模型，本模擬是利用套裝軟體 MATLAB 中的 Simulink 來進行，其中在建立鋰電池並聯電容之充電系統模型前，必須先建立鋰電池之 Simulink 的模型，首先必須先建立在等效電路中不同電路位置的模型，建立說明如下：

4.1.1 鋰電池的 simulink 模型

(1) SOC 計算模型

$$\text{SOC} = \text{SOC}_0 + \int \frac{I}{3600} dt \quad (4.1-1)$$

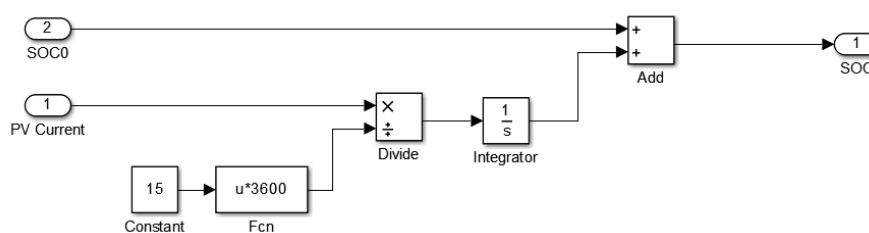


圖 4.1.1 SOC 之 Simulink Block diagram

鋰電池之 SOC 計算公式如式 4.1.1 所示，初始的 SOC_0 再加上電流隨時間的積分，由於本實驗所使用的鋰電池為 15Ah 故在積分時將以 15Ah 帶入 SOC 模型來計算。

(2) OCV 模型

由 PCT 實驗結果可以觀察到，鋰電池 OCV 的變化與 SOC 的關係並非銅鉛酸電池般有著良好的線性關係，故在進行模擬時只能使用線性擬合的方式找出合適的曲線，如式 4.1-2。

$$\text{OCV} = 3.074 + 1.361 \times \text{SOC} - 2.234 \times \text{SOC}^2 + 1.162 \times \text{SOC}^3 \quad (4.1-2)$$

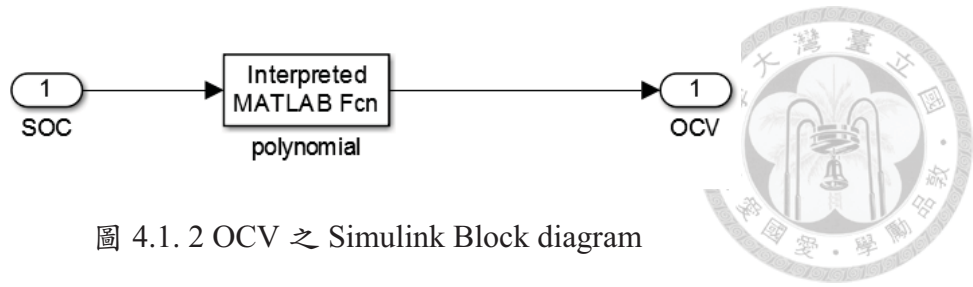


圖 4.1. 2 OCV 之 Simulink Block diagram

(3) RC 並聯電路模型

此模型會使用到透過 PCT 實驗方法得到的 R_1 、 C_1 、 R_2 與 C_2 值，但再不同的 SOC 下這些參數值皆無良好的線性關係，故在進行模擬時只能使用線性擬合的方式找出合適的曲線如式 4.1-3~4.1-6。式 4.1-9 為 RC 並聯電路之拉氏轉換，再利用這關係是建立如圖 4.1.4 之 Block diagram。

$$R_1 = 0.003 - 0.006 \times SOC + 0.053 \times SOC^2 - 0.122 \times SOC^3 + 0.088 \times SOC^4 \quad (4.1-3)$$

$$C_1 = 9.691 - 2.308 \times SOC - 9.690 \times SOC^2 - 2.309 \times SOC^3 \quad (4.1-4)$$

$$R_2 = 0.005 - 0.001 \times SOC - 0.048 \times SOC^2 + 0.225 \times SOC^3 - 0.370 \times SOC^4 + 0.217 \times SOC^5 \quad (4.1-5)$$

$$C_2 = -4.508 + 0.703 \times SOC + 4.509 \times SOC^2 + 0.702 \times SOC^3 \quad (4.1-6)$$

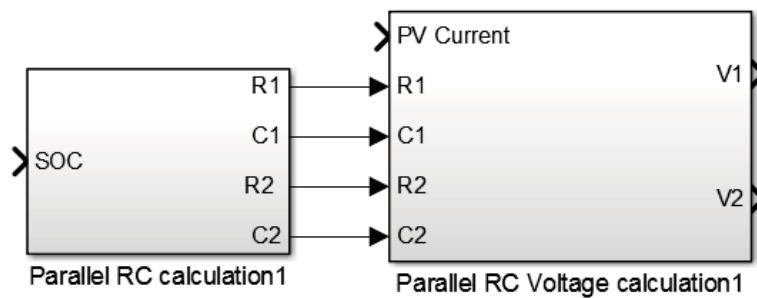


圖 4.1. 3 RC 等效電路模型之 Simulink Block diagram (1)

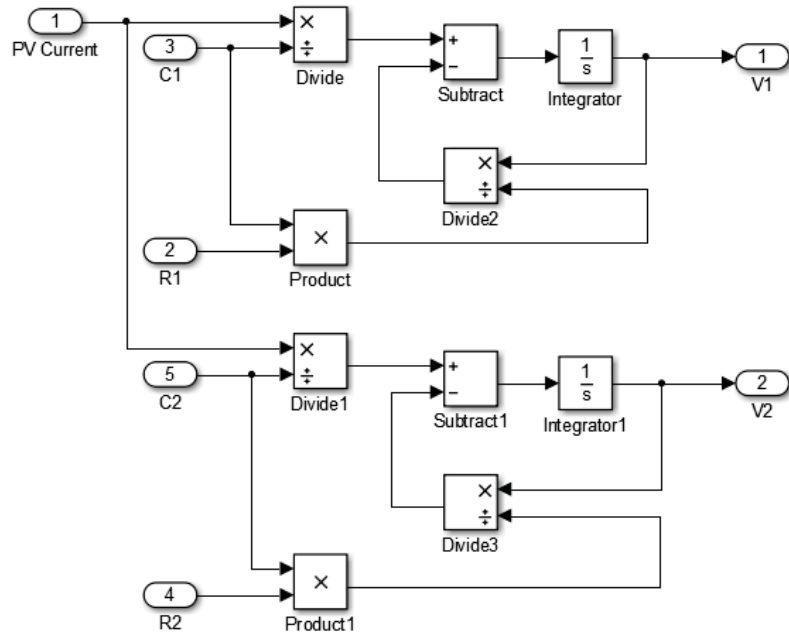


圖 4.1. 4 RC 等效電路模型之 Simulink Block diagram (2)

$$I = \frac{V_n}{R_n} + sC_n V_n \quad (4.1.7)$$

$$\frac{I}{sC_n} = \frac{V_n}{sR_n C_n} + V_n \quad (4.1.8)$$

$$\therefore V_n = \left(\frac{1}{s}\right) \left[\frac{I}{C_n} - \frac{V_n}{R_n C_n} \right], n = 1, 2 \quad (4.1-9)$$

(4) V_s 模型

由 PCT 實驗結果可以觀察到，鋰電池 R_s 的變化與 SOC 的關係並非有著良好的線性關係，故在進行模擬時只能使用線性擬合的方式找出合適的曲線，如式(4.1-10)。而 V_s 值則為 R_s 與經過電流之乘積，圖 4.1.5 與式 4.1-11 所示。

$$R_s = 0.005 - 0.001 \times \text{SOC} - 0.006 \times \text{SOC}^2 + 0.015 \times \text{SOC}^3 \quad (4.1-10)$$

$$V_s = I \times R_s \quad (4.1-11)$$

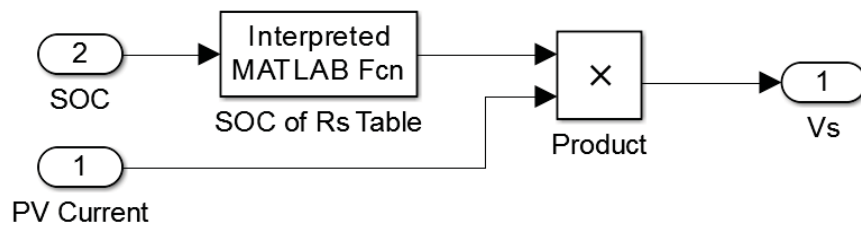


圖 4.1. 5 不同 SOC 下的 V_s 之 Simulink Block diagram

(5) 單顆鋰電池模型

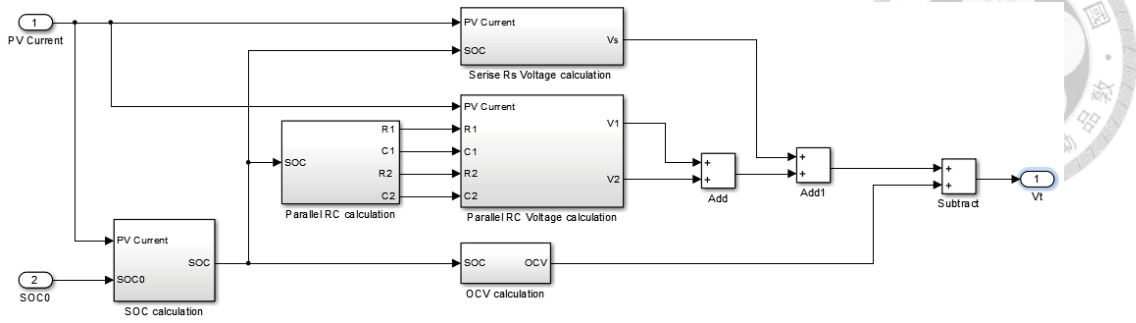


圖 4.1.6 鋰電池完整 simulink block diagram

$$V_t = OCV + V_s + V_1 + V_2 \quad \text{Equation 4.1. 1}$$

V_t : 鋰電池端電壓

V_1 : 鋰電池等效電路中的 R_1C_1 等效並聯電路

V_2 : 鋰電池等效電路中的 R_2C_2 等效並聯電路

建立完成上述四個 simulink block diagram，再將其整合後即為完整的鋰電池模型，如圖 4.1.6，其中鋰電池的端電壓 V_t 即為這四個 block diagram 通過電流後所產生之電壓的總合，如公式 4.1.4。

(6) 鋰電池模組模型

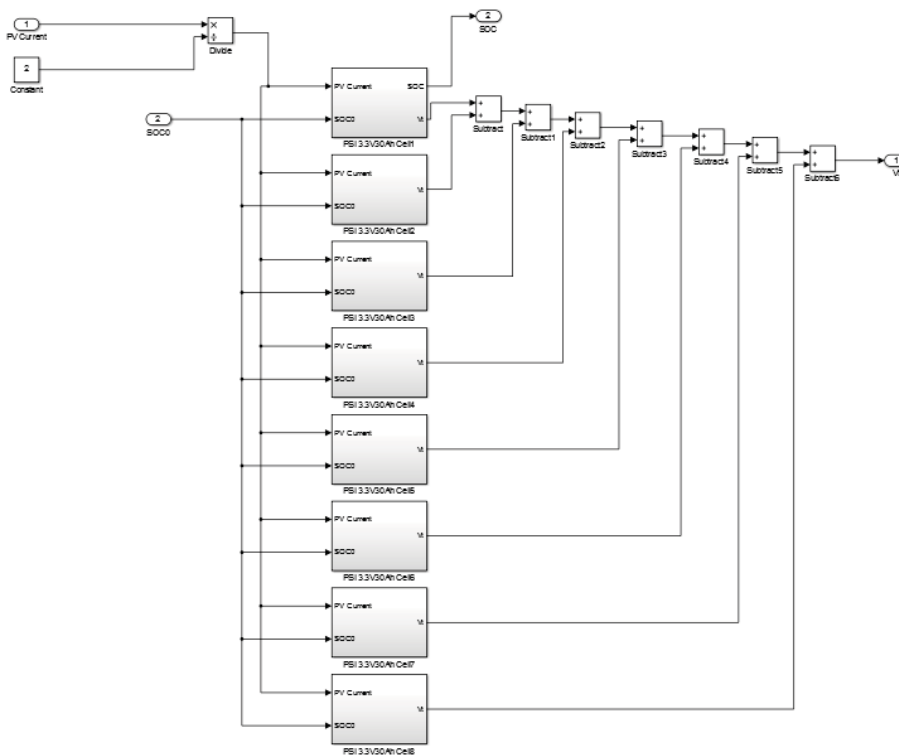


圖 4.1.7 鋰電池模組之 Simulink Block diagram

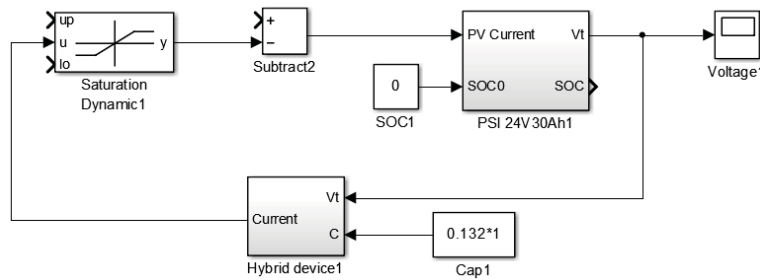


圖 4.1.8 充電增強系統 Simulink Block diagram

完成單顆鋰電池模型後，再將其以 2 並聯 8 串聯的方式組合成一個鋰電池模組，其規格為 24V30Ah，如圖 4.1.7。最後將此模組並聯電容，即完成充電增強系統的模型，如圖 4.1.8。

4.1.2 太陽能板模型

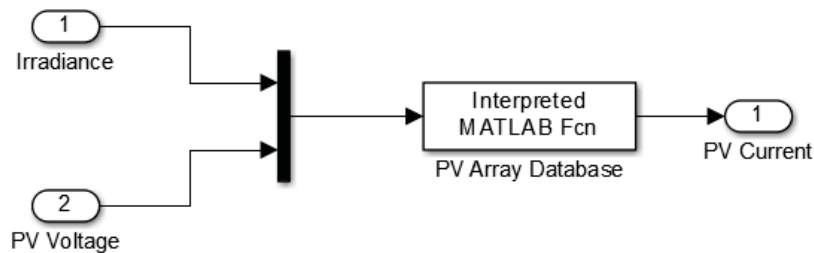


圖 4.1.9 太陽能板 Simulink Block Diagram

利用第三章中的太陽能板之數學模型來建立 Simulink Block Diagram，此太陽能板模擬模型設計為需要輸入當日的太陽輻射量(W/m^2)與太陽能板兩端之電壓，如圖 4.1.9 所示。由於此系統為 nMPPO 匹配下的系統，太陽能版兩端之電壓即為鋰電池之電壓，所以在使用此模型時只需要提供太陽逐時的輻射量即可以輸出電流。

4.1.3 鋰電池並聯電容之太陽能充電系統

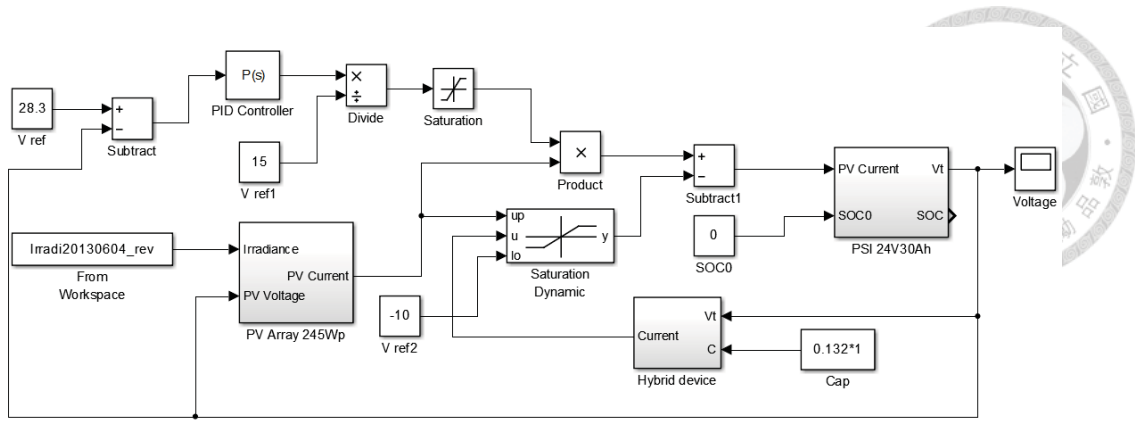


圖 4.1.10 太陽能增強系統之 Simulink Block Diagram

將上述全部的 Simulink Block Diagram 整合後即為太陽能充電增強系統，如圖 4.1.10 所示，在這個系統中加入了 PID 迴授控制，使鋰電池可分為三階段模式充電。

4.2 鋰電池並聯電容之太陽能充電系統模擬

在進行整個太陽能系統模擬前先將鋰電池模組的模擬結果與實驗進行比較，確認此系統的模型的正確。以下針對單顆鋰電池芯與 24V30Ah 鋰電池模組的模擬結果與實驗進行驗證。

由 PSI 廠商所提供的技術資料指出，鋰電池芯的最低操作電壓為 2.8V，而最高操作電壓為 3.65V，故實驗時以 0.2C 的電流將鋰電池於 SOC 從 0% 充電至 100%，並記錄其電壓變化，如圖 4.2.1 所示，虛線部分是實際鋰電池充電之曲線，實線為模擬結果，模型相當接近實測，唯在最低飽充區段有誤差。

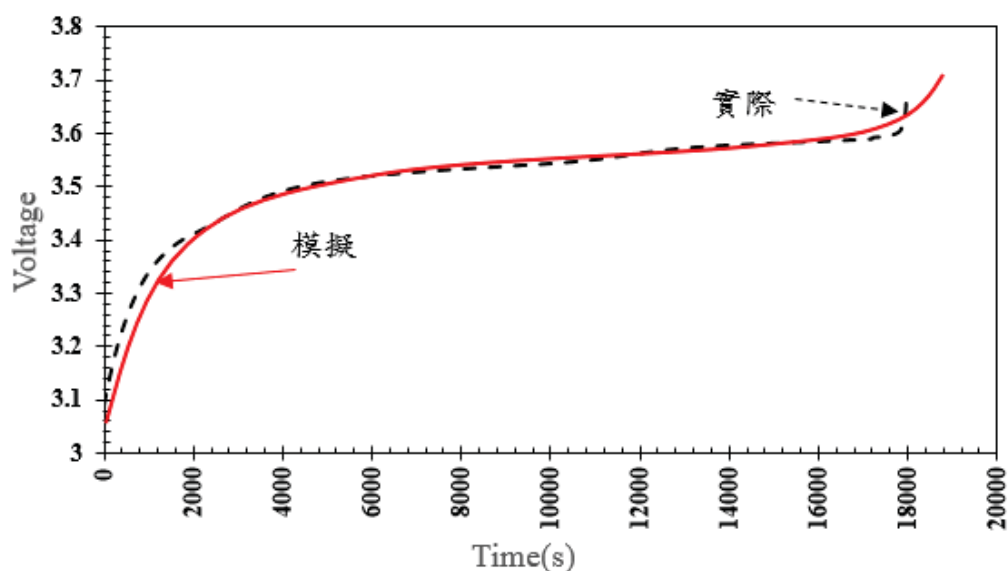


圖 4.2.1 鋰電池芯模擬曲線與實際測試比較圖

將鋰電池芯以 2 並聯 8 串聯成規格為 24V30Ah 的鋰電池模組，以 0.2C 的電流對鋰電池模組進行充電，該模組為 PSI 廠商所提供，內部含有一被動式 BMS 硬體電路，如圖 4.2.2 所示，由於鋰電池模組中多了 BMS 硬體電路，結果與實際差異稍大，較無法完全掌握，圖 4.2.3 為實驗與模擬之比較。



圖 4.2.2 PSI 24V30Ah 鋰電池模組

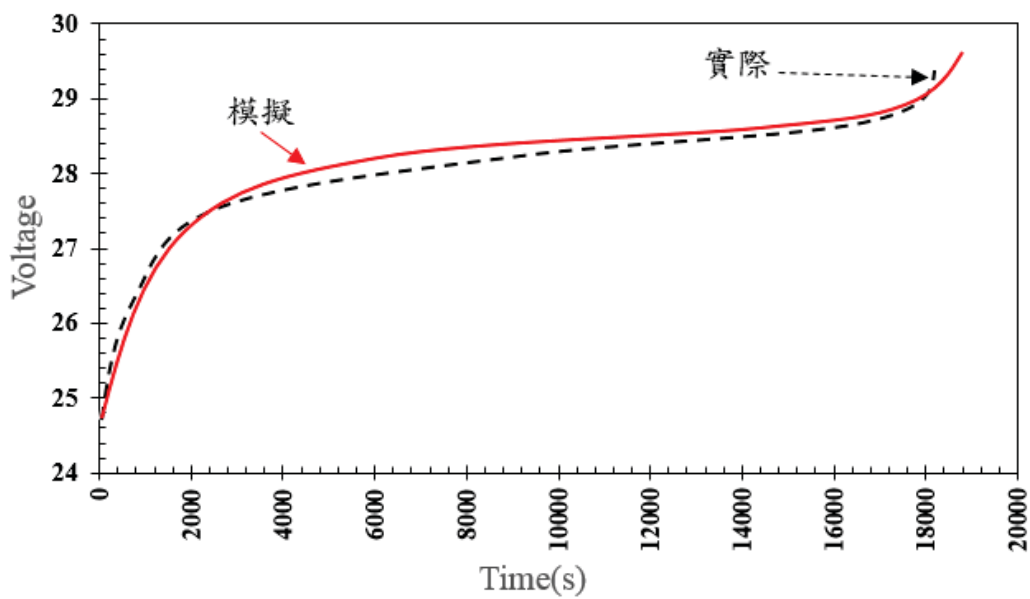


圖 4.2.3 鋰電池模組模擬與實際曲線圖

在驗證完鋰電池模組充電與實驗結果後，將進行鋰電池之太陽能增強系統的模擬與實驗結果比較，模擬之電容容量設定為 0.132F、Phase2 電壓為 28.3V 以及最低電壓為 24V，這些參數規格是由台大張許昱的研究進內容中所訂定，其模擬結果將與其數據進行比較。如圖 4.2.4 所示，將 2013 年 6 月 2 日的太陽輻射量數據輸入於系統中來進行模擬，模擬結果可看出當電壓到達 28.3V 後以此電壓值做定電壓充電，此為 PID 迴授之作用。模擬結果與實驗結果相當接近，故此模擬模型相當可靠。

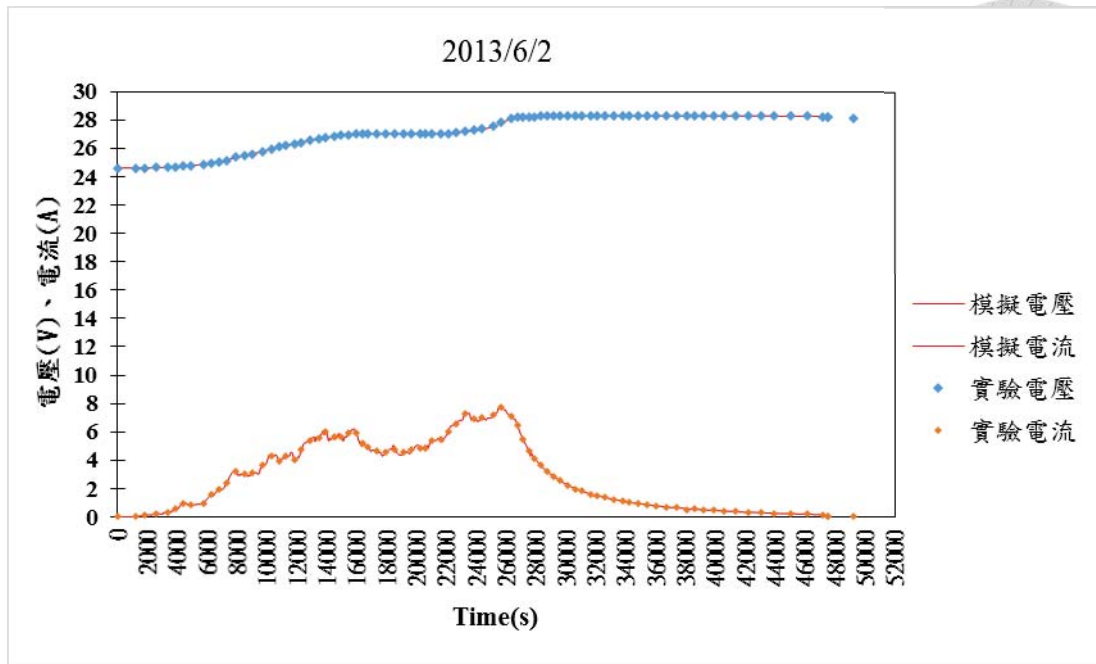


圖 4.2.4 2013/6/2 鋰電池之太陽能系統模擬與實驗結果比較

4.3 鋰電池並聯電容之太陽能充電系統長程性能分析

在過去太陽能充電增強實驗中由於鋰電池的與太陽能板的匹配不良，導致實驗結果發現系統的發電效率不佳，主要原因為系統的鋰電池規格為 24V30Ah，而太陽能板的規格為 260W，這樣會造成鋰電池很快的就進入飽充電壓而開始進行 Phase2 充電，此時太陽能的電流已經無法全力的輸入至鋰電池中，以致太陽能板的發電下降，圖 4.3.1 與表 4.3.1 為鋰電池容量在 30Ah 時，太陽能板的發電效率，此結果指出太陽能板的效率因為鋰電池容量太小而嚴重下降，尤其在輻射越高時效率越差。

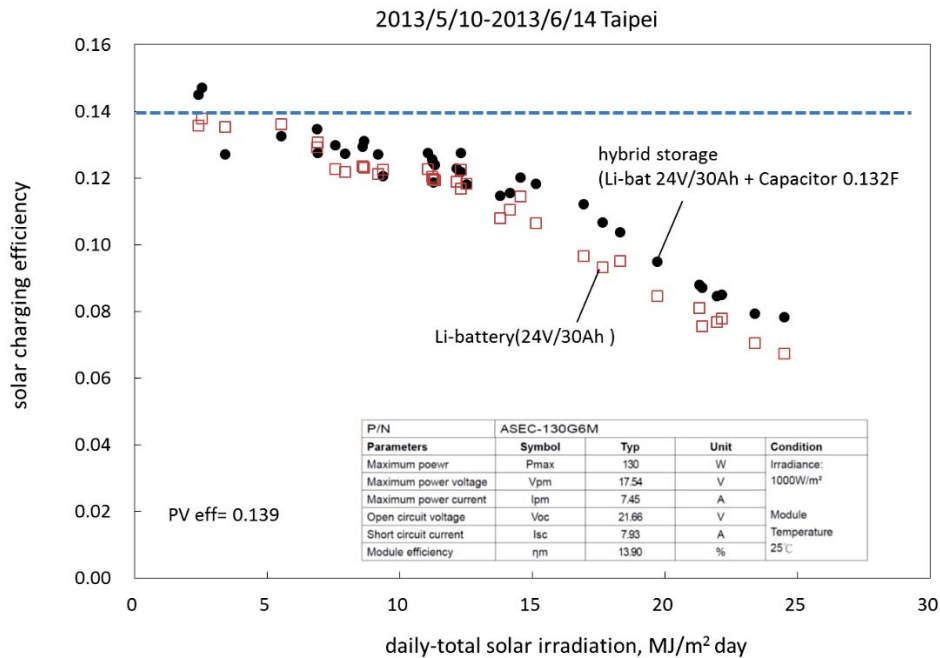


圖 4.3.1 太陽能板在鋰電池容量 30Ah 下發電效率

日期	累積發電量(Wh)	總輻射量(MJ/m ²)	solar eff(%)	日期	累積發電量(Wh)	總輻射量(MJ/m ²)	solar eff(%)
5月10日	769.49	11.04	12.76%	5月28日	1028.85	17.66	10.67%
5月11日	191.32	2.41	14.52%	5月29日	862.40	13.77	11.47%
5月12日	204.56	2.55	14.71%	5月30日	1019.74	21.41	8.72%
5月13日	766.85	11.32	12.41%	5月31日	1014.21	23.38	7.94%
5月14日	856.33	12.29	12.76%	6月1日	1021.02	19.70	9.49%
5月15日	607.57	8.59	12.96%	6月2日	1015.63	21.95	8.47%
5月16日	505.64	6.88	13.47%	6月3日	1024.40	21.29	8.81%
5月17日	815.74	12.15	12.29%	6月4日	550.99	7.93	12.73%
5月18日	236.25	3.40	12.72%	6月5日	636.93	9.17	12.72%
5月19日	953.90	14.54	12.01%	6月6日	1038.44	18.31	10.38%
5月20日	807.17	12.52	11.80%	6月7日	893.88	14.16	11.56%
5月21日	401.01	5.54	13.26%	6月8日	1028.58	22.15	8.50%
5月22日	481.42	6.91	12.75%	6月9日	619.24	8.64	13.12%
5月23日	616.64	9.36	12.06%	6月10日	765.19	11.23	12.48%
5月24日	730.91	11.27	11.87%	6月11日	536.45	7.56	13.00%
5月25日	1049.01	24.50	7.84%	6月12日	819.21	12.31	12.19%
5月26日	977.32	15.13	11.83%	6月13日	770.02	11.22	12.57%
5月27日	1036.23	16.92	11.22%				

表 4.3.1 30Ah 鋰電池每日發電量、輻射量與發電效率

本研究中將鋰電池容量放大，改為 24V60Ah，其它規格皆保持不變，如電容 0.132F，鋰電池操作電壓 $V_L=23.5V$ 、 $V_{max}=28.3$ ，太陽能板為 260W，再以這些規格輸入至上節 Simulink 模擬軟體來模擬，觀察如果在鋰電池容量放大下，是否能夠提升太陽能板的發電效率。下圖 4.3.2 至 4.3.4 為模擬的結果與張許昱的實驗結果，圖中 30Ah Cap System 表示為張許昱的實驗曲線，60Ah Cap System 表示為鋰電池放大後的模擬曲線，可以從模擬的電壓曲線觀察到鋰電池因為放大故其電壓成長較為緩慢，系統不會進入因此而進入到 Phase2 階段採定電壓充電，所以太陽能板能夠全力的發電到鋰電池中，而發電量就會高於 30Ah Cap System。

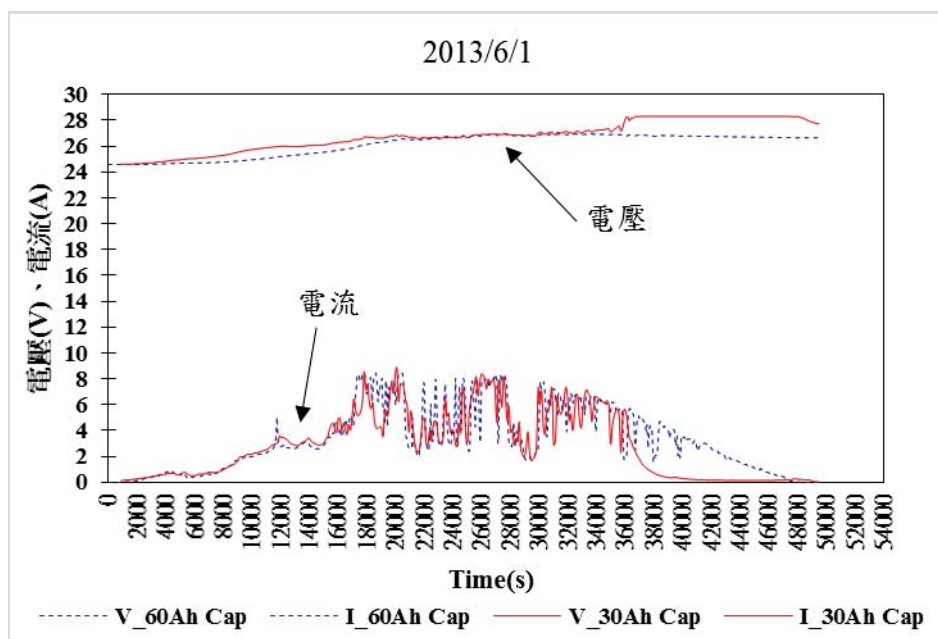


圖 4.3. 2 2014/6/1 數據比較

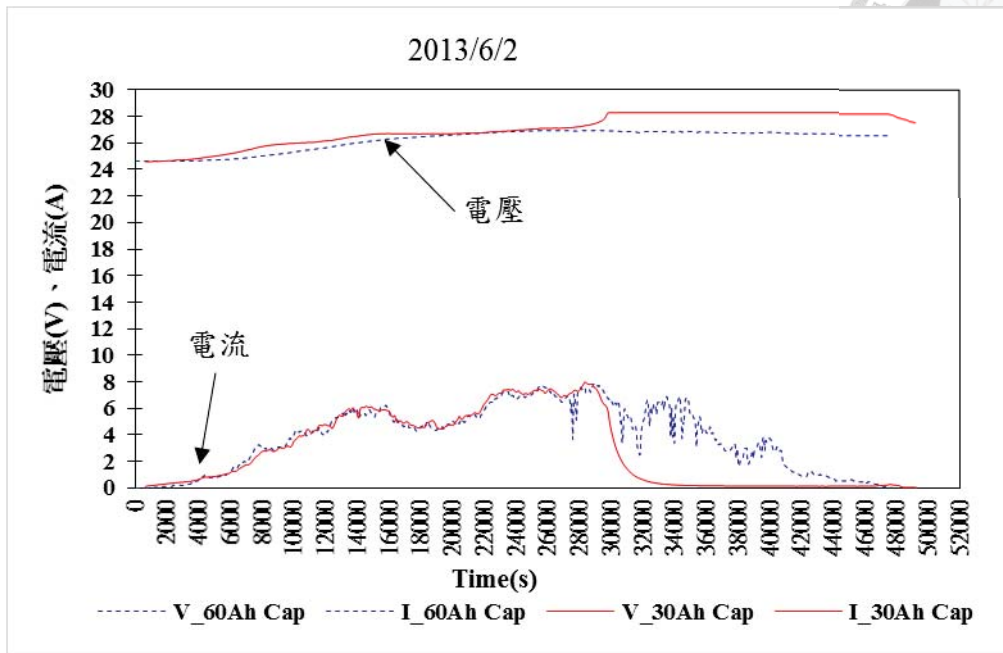


圖 4.3. 3 2014/6/2 數據比較

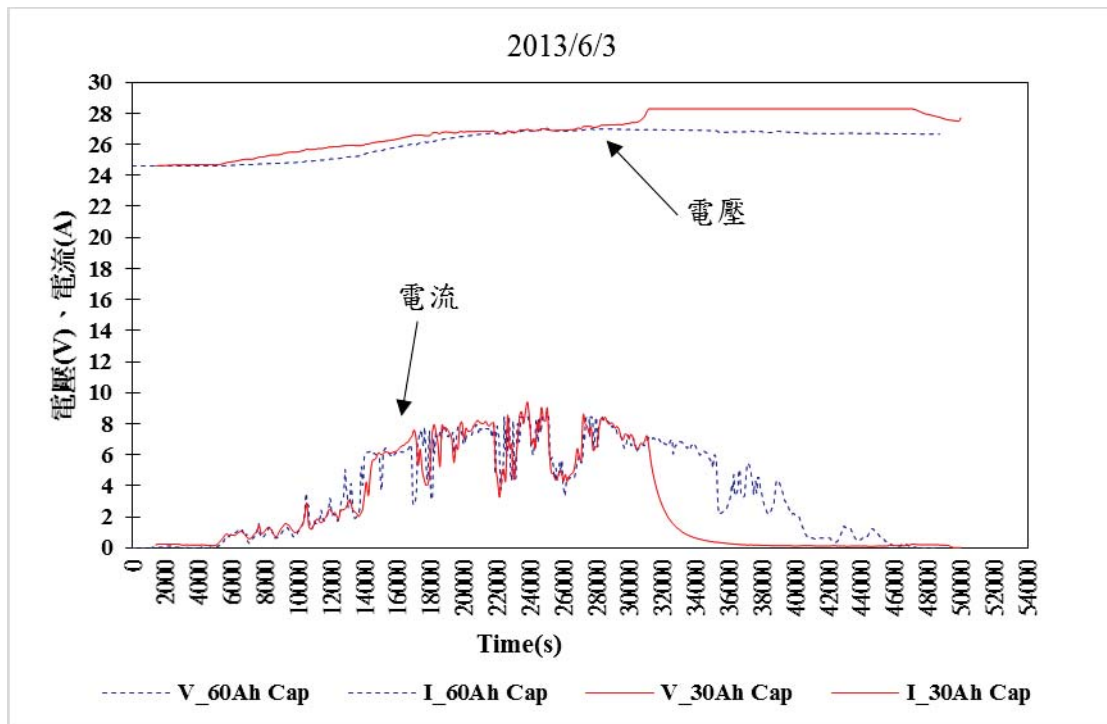


圖 4.3. 4 2014/6/3 數據比較

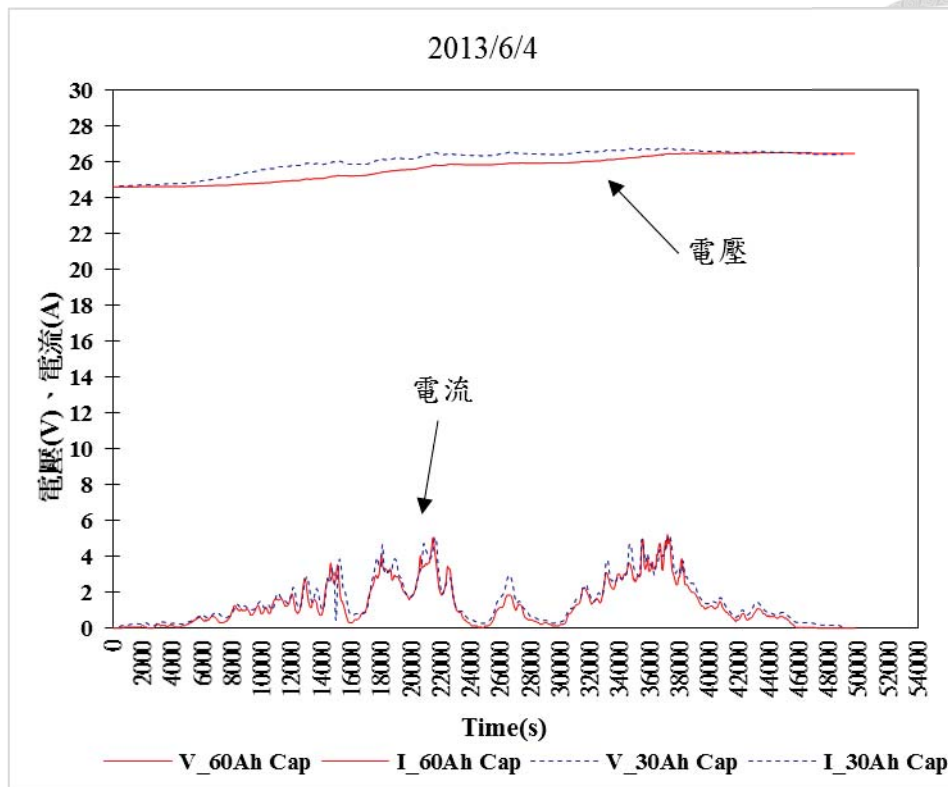


圖 4.3.5 2014/6/4 數據比較

圖 4.3.6 為模擬的結果與張許昱的實驗做比較，當鋰電池放大後太陽能板的發電效率明顯提升，而當輻射量到達 $16\text{MJ}/\text{m}^2$ 後效率開始衰減，這樣的趨勢與鉛酸電池的研究相符，如圖 1.2.9 的鉛酸電池實驗，而模擬的太陽能板效率超過 13.9% 是因為模擬的條件不及實際現象嚴苛所導致。表 4.3.2 為兩套系統的發電量比較。

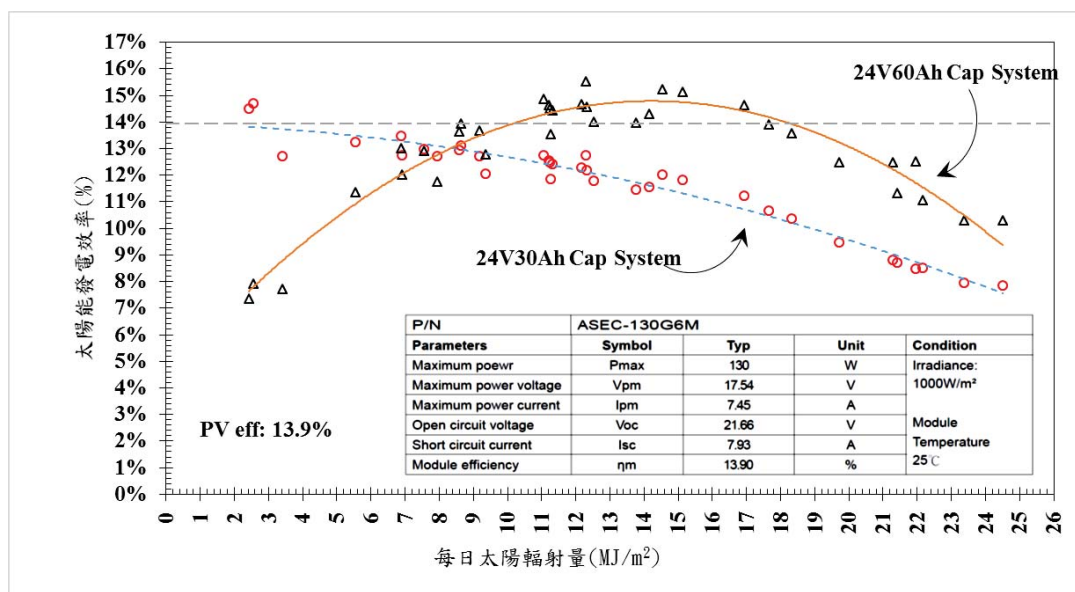


圖 4.3. 6 30Ah Cap Sys 與 60Ah Cap Sys 的太陽能板發電效率

日期	總輻射量(MJ/m ²)	30Ah發電量(Wh)	30Ah solar effn(%)	60Ah發電量(Wh)	60Ah solar effn(%)
5月10日	11.04	769	12.76%	897	14.87%
5月11日	2.41	191	14.52%	97	7.37%
5月12日	2.55	205	14.71%	110	7.94%
5月13日	11.32	767	12.41%	893	14.44%
5月14日	12.29	856	12.76%	1041	15.52%
5月15日	8.59	608	12.96%	640	13.66%
5月16日	6.88	506	13.47%	489	13.02%
5月17日	12.15	816	12.29%	973	14.67%
5月18日	3.40	236	12.72%	144	7.73%
5月19日	14.54	954	12.01%	1209	15.22%
5月20日	12.52	807	11.80%	959	14.02%
5月21日	5.54	401	13.26%	344	11.37%
5月22日	6.91	481	12.75%	454	12.04%
5月23日	9.36	617	12.06%	654	12.80%
5月24日	11.27	731	11.87%	834	13.55%
5月25日	24.50	1049	7.84%	1376	10.29%
5月26日	15.13	977	11.83%	1249	15.13%
5月27日	16.92	1036	11.22%	1353	14.65%
5月28日	17.66	1029	10.67%	1340	13.90%
5月29日	13.77	862	11.47%	1052	13.98%
5月30日	21.41	1020	8.72%	1324	11.33%
5月31日	23.38	1014	7.94%	1314	10.29%
6月1日	19.70	1021	9.49%	1342	12.47%
6月2日	21.95	1016	8.47%	1503	12.54%
6月3日	21.29	1024	8.81%	1451	12.48%
6月4日	7.93	551	12.73%	509	11.75%
6月5日	9.17	637	12.72%	685	13.69%
6月6日	18.31	1038	10.38%	1357	13.57%
6月7日	14.16	894	11.56%	1105	14.29%
6月8日	22.15	1029	8.50%	1340	11.08%
6月9日	8.64	619	13.12%	658	13.95%
6月10日	11.23	765	12.48%	890	14.51%
6月11日	7.56	536	13.00%	534	12.93%
6月12日	12.31	819	12.19%	979	14.56%
6月13日	11.22	770	12.57%	898	14.65%

表 4.3. 2 結果比較表

第五章 鋰電池並聯電容之太陽能充電系統戶外比對

測試分析



5.1 實驗設計

為驗證電腦模擬分析，本研究在戶外架設了兩套相同太陽能充電系統進行比對測試；其中一套系統的鋰電池有並聯電容，另外一套是沒有電容的一般太陽能充電系統。的硬體設備與軟體，說明如下。

5.1.1 充放電控制器

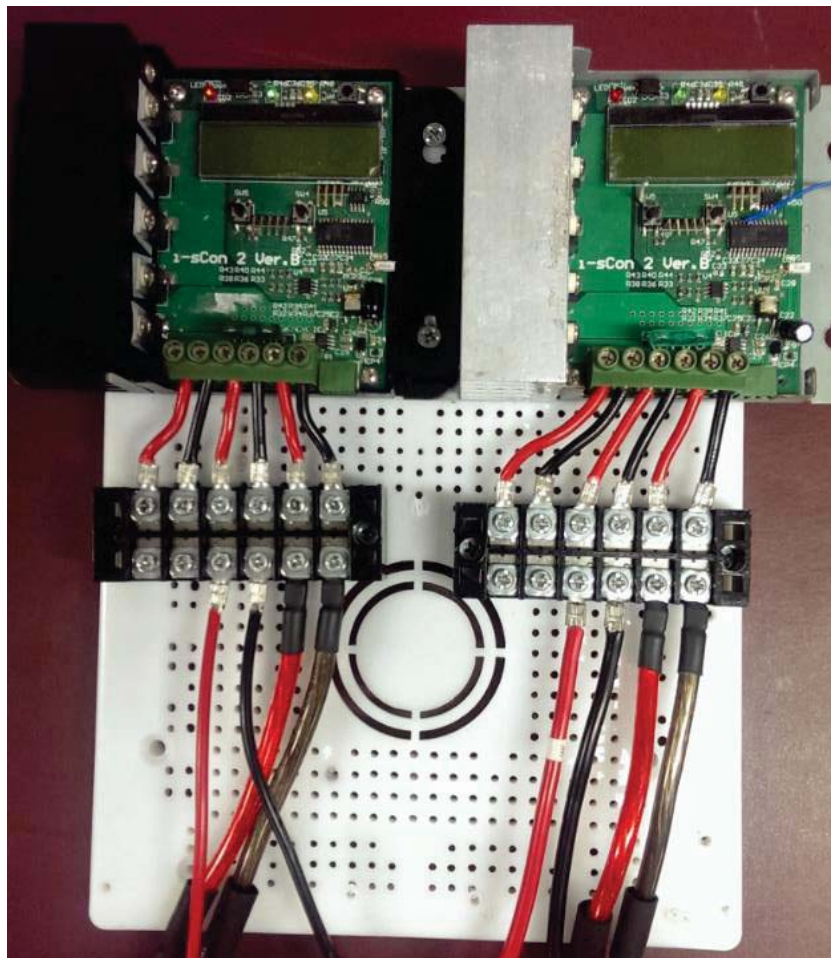


圖 5.1.1 充放電控制器 i-sCon2



圖 5.1.2 充放電控制器之電腦連線軟體

本研究室針對獨立型太陽能發電系統所開發之充放電控制器 i-sCon2，最大功率為 500W，可以記錄鋰電池在充放電過程中之電壓與電流，可透過電腦連線做資料的傳輸將所記錄的數據取出。目前設定為以每 15 秒紀錄一次電壓與電流值，可持續紀錄 2 天資料。在控制方面，i-sCon2 採三段式充電，即 Phase1、Phase2 與 Phase3，Phase2 與 Phase3 的控制採 PID 迴授控制。圖 5.1.3 為控制器的系統 PID 回授方塊圖，控制器透過感測器取得電壓誤差後再經由 PID 控制來計算出 MOSFET 切換所需之 Duty Cycle，以改變由太陽能板輸出的平均電流，進而達到鋰電池電壓的控制。

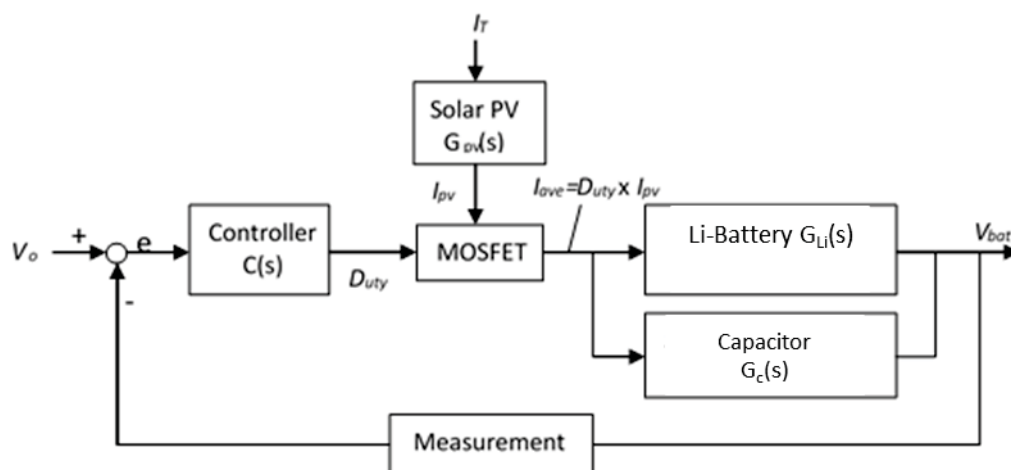


圖 5.1.3 控制器的系統 PID 回授方塊圖

5.1.2 記錄器

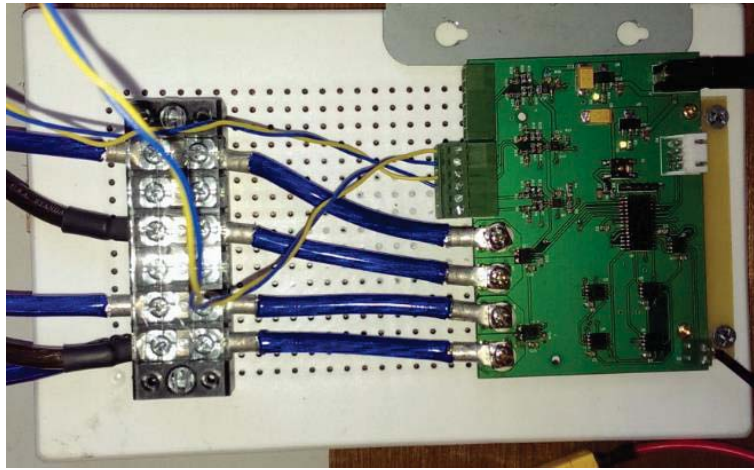


圖 5.1.4 紀錄器

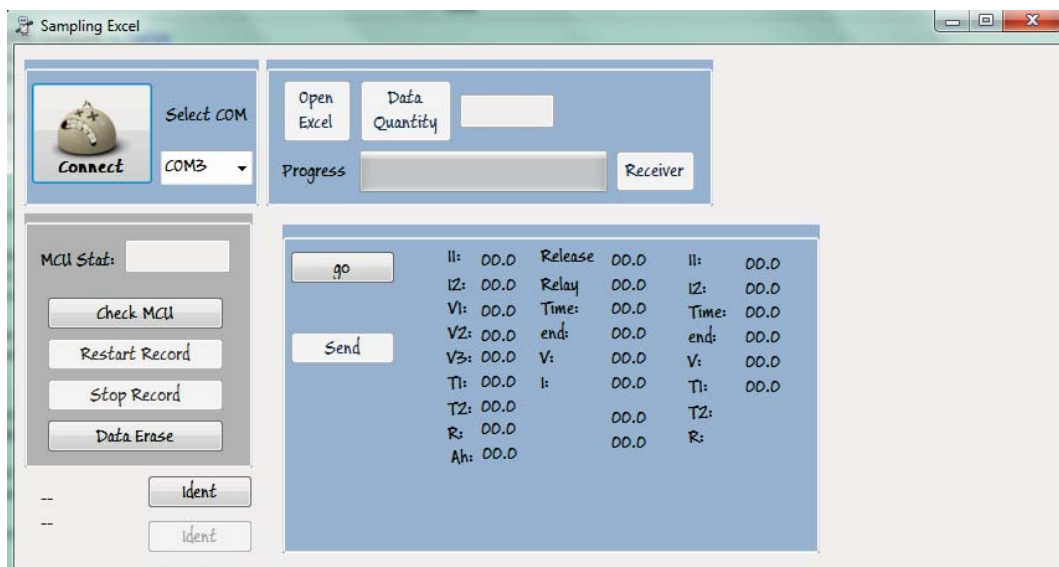


圖 5.1.5 專用紀錄器之電腦連線軟體

本實驗利用兩台 i-sCon2 來進行兩套系統的控制與記錄，但在記錄時容易造成不同步的現象，故特別設計了一台紀錄器，做同步記錄，確保實驗數據的準確度。此台記錄器的記錄時間週期可以縮短至 1.5 秒來記錄一次數據，可持續 1.5 天。

5.1.3 電解電容

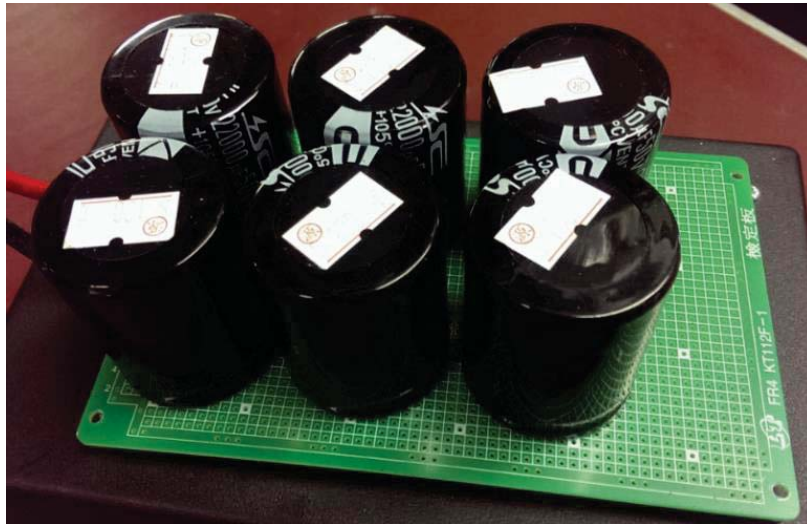


圖 5.1. 6 50V22000uF 電解電容

本實驗之太陽能充電增強系統所使用之電容為電解電容，每顆電容規格為 50V/22000uF，並聯 6 顆，故總容量為 0.132F。為防止電線與連接器接點的阻抗而影響實驗，故在這些細節的處理皆非常注意。

5.1.4 鋰電池模組



圖 5.1. 7 PSI 24V30Ah 鋰電池模組

本實驗所採用的鋰電池模組為 PSI 所提供的 24V30Ah，共四顆。每顆鋰電池模組中皆含被動式 BMS 電路，用以平衡鋰電池模組中各顆鋰電池在充電時的電壓；將四顆鋰電池分為兩組來給兩套系統使用，每一組並聯兩顆，則使鋰電池模組的規格變成 24V60Ah，已放大張許昱[8]的蓄電池。

5.1.5 太陽能板



圖 5.1. 8 NSP 太陽能板

Maximum Rating Power (P_{max})	245	Wp
Module Efficiency	15	%
Open Circuit Voltage (V_{oc})	37.62	V
Maximum Power Voltage (V_{pm})	30.38	V
Short Circuit Current (I_{sc})	8.52	A
Maximum Power Current (I_{mp})	8.07	A
Temperature Coefficient of I_{sc}	0.046	%/K
Temperature Coefficient of V_{oc}	-0.313	%/K

表 5.1. 1 NSP245 規格

本實驗所使用的太陽能板為新日光(NSP)公司所生產的多晶矽太陽能板 D6P245A3A，如圖 5.1.6，其規格為如表 5.1.1 所示，此太陽能板經過 nMPPO 之系統匹配分析後得到的性能指標為 $L_{mp}=0$ 、 $r_{mp}=0.01$ 、 $C_i=0.34$ 、 $r_{oc}=0.66$ ，即表示此太陽能板的規格針對本實驗之系統有良好的 nMPPO 匹配。

5.1.6 負載

在白天進行充電後，夜間需要將儲存於鋰電池中的電量消耗，以利於隔天

充電實驗的進行，而放電之負載為鹵素燈，如圖 5.1.7，其規格為 12V50W，總共使用 8 顆，每組系統各別分配 4 顆；由於兩組系統之鋰電池為 24V，故需將鹵素燈以兩串兩併的方式讓電壓能夠承受，在將兩組鹵素燈分別接到兩個系統中，讓夜間放電功率為 200W，最後撰寫 i-sCon2 的程式讓夜間放電之電流保持 7.5A，約為 0.125C 放電。



圖 5.1.9 鹵素燈(含燈座)

5.1.7 系統架構

圖 5.1.10 為系統架構圖，太陽能板直接並聯鋰電池，而電容並聯於鋰電池；另外一組系統僅太陽能板並聯於鋰電池，以這兩套系統來進行戶外實測比對。

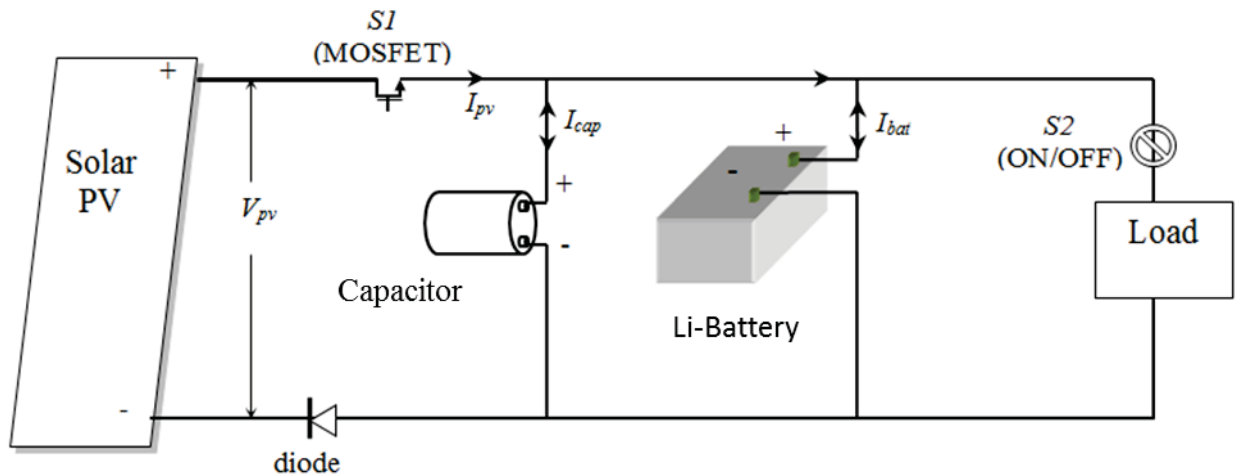


圖 5.1.10 充電增強技術之系統架構

5.2 戶外實測數據比對

完成戶外實測之硬體設備後，安裝於台灣大學工綜館頂樓進行實測記錄每日的發電狀況，並觀察與比較兩系統的發電差異。在下面圖示中，有標示 Cap 為有並聯電容的系統，標示 No-Cap 為沒有並聯電容的系統。

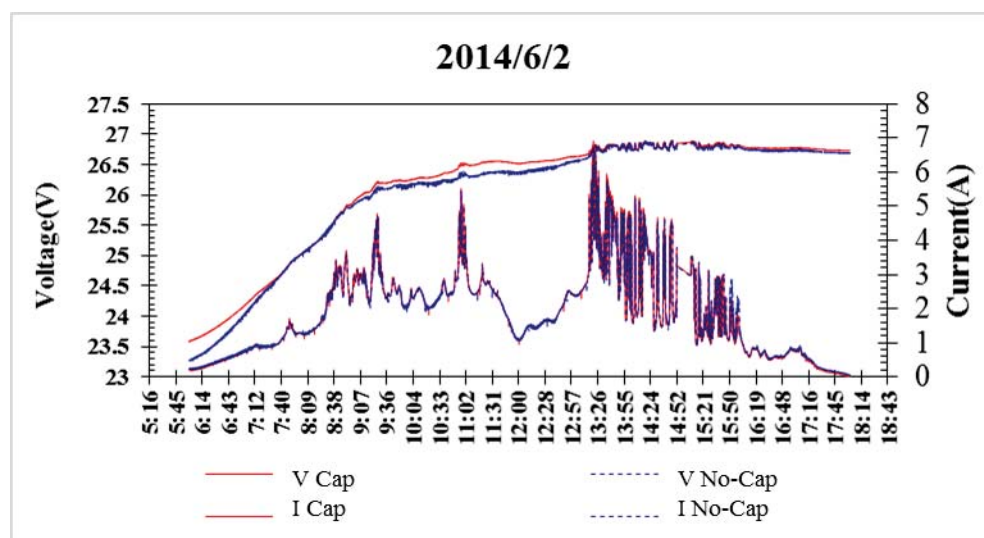


圖 5.2.1 2014/6/2

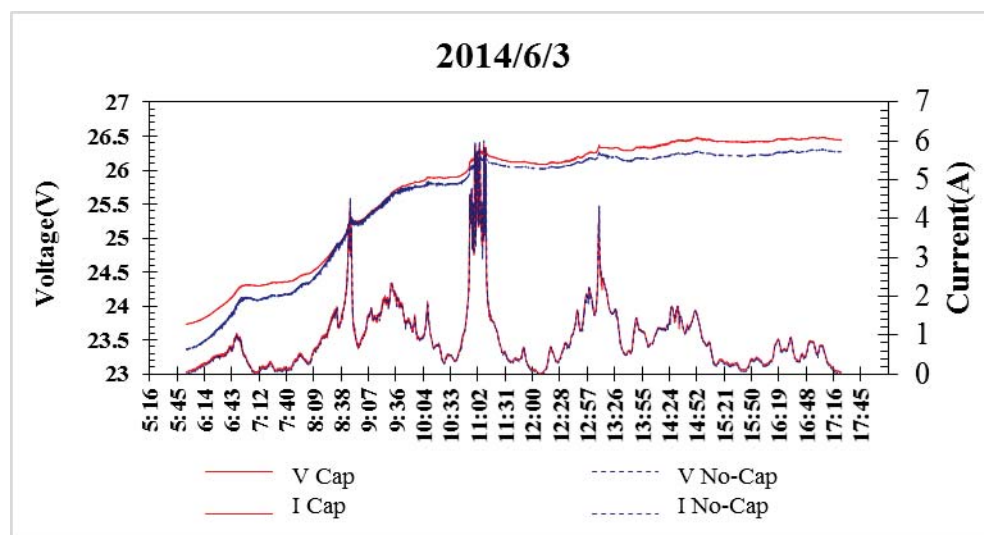


圖 5.2.2 2014/6/3

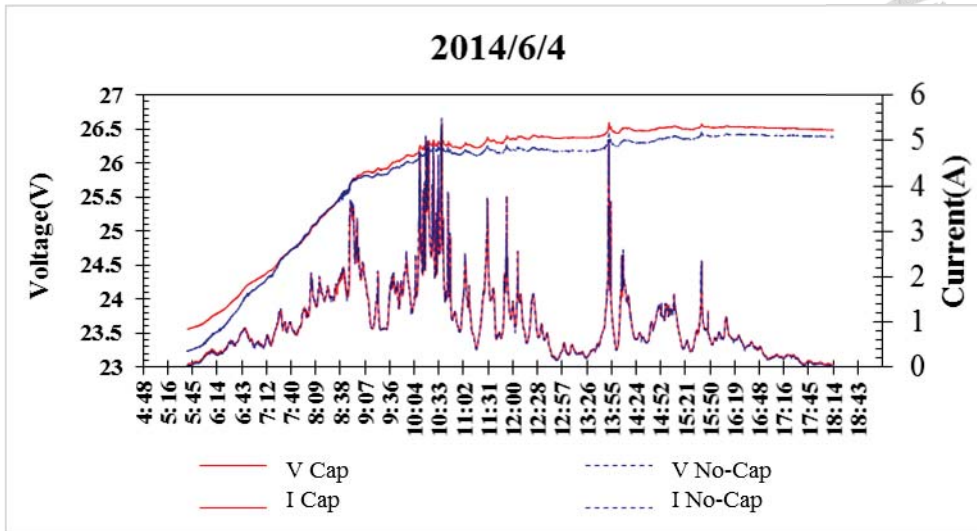


圖 5.2. 3 2014/6/4

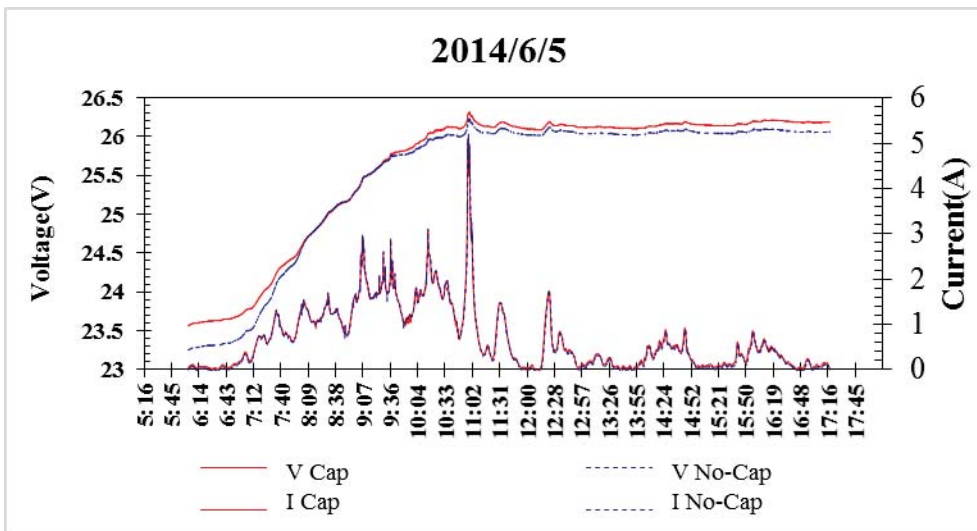


圖 5.2. 4 2014/6/5

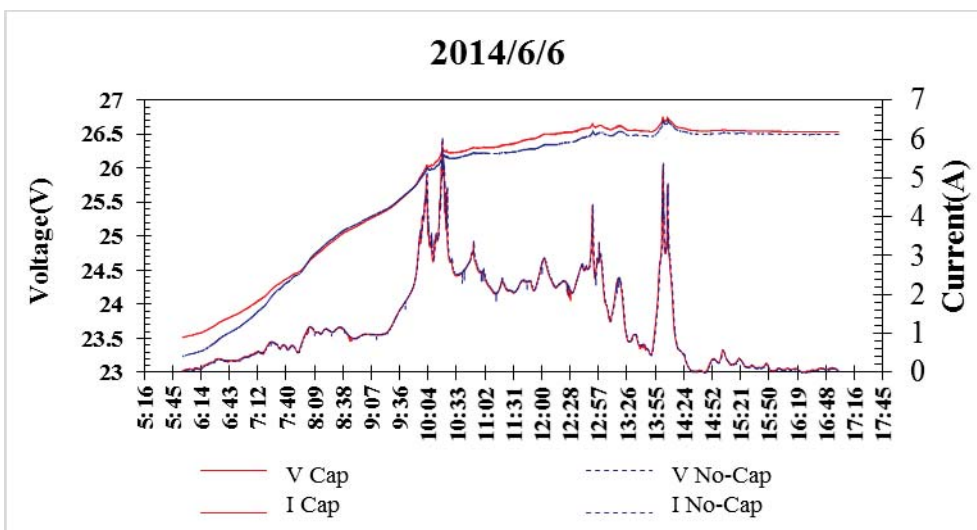


圖 5.2. 5 2014/6/6

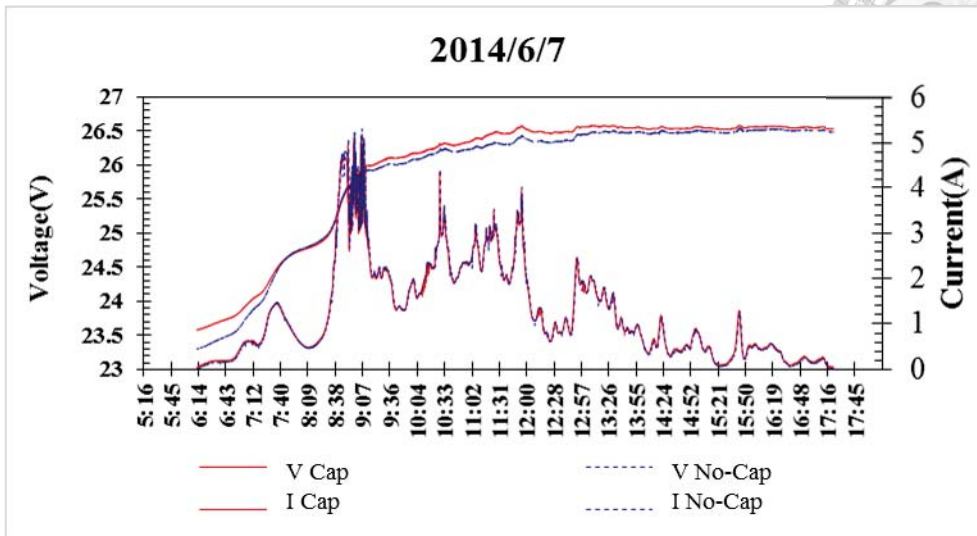


圖 5.2. 6 2014/6/7

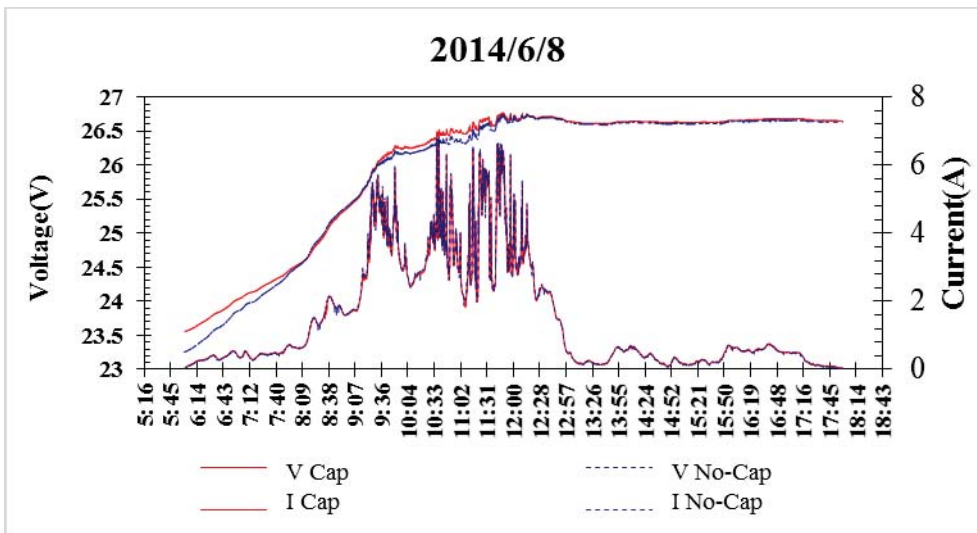


圖 5.2. 7 2014/6/8

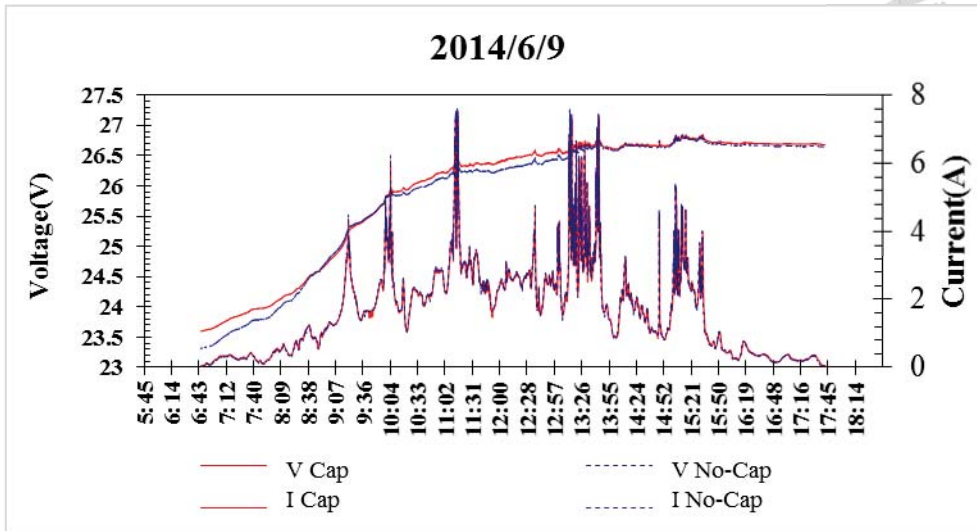


圖 5.2. 8 2014/6/9

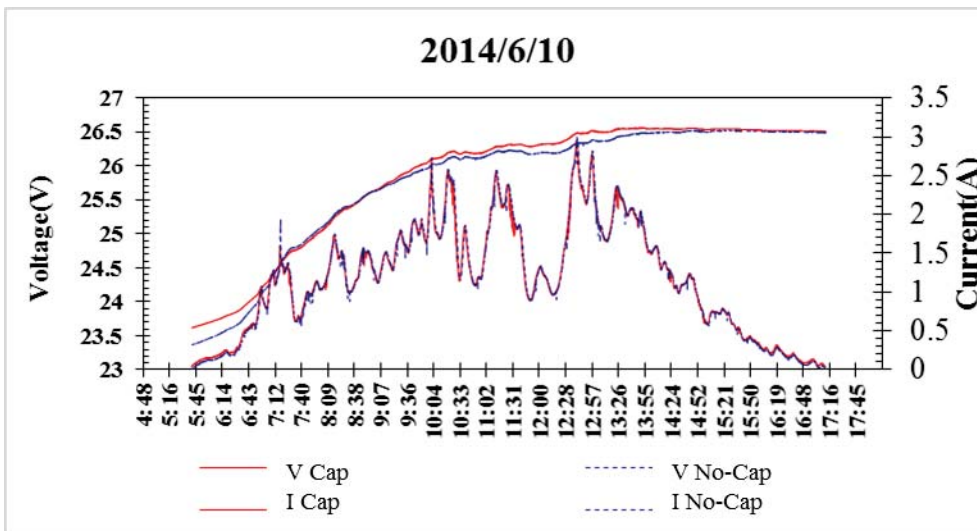


圖 5.2. 9 2014/6/10

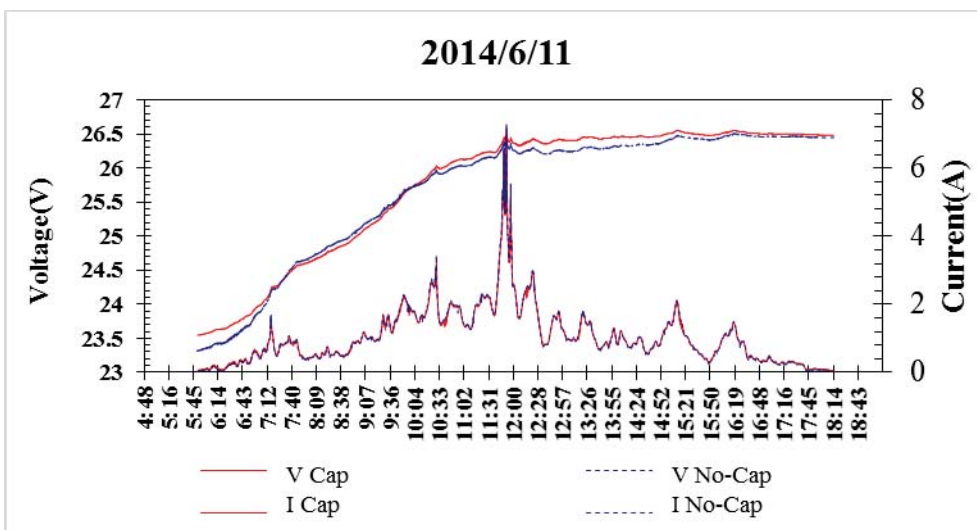


圖 5.2. 10 2014/6/11

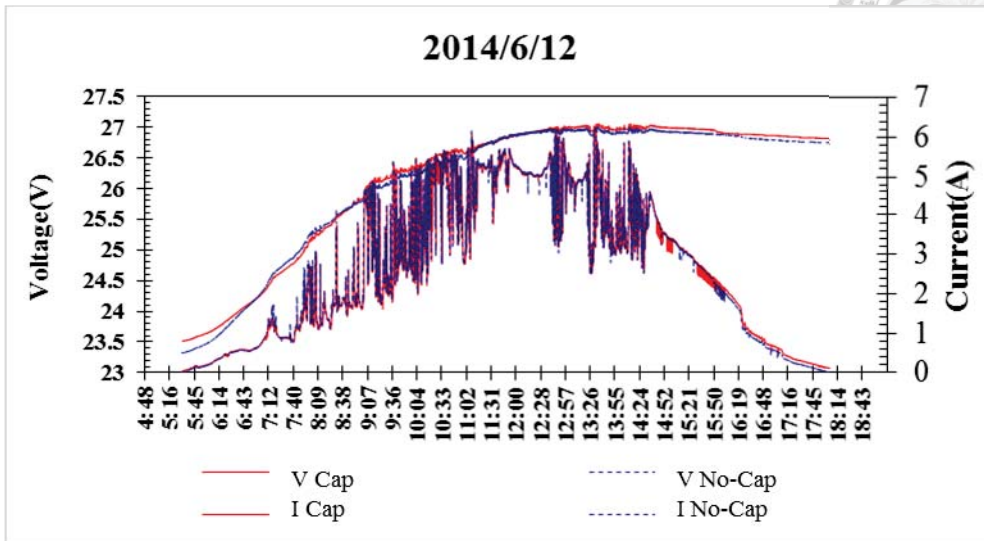


圖 5.2. 11 2014/6/12

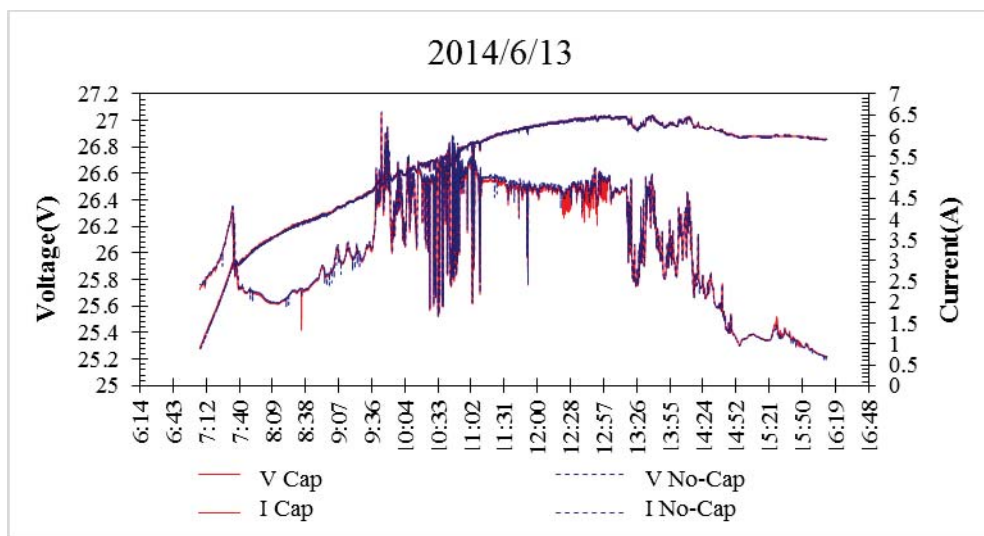


圖 5.2. 12 2014/6/13

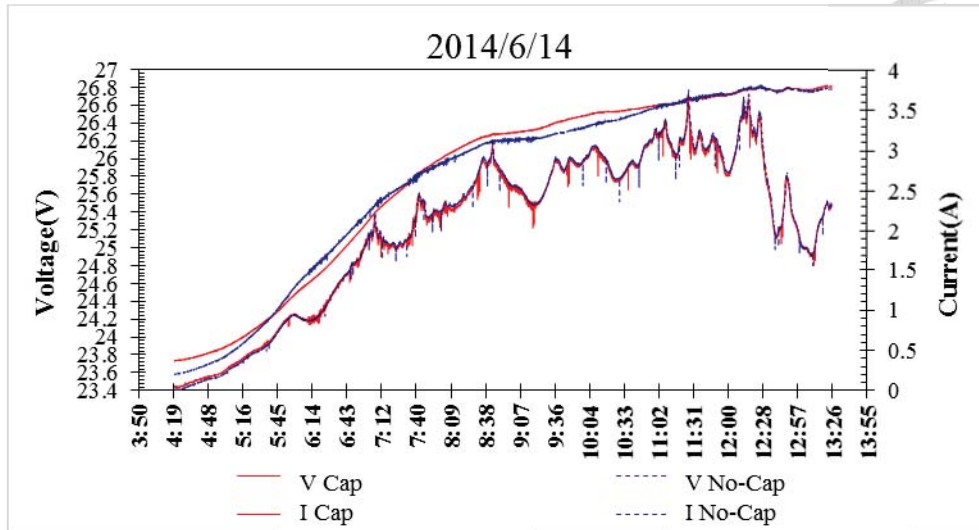


圖 5.2. 13 2014/6/14

圖 5.2.1 至圖 5.2.13 X 軸為每日的時間，左邊 Y 軸為鋰電池電壓，由於鋰電池與太陽能板直接並聯，故太陽能板的電壓即為鋰電池的電壓，右邊 Y 軸為充電之電流，亦為太陽能板輸出之電流。

由戶外實測可以發現，有並聯電容之系統的電壓會比沒有並聯電容之系統來得高，特別是在夜間放電後靜置到清晨待日出瞬間，鋰電池的起使電壓大小變化可以明顯地看出差異，這個現象與台大廖子豪[6]針對鉛酸電池的研究有相同結果。在電流部分，可明顯地觀察出兩個系統的電流變化並無差異，幾乎是相同的電流大小。

然而在全日充電過程中，有並聯電容之系統電壓未必總是高於沒並聯電容的系統，有時候電壓反而較低，以致於整日下來，兩套系統所累積的發電量差異不大，這種現象與鉛酸電池不同的

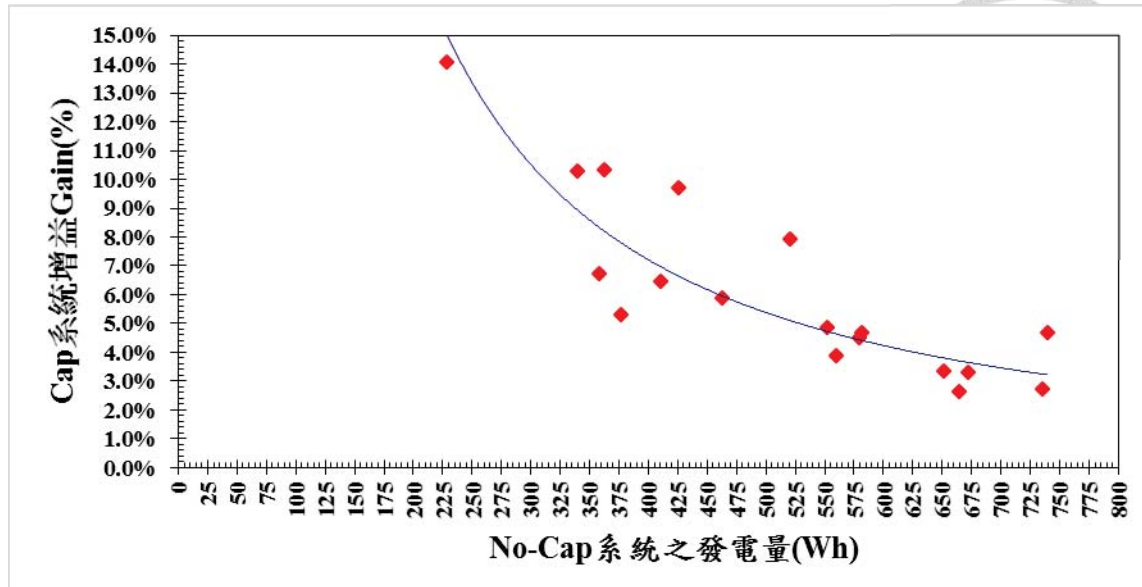


圖 5.2. 14 Strengthen 系統相對於 Normal 系統之發電量增益圖

Date	Normal(Wh)	Strenghten(Wh)	Gain(%)	Date	Normal(Wh)	Strenghten(Wh)	Gain(%)
6月2日	568	571	0.44%	6月15日	366	368	0.67%
6月3日	268	274	2.08%	6月16日	491	501	1.97%
6月4日	315	320	1.50%	6月17日	739	774	4.71%
6月5日	191	196	2.95%	6月18日	651	673	3.34%
6月6日	363	366	0.71%	6月19日	411	437	6.45%
6月7日	364	365	0.36%	6月20日	358	382	6.74%
6月8日	452	455	0.57%	6月21日	462	489	5.88%
6月9日	467	468	0.22%	6月22日	362	400	10.35%
6月10日	351	353	0.63%	6月23日	339	374	10.28%
6月11日	335	338	0.91%	6月24日	228	260	14.05%
6月12日	882	885	0.27%	6月25日	377	397	5.31%
6月13日	806	812	0.86%	6月26日	672	694	3.32%
6月14日	583	586	0.65%	6月27日	579	606	4.51%
6月15日	366	368	0.67%	6月28日	426	467	9.71%
6月8日	452	455	0.57%	6月29日	521	562	7.92%
6月9日	467	468	0.22%	6月30日	560	582	3.89%
6月10日	351	353	0.63%	7月1日	553	580	4.88%
6月11日	335	338	0.91%	7月2日	664	682	2.66%
6月12日	882	885	0.27%	7月3日	735	755	2.71%
6月13日	806	812	0.86%	7月4日	582	609	4.70%
6月14日	583	586	0.65%				

表 5.2. 1 Cap 相對於 No-Cap 系統之發電量增益

日累積性能則是值皆測量全天性能並加以積分來求得發電量增益：

$$\eta_{nMPPO} = \frac{\int P_{cap} dt - \int P_{no-cap} dt}{\int P_{no-cap} dt} \quad (5.2.1)$$

如圖 5.2.14 所示，X 軸為無並聯電容之 Normal 系統的每日累積發電量，Y 軸為有並聯電容之 Strengthen 對應的增益，主要以 Normal 系統作為基準來比較 Strengthen 的增益，其增益由式 5.2.1 求得。

其結果顯示當發電量小於 400Wh 時有並聯電容之 Strengthen 系統的發電量有顯著的增益，尤其在 200Wh 時的增益較為明顯。當系統發電量越大時，即太陽輻射較大或天氣較好時，有並聯電容之 Strengthen 系統的增益效果會越來越不明顯，幾乎可以認定為無差異，也就是說此增益現象只有在太陽輻射較小或天氣較差時，Strengthen 系統才有較明顯的差異，這樣的結果與過去鉛酸電池的研究相反。

第六章 討論、結論與未來展望



6.1 討論與結論

A. 鋰電池充電增強技術討論

利用並聯電容作為鋰電池之太陽能充電增強技術的研究中，由於在進入 Phase2 充電後的電壓會因為採定電壓充電，而讓能進入的電流下降的非常低，使得鋰電池無法充分地獲得由太陽能板所輸出的發電量，故充電增強技術主要改善的充電階段設定在 Phase1。

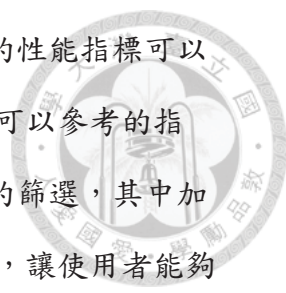
在充電過程中，鋰電池電壓變化的行為與鉛酸電池不同，雖然鋰電池在瞬間充電電流對電壓的反應較快，但在進行長時間充電時，當鋰電池電壓尚未到達充電保護點電壓前，其電壓斜率變化是相當平緩且非線性的，此現象與電壓呈線性關係的鉛酸電池截然不同，這個現象經由模擬與實驗皆可以觀察出來。

而在戶外實測結果可以觀察出有並聯電容之 Strengthen 系統雖然在初期的電壓較高，但隨著 SOC 增加時兩系統的電壓會越來越接近，這是因為鋰電池在電壓到達保護電壓時，電壓成長的斜率平緩所表現出來的現象。

戶外實測結果顯示，利用並聯電容作為充電增強技術在天氣較不好的情況才有顯著的發電增益，若在天氣晴朗的狀況下增益會越來會小，這個現象與過去鉛酸電池的研究是相反的。由於鋰電池的特性曲線與鉛酸電池截然不同，故從結果說明若要使用電容來提升太陽能充電系統對鋰電池的充電量，是較不合適的，因為充電增強技術的應該是發電量越大效果越佳才是最有效益的結果。

有並聯電容的系統之電壓與並不會總是高於沒並聯電容的系統，這有可能是在鋰電池模組中，多了一個 BMS 硬體所導致，此鋰電池 BMS 在充電過程中當內部鋰電池單元電壓箱等時，將會進行部分鋰電池單元放電，來達到電壓平衡，故此時整個鋰電池模組的總電壓可以會因此下降，而導致兩套系統鋰電池電壓忽高忽低的現象。

B. nMPPO 充電系統設計匹配



本研究中所發展的規格化 nMPPO 系統匹配，所定義出來的性能指標可以將系統匹配的依據數字化，在實務上對太陽能板的篩選上有個可以參考的指標。而 nMPPO 系統匹配軟體的的建立，不僅加速在太陽能板的篩選，其中加入了以不同數量的鋰電池電芯來作串聯的組合的操作介面選項，讓使用者能夠進行不一樣的系統匹配，讓 nMPPO 系統匹配方法更加無限制與靈活。

當太陽能發電系統能夠以系統匹配的方式來取代掉 MPPT 的裝設，則可以增加系統的可靠度，以減少在太陽能發電系統的維修與保養，如此一來就能降低裝設與維護的成本，並延長使用的壽命，而太陽能發電系統就能夠更容易地推廣與普及。

6.2 未來展望

鋰電池作為在太陽能系統中的蓄電池，已經是目前的趨勢，由於鋰電池的充電特性曲線難以掌握，其充電技術仍然是個重要的研究課題，本研究主要在試驗如何增加鋰電池在太陽能系統中發電量，其實驗表示並聯電容對發電量的影響僅在於日照輻射較低的情況，故在實際使用上並無太大的效益，還需要找尋其他的儲能元件來進行測試與實驗，找出如同電容用於鉛酸電池如此有效的元件。

充電增強技術研究中，僅探討發電量的增益，並沒有探討長期充電測試下對鋰電池壽命的影響，如果增加電容當作瞬間大電流的緩衝，藉此延長鋰電池的壽命，則加入電容就具有其效益。

在 nMPPO 系統匹配軟體中，在計算太陽能板特性曲線的準確度受到演算速度的影響，目前電壓僅能分辨到小數點下第一位，若要提高準確度，例如小數點以下第二位，則演算時間會增加十倍，故在此軟體中可以加入一個準確度選項來提供使用者選擇，使太陽能板的特性曲線的準確度可以更佳靈活地設定。

參考文獻



- [1] "BP Statistical review of world energy June 2006" ,British Petroleum, June 2006.
- [2] "Renewables, Global Status Report 2006" , Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. 2006.
- [3] 孫輔笙:“太陽光發電系統研究”，國立台灣大學機械工程研究所博士論文，2006
- [4] 吳民聖:“獨立型太陽能 LED 照明技術研究”，國立台灣大學機械工程研究所博士論文，2009
- [5] 曾偉民:“以混合式儲能提升獨立型太陽電池發電系統充電效率研究”，國立台灣大學機械工程研究所，2013
- [6] 廖子豪:“太陽電池發電系統充電性能提升研究”，國立台灣大學機械工程研究所，2010
- [7] 張哲偉:“利用混合式儲能裝置提升獨立型太陽電池發電系統之充電性能研究”，國立台灣大學機械工程研究所，2011
- [8] 張許昱:“鋰電池的太陽能充電技術研究”，國立台灣大學機械工程研究所，2013