

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

不同個體戶組成的金字塔太陽能微電網特性研究

Performance Characteristics of Pyramid Solar Microgrid

with Different Individual PV Systems

李安倫

An-Lun Lee

指導教授：黃秉鈞 教授

Advisor: Bin-Juine Huang, Ph.D.

中華民國 109 年 7 月

July 2020



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

不同個體戶組成的金字塔太陽能微電網特性研究
Performance Characteristics of Pyramid Solar Microgrid
with Different Individual PV Systems

本論文係李安倫君（學號 R07522835）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 109 年 7 月 28 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）

（指導教授）

陳一孟

許伯堅

系主任

董美娟

（簽名）

誌謝



「浮雲一別後，流水十年間，歡笑情如舊，蕭疏鬢已斑。」時光匆匆，研究所碩士生涯的兩年飛也似的就過去了，我也即將離開溫暖的校園及實驗室，邁向更加艱辛的社會生活。碩士生的兩年，雖然遇到了許多困難，但總有許多的人對我伸出援手，最後我也跨過了各種瓶頸，非常感謝這些曾經給予幫助的人，也希望未來在遭遇困境時，我也能遇到如此的貴人助我擺脫困境、解決問題。

首先我最感謝的就是我的指導教授黃秉鈞教授，謝謝秉鈞教授在我遇到實驗上或是生活上的瓶頸時，總會以幾十年豐富的經驗來指導我，平常有空暇之餘也經常分享許多有趣且實用的人生經驗和故事，讓我學到了相比於學術上更為重要的人生哲理，相信這些哲理在我未來的人生上會有很大的幫助。

再來我要感謝我的父母，在我人生的求學道路上，不論是經濟上還是心理上都給予我很大的支持，讓我不必為食、衣、住、行等因素擔心，更在我在遇到挫折時與我分享了許多經驗及故事來開導我，真的非常謝謝我的父母，也感謝所有家人和朋友一路以來的支持陪伴。

接著我要感謝明佳、彥安、季定、明賢、旻佐和伯賢這些學長們，不管是修課或是做研究，都給過我很實用的意見或是為我解惑，尤其是李明佳學長更是經常在我遇到困難時給我幫助，真的非常感恩。

也感謝柏賢、阿甘、康哥、吳大哥、葉大哥、宛亭姐、郭姐，有他們幫忙處理各種事物才能讓實驗室正常運作；還有我的同學兼好友的孝思、貫誠及奕華，謝謝他們與我一起打拼、修課，使我的碩士生涯並不枯燥乏味，反而甚是有趣。

最後感謝道承、成量和譽嚮，幫忙處理了很多實驗室雜務，謝謝大家。

安倫 謹識

2020/07/30

不同個體戶組成的金字塔太陽能微電網特性研究



李安倫* 黃秉鈞**

國立台灣大學

機械工程學研究所

摘要

本研究搭建 4+4 實體金字塔微電網系統，並利用 HyPV 個體戶性能模擬器與實體 CCU 組成的 4+4 系統，探討系統的模擬準確度，並研究三種電力調度方式對發電效益及資料傳輸穩定度的影響，包括集權式調度、分層式調度、機動式調度。最後提出三種個體戶組合而成的金字塔微電網並分析比較其發電效益，包括 8 戶 HyPV 個體戶、8 戶 HyS 個體戶及 4 戶 HyPV+4 戶 HyS 個體戶。

實驗結果得出三種調度方式對發電效益及資料傳輸穩定度大致無影響；而加入 HyS 個體戶的微電網對整體發電量稍有提升，但對電力調度貢獻不大。

* 研究生

** 指導教授

Performance Characteristics of Pyramid Solar Microgrid with Different Individual PV Systems



An-Lun Lee* Bin-Juine Huang**

Department of Mechanical Engineering

National Taiwan University

Abstract

This study builds a 4+4 physical pyramid microgrid system, and uses HyPV simulators and CCUs to assemble a 4+4 simulation system, and then discuss the simulation accuracy of the two systems. It also research the power generation efficiency and data transmission stability of the three different power dispatching control methods which are centralized scheme, cascaded scheme and mobile-commander scheme. After this, another experiment about three different combination of pyramid microgrid systems including 8 HyPV units, 8 HyS units, and 4 HyPV+4 HyS units are proposed and their power generation efficiency are analyzed and compared.

According to the experiments. We have the results that there is no effect on the power generation efficiency and data transmission stability by the three different power dispatching methods. And the microgrids which included the HyS units improves the power generation slightly, but don't contribute much to power dispatching.

* Graduate Student

** Advisor

目錄



誌謝	I
摘要	II
Abstract.....	III
圖目錄	VI
表目錄	X
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究動機與目的	4
1.3 研究內容	5
第二章 金字塔太陽能微電網架構	6
2.1 微電網系統架構	6
2.1-1 HyPV 架構	6
2.1-2 HyS 架構	7
2.1-3 互聯中央控制器(CCU, central controller unit)架構.....	10
2.2 微電網系統買電與賣電條件	13
2.2-1 HyPV 買賣電條件	13
2.2-2 HyS 買賣電條件	15
2.3 電力調度控制技術與通訊技術	19
2.3-1 電力調度控制技術	19
2.3-2 通訊技術 RS-485 與 CANbus.....	20
2.4 微電網指揮控制技術	23
2.4-1 A 層級電力調度	23
2.4-2 集權式指揮調度	25



2.4-3	分層式指揮調度	27
2.4-4	機動式指揮調度	30
2.4-5	調度過程	33
第三章	金字塔太陽能微電網模擬系統	38
3.1	HyPV 太陽光電系統個體戶運作模擬	38
3.1-1	個體戶太陽光電系統運作模擬目的與架構	38
3.1-2	個體戶太陽光電系統運作模擬流程	41
3.2	個體戶太陽光電系統運作模擬器設計	45
3.2-1	個體戶模擬器	46
3.2-2	HyPV 與 CCU 的同步器	51
3.3	HyS 運作模擬軟體	55
第四章	金字塔太陽能微電網不同指揮調度法的性能分析	59
4.1	系統設計	59
4.1-1	4+4 實體系統	59
4.1-2	4+4 模擬系統	65
4.2	實驗結果	66
4.2-1	實體及模擬結果比較	66
4.2-2	三種調度法結果比較	74
第五章	4+4 微電網最佳個體戶組合研究	80
5.1	系統設計	80
5.2	模擬結果分析	85
第六章	結論與未來展望	96
6.1	結論	96
6.2	未來展望	98
參考文獻	99

圖目錄



圖 1.1-1、隔離混合式太陽光發電系統(HyPV)	2
圖 1.1-2、自用型雙儲能太陽光電系統(HyS)架構圖	2
圖 1.1-3、金字塔微電網	3
圖 1.2-1、8 戶系統微電網架構圖	4
圖 1.3-1、電力調度指揮方式	5
圖 1.3-2、4+4 微電網組合	5
圖 2.1-1、HyPV 系統架構圖	7
圖 2.1-2、HyS 系統架構圖	7
圖 2.1-3、kw1230 充放電控制器	8
圖 2.1-4、蓄熱流程圖	9
圖 2.1-5、HyPV-net2 系統架構	10
圖 2.1-6、HyS-net2 系統架構圖	11
圖 2.1-7、HyPV-microgrid 系統架構的 HyPV-net4 單元	11
圖 2.2-1、隔離混合型太陽光電系統的買電與賣電達成條件	14
圖 2.2-2、HyS 蓄熱流程圖	16
圖 2.2-3、HyS 於需量反應下調度流程圖	17
圖 2.2-4、HyS 於非需量反應下調度流程圖	18
圖 2.3-1、電力調度控制器架構	19
圖 2.4-1、A 層級調度	23
圖 2.4-2、HyPV-microgrid A 層級調度控制邏輯流程圖	24
圖 2.4-3、集權式指揮調度訊號傳送	25
圖 2.4-4、集權式指揮調度邏輯流程圖	26
圖 2.4-5、金字塔微電網電力線及訊號線概念圖	27



圖 2.4-6、分層式指揮調度 CANbus 訊號傳送關係圖	27
圖 2.4-7、分層式調度傳送編號關係圖	28
圖 2.4-8、分層式指揮調度邏輯流程圖	29
圖 2.4-9、機動式指揮調度步驟(一)	30
圖 2.4-10、機動式指揮調度步驟(二)	30
圖 2.4-11、機動式指揮調度步驟(三)	31
圖 2.4-12、機動式指揮調度控制邏輯流程圖	32
圖 2.4-13、進行電力調度流程圖	33
圖 2.4-14、解除電力調度流程圖	34
圖 2.4-15、分層式指揮調度透過 CANbus 向上傳輸資訊情況	37
圖 2.4-16、機動式、分層式及集權式一日 CANbus 傳送次數	37
圖 3.1-1、HyPV-net2 模擬系統模型架構圖	39
圖 3.1-2、HyPV-net2 系統模擬架構	42
圖 3.1-3、HyPV-net2 系統獨立運作模式	43
圖 3.1-4、HyPV-net2 系統電力調度模式	43
圖 3.1-5、HyPV-net2 系統模擬流程圖	44
圖 3.2-1、HyPV-microgrid 架構 4+4 電路模擬系統實體圖	45
圖 3.2-2、個體戶性能模擬器電路板[3]	47
圖 3.2-3、個體戶性能模擬器電路圖-核心部分(單晶片與控制按鈕)[3] ..	47
圖 3.2-4、個體戶性能模擬器電路圖-通訊部分(上)、顯示部分(下)[3]...	48
圖 3.2-5、HyPV 系統模擬電腦預處理的軟體部分介面圖與參數設定 ...	49
圖 3.2-6、個體戶與 CCU 同步器電路板	51
圖 3.2-7、系統運作循環圖	52
圖 3.2-8、同步器邏輯電路圖	52
圖 3.2-9、同步器工作波型圖	53

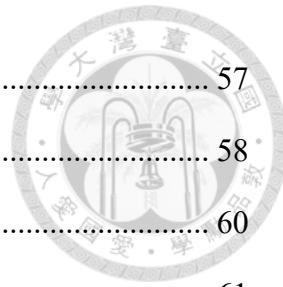


圖 3.3-1、HyS 於非需量反應期間的邏輯流程圖	57
圖 3.3-2、HyS 於需量反應期間的邏輯流程圖	58
圖 4.1-1、實體微電網架構圖	60
圖 4.1-2、U1 系統實體圖	61
圖 4.1-3、U2 系統實體圖	61
圖 4.1-4、U3 系統實體圖	62
圖 4.1-5、U4 系統實體圖	62
圖 4.1-6、U5 系統實體圖	63
圖 4.1-7、U6 系統實體圖	63
圖 4.1-8、U7 系統實體圖	64
圖 4.1-9、U8 系統實體圖	64
圖 4.1-10、Matlab 預處理介面	65
圖 4.2-1、日發電量對日輻射量變化圖(實體系統數據)	69
圖 4.2-2、日發電量對日輻射量變化圖(模擬系統數據)	69
圖 4.2-3、日調度量對日輻射量變化圖(實體系統數據)	70
圖 4.2-4、日調度量對日輻射量變化圖(模擬系統數據)	70
圖 4.2-5、實體及模擬之每日發電量差異圖	73
圖 4.2-6、實體及模擬之每日調度量差異圖	73
圖 4.2-7、三種調度法與實體實驗之總調度量變化圖	77
圖 4.2-8、三種調度法與實體實驗之總發電量變化圖	77
圖 4.2-9、Microchip OERR 發生原因圖	78
圖 4.2-10、Microchip 如何解決 OERR	79
圖 5.1-1、8 戶 HyPV 個體戶組合(微電網 A)	81
圖 5.1-2、8 戶 HyS 個體戶組合(微電網 B)	82
圖 5.1-3、4 戶 HyPV+4 戶 HyS 個體戶組合(微電網 C)	82



圖 5.1-4、負載模型 B，日間負載占全天 75%.....	83
圖 5.1-5、負載模型 D，日間負載占全天 25%.....	83
圖 5.1-6、金字塔微電網 4+4 系統架構與 HyPV-net2 單元翻轉對應指示.....	84
.....	84
圖 5.2-1、微電網 A 調度量對輻射量的變化圖(以互聯一為例).....	87
圖 5.2-2、微電網 A 發電量對輻射量的變化圖(以互聯一為例).....	87
圖 5.2-3、三種個體戶組合之調度量比較圖(以互聯一為例).....	88
圖 5.2-4、三種個體戶組合之發電量比較圖(以互聯一為例).....	89
圖 5.2-5、三種個體戶組合之發電量比較圖(以互聯一為例).....	89
圖 5.2-6、三種個體戶組合之不同因素導致發電提升量比較.....	90
圖 5.2-7、各互聯形式總調度量比較圖.....	91
圖 5.2-8、各互聯形式總發電量比較圖.....	92
圖 5.2-9、各互聯形式發電效益比較圖.....	93
圖 5.2-10、微電網 A 調度分配圖.....	94
圖 5.2-11、多組互補 HyPV-net2 組合成 HyPV-4、HyPV-8.....	95

表目錄



表 2.2-1、不同臨界放電量之整年模擬(日平均)[11].....	14
表 2.3-1、Modbus 協定之主從機通訊格式.....	21
表 2.3-2、CANbus2.0A 資料訊框格式(data frame)	22
表 2.4-1、分層式調度運算和訊號.....	29
表 2.4-2、各調度演算法調度連接資訊傳送次數.....	35
表 2.4-3、一日 CANbus 傳輸量公式 (86400 為一日之秒數)	37
表 3.2-1、同步器輸出真值表.....	53
表 4.1-1、8 戶個體戶簡介.....	60
表 4.1-2、U1 及 U2 詳細規格	61
表 4.1-3、U3 及 U4 詳細規格	62
表 4.1-4、U5 及 U6 詳細規格	63
表 4.1-5、U7 及 U8 詳細規格	64
表 4.2-1、實體 4+4 微電網 30 日主要數據.....	67
表 4.2-2、機動式模擬 4+4 微電網 30 日主要數據.....	68
表 4.2-3、實體及模擬差異比較	72
表 4.2-4、集權式模擬 4+4 微電網 30 日主要數據.....	75
表 4.2-5、分層式式模擬 4+4 微電網 30 日主要數據.....	76
表 4.2-6、RS485 掉包次數比較	79
表 4.2-7、軟體改良前後掉包率比較	79
表 5.1-1、代表日分類定義	80
表 5.1-2、2016 年三種天氣狀態比例與平均輻射量	81
表 5.1-3、七種互聯形式所對應每一組 HyPV-net2 的每月用電量	84
表 5.2-1、微電網 A	85

表 5.2-2、微電網 B	85
表 5.2-3、微電網 C	86
表 5.2-4、以不同層級調度類比方式形容各互聯形式之互補性組合	93
表 5.2-5、以不同層級調度類比方式形容各互聯形式之互補性組合	95



第一章 緒論



1.1 研究背景

隨著科技的發展，電，已經是人類所需要之最重要的能源。而龐大的用電量必須倚賴各種來源供應，如火力發電、核能發電、太陽能發電……，但由於近年來環保意識的高漲，且核能發電除了產生的核廢料問題外，更有安全上的疑慮，尤其在日本福島核災事件之後，許多國家包括工業大國德國等都極力倡導廢核，我國政府更喊出了非核家園[1]的口號，預計在幾年後達成全面廢核並且再生能源佔比達 20%，其中太陽能總累計安裝量更要達到 20GW 的目標，太陽能光電將可成為未來主要的電力來源，故台大新能源中心遂以太陽能相關之研究為主要研究。

目前政府鼓勵民間裝設太陽能板發電並回售電網的做法並不洽當，因為回售電網過多電能時會使電網輸配電產生問題，致使必須花費更多的成本來更新電網。如德國政府在過去雖補貼了併網型太陽能系統，但近年來的政策變成只有具備儲能功能的系統才有補貼。台大新能源中心為解決此問題，開發了隔離混合型太陽光發電系統(HyPV, Hybrid PV system) 如圖 1.1-1，在太陽能充足時使用太陽能供電，此為 PV-Mode，而在太陽能不足時則切換由市電供電，為 Grid-Mode，兩模式自動切換，發電自用不回售電網，以避免電網輸配電問題。HyPV 採系統匹配設計與太陽能直充電技術。近最大功率點操作設計(nMPPO, Near-Maximum-Power-Point-Operation Design)[2]，可降低能量轉換的損失與系統的故障率，並利用蓄電池日間儲存太陽能以供應夜間負載，解決太陽下山後用電問題，達到替代核電基載的效果。

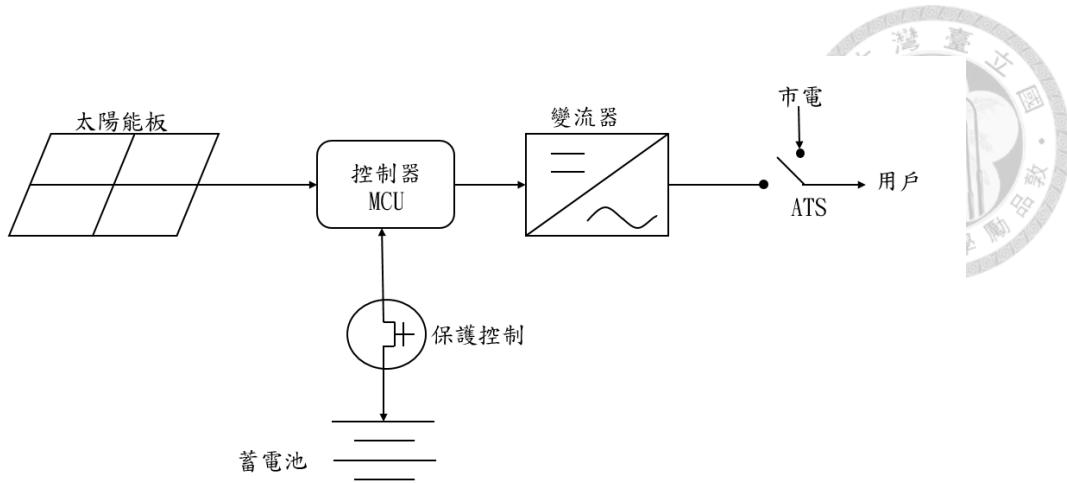


圖 1.1-1、隔離混合式太陽光發電系統(HyPV)

然而太陽光電不回售電網，使得儲能對於系統的放能影響很大，若蓄電池達飽充狀態時且負載用電量小，就會造成太陽能的發電損失。但負載用電及太陽輻射量的變動很大並難以精準預測，使得很難預估蓄電池何時達到飽充。選用越大的儲能裝置雖然越有利於 HyPV 系統的發電效能，但成本也隨之升高。為了解決此問題，台大新能源中心提出金字塔微電網的概念[3][4][6][7][11]，以鄰近之個體戶互聯相互支援太陽電力，平衡用戶間的負載，有效分配太陽能，提升整體系統發電效能。台大新能源中心也提出了雙儲能系統(HyS)除了蓄電也利用熱水器蓄熱[5]，以蓄熱代替部分的蓄電以降低蓄電池的成本，如圖 1.1-2，而 HyS 更有需量反應[5]的功能，減少台電的尖載供電壓力，使其更具經濟效益。

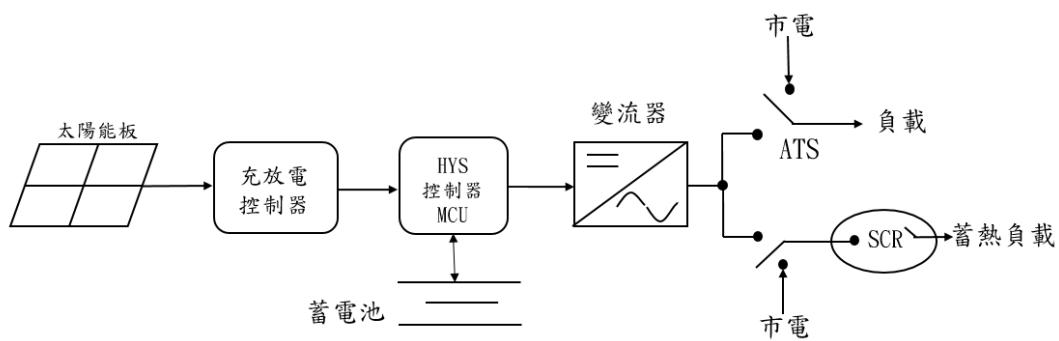


圖 1.1-2、自用型雙儲能太陽光電系統(HyS)架構圖

台大新能源中心所提出的金字塔太陽能微電網架構如圖 1.1-3。每個個體戶以 HyPV 為基礎單元，透過電力節點兩兩合為一組，向上堆疊形成由下而上的金字塔微電網。因此當其中一戶用電量高時，其他用戶可以將多餘的太陽電力提供給該戶使用，以提升整體的發電效能。

新能源中心目前已製作安裝過兩戶(1+1)HyPV 和四戶(2+2)HyPV 實體微電網系統另也開發八戶 (4+4)HyPV 系統模擬器[3]，以進行快速的模擬分析並降低實作成本和測試時間。本研究則擬實作四戶 HyPV 系統另增加四戶 HyS 系統的八戶(4+4)微電網系統，並利用現有的八戶(4+4)微電網模擬器硬體，加入 HyS 模擬軟體來進行分析，再利用模擬器模擬在不同戶數包含 HyPV 及 HyS 組合的八戶微電網，探討包含 HyS 的金字塔微電網整體效能與經濟效益，並研究三種電力調度技術對微電網系統效能的影響。

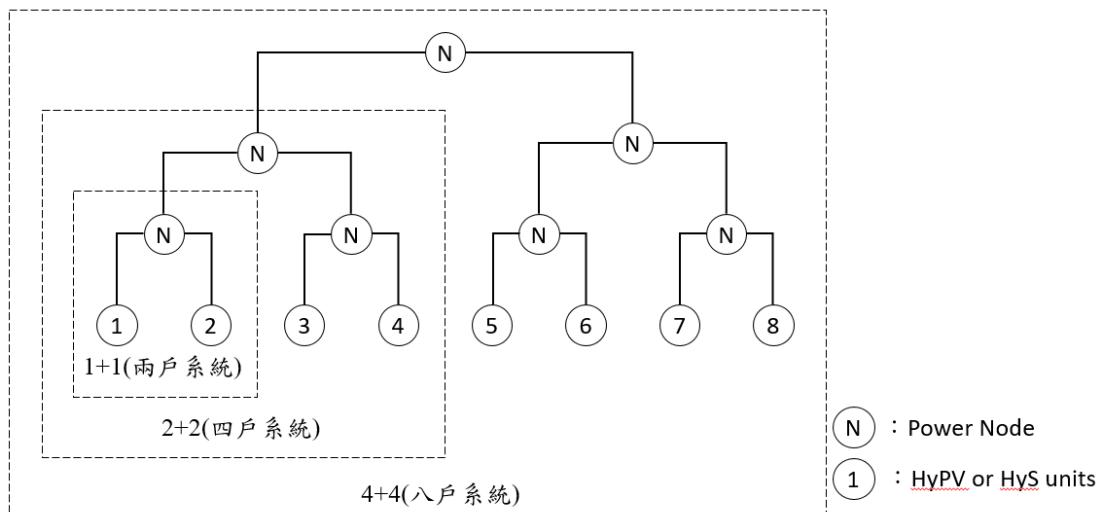


圖 1.1-3、金字塔微電網



1.2 研究動機與目的

金字塔太陽能微電網之研究已進行多年[3][4][6][7][11]，電路設計和電力控制邏輯不斷進行優化。但以前在實作方面僅有四戶(2+2)系統且個體戶皆為 HyPV 系統，而模擬器雖有八戶但也都是 HyPV 系統。本研究利用舊有四戶(2+2)HyPV 實體系統並新增四戶(2+2)HyS 實體系統形成新的八戶微電網實體系統 如圖 1.2-1，並延用舊有八戶微電網模擬器硬體及 HyPV 模擬軟體，新加入 HyS 模擬軟體，以模擬四戶 HyPV 系統加四戶 HyS 系統的八戶(4+4)微電網系統性能，再與實體數據進行驗證。然後用模擬器模擬各種個體戶組合的微電網效能。

本研究有以下目的：

- (1) 驗證模擬系統對實體系統的準確度。
- (2) 研究包含 HyS 與 HyPV 的微電網發電效益。
- (3) 研究微電網電力調度可靠度。

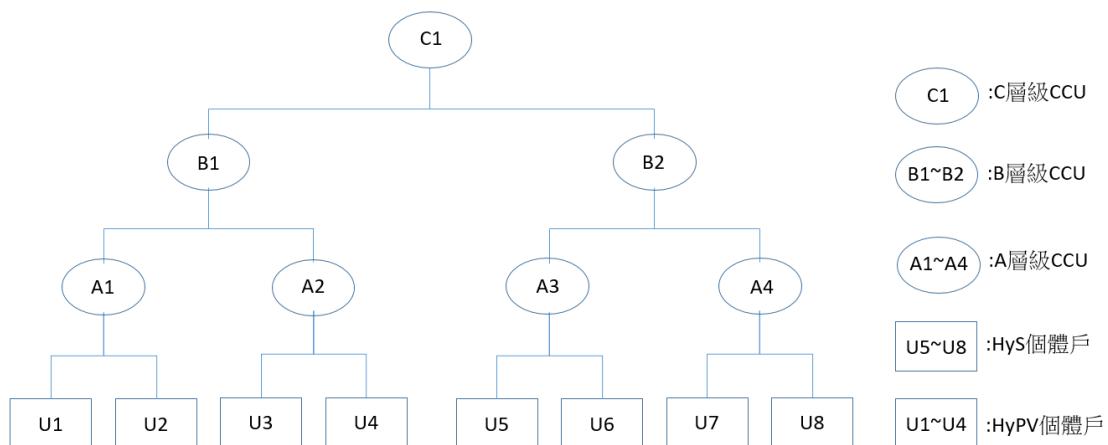


圖 1.2-1、8 戶系統微電網架構圖

1.3 研究內容

本研究內容包含以下四個部分：

- (1) 搭建實體 8 戶(4 HyPV+4 HyS)系統，並取其數據。
- (2) 加入 HyS 模擬程式於個體戶模擬器，並模擬 4 戶 HyPV 加 4 戶 HyS 的八戶微電網系統，再與實體數據比較，分析其準確度。
- (3) 以模擬系統探討三種電力調度方式[3][6]如圖 1.3-1 的優劣。
- (4) 以模擬系統探討三種個體戶組合：8 戶 HyPV、8 戶 HyS 以及 4 戶 HyPV 加 4 戶 HyS 如圖 1.3-2 的微電網效益。

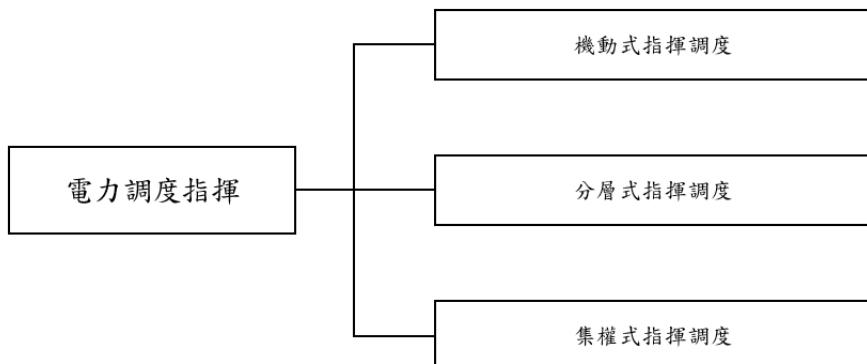


圖 1.3-1、電力調度指揮方式

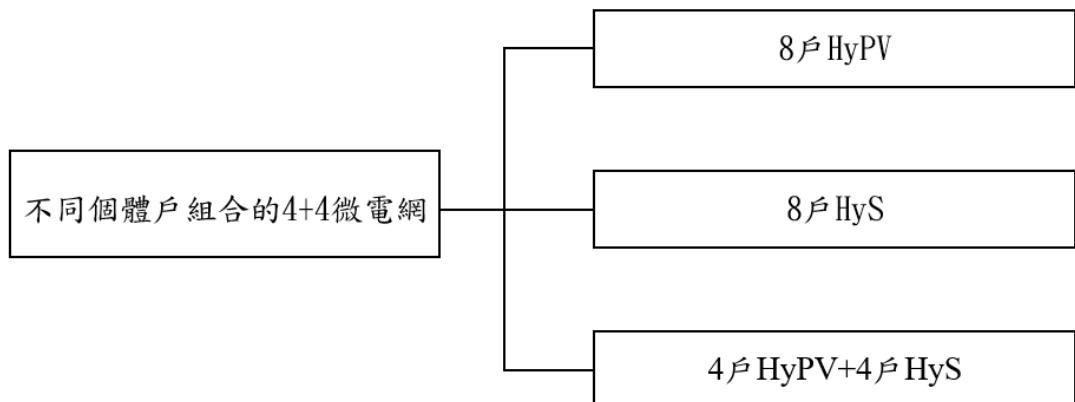


圖 1.3-2、4+4 微電網組合

第二章 金子塔太陽能微電網架構



2.1 微電網系統架構

2.1-1 HyPV 架構

隔離混合型太陽光電系統(HyPV)是在獨立太陽光電模式(PV Mode)與市電模式(Grid Mode)之間作自動切換的分散式發電系統。當太陽光發電充足由太陽光電系統供給負載全部用電，若有多餘的發電量利用蓄電池做儲存而不回售電網，稱「太陽光電模式(PV Mode)」；太陽光發電不足時，則將負載用電切換到市電供應，稱「市電模式(Grid Mode)」，讓市電與太陽光電完全獨立運作，即「單向併網自用型」。HyPV 的基本組成有：太陽光電板、電力控制器、蓄電池、逆變器、負載。圖 2.1-1 為 HyPV 系統架構圖，其中 HyPV 電力控制器功能包括：(1)充放電控制(蓄電池)，包含充放電的限流、防止電流回充太陽能板等保護設計；(2)供電模式切換控制(PV/Grid Mode)。

蓄電池在系統中扮演著緩衝及儲存能量的功用，蓄電池的充放電控制將影響蓄電池的使用壽命及系統效益。蓄電池充放電控制的主要功能是保護蓄電池並延長蓄電池的使用壽命。控制器控制了由光電板進入蓄電池的充電量(即蓄電池充電電壓控制)，也包含蓄電池放電深度控制。

太陽光電板所產生的電力將優先提供給負載，若有多餘的發電量才儲存於蓄電池，假如太陽光電板發電量小於用電量，則蓄電池釋放電力補充其不足電量，當太陽光電板發電量和蓄電池蓄電量不足時，控制器將調控 ATS(Automatic Transfer Switches)使系統切換為 Grid Mode 由市電供給負載，此時太陽光發電全部提供電池充電，待滿足太陽光電可供給負載用電時，再切換回 PV Mode 由太陽光電板及蓄電池對負載供電。

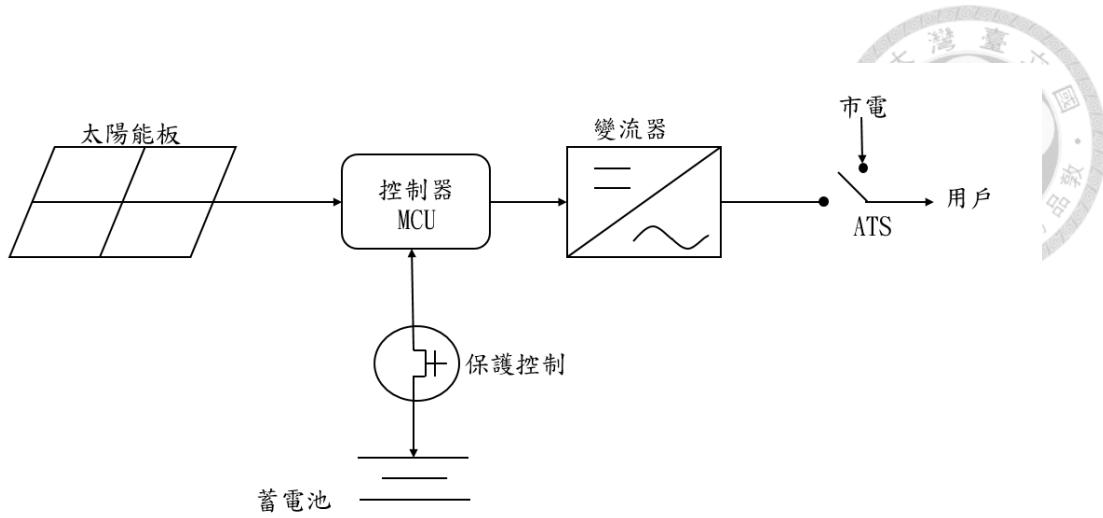


圖 2.1-1、HyPV 系統架構圖

2.1-2 HyS 架構

HyS 整體架構如圖 2.1-2，其基本組成為：太陽光電板、充放電控制器、HyS 控制器、蓄電池、逆變器、負載、SCR 功率控制器、電熱水器。不同於 HyPV 系統，HyS 的充放電控制是使用市售的充放電控制器來維持太陽能的發電效率並對電池充電，僅放電的部分是由 HyS 的控制器進行控制。以 24V 蓄電池系統必須搭配 kw1230 充放電控制器如圖 2.1-3。

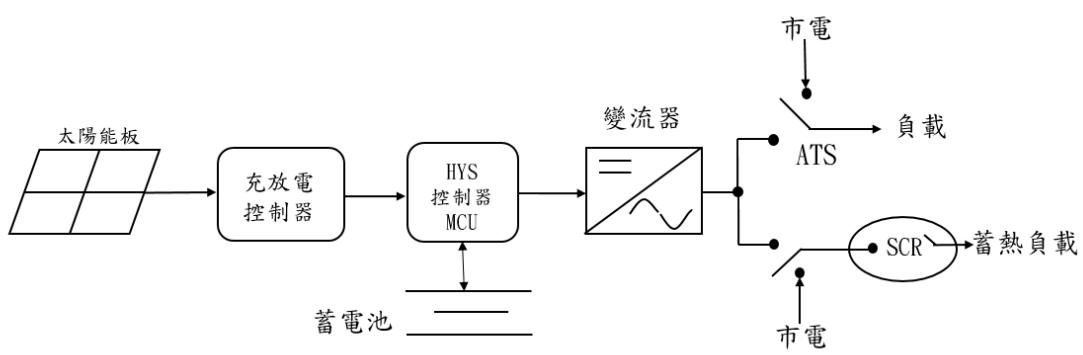


圖 2.1-2、HyS 系統架構圖



圖 2.1-3、kw1230 充放電控制器

系統負載與蓄熱裝置運作時會在兩種模式間做切換，一種為太陽能供電模式 (PV mode)，另一種為市電供給模式(Grid mode)。在太陽能發電量及電池蓄電量不足時，負載端會以市電模式運作，也就是由市電來供給負載，而當太陽能和電池蓄電量充足時，負載端便會切換到太陽能模式，太陽能所發的電與蓄電池的電將會透過逆變器供給負載。當太陽夠大時，太陽能板會提供大部分的電，而太陽變小時則由電池來補足太陽能功率不足的部分。通常電力充足時優先給予負載使用，但是如果負載使用量不大而且太陽能還持續發電時，將負載切換到市電，然後電熱水器切換到太陽能模式來蓄熱，讓太陽能不會因為電池達到飽充而限制太陽能發電。

相比於 HyPV 系統，HyS 系統除了多了熱水器可以蓄熱使太陽能發電效益更高外，HyS 系統更有需量反應的概念[5]。簡單來說，需量反應即是在用電尖峰時盡可能的使用太陽能發電，令用戶使用市電的比例減少，以此來減少台電用電尖峰時的供給壓力。一般我們認為用電尖峰是在下午 13:00~15:00 及晚上 19:00~21:00，此段時間稱為需量反應期間，因此在非需量反應期間只有在電池電量非常充足的情況下才以太陽能提供負載用電，以此來令需量反應時負載有足夠的太陽能電量使用。在需量反應期間 HyS 負載會使用太陽能的發電量及蓄電池的電量，直到電池蓄電量不足，才切回市電模式使用市電供給負載。

蓄熱方式：在太陽能模式供電給負載時，如果電池接近飽充且負載用電量不大，則會將負載用電切至市電，並將太陽能供電轉給熱水器蓄熱，使太陽能發電使用率更高。定義蓄熱電壓為判斷電池可以進行蓄熱的電壓，高於此電壓值代表接近飽充。當電池電壓超過蓄熱電壓且負載用電量小並且維持 25 分鐘，電熱水器便會切換為太陽能供電蓄熱，負載此時則切至市電。如果加熱的溫度超過熱水器設定的上限溫度時，便會停止加熱，然後將負載用電切回至太陽能供電，圖 2.1-4 為判斷流程示意圖。

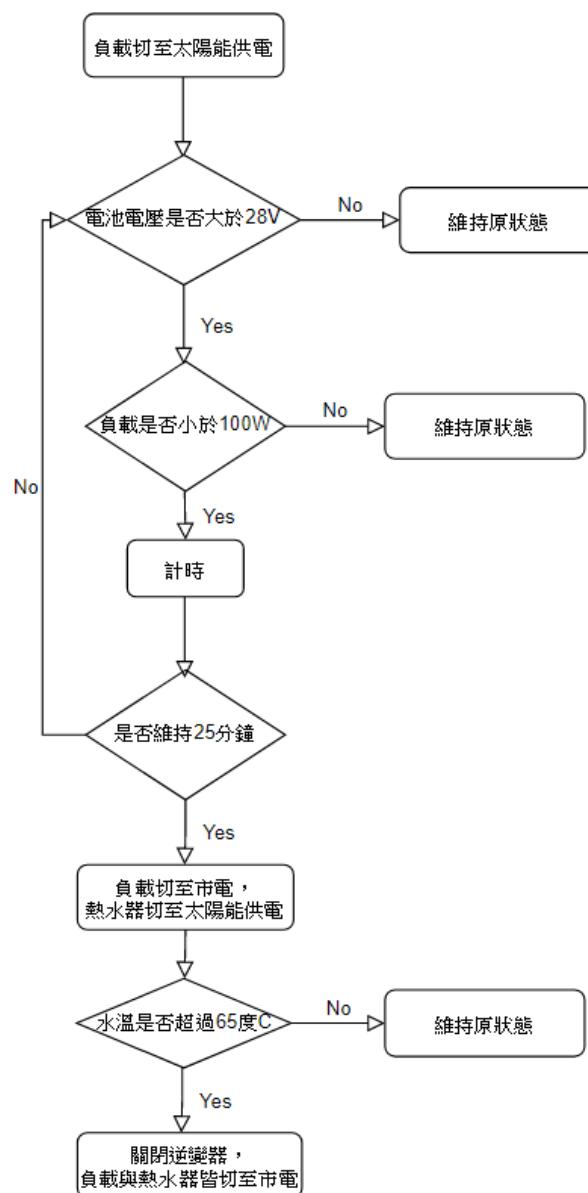


圖 2.1-4、蓄熱流程圖

2.1-3 互聯中央控制器(CCU, central controller unit)架構

金字塔微電網最基本的互聯單元是 HyPV-net2[4]，定義 HyPV-net2 是由兩個獨立 HyPV 個體戶或兩個獨立 HyS 個體戶利用一個電力調度控制器(Central Controller Unit, CCU)進行交流電力調度控制，為方便敘述，本文皆以 HyPV-net2 代表。定義直接與個體戶進行 RS-485 訊號傳輸之 CCU 為 Master-CCU，使用 Master-CCU 中的內部調度繼電器可以將兩個獨立 HyPV 的交流端連結，達成 A 層級調度。Master-CCU 會以間隔一定的時間接收從屬的兩個獨立 HyPV 資訊，判斷兩個 HyPV 是否需要進行電力調度。而已在調度狀態時，判斷兩個 HyPV 是否需要解除電力調度，如圖 2.1-5；若個體戶為 HyS 則其架構如圖 2.1-6，HyS 只有負載會參與調度，蓄熱的熱水器是不參與調度的，所以其 Master-CCU 的內部調度繼電器連接的地方為負載端的 ATS。

以下皆以 HyPV-net2、HyPV-net4、HyPV-net8……代表不同 HyPV 及 HyS 組合之微電網。

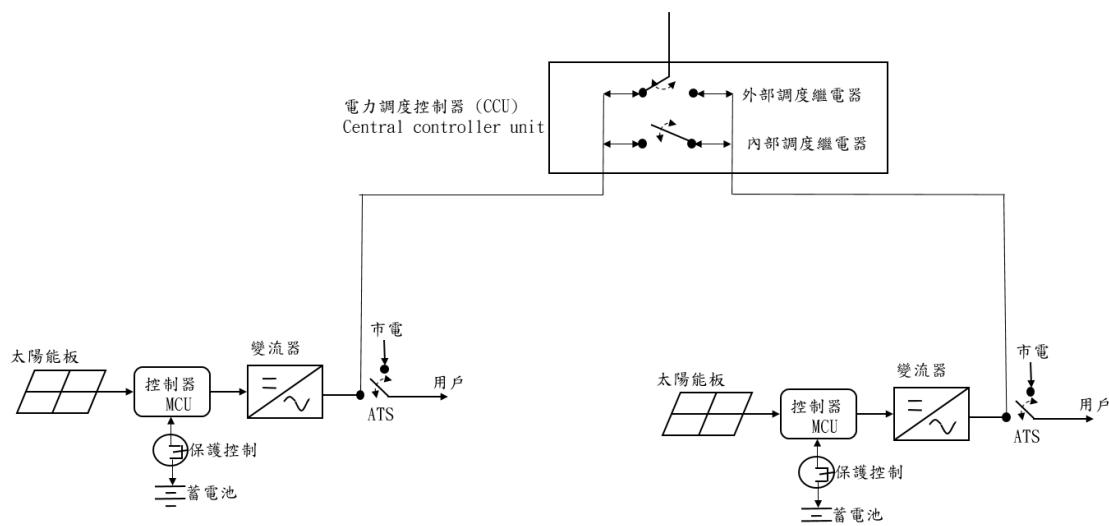


圖 2.1-5、HyPV-net2 系統架構

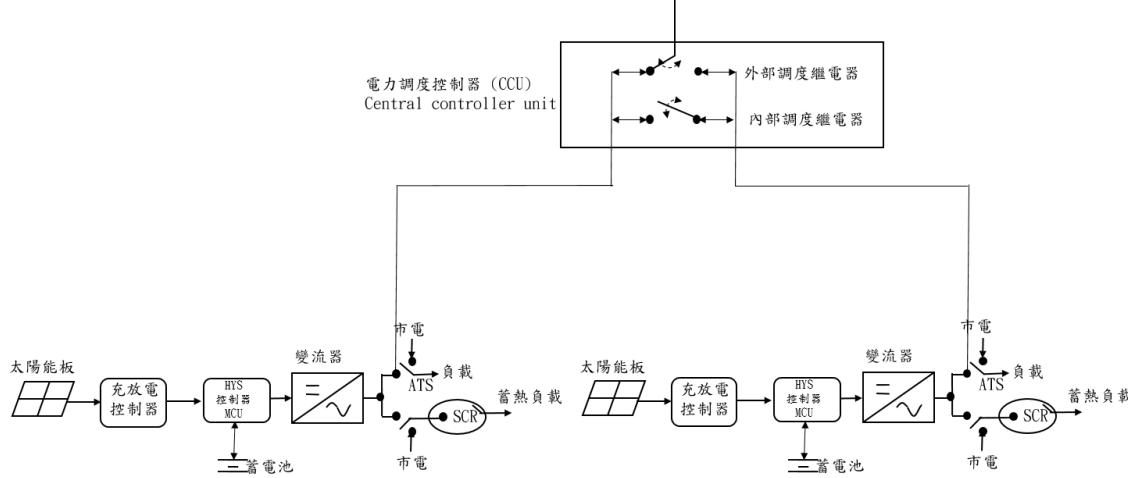


圖 2.1-6、HyS-net2 系統架構圖

微電網調度決策以 HyPV-net2 單元內是否可互相調度為優先，視為 A 層級調度，調度條件達成則使用單元內的 Master-CCU 內部調度繼電器，若在 HyPV-net2 單元內無法達成調度條件，Master-CCU 會向外尋找電網中的其它 HyPV-net2 是否有可互相支援的系統，並藉由外部調度繼電器，進行買電或賣電的動作，視為多層級調度，如圖 2.1-7。A 層級調度和多層級調度的區別在於，一個 A 層級調度只會使用一台 Master-CCU 的內部繼電器達成，而多層級調度會使用 Master-CCU 及其他非 Master-CCU，以外部和內部繼電器設計出電力調度路線。

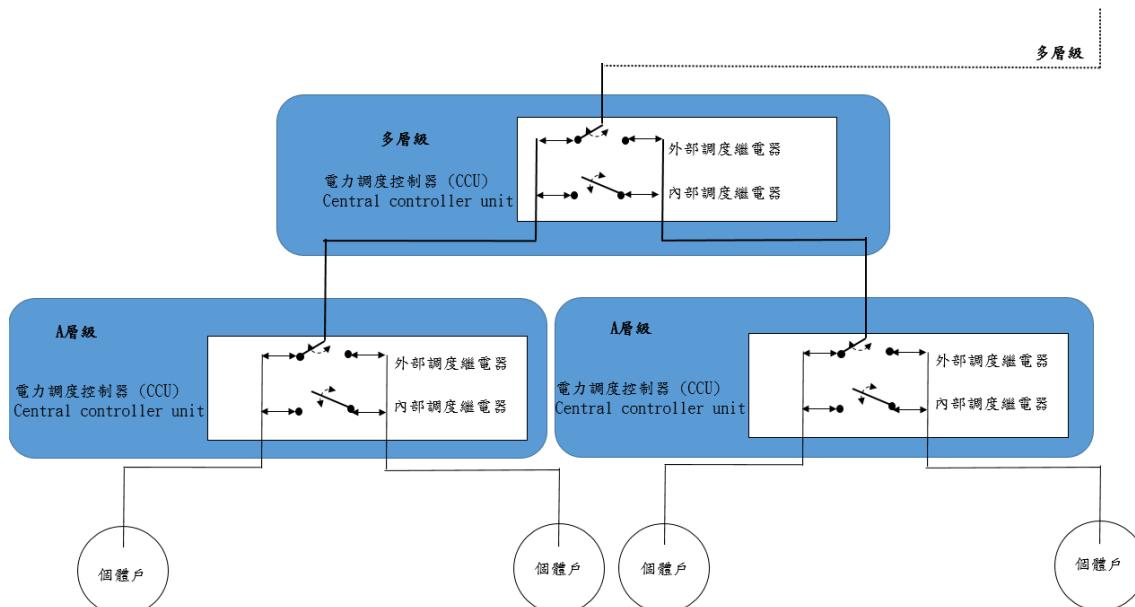


圖 2.1-7、HyPV-microgrid 系統架構的 HyPV-net4 單元

HyPV-net4、HyPV-net8……等更高層級的微電網，系統架構皆是以 HyPV-net2 為基礎，本研究主要研究 HyPV-net8 也就是是 4+4 的八戶微電網架構，在 4+4 微電網中包括 A 層級調度以及 B 層級調度、C 層級調度的多層級調度，定義在其不同層級調度下的最高層 CCU 為 A1~A4、B1~B2 及 C1，個體戶分別為 U1~U8。在 HyPV-net8 微電網中，將兩組 HyPV-net2 利用一個更高層級的電力調度控制器(B1 or B2)做連結，定義為 B 層級調度，為 HyPV-net4 架構，若是兩組 HyPV-net4 利用一個更高層級的電力調度控制器(C1)做連結，則定義為 C 層級調度，為 HyPV-net8 架構，如圖 2.1-8。對於更高層級的微電網也可以依此類推，一層一層向上堆疊而成的金字塔狀網路，電力線架構為完滿二元樹(Full Binary Tree)[8]。藉由 CCU 中的外部調度繼電器，可以將 HyPV-net2 中的其中一個個體戶的電力外送或接收，而是否達成調度條件，由各 Master-CCU 在一定的時間內接收從屬的 HyPV 或 HyS 資訊，判斷其從屬之個體戶為可賣電或可買電的狀態。

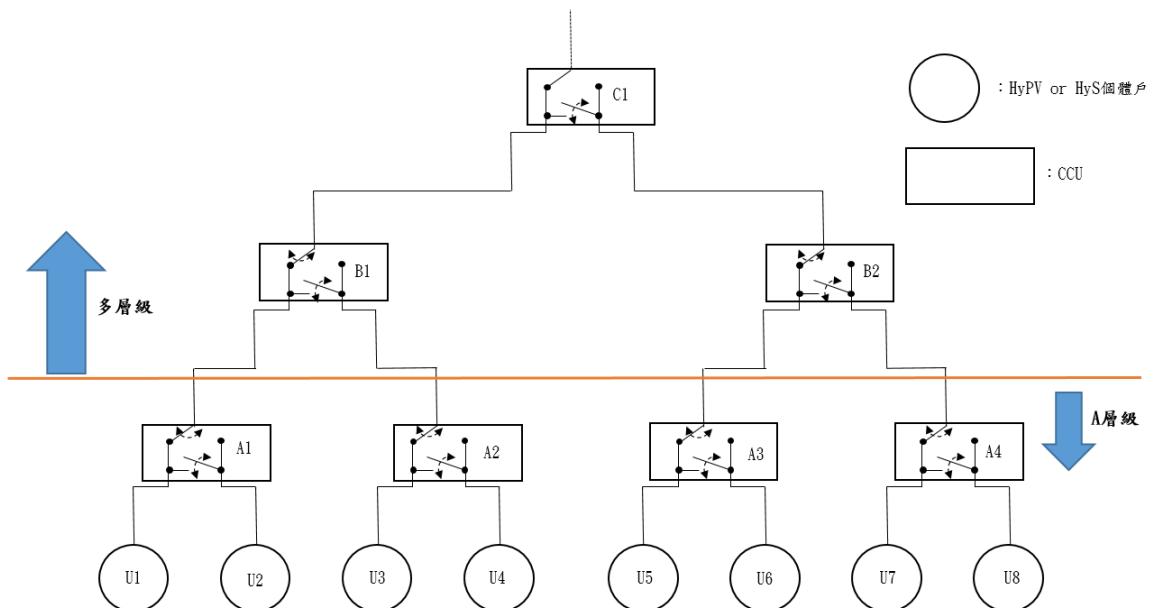


圖 2.1-8、HyPV-net8 系統架構



2.2 微電網系統買電與賣電條件

2.2.1 HyPV 買賣電條件

HyPV-microgrid 金字塔微電網的調度控制目的是使太陽能發電量可以在整個微電網內得到最大的使用率，其調度控制方式必須由每一個 HyPV-net2 單元內的 Master-CCU 取得從屬的 HyPV 資訊後，分析電力調度條件參數，判斷在電網中是否有適當的賣電戶與買電戶可進行電力調度。為使調度最佳化，定義 CCU 電力調度條件參數[9] [11]：

$$V_H = \text{賣電戶的高電壓(V)} = 28 \text{ 伏特}$$

$$V_L = \text{買電戶的低電壓(V)} = 26 \text{ 伏特}$$

$$D_B = \text{臨界放電量(Ah)} = 15\text{Ah}$$

HyPV 系統為單向併網自用型，若其本身在飽充電壓時，發電量會受到限制因而降低發電效率，為了避免此現象發生並使 HyPV 發電效能提高，我們定義當 HyPV 電壓超過 V_H 時，會被判定為具賣電戶身分並認為該 HyPV 應使多餘的電力外送，藉此提升發電效益；當 HyPV 電壓小於 V_L 時，則會被判定為具買電戶身分，認為該 HyPV 需要電力支援，藉此妥善地將電力送至真正需要的 HyPV 系統中，若微電網內發現符合上述兩個條件，將能進行電力調度使發電效益提升。而有時 HyPV-net2 單元內會產生兩台 HyPV 都具買電戶的身分，此時將取消電壓較高的 HyPV 戶，保持 HyPV-net2 單元內只有一個買電戶，且該買電戶將為蓄電池電壓最低的 HyPV 戶，其可蓄電量最大也就是最適合買電的系統，滿足妥善運用電力的原則；而若發生兩台 HyPV 都為賣電戶則將電壓較低之 HyPV 戶取消賣電戶身分，如圖 2.2-1。

買賣電戶達成條件	電力調度控制器(CCU)判斷結果
$V_A > V_H, V_B < V_L$ Or $V_A < V_L, V_B > V_H$	A、B相互支援
$V_A > V_H, V_B < V_H$	V_A 為賣電戶
$V_A > V_H, V_B > V_H$	V_A 與 V_B 較高的為賣電戶
$V_A < V_L, V_B > V_L$	V_A 為買電戶
$V_A < V_L, V_B < V_L$	V_A 與 V_B 較低的為買電戶

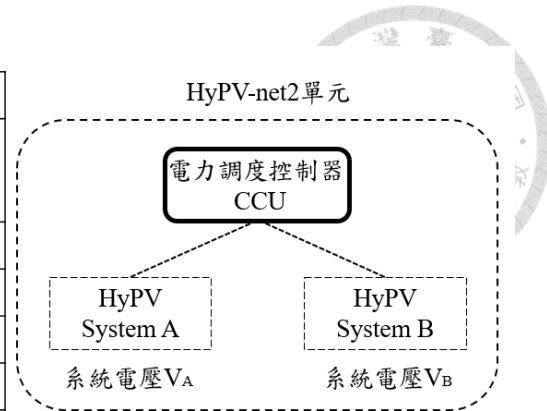


圖 2.2-1、隔離混合型太陽光電系統的買電與賣電達成條件

金字塔微電網利用 HyPV 電壓來判斷買電戶與賣電戶是一種較不精準的方法，理論上應以電池殘電量來作為判斷標準，但是 HyPV 系統不易產生一次完整的充放電循環，加上電池老化的因素會使電池充放電特性因使用時間的長短而改變，故殘電量估測較難實現，所以採取電池電壓做為判斷依據[10]來替代殘電量估測法， V_L 、 V_H 即是經由計算後能使微電網調度最佳化的電池殘電量的代表電壓值[11]。

D_B 是計算當電力調度時賣電戶的蓄電池最大淨放電量，當達到或超過 D_B 時，代表電池已放出一定電量，而太陽能發電量將不再被電池飽充的原因限制，所以可以終止電力調度模式。調整 D_B 值，將會影響整體系統的 ATS 切換次數與太陽能發電量，如表 2.2-1[11]。

表 2.2-1、不同臨界放電量之整年模擬(日平均)[11]

D_B (Ah)	0	10	20	30
kWh/kWp	2.423	2.482	2.482	2.482
PV發電量(Wh)	4748.78	4865.36	4865.30	4865.30
ATS切換次數/天	2.6	4.6	4.4	4.3
調度次數/天	0.0	0.5	0.5	0.5



2.2-2 HyS 買賣電條件

HyS 相比於 HyPV 多了需量反應及蓄熱功能，所以調度成立的買電與賣電條件也略有不同。HyS 的需量反應功能主要是希望減少在用電尖峰時對市電的使用，因此在一天的用電尖峰時，最好能完全使用太陽能及蓄電池的電能，而用電尖峰一般認為是在下午 1 點到 3 點及晚上 7 點到 9 點，故稱此時間為需量反應期間。因上述概念，HyS 在微電網中僅可在非需量反應期間賣電，買、賣電條件與 HyPV 相同；若在需量反應期間，HyS 會優先提供給自己的負載用電，而若 HyS 想要買電的話，則設定其電池電壓必須處於低電壓(24V 以下)或是其電池電量(30Ah 以下)非常低才可進行買電。

至於蓄熱功能如圖 2.2-2，在電池電壓超過 28 伏特且負載用電小於 100W 持續 25 分鐘蓄熱旗標才會升起並將負載切至市電、熱水器切至太陽能供電。而因為必須維持在電池電壓高於 28 伏特 25 分鐘，才會進行蓄熱，故在蓄熱旗標升起前，此個體戶皆視為可以賣電的狀態，在此期間若有其他個體戶可以買電的話，則會連結該個體戶與此戶並進行調度，若達成調度則不會再繼續判斷其維持 25 分鐘與否，也就是說 HyS 在用電分配上優先權調度大於蓄熱，其需量反應及非需量反應的流程圖分別如圖 2.2-3 及圖 2.2-4。

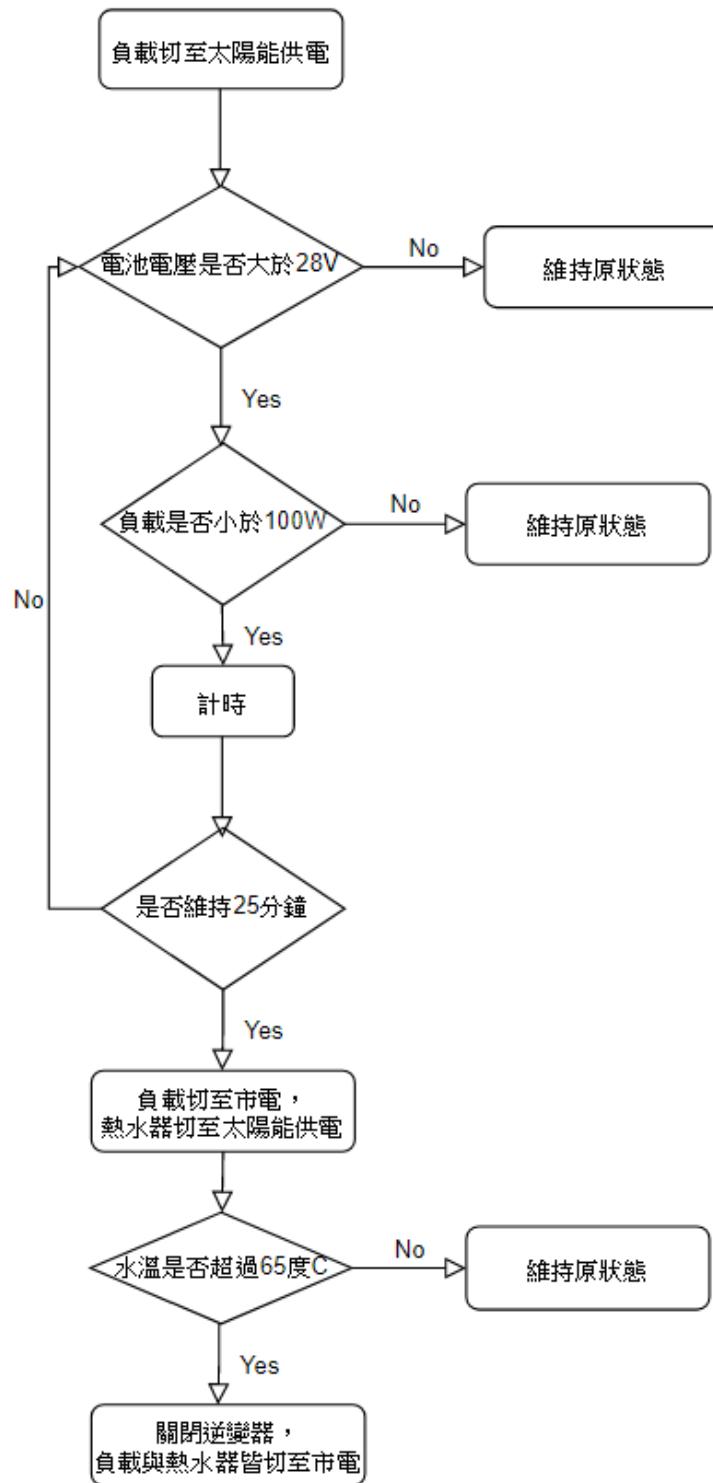


圖 2.2-2、HyS 蓄熱流程圖

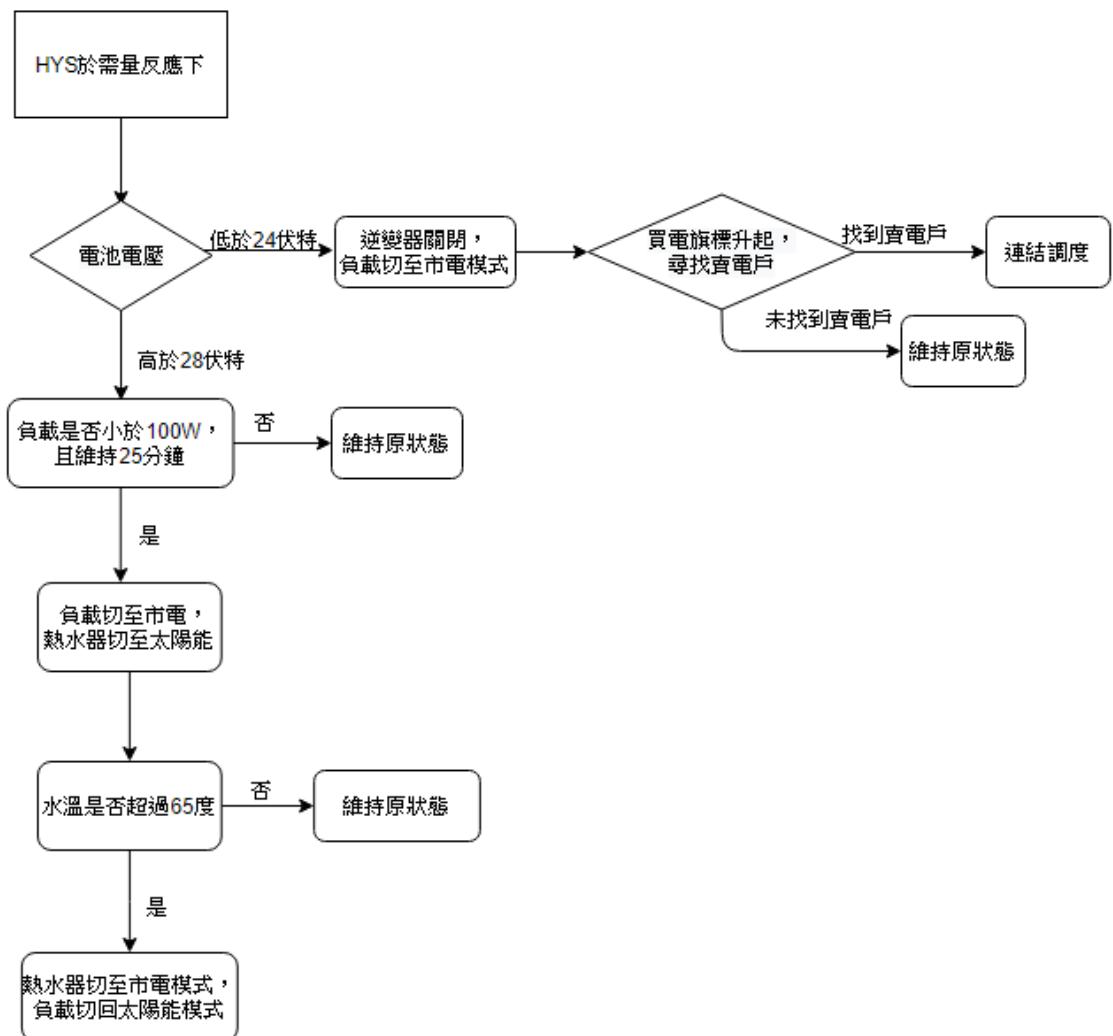


圖 2.2-3、HyS 於需量反應下調度流程圖

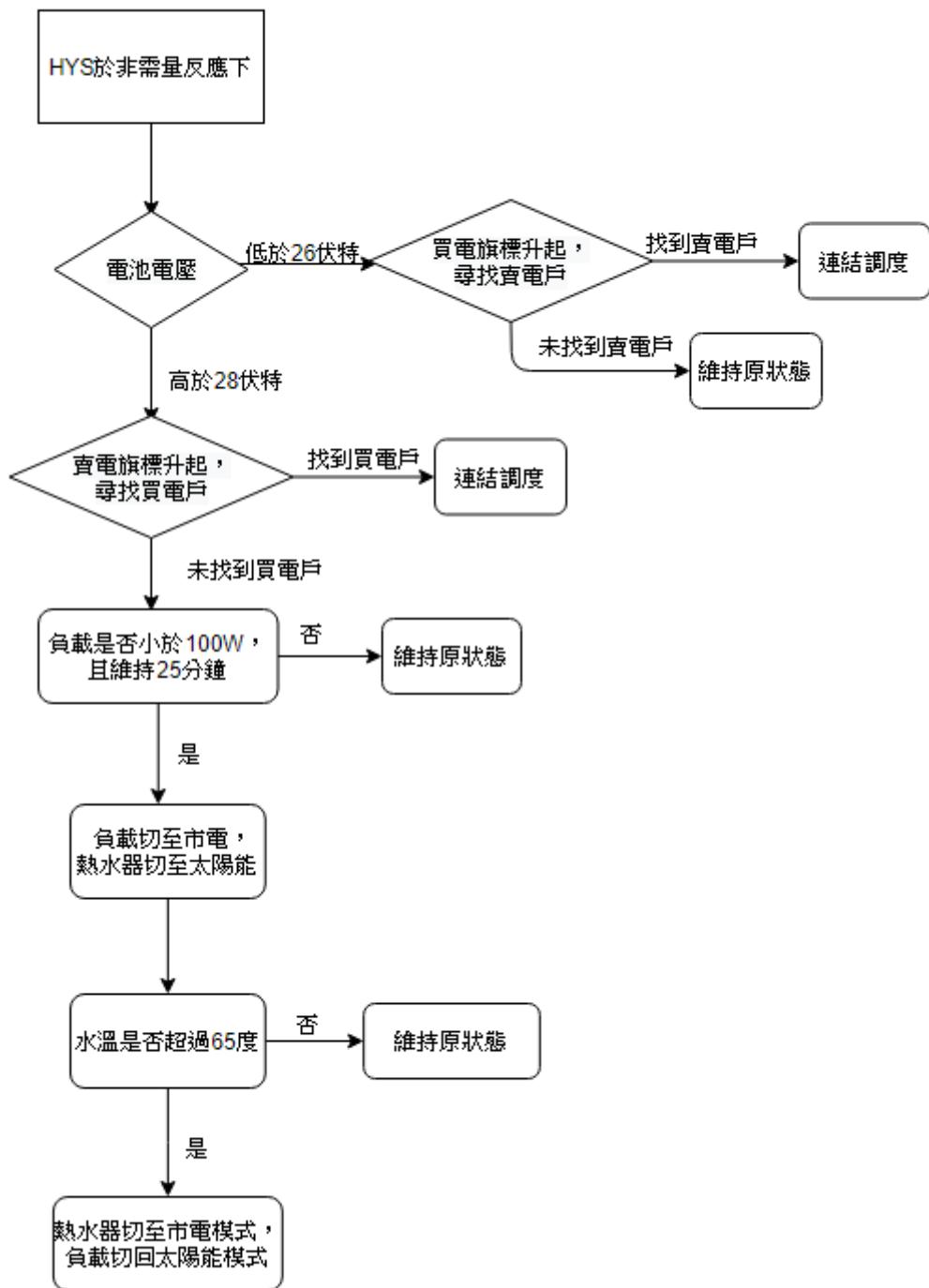


圖 2.2-4、HyS 於非需量反應下調度流程圖



2.3 電力調度控制技術與通訊技術

2.3-1 電力調度控制技術

HyPV-microgrid 架構的電力調度控制器沿用前幾代的電力調度控制器設計 [3][4][7]，有雙繼電器設計，訊號方面經改良後採用雙訊號設計 [3]，將 Master-CCU 與 HyPV 間的訊號及各 CCU 之間互傳的訊號隔離，優化通訊品質，使微電網可以提供更穩定的電力調度。圖 2.3-1 為電力調度控制器架構圖，分別以紅色虛線表示 RS-485 通訊、藍色虛線表示 CANbus 通訊、黑色實線則為電力線。可以看到 485 通訊線連結 Master-CCU 及從屬個體戶，而 CANbus 通訊線則連結所有 CCU，並且兩種通訊線是分離的。電力調度方面的話，在 A 層級電力調度使用的是內部調度繼電器；多層級電力調度則使用外部調度繼電器，搭配當次調度之最高層 CCU 的內部調度繼電器。

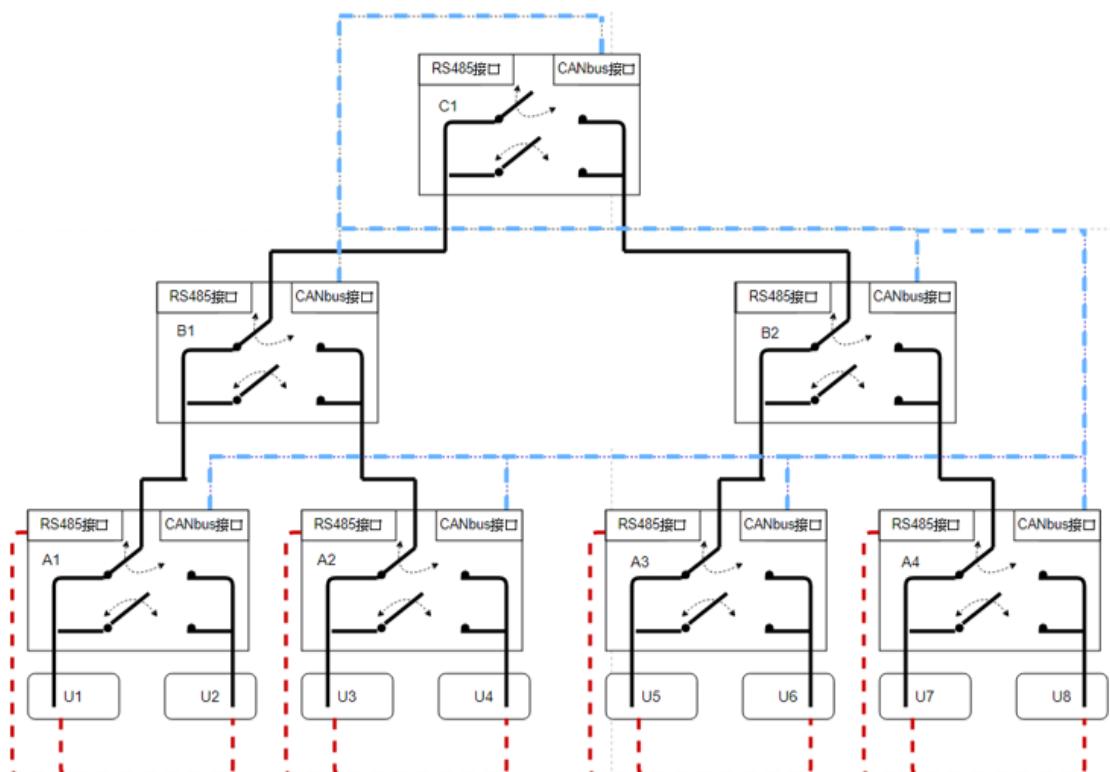


圖 2.3-1、電力調度控制器架構



2.3-2 通訊技術 RS-485 與 CANbus

HyPV-microgrid 系統通訊架構區分成兩大部分：

(1) RS-485：訊號線串聯了同一個 HyPV-net2 中的 CCU 與它從屬的兩個 HyPV，使其在同一條 Bus 上，故 CCU 可發訊號給任一台 HyPV，不需要經過任何轉接的步驟，硬體架構如圖 2.3-2，以 Master-CCU A1 及其從屬個體戶 U1、U2 為例，對於 A2~A4 的 HyPV-net2 也適用此圖。以標準 Modbus 的通訊協定，定義 CCU 為主機(Master)，HyPV 為從機(Slave)，若有電腦也為從機(Slave)，表 2.3-1 則為自定義的 Modbus 協定之主從機通訊格式，全部的指令皆由 CCU 發送，其它 HyPV 與電腦在接收 CCU 的指令後，確認從機碼與指令無誤才會有回應指令的動作，確保在同一時間裡，只會有一個訊號通過通訊線路，以降低訊號發生衝突的情況。RS-485 訊號主要功能為接收 HyPV 資訊，以及發送電力調度指令。

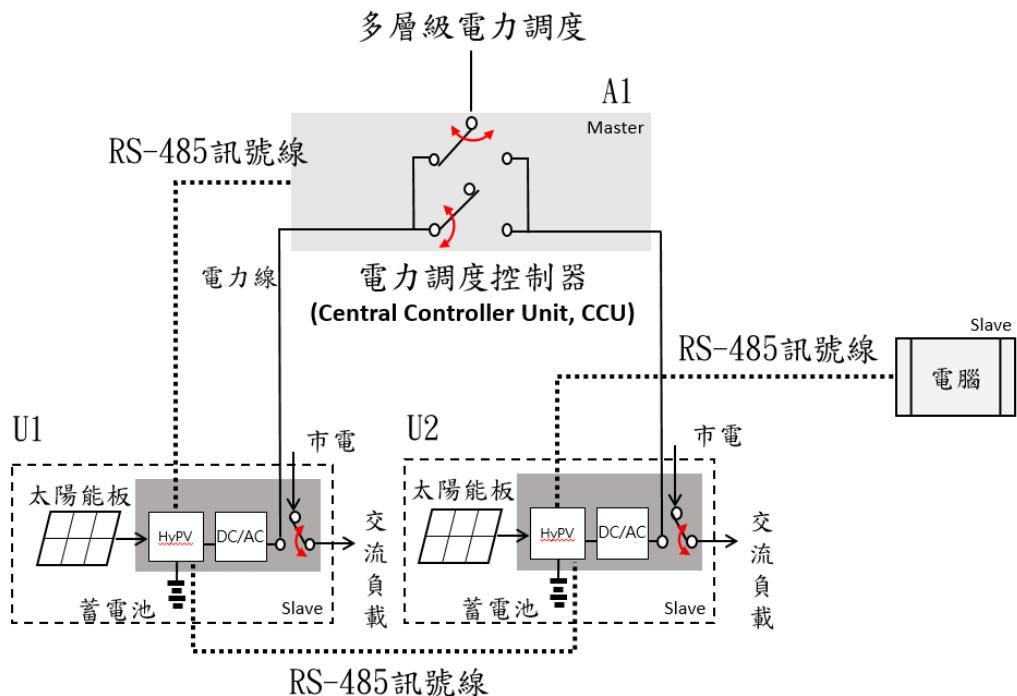
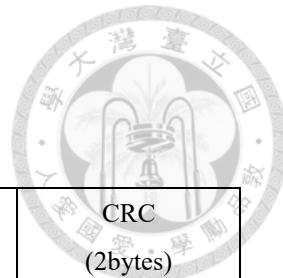


圖 2.3-2、HyPV-net2 系統通訊架構(RS-485)

表 2.3-1、Modbus 協定之主從機通訊格式



Master Command (7 bytes)

Slave ID. (1byte)	Function Code (1byte)	Address (1byte)	Data (2bytes)	CRC (2bytes)
----------------------	--------------------------	--------------------	------------------	-----------------

Slave Command (5 bytes~259bytes)

Slave ID. (1byte)	Data Amount (1byte)	Data (1byte – 255bytes)	CRC (2bytes)
----------------------	------------------------	----------------------------	-----------------

- (1) Slave-ID：從機識別碼，即從機的名稱代號。
 - (2) Function Code：讀取或寫入從機的地址暫存器。
 - (3) Address：從機的地址暫存器(從機出廠設定)，每個地址代表不同的功能。
 - (4) Data Amount：代表接下來要傳送的資料筆數。
 - (5) Data：要寫入的參數值或讀取的資料。
 - (6) CRC[12]：透過校驗計算式得到的校正碼，用於驗證資料的正確性。
- (2) CANbus：將 HyPV-net2 中的 CCU，意即擁有 HyPV 資訊的 CCU 定義為 Master-CCU，並且由多主機(多 Master)的方式，使每一台 CCU 可互相溝通，CANbus 訊號線和電力線的金字塔架構不同，為一條線串連所有 CCU，故任何一台 CCU 皆可直接發送訊號至其他任何一台 CCU，架構如圖 2.3-3。此作法是為了取代之前微電網架構只使用 RS-485 訊號串連所有 CCU 與 HyPV 的方式，產生只有一台主機能夠發號施令的情況。加入了 CANbus 可使訊號分離，讓傳輸網路的複雜度降低，使訊號不易碰撞，讓電力調度控制更穩定。

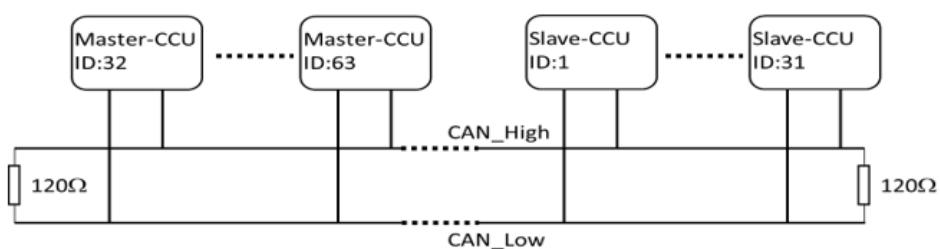


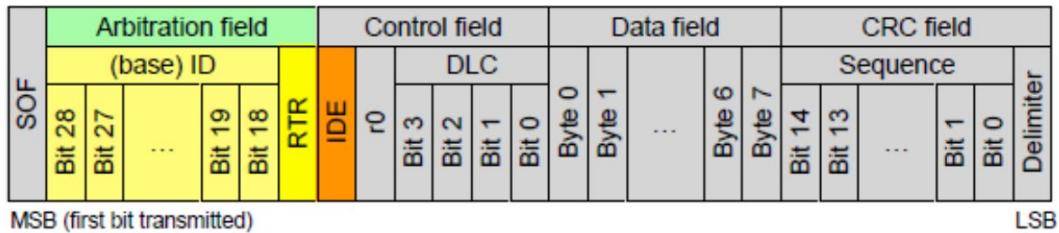
圖 2.3-3、CANbus 訊號在 HyPV-net2 系統通訊架構



在 CANbus 中傳遞的資料是以類似 CANopen[13]通訊協定的架構下，所自訂出來的格式，本研究採用 CAN2.0A 資料格式[14]，COB-ID(communication object identifier)為 11 位元，CANopen 將 CANbus 11 位元的 ID 分為 4 位元的功能碼及 7 位元的 CANopen 節點 ID。7 位元的 ID 共有 128 種不同的組合，因此一個 CANopen 網路上最多允許 127 台設備，其架構如表 2.3-2。

表 2.3-2、CANbus2.0A 資料訊框格式(data frame)

Base CAN data frame format



- (1) Start of Frame(SOF)：為起始同步訊號使用。
- (2) Arbitration Field：包含 COB-ID，此欄位也表示該資料的優先權，例如若多個節點同時傳送，在仲裁欄位逐一比對優先權，COB-ID 值越小，優先權越高，決定此筆資料是否優先送出。
- (3) Control Field：IDE 決定是否為標準格式、DLC 決定此資料長度、r0 為保留。
- (4) Data Field：0-8bytes 的資料，最小資料長度為 0、最大資料長度為 8
- (5) CRC field：循環冗餘校驗(Cyclic redundancy check)[12]，透過校驗計算式得到的校正碼，用於驗證資料的正確性。



2.4 微電網指揮控制技術

2.4-1 A層級電力調度

定義 Master-CCU 為與 HyPV 或 HyS 個體戶進行 RS-485 訊號傳輸的 CCU，為方便敘述，本節皆以 HyPV 代表 HyPV 與 HyS。Master-CCU 會在一定時間中收集底下兩台從屬系統個體戶之資訊，並定義其狀態為可支援電力的賣電戶、需被支援電力的買電戶、不可買賣電三種，若底下從屬兩台個體戶分別為買電戶與賣電戶，則可執行 A 層級電力調度配對，並進行調度連接。進行電力調度時 CCU 會計算賣電戶的淨放電量是否有超過臨界放電量(D_B)，超過則結束調度並切斷 CCU 的連結。在 A 層級電力調度中，電力及訊號皆只經過自己所屬的 Master-CCU，調度過程不需使用 CCU 的 CANbus 向外發送需調度之訊號，也不需使用外部電力調度繼電器，系統的運算和判斷變得相當簡單，如圖 2.4-1，控制流程邏輯圖則為圖 2.4-2。

若 Master-CCU 從屬之兩台個體戶無法互相配對，CCU 則會尋找其他可支援調度的系統，為多層級電力調度，包含 B 層級與 C 層級調度。對於多層級調度，本研究提出三種調度方法：機動式指揮調度、分層式指揮調度、集權式指揮調度，並在第四章透過模擬與實體數據進行分析比較，不同方法會有不同的訊號傳送對象及決策的控制器和發出指令的指揮。

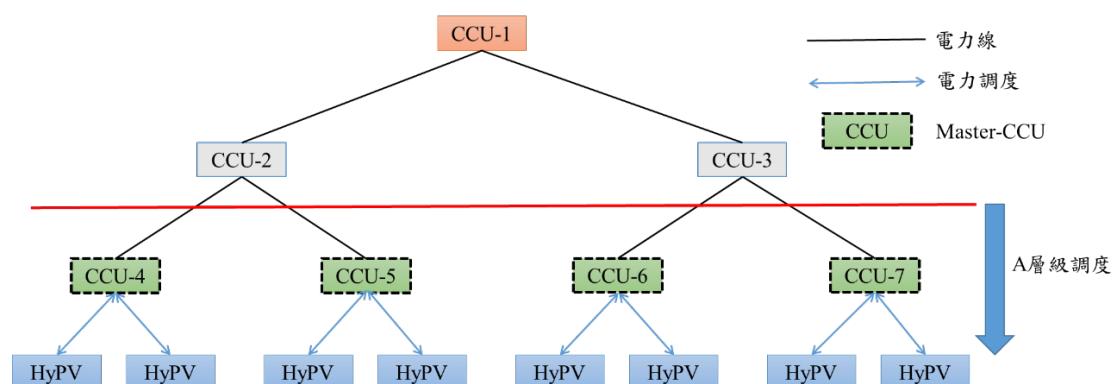


圖 2.4-1、A 層級調度

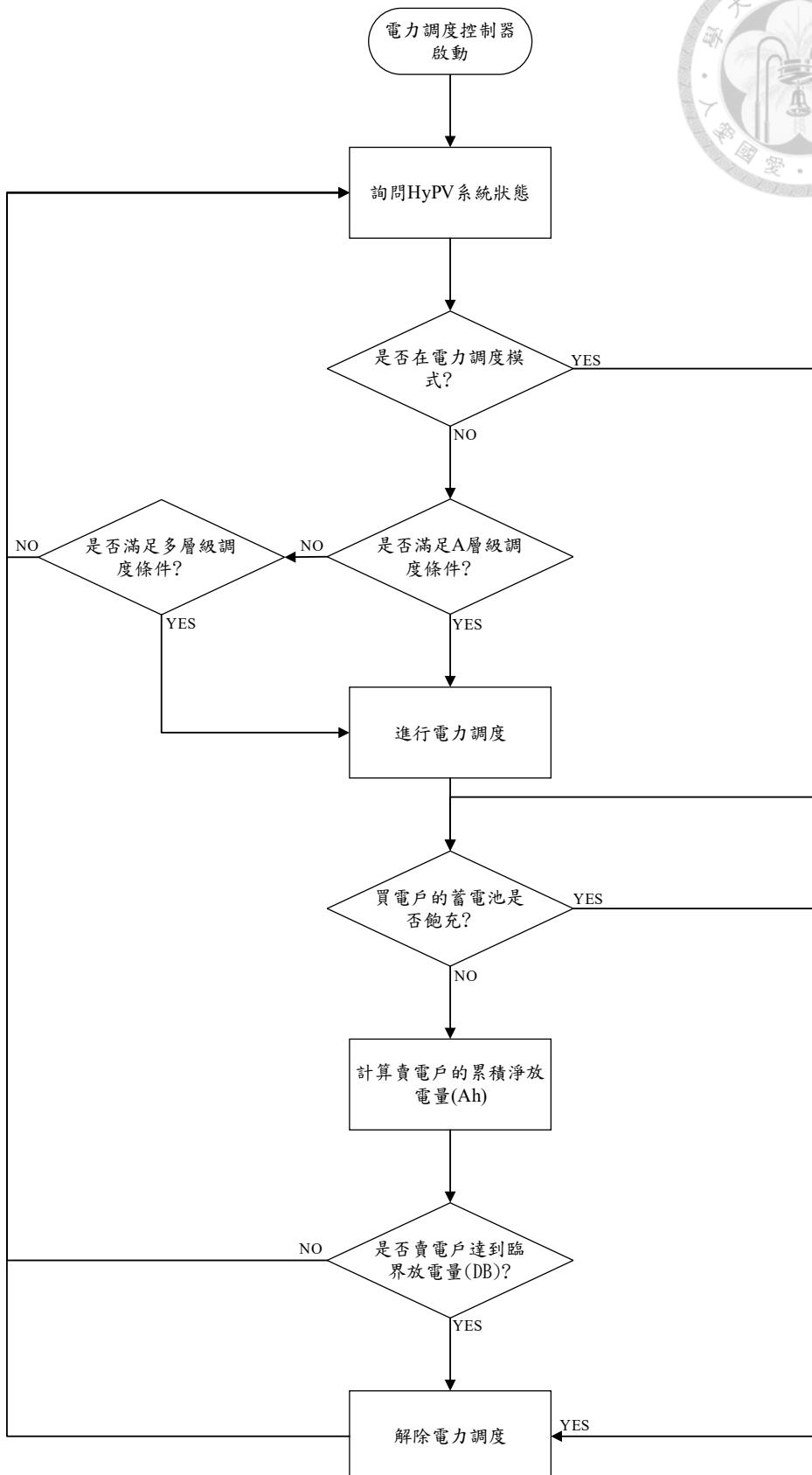


圖 2.4-2、HyPV-microgrid A 層級調度控制邏輯流程圖



2.4-2 集權式指揮調度

集權式顧名思義即是交由某一台 CCU 為總指揮 CCU，在此定義為金字塔最頂層編號 1 的 CCU。每台 Master-CCU 收到從屬 HyPV 個體戶訊號後，若無法達成 A 層級調度，則將 HyPV 資訊傳到總指揮 CCU 上，如圖 2.4-3，由總指揮 CCU 運算後規劃出最佳全域調度路線，並控制所有需要配合調度的 CCU，切換路線上 CCU 的 ATS，邏輯流程如圖 2.4-4，啟動調度和結束調度等指令都由總指揮 CCU 發送，概念相對其他兩種調度方式簡單，但此調度方法會將所有工作量集中於一台 CCU 上，若總指揮 CCU 運作異常，則容易影響整個微電網運作，為此方法之缺點，如要擴充微電網系統，改以電腦或更強的指揮中樞，甚至遴選下一層 CCU 接替總指揮 CCU 工作，集權式指揮的指揮權移植性則相對其他兩種方法高。

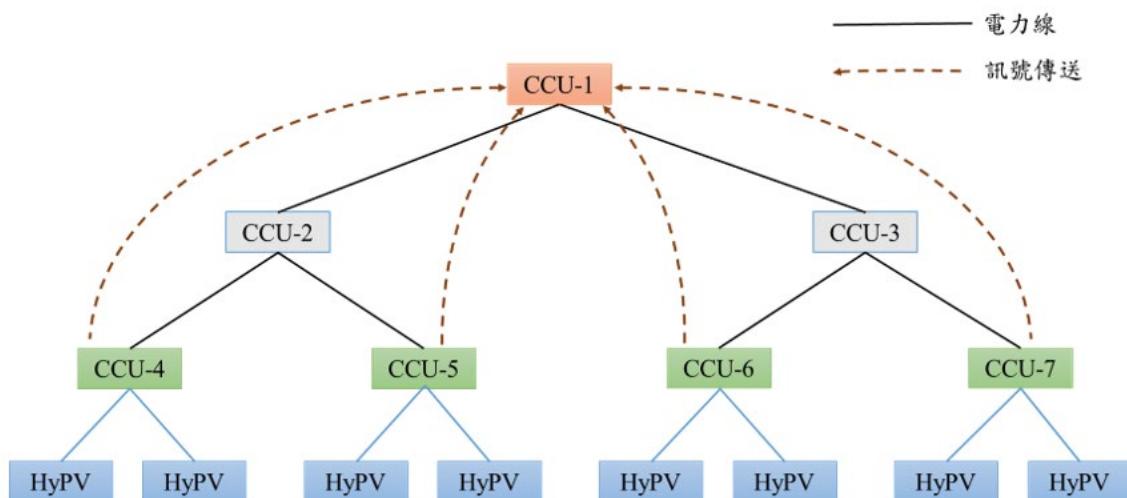


圖 2.4-3、集權式指揮調度訊號傳送

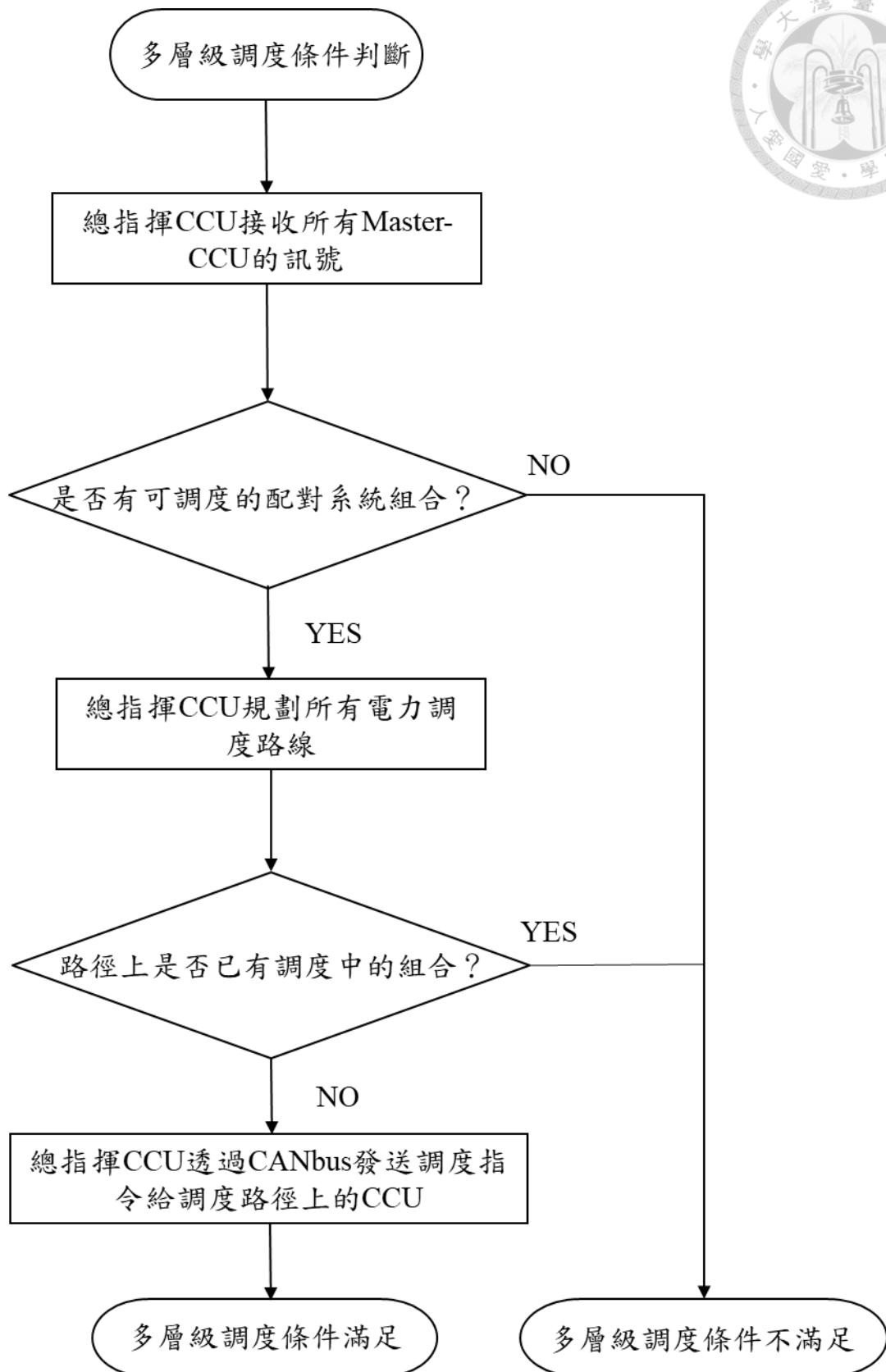


圖 2.4-4、集權式指揮調度邏輯流程圖



2.4-3 分層式指揮調度

金字塔微電網的電力線是一層一層堆疊而成的金字塔狀，所以電力傳送的路線皆必須由賣電方 HyPV 向上傳到 CCU 後再向下傳至買電方 HyPV，然而訊號線則是將所有 CCU 全都連在同一條線路上，概念如圖 2.4-5。為了將傳送訊號的對象變得更簡潔且每一台 CCU 的工作內容更單純，本研究提出分層式指揮調度的概念，在不改變原先串聯的訊號線硬體結構下，在軟體中將訊號強制分層，使訊號的傳送只能向上一層和向下一層，如圖 2.4-6。

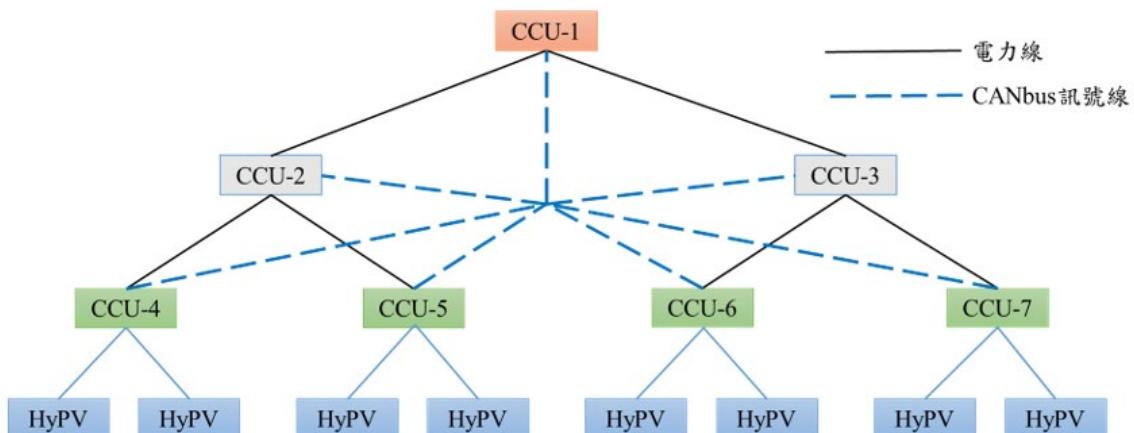


圖 2.4-5、金字塔微電網電力線及訊號線概念圖

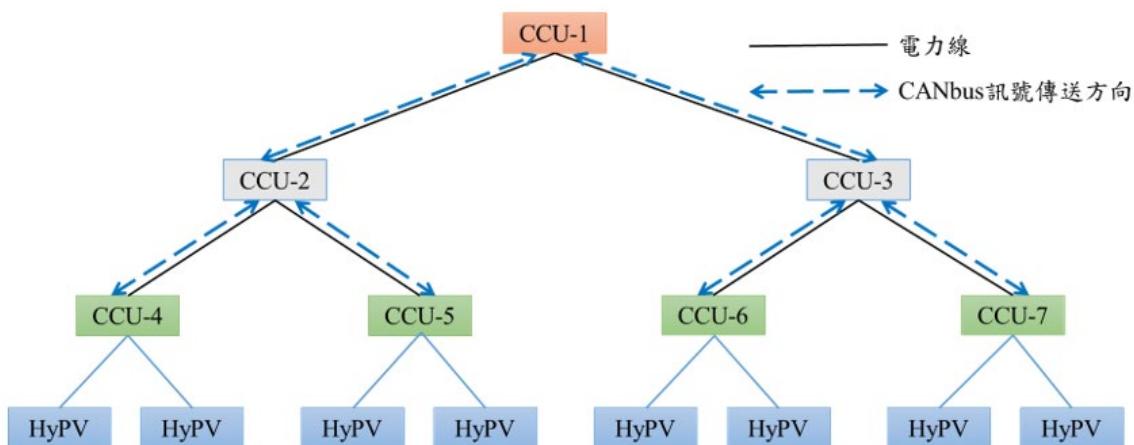


圖 2.4-6、分層式指揮調度 CANbus 訊號傳送關係圖

每一台 CCU 所做的事情都是先接收下方的控制器訊號，再經過運算判斷後向上傳送訊號，Master-CCU 會先以 RS-485 訊號接收從屬 HyPV 個體戶的資訊，在判斷無法達成 A 層級內部調度後，將 HyPV 的買賣電訊號向上傳至上一層的 CCU。利用完滿二元樹[8]之特性，分層式調度的訊號發送對象如圖 2.4-7，為了達成訊號的一致性，無論是否需要買賣電，都會向上傳送訊號。在收到底下兩台個體戶控制器的訊號後，才會進行運算判斷並進一步向上傳送訊號，接受的訊號和傳送的訊號如表 2.4-1。因為微電網以經過越少台 CCU 的路線為優先，所以可採局部的最佳解作為全域的最佳解，類似於貪婪演算法[28]。分層式還有一最大好處為不需規劃路線，若從下方接收到一買電及一賣電的訊號，必定會有一條且是唯一一條可調度的電力路徑。

向上傳送目標CCU編號	接收資訊來源CCU編號	
自身編號 / 2	自身下方左側	自身下方右側
自身編號 * 2	自身編號 * 2	自身編號 * 2 + 1

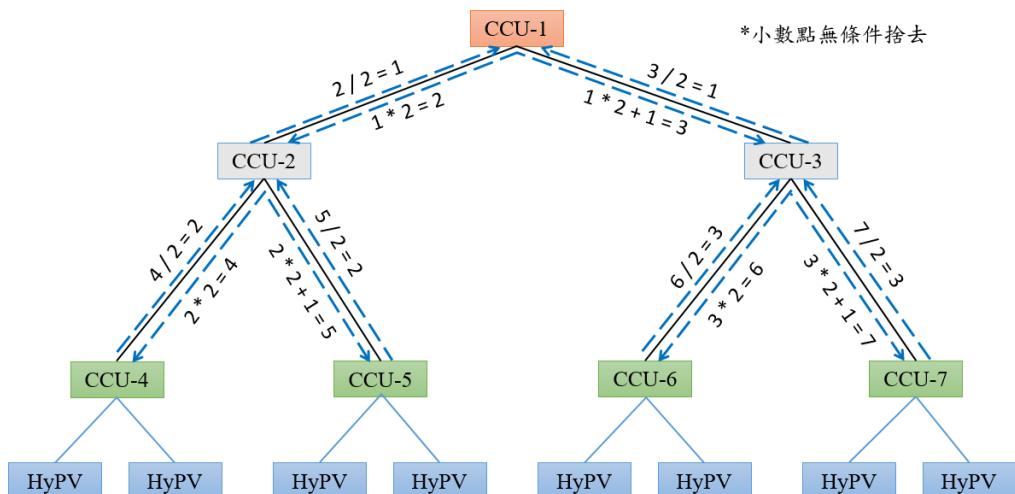


圖 2.4-7、分層式調度傳送編號關係圖



表 2.4-1、分層式調度運算和訊號

接收訊號(左、右)		CCU運算	傳送訊號
賣電	買電	完成調度配對，以此CCU為首開始進行調度	向上傳送不買電也不賣電的訊號
賣電	賣電	選擇蓄電池達飽充或電壓較高的一方為支援戶，另一方則取消支援資格	向上傳送可賣電訊號
買電	買電	選擇蓄電池電壓較低的一方為被支援戶，另一方則取消被支援資格	向上傳送需買電訊號

分層式的目的在於將每台 CCU 的工作簡化，邏輯流程如圖 2.4-8，若在該 CCU 無法成功完成調度配對，則會一路將訊號一層一層向上傳送並處理，直到最頂端的 CCU，即完成此次多層級調度的決策，等待下一次 Master-CCU 接收到 HyPV 訊號後向上傳送訊號。

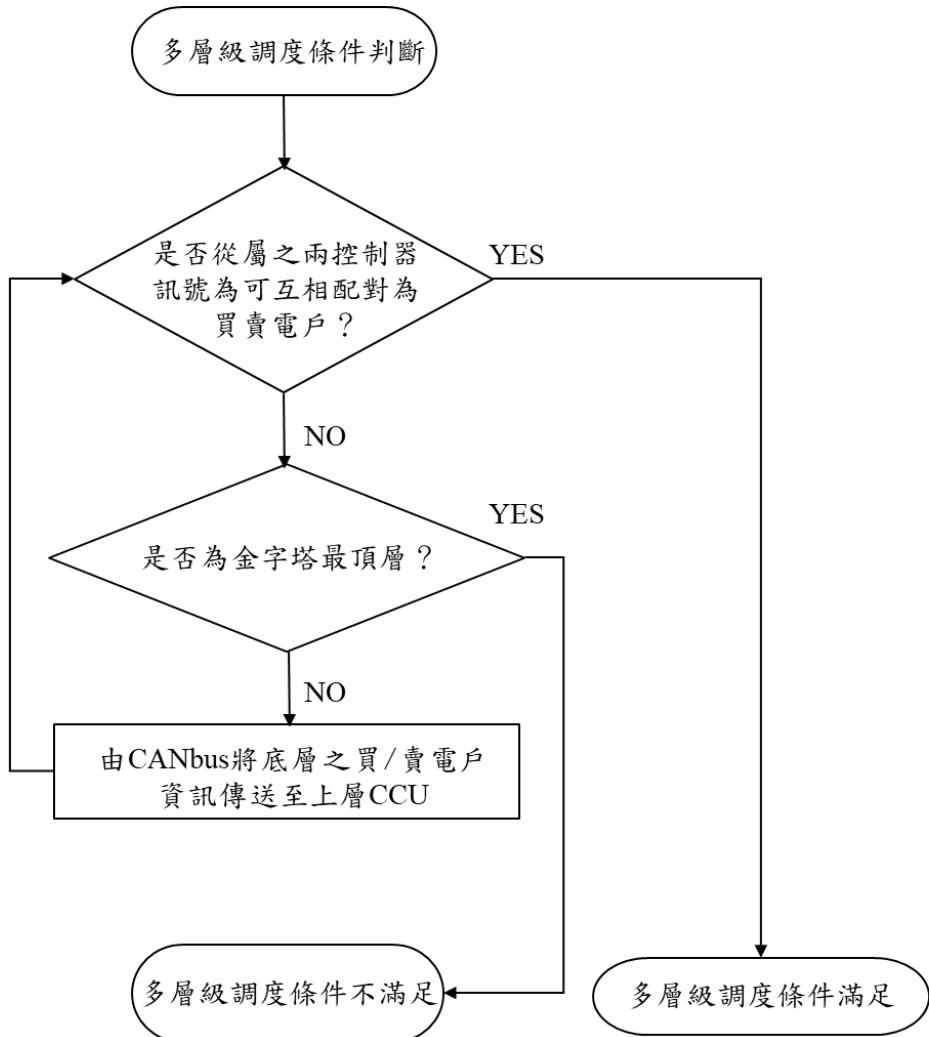


圖 2.4-8、分層式指揮調度邏輯流程圖



2.4-4 機動式指揮調度

Master-CCU 在收到從屬 HyPV 個體戶的訊號後，若無法配對完成 A 層級調度，則向其他 Master-CCU 尋求支援，定義以買電戶的 Master-CCU 為主，向其餘 Master-CCU 發送訊號，若之中有可賣電的 Master-CCU，則發送訊號回給原發送訊號 Master-CCU，如圖 2.4-9，即代表 CCU-7 為調度總指揮 CCU，因其從屬 HyPV 為買電戶，向其他 Master-CCU 發送訊號，而 CCU-5 因其從屬 HyPV 為賣電戶，故會回傳訊號給 CCU-7，如圖 2.4-10。

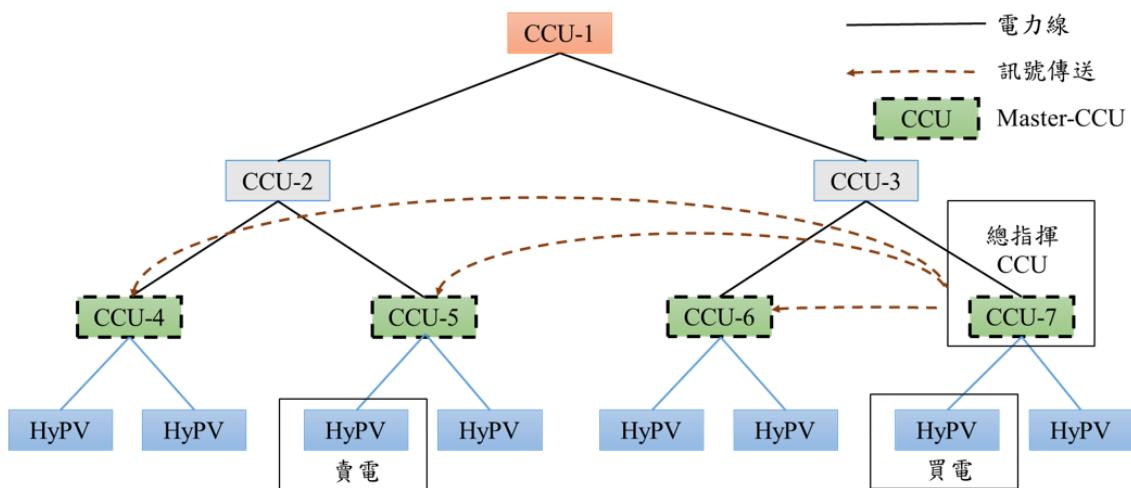


圖 2.4-9、機動式指揮調度步驟(一)

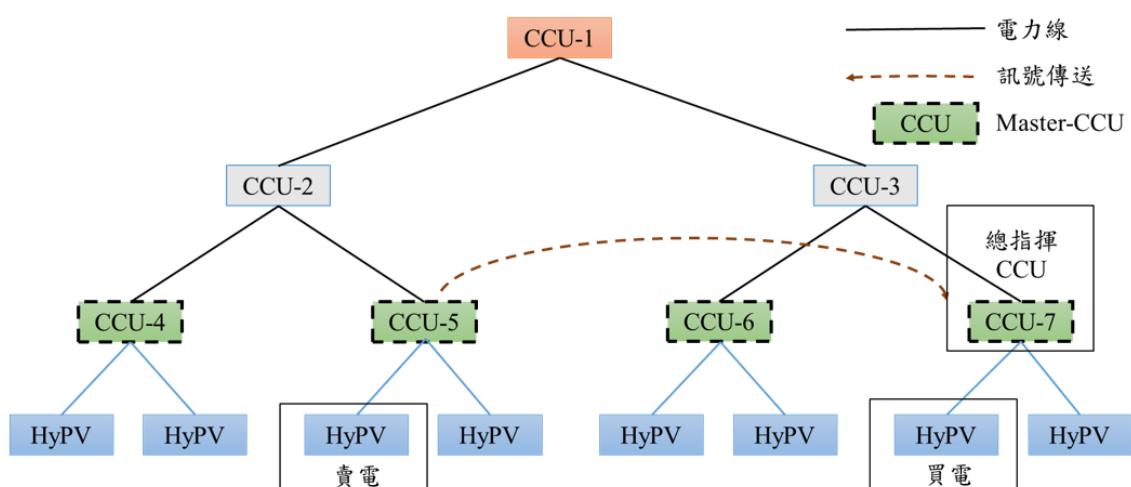


圖 2.4-10、機動式指揮調度步驟(二)

此時總指揮 CCU 會確認連接路線上並無其他正在調度的系統，即可由總指揮 CCU 控制進行調度步驟，並控制路線上的所有 CCU，使其 ATS 切換至正確的方向，如圖 2.4-11。

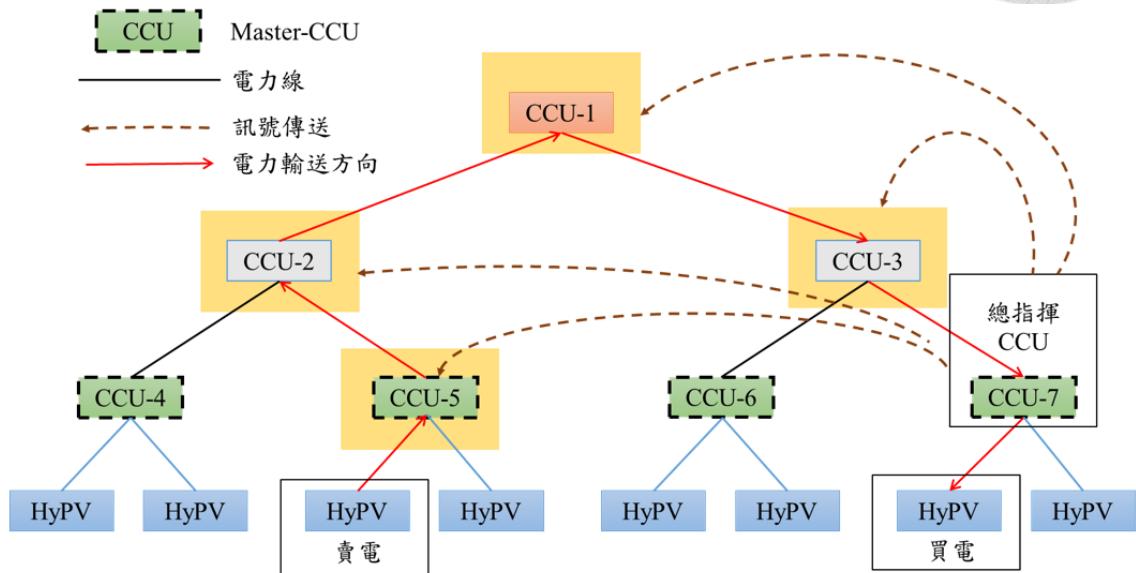
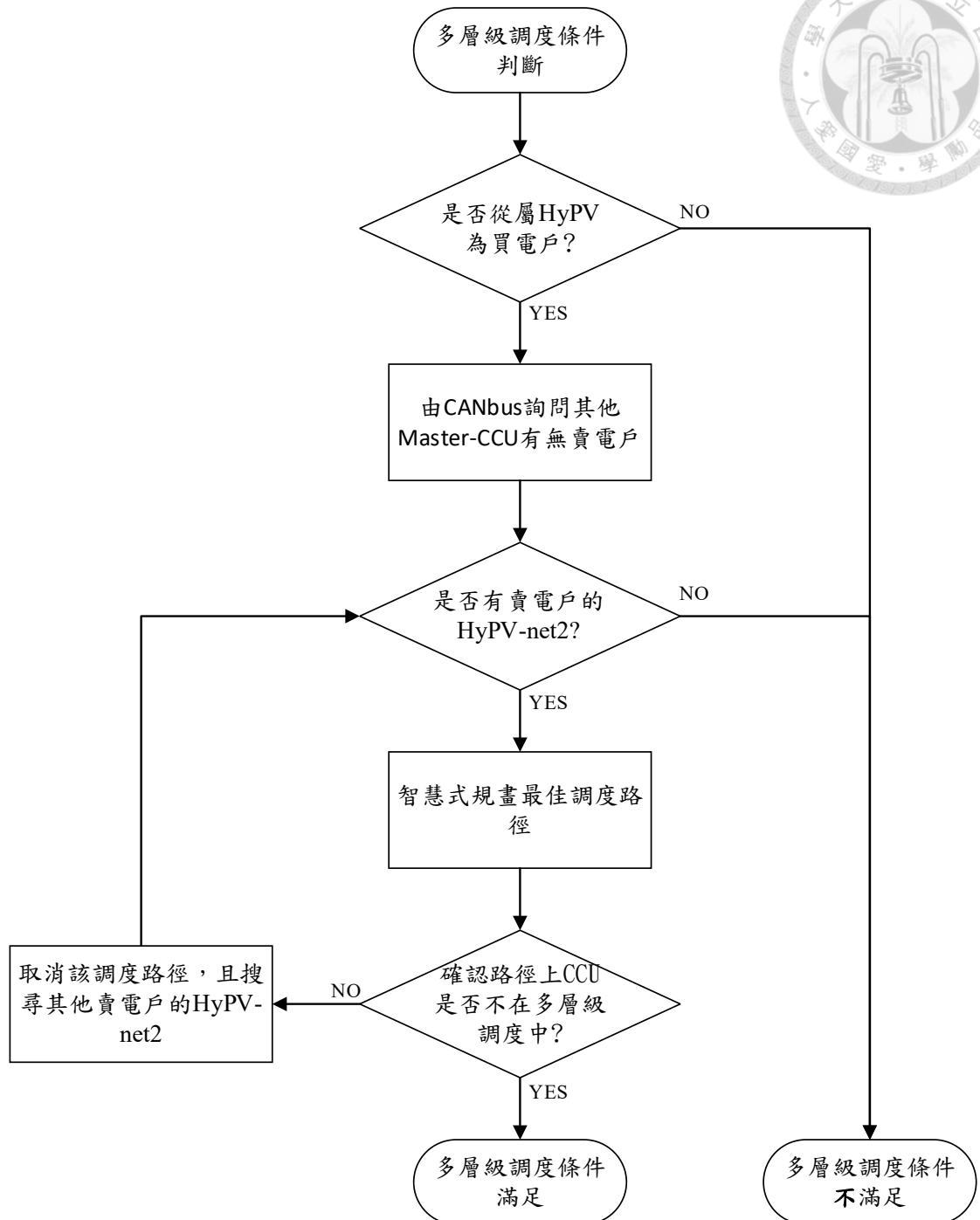


圖 2.4-11、機動式指揮調度步驟(三)

結束調度則是由賣電戶計算是否已達臨界放電量或是買電戶之蓄電池已達飽充電壓作為判斷依據，達成上述任一條件則結束調度，一樣由買電戶的 CCU 指揮所有路線上的 CCU 回復原運作模式，將 CCU-1 的內部調度繼電器打開，並將賣電戶切回太陽能供電，不再支援別戶，買電戶則回復獨立運作模式，由原系統參數，決定為 PV-Mode 或 Grid-Mode。

機動式指揮調度之控制邏輯如圖 2.4-12，判斷權及指揮權全都只侷限於所有的 Master-CCU，以買電戶為出發點，Master-CCU 必定隨時都能掌控買電方 HyPV 的資訊，如此只需控制其他 CCU 之 ATS，不須將多餘的電壓、電流資訊傳給其他 CCU，即可達成整個調度過程，為此演算法的一大優點。





2.4-5 調度過程

在金字塔微電網中，調度的啟動和結束，並不是只有繼電器切換，而是一系列的指令和步驟，其中若有某個環節尚未執行完成或是發生錯誤，是無法執行接下來的指令，電力調度的流程如圖 2.4-13。

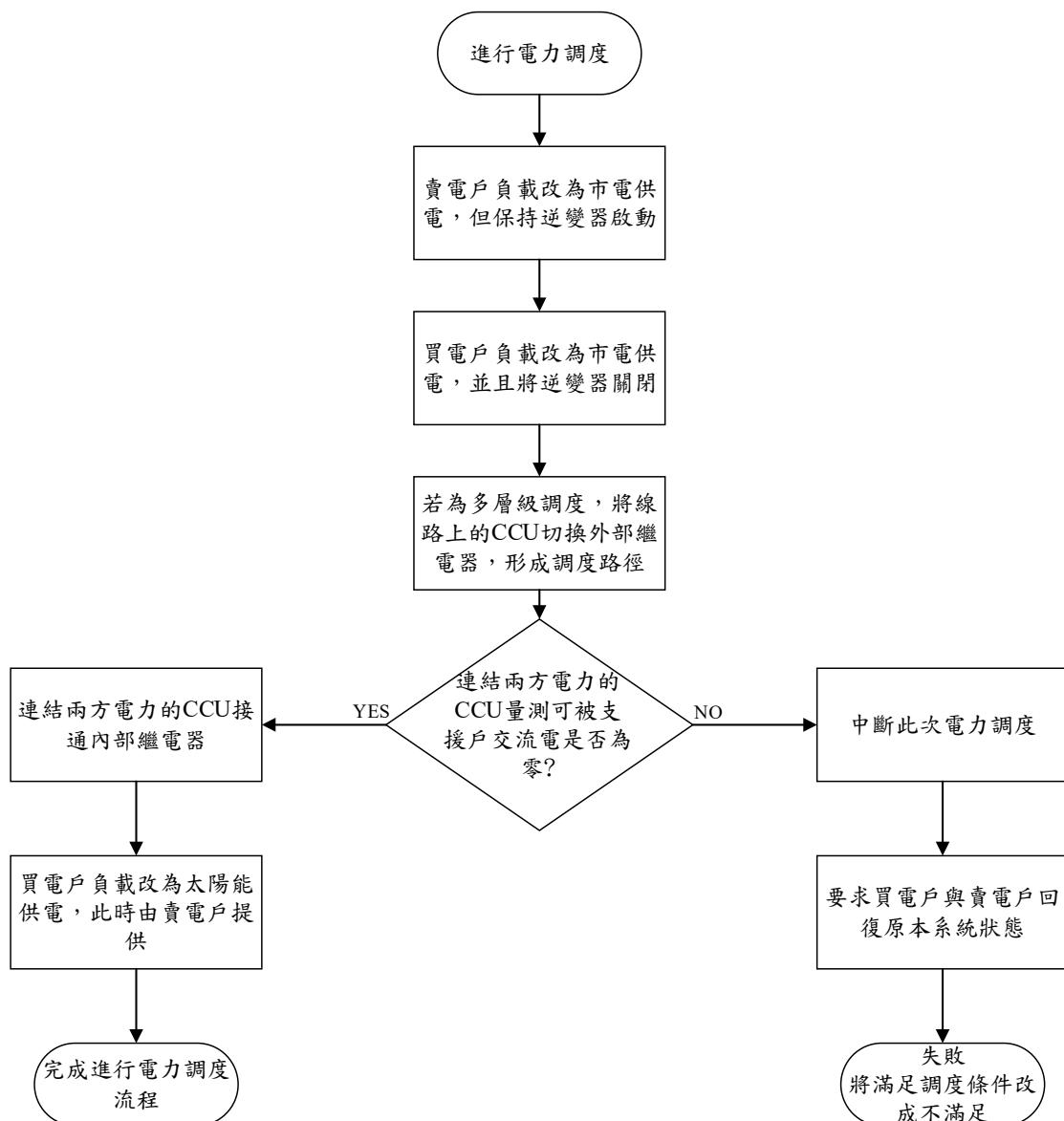


圖 2.4-13、進行電力調度流程圖



調度連接的指令可簡單歸納為三階段：

(1) 買電戶及賣電戶負載 ATS 切換至市電，買電戶逆變器關閉，賣電戶逆變器則保持開啟。

(2) 若買電戶之逆變器已關閉，則 CCU 接通內部調度繼電器。

(3) 買電戶負載 ATS 切換至太陽能供電，此時負載電力由賣電方供應。

CCU 必定照以上指令依序下達指令，而 HyPV 系統若尚未動作，則無法發送下一指令。結束調度步驟則是如下，流程圖如圖 2.4-14：

(1) 買電戶負載 ATS 切換至市電。

(2) CCU 內部調度繼電器斷開連結。

(3) 賣電戶負載 ATS 視當時太陽能狀況決定切換至 Grid-Mode 或 PV-Mode 回到 HyPV 正常運作模式，買電戶負載 ATS 則切換至太陽能供電。

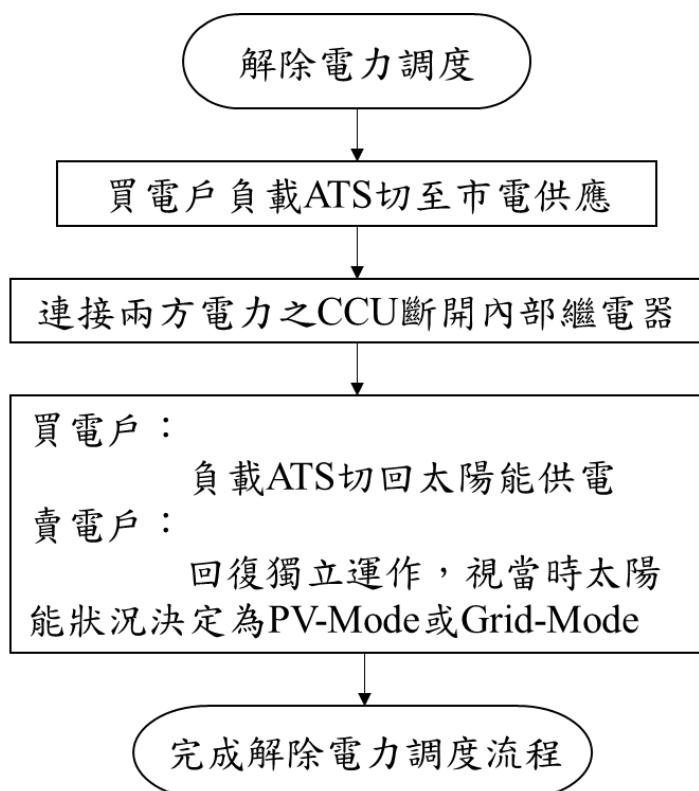


圖 2.4-14、解除電力調度流程圖

對於這些多步驟的調度指令，CCU 每次只能發送一個指令，再由 HyPV 回傳一個狀態，接著 CCU 再發送下個指令，直到調度的三個步驟都完成即完成調度，CCU 控制器設定的工作時間間隔為 5 秒，也就是每 5 秒發送一次訊號。

在機動式和集權式的調度中，都是由一台 CCU 當總指揮直接發送訊號給路徑上的 CCU 做最即時的訊號發送和狀態回報，但在分層式調度中，由於只有往上一層或往下一層的對象限制，所以訊號發送和狀態回報都會因越高層級的微電網調度而越慢，表 2.4-2 為各調度方式進行調度連結時的等待資訊傳送次數及等待時間最大值公式。

表 2.4-2、各調度演算法調度連結資訊傳送次數

	集權式調度	分層式調度	機動式調度
資訊傳輸次數	8	$2 \times (\text{層數} - 1) \times 4$	8
等待時間(s)	40	$2 \times (\text{層數} - 1) \times 4 \times 5$	40

集權式和機動式調度資訊傳送次數為 8，其來源為第一次的狀態詢問加上三步驟的調度指令乘以發送和訊號回傳的兩次訊號傳輸，因為指令傳至底層 CCU 和 HyPV 系統後，還要回傳資訊給總指揮 CCU，故一個指令得花兩個傳送次數才能完成。

而分層式則較為繁瑣，其公式如式(2.4-1)：

$$\text{資訊傳輸次數(分層式)} = 2 \times (\text{金字塔微電網層數} - 1) \times 4 \quad (2.4-1)$$

等待時間的公式與資訊傳送次數的公式有些微不同，如式(2.4-2)：

$$\text{連結等待時間(分層式)} = 2 \times (\text{金字塔微電網層數} - 1) \times 4 \times 5 \quad (2.4-2)$$

結束調度的最大等待時間公式也和啟動調度相同，因其皆為三步驟之連續指令，結束調度則是和啟動調度逆向的步驟順序。

資訊傳輸量分為兩種，RS-485 和 CANbus 的訊號傳輸，RS-485 通訊為 Master-CCU 和 HyPV 之間的資訊傳輸，且每 5 秒傳 2 次，傳輸時間為全日，故一天的傳輸次數為 34,560 次。

RS-485 傳輸次數在三種調度指揮方式中無差異，主要差異為 CANbus 的傳輸量，以下為三種調度方式的 CANbus 每日傳輸次數計算方式。

分層式指揮調度為 CANbus 傳輸量最大的調度方式，每 5 秒每台 CCU 皆向上傳輸資訊，除了最頂層的 CCU 之外，如圖 2.4-15，故每 5 秒的總次數為總 CCU 台數減一，一天的總傳輸次數如式(2.4-3)：

$$\text{CANbus(分層式)一日總傳輸次數} = (\text{CCU 台數} - 1) \times 24 \times 3,600 \div 5 \quad (2.4-3)$$

集權式指揮調度的 CANbus 傳送次數則是比分層式指揮調度少，每 5 秒由 Master-CCU 向最頂層之總指揮 CCU 傳送資料，省去了中間轉傳的步驟，如式(2.4-4)，機動式、分層式和集權式的統計比較次數如圖 2.4-16。

$$\text{CANbus(集權式)一日總傳輸次數} = 2^{\text{層數}-1} \times 24 \times 3,600 \div 5 \quad (2.4-4)$$

機動式指揮調度較特殊，由於總指揮都固定為底層之 Master-CCU，必定可以掌控買電方的電力狀況，故只需在尋求外部電力調度支援時才需要傳輸資訊，次數不固定且遠小於另外兩種調度方式，故機動式指揮調度的 CANbus 訊號傳送次數可被忽略不計。此資訊傳輸量統計只統計固定的資訊回傳或詢問，並無將調度過程的傳送次數一併統計，因為調度過程的傳送次數不為固定值，三種調度方式之一日 CANbus 傳輸量公式如表 2.4-3。

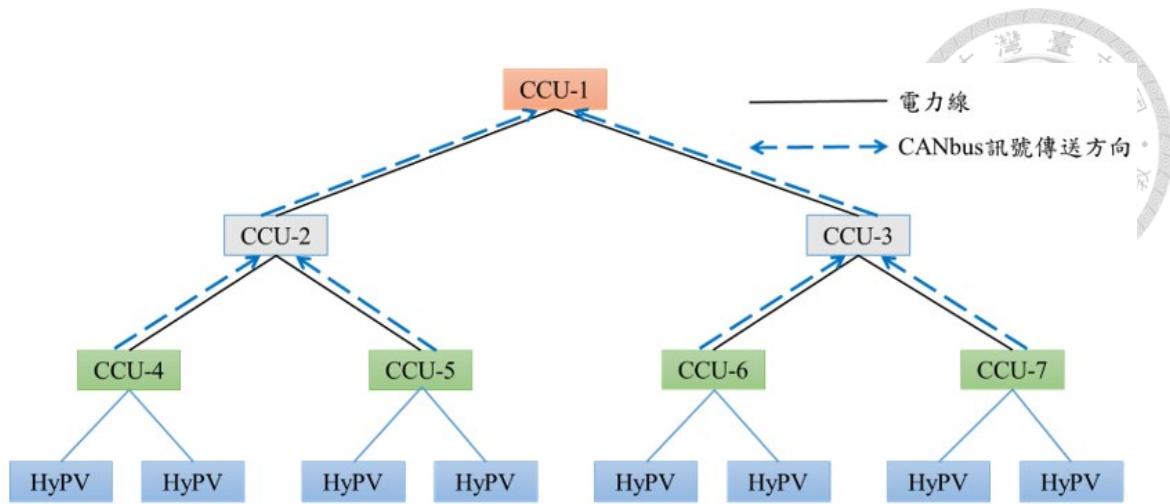


圖 2.4-15、分層式指揮調度透過 CANbus 向上傳輸資訊情況

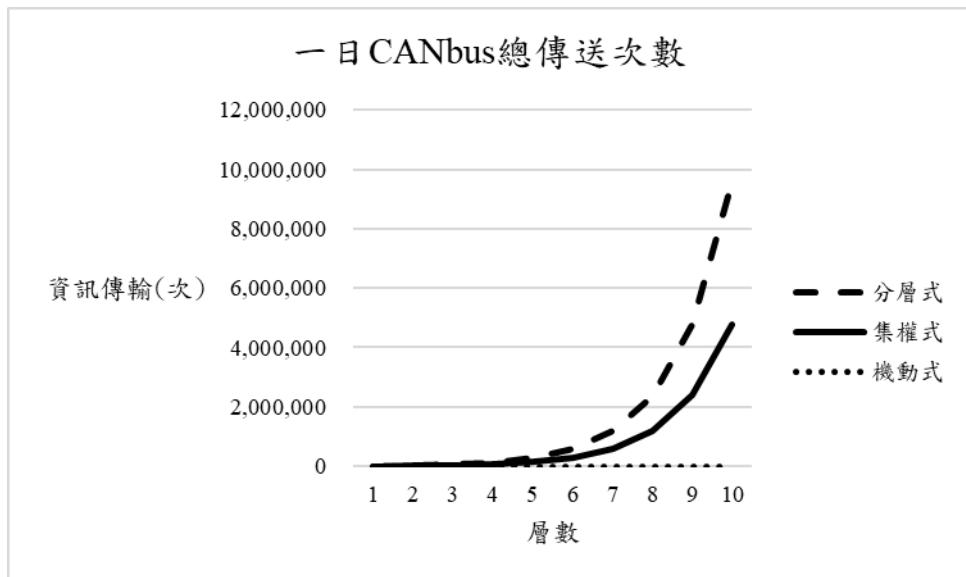


圖 2.4-16、機動式、分層式及集權式一日 CANbus 傳送次數

表 2.4-3、一日 CANbus 傳輸量公式 (86400 為一日之秒數)

	一日 CANbus 傳輸量(次數)
分層式	$(CCU\ 台數-1) * 86,400 / 5$
集權式	$2^{^(層數 - 1)} * 86,400 / 5$
機動式	可忽略不計

第三章 金子塔太陽能微電網模擬系統



3.1 HyPV 太陽光電系統個體戶運作模擬

3.1-1 個體戶太陽光電系統運作模擬目的與架構

本研究主要目的是利用個體戶模擬器與實體 CCU 組成的金子塔微電網模擬器，探討不同電力調度控制對通訊可靠度和發電效益等影響以及不同個體戶組合之微電網效益比較。

個體戶模擬器可降低 HyPV-net2 的建設成本、加速測試時程及維持一致測試數據，透過一台個體戶電路模擬器與一台實際 CCU，可以不限地域與時間的限制，快速地分析實際 CCU 中不同電力調度的條件對於一組 HyPV-net2 太陽能發電效益的影響，相較於二元太陽能互聯網最佳系統設計[11]，不單單只用電腦模擬分析，透過實際 CCU 中的電力調度條件，藉由真正的通訊界面得到更貼近實際 HyPV-net2 的結果，且可以直接驗證 CCU 中的調度條件是否有誤，降低撰寫程式的成本。對於 HyPV-net2 實地測試來說，想要重複一模一樣的測試環境及條件是不可能的，每個時刻的輻射量、溫度、電池狀況……等參數都不可能完全相同，但對太陽光電模擬來說卻可以輕易以相同的數據做測試，如此才可在相同的條件下測試不同的調度控制方式，以利於後續的研究。

個體戶太陽光電系統(HyPV)會在獨立太陽光電模式(PV Mode)與市電模式(Grid Mode)之間互相切換。當太陽光發電足夠時全由太陽光電系統供電，蓄電池擔任緩衝電量的角色，提供或儲存電量，達到供應電力穩定；而當太陽光發電和蓄電池電量同時不足時，則完全切換到市電供應，讓市電與太陽光電完全獨立運作，將剩餘的太陽光電量存於電池中，此為獨立型太陽能系統的特色。所以 HyPV 電力控制器主要的功能為(1)蓄電池充放電控制，(2)供電模式切換控制。蓄電池的殘電量是 HyPV 非常重要的指標，當殘電量過少時，HyPV 以剩餘電量決



定系統是否要切換回 Grid Mode；而當蓄電量快達到電池容量時，意即電池已快飽充，太陽光電力將無法充入電池，造成太陽光發電效益降低。在目前蓄電池充電控制依電池種類而有許多不同的充電方式[15][16][17]，本研究在進行系統模擬時，採用庫侖法計算蓄電池的殘電量，決定蓄電池是否要繼續充電或放電。充電時，以 SOC(State of Charge)[18]為充電依據，將 SOC=100% 定義為蓄電池達飽充，即無法再對蓄電池充電。放電時，以 DOD(Depth of Discharge)[19]為放電深度控制的依據，若 DOD=80%，表示在 SOC \leq 20% 時蓄電池停止放電。

以上述兩種操作做為離型，個體戶太陽光電系統被設計為一台 HyPV 電路模擬器，可以在微處理器執行數值運算後，模擬出兩組個體戶太陽光電系統，並藉由實際的通訊提供模擬數值給真正的電力調度控制器，而電力調度控制器可以依據 HyPV 電路模擬器的資料判斷實際的電力調度條件，與 HyPV 電路模擬器達成 A 層級調度，進而完成 HyPV 電路模擬二元互聯電力調控系統(HyPV-net2)。太陽光發電系統實際產生的電力，會受到不同的系統規格，安裝地區及負載模式等影響。因此進行系統分析時，必須先建立各個子系統的物理模型，方能進行性能模擬。如圖 3.1-1，將整個系統模擬分為兩部份：

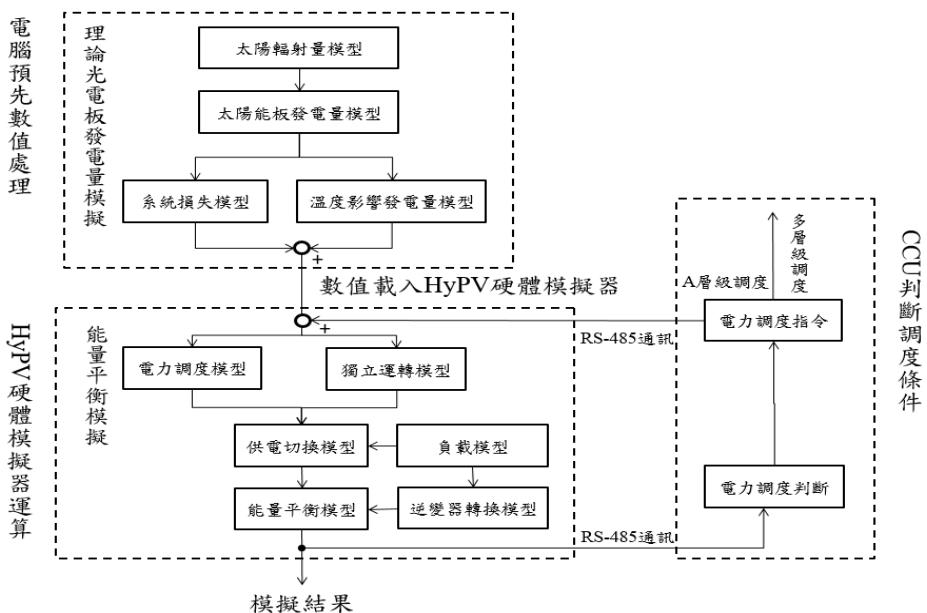


圖 3.1-1、HyPV-net2 模擬系統模型架構圖



第一部分：太陽光電板發電量模擬[11]

先使用電腦端產生模擬數值，透過下列模型，可以將中央氣象局的逐時日輻射量資料轉換為可用的理論太陽能發電量，再匯入 HyPV 電路模擬器，執行能量平衡模擬。

- (1) 太陽輻射量模型：每日逐時水平輻射量與傾斜面輻射量關係模型。
- (2) 太陽光電板發電量模型：在標準測試條件下，太陽能板於不同太陽輻射量的發電量模型。
- (3) 溫度影響發電量模型：太陽能板之發電量受溫度影響的模型。
- (4) 系統損失模型：太陽能板之發電量受到遮蔭、線損、塵土、接點等，造成的能力損失模型。

第二部分：能量平衡模擬[11]

由 HyPV 電路模擬器計算理論發電量與負載用電量的相關性，因為蓄電池的殘電量或滿足 CCU 電力調度的條件，而會改變 HyPV 供電切換，並計算在不同供電模式的系統能量平衡，達到模擬真實的 HyPV-net2 系統。

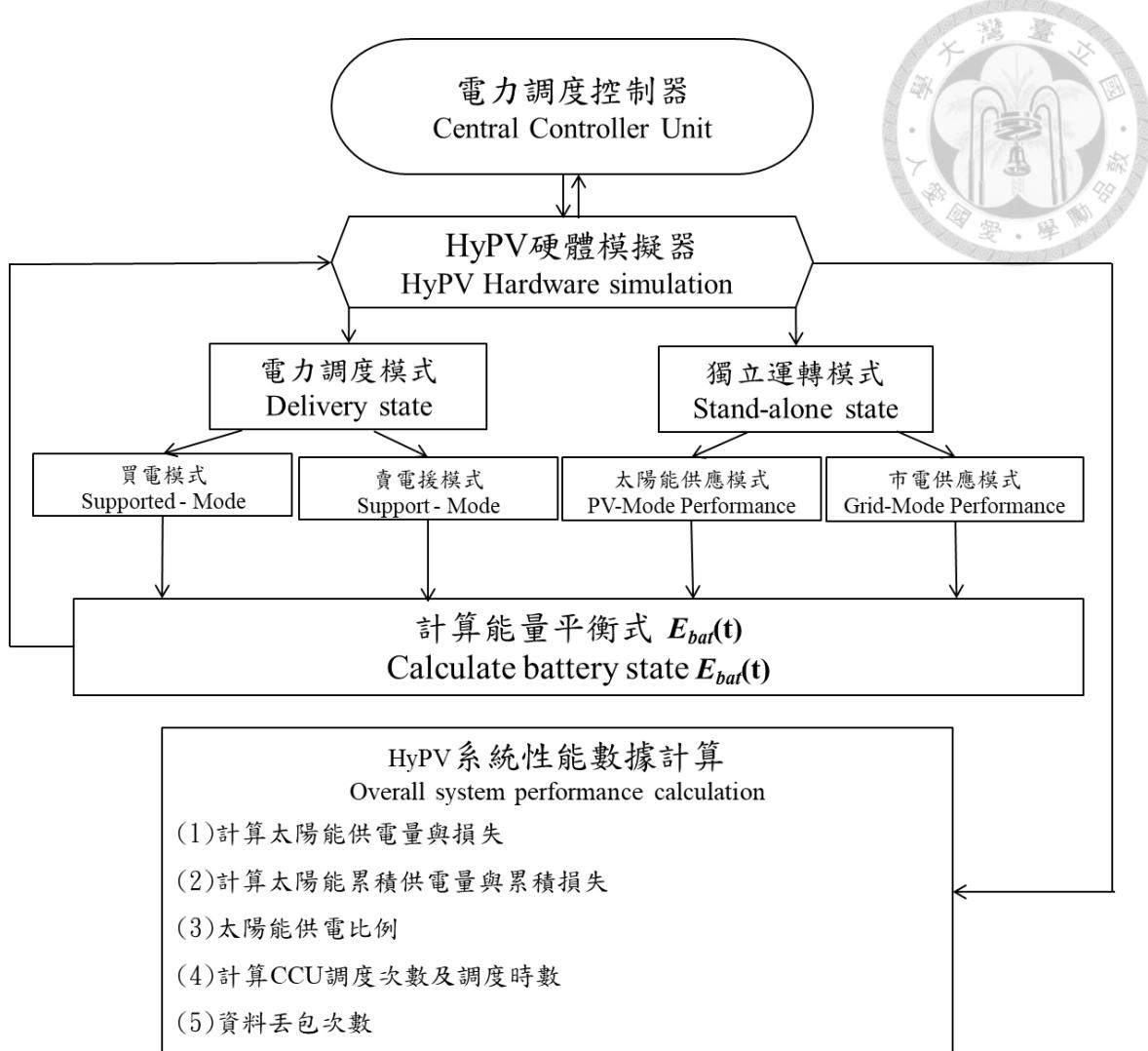
- (1) 負載模型：依據不同大小、時段的使用負載變化
- (2) 供電切換控制模式：系統由市電或太陽能供電給負載的切換模式
- (3) 能量平衡模型：兩系統在太陽光電板、蓄電池及負載模型之間的能量平衡關係。
- (4) 逆變器(變流器)模型：逆變器將直流電轉交流電的效率關係模型。

$P_{INV,AC} = P_{INV,DC} \times \eta_{inv}$ ， $P_{INV,AC}$ 為逆變器交流輸出、 $P_{INV,DC}$ 為逆變器直流輸入、 η_{inv} 為逆變器轉換效率。後續模擬取 $\eta_{inv} = 0.92$ 。



3.1-2 個體戶太陽光電系統運作模擬流程

個體戶電路模擬器供電模式切換流程如圖 3.1-2，在 HyPV-net2 中，CCU 會將 HyPV 區分成兩種模式，第一種屬於獨立運作模式(Stand-alone state)，表示未達到電力調度條件，系統會依照 PV-Mode 或 Grid-Mode 來選擇用市電或太陽能獨立供電給負載；第二種屬於電力調度模式(Delivery state)，將 HyPV 設定為賣電模式或買電模式，並分別透過不同的能量平衡式，計算電池電量與太陽能損失。而電池是否飽充，是在 HyPV 中導致太陽能損失的一項重要指標，如圖 3.1-3 為獨立運作模式下之細部架構，討論了電池的不同狀態影響太陽能實際發電量，最後藉由實際的發電量與負載用電量計算電池的電量變化；而圖 3.1-4 為電力調度模式下之細部架構。當 HyPV 為賣電戶時，其負載由太陽能供電改為市電供電，太陽能只單獨供電給買電戶的負載以避免過載；而 HyPV 為買電戶時，全部太陽能電量充入電池中，太陽能不供應給負載，但以上兩種狀況電池若是飽充也會影響著太陽能實際發電量，並發生太陽能損失的情形。HyPV 電路模擬流程則如圖 3.1-5 所示。



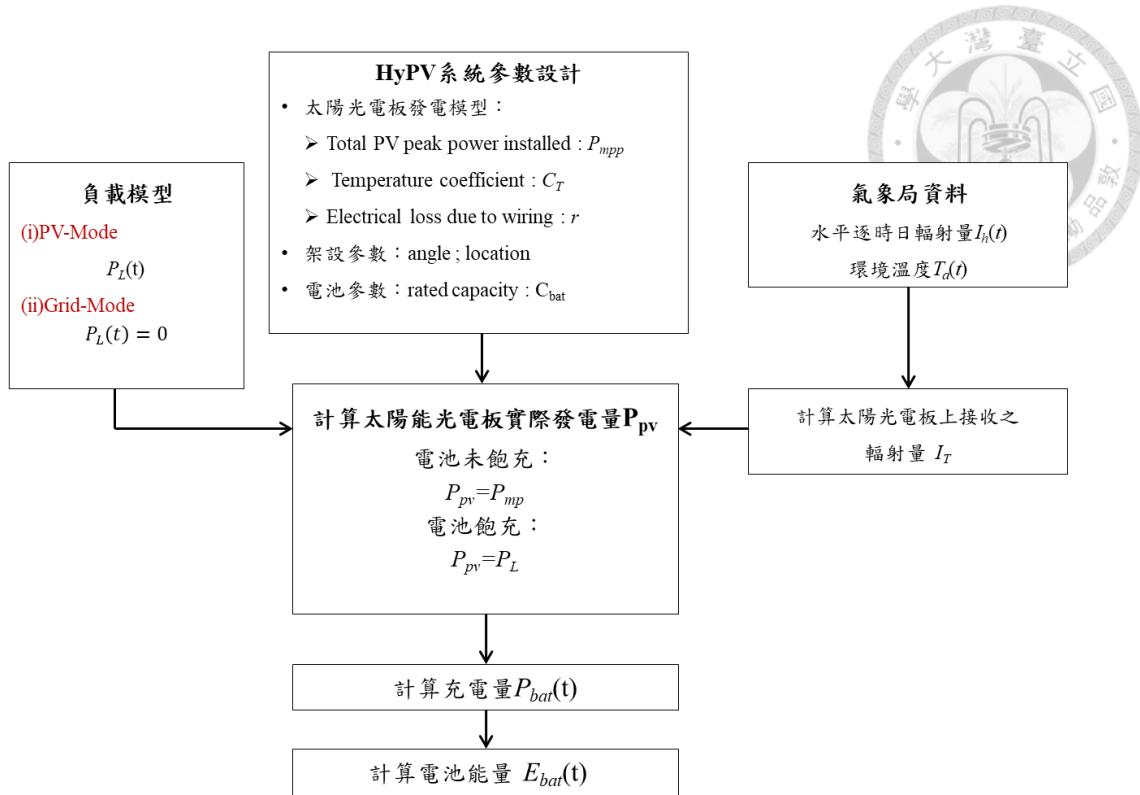


圖 3.1-3、HyPV-net2 系統獨立運作模式

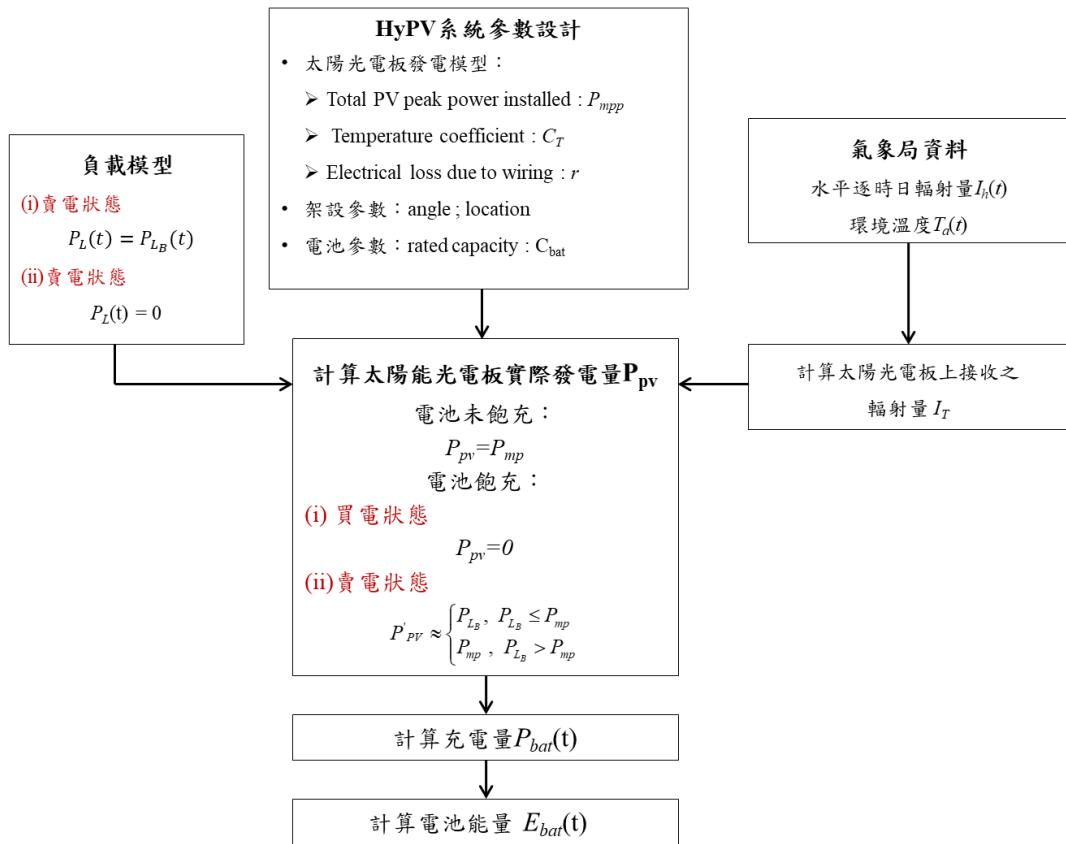


圖 3.1-4、HyPV-net2 系統電力調度模式

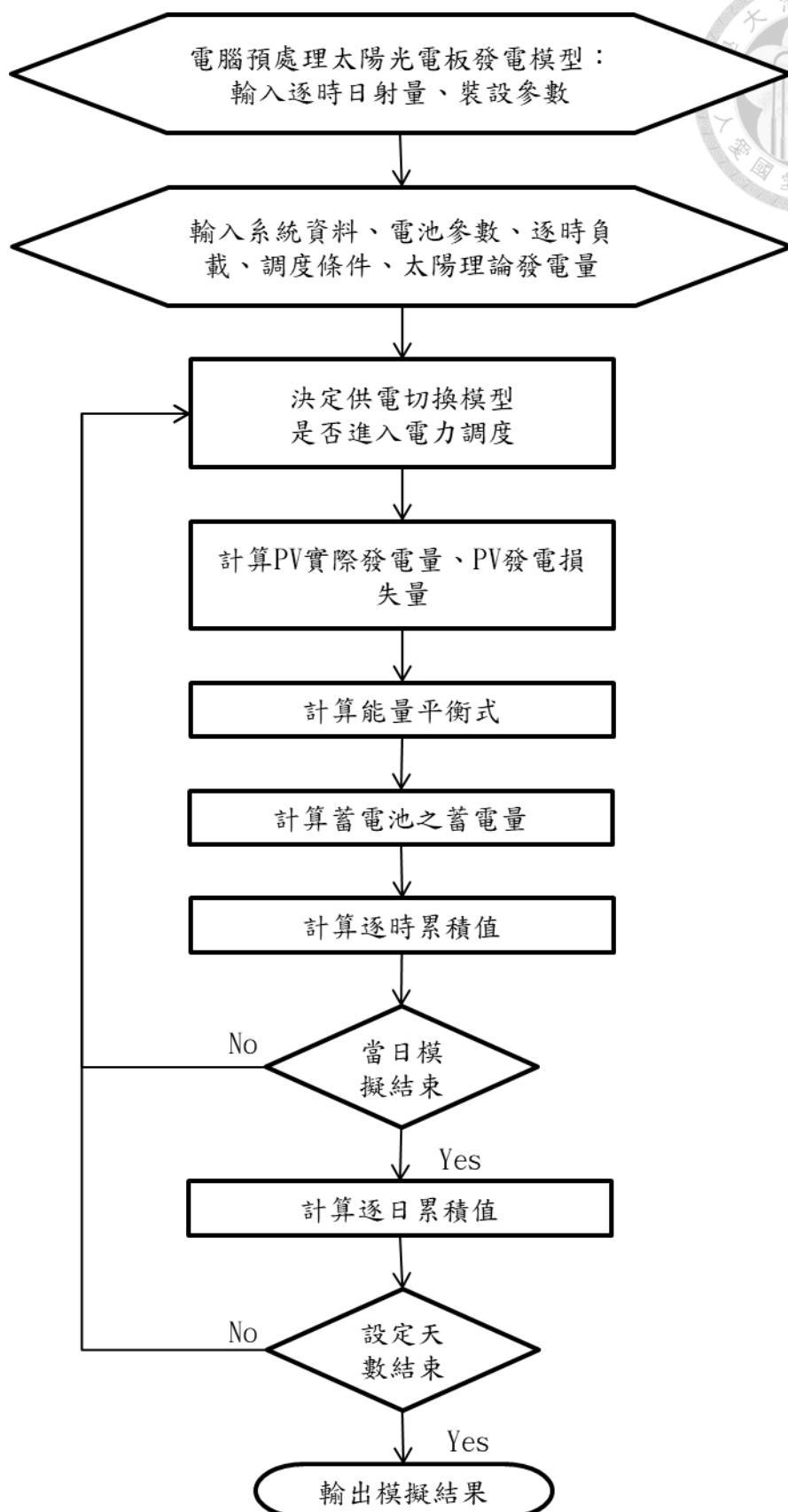


圖 3.1-5、HyPV-net2 系統模擬流程圖



3.2 個體戶太陽光電系統運作模擬器設計

個體戶太陽光電系統的模擬器(個體戶模擬器)[3]是來模擬真實的 HyPV-net2 個體戶的操作狀態。而整套八戶(4+4)模擬系統主要由三大模組組合而成：個體戶性能模擬器、CCU 及同步器，如圖 3.2-1。以個體戶性能模擬器為首，產生 HyPV 的模擬運作狀態，經由真實的 RS-485 訊號和同步訊號與電力調度控制器與同步器相互運作，使三個模組一同模擬出實際在 HyPV-net2 系統中資料傳輸的行為與電力調度操作。藉由此模擬實驗，可以分析太陽能微電網系統效能，包含發電效益、通訊穩定度，以及測試 CCU 調度邏輯條件與指揮控制，並且設定偵錯機制，可以測得訊號在傳送過程中的資料丟包次數。

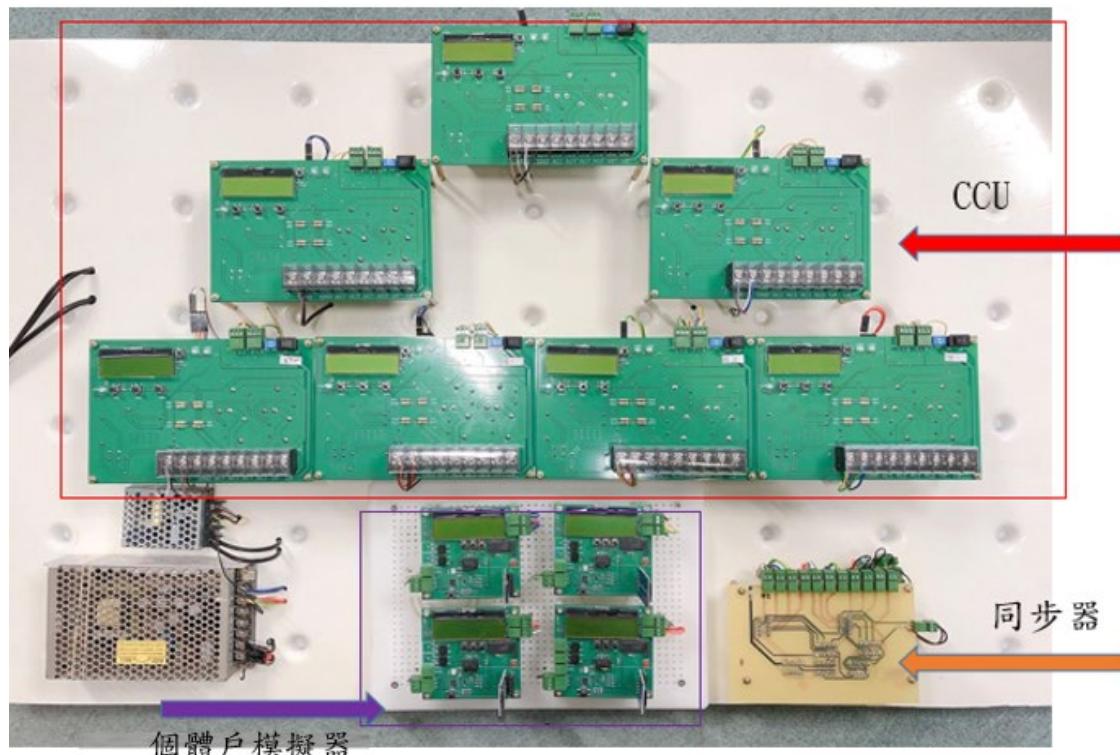


圖 3.2-1、HyPV-microgrid 架構 4+4 電路模擬系統實體圖



3.2-1 個體戶模擬器

個體戶性能模擬器為一台實際的控制電路，如圖 3.2-2~圖 3.2-4，模擬器模擬了前一節所建立出的模型與 HyPV-net2 系統運作，模擬器的單晶片(PIC18F26K22)中建有能量平衡模型，透過載入輻射量資料與負載變化，就可以執行單一的 HyPV 系統個體戶性能模擬。而一台個體戶模擬器最多可模擬兩套 HyPV 個體戶系統。加裝了 CCU 後，模擬器就能夠透過 RS-485 接收到 CCU 的指令，執行電力調度。其中模擬參數條件、載入資料如下。

(a) Load Pattern :

設定 HyPV 的負載變化與大小，需載入依每小時數值變化的負載模型，

(b) System Parameters :

- (1) 太陽能板個數：模擬系統的太陽能板的裝設個數。
- (2) 日期：選擇要開始模擬的日期與結束日期。
- (3) 電池資料：電池總容量(Ah)、電池電壓。
- (4) 初始狀態：電池容量(Ah)、系統供電模式。
- (5) 逆變器轉換效率：逆變器將直流電轉換成交流電的效率。

(c) Switching Control :

此為 PV Mode/Grid Mode 供電模式切換控制設定，有固定、Fuzzy、梯形三種。

(d) 太陽光電板發電量：

電腦預處理的每小時理論太陽能板發電量。



圖 3.2-2、個體戶性能模擬器電路板[3]

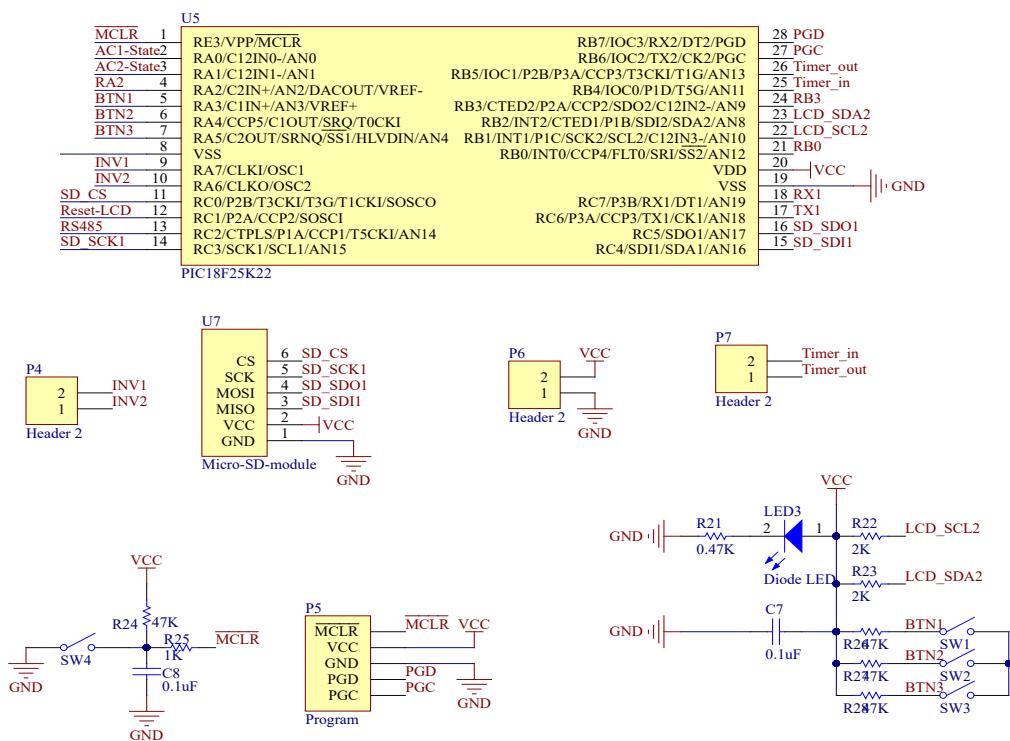


圖 3.2-3、個體戶性能模擬器電路圖-核心部分(單晶片與控制按鈕)[3]

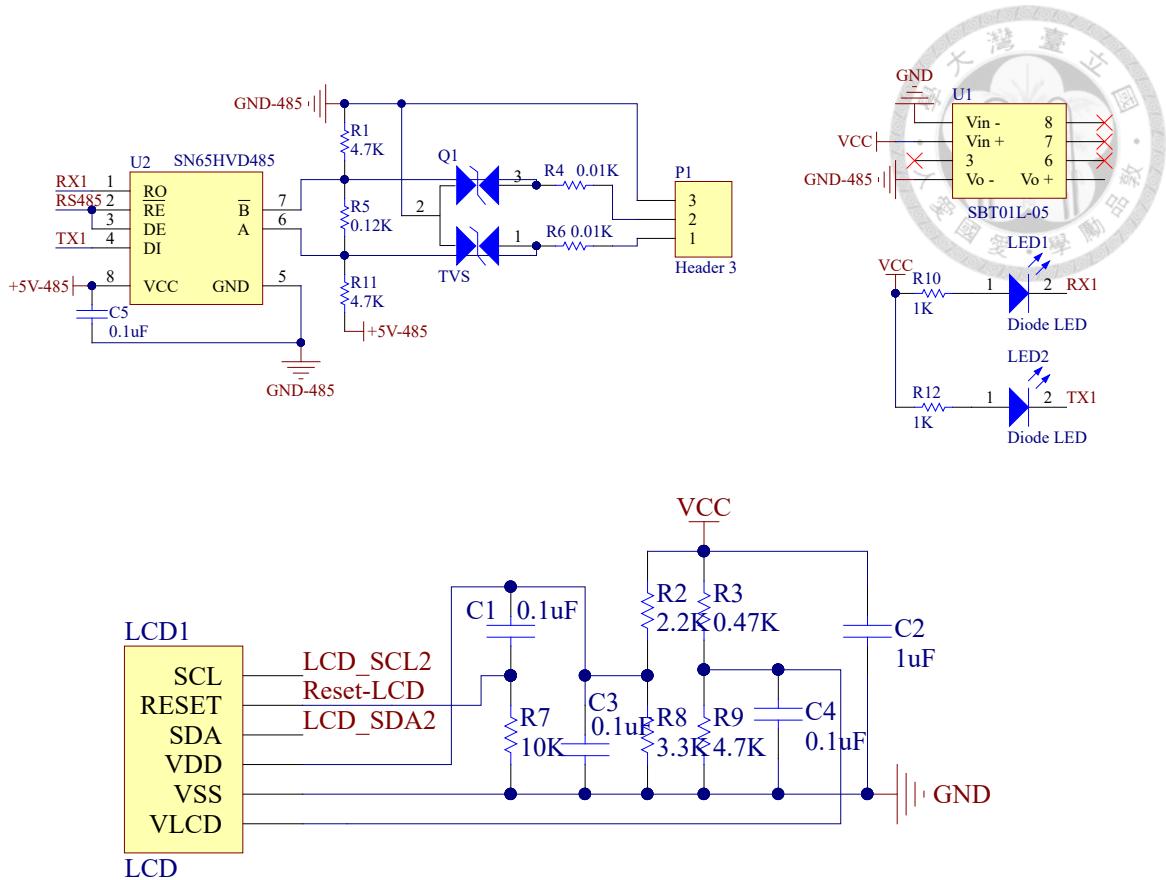


圖 3.2-4、個體戶性能模擬器電路圖-通訊部分(上)、顯示部分(下)[3]

其中電腦預處理太陽能板發電量的模擬軟體是使用 Matlab 軟體來撰寫，以台灣大學熱流控制實驗室驗證過的 HyPV 模擬程式[26]為基礎，藉由其中部分的功能，可將氣象局每小時的日射量，轉換為理論單一太陽能板的發電量，就能推算系統安裝位置的太陽能板實際發電量，模擬程式介面、需載入資料，如圖 3.2-5。

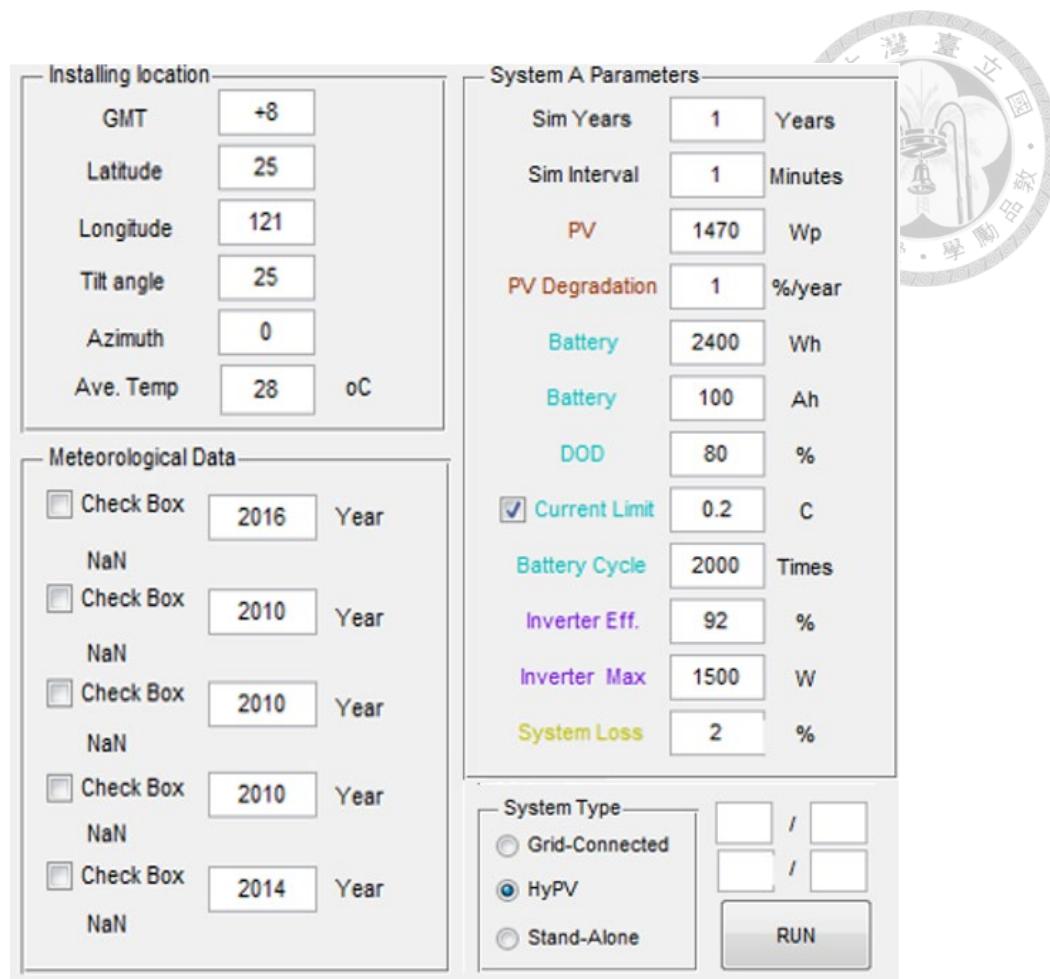


圖 3.2-5、HyPV 系統模擬電腦預處理的軟體部分介面圖與參數設定

(a) Installing Location:

設定太陽光電板的傾斜角度及安裝方向。

(1) Latitude: 系統安裝地區的緯度。

(2) Longitude: 系統安裝地區的經度。

(3) Tilt angle: 光電板的板面和陸地水平面之間的夾角。模擬預設值為安裝地區的緯度。

(4) Azimuth: 光電板的板面朝向垂直面與正南方向之間的夾角。一般而言，朝向正南面的發電量最大。模擬預設值為零度，即正南方。

(5) Ave. Temp: 模擬地區的月平均溫度加上修正溫度後的值。台北地區月平均溫度為 27 度，台南地區則為 28 度。



(b) Meteorological Data:

匯入氣象局測得之系統安裝地區逐時日射量資料。

(c) 太陽能板規格：

在標準測試條件下(STC, standard test conditions)，太陽光電板於日輻射量 $1,000 W/m^2$ 照射下，並且太陽光電板溫度維持在 25°C 時，所產生的最大發電量 (W_p) 為太陽光電板規格。



3.2-2 HyPV 與 CCU 的同步器

八戶(4+4)模擬系統主要是由個體戶電路模擬器與 CCU 兩組控制器搭配同步器所組成，同步器的功能在於使所有個體戶操作上的同步，如圖 3.2-6，把個體戶模擬器和 CCU 兩種控制器的程式主迴圈都視為各控制器一次週期的工作，每個控制器只要將自己一次週期的工作完成後，就把輸出訊號拉低至同步器輸入腳位的電位，待所有控制器輸出至同步器的輸入腳位皆為低電位時，同步器則輸出一高電位訊號，此時各控制器的輸入腳位讀到來自同步器輸出的高電位訊號後，會把輸出至同步器的輸出腳位改為高電位，待所有控制器的輸出腳位都為高電位後，同步器輸出腳位改為低電位，各控制器開始執行下一週期的工作，運作循環圖如圖 3.2-7，系統只會等待控制器尚未執行完工作的時間，而不會像真實系統一樣等待一固定時間，利用主動式同步所有控制器的方式可提升整體模擬運作的速度，同步器邏輯電路如圖 3.2-8。

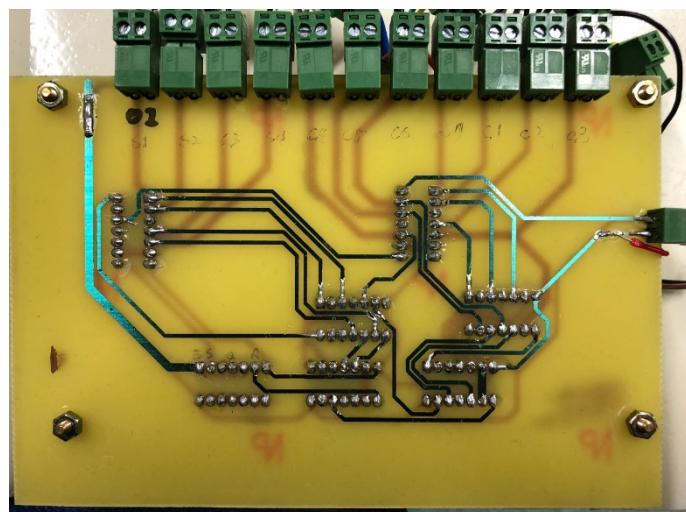


圖 3.2-6、個體戶與 CCU 同步器電路板

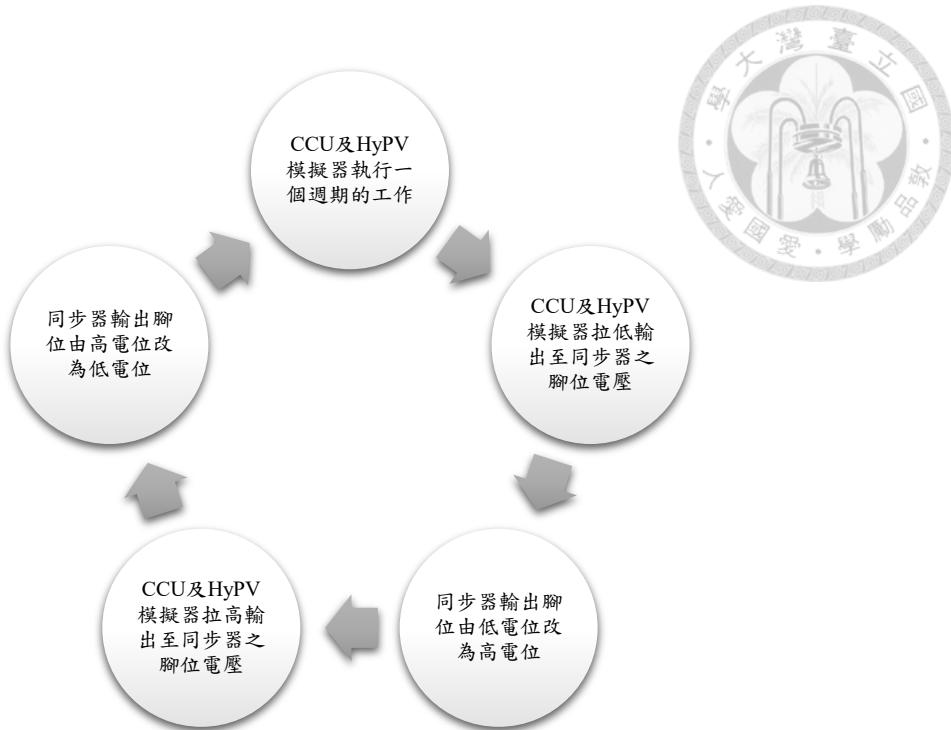


圖 3.2-7、系統運作循環圖

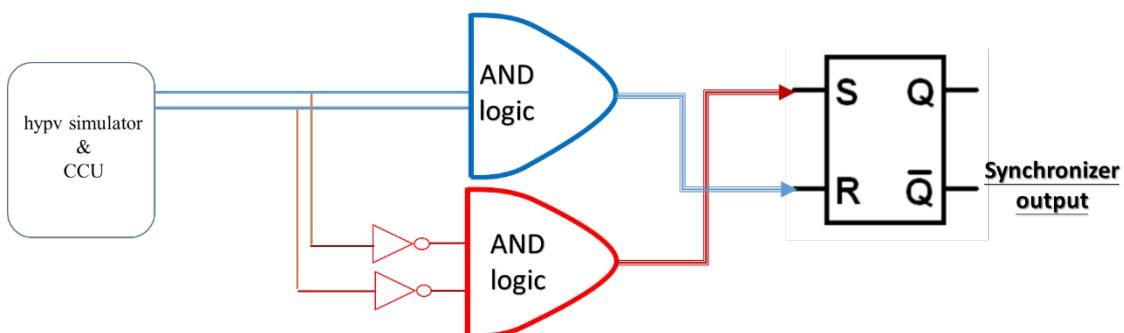


圖 3.2-8、同步器邏輯電路圖

同步器主要為 AND Gate、NOT Gate、SR Latch 組合而成，而 HyPV 電路模擬器與 CCU 上要設計一組 IO 腳位接上同步器。藉由同步器的輸入與輸出來判斷何時進入下一周期，當控制器結束此週期工作後，會把同步器輸入腳位拉低，而同步器會在所有的輸入腳位都拉低時產生同步器輸出腳位的高電位，告訴所有控制器可以執行下一個周期。若所有控制器已在下一個周期，而將同步器輸入腳位回復高電位，且同步器輸出腳位也將輸出低電位，達成一次完整的同步器運作，其同步器輸出電位真值表，如表 3.2-1。

表 3.2-1、同步器輸出真值表

Synchronizer Input	Q	\bar{Q} (Synchronizer Output)
其他狀態		Not change
全部控制器已進入下一周期	1	0
全部控制器完成此週期工作	0	1

而同步器使用邏輯 IC 實現主要目的為提高同步的速度，因為在選用的 IC 中反應時間大約在 9ns 左右，而 HyPV 電路模擬器時脈為 16MHz，所以可將反應時間忽略不計，如圖 3.2-9，有三組同步器訊號，分別為訊號 1：同步器輸出、訊號 2：同步器輸入(由 HyPV 電路模擬器)、訊號 3：同步器輸入(由 CCU)，運作行為如下敘述，而實測結果 HyPV 電路模擬系統相較於實際運作的系統以約 480 倍的速度執行模擬。

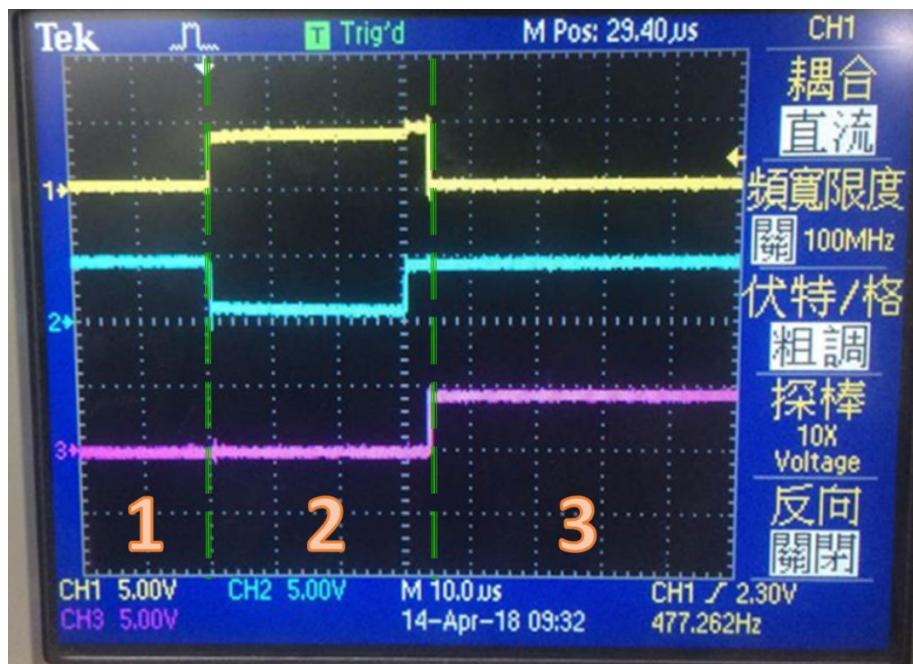


圖 3.2-9、同步器工作波型圖

(期間1)訊號 2 的控制器未完成周期內的工作，電位處於高電位，而訊號 3 已處於低電位。

(期間2)訊號 2 已完成周期內工作，將電位拉低，同時訊號 1 偵測到所有控制器已完成工作，立即將電位拉高，等待所有控制器進入下一個周期。

(期間3)訊號 3 已進入下一個周期工作，訊號 1 會再次拉低電位，等待下一次所有控制器完成工作，回到期間 1 且重複此順序。

而模擬系統所使用的電力調度控制器 CCU 與 HyPV-microgrid 架構中的電力調度控制器是相同的，而其中最重要的調度邏輯也相同，故可以真實呈現原系統運作模式，並也使用偵錯機制，計算資料丟包次數，把預期會回傳的資料卻沒有回傳發生的次數當作指標，代表通訊的穩定度，可以分析模擬過程中訊號的可靠度。

但是電路模擬中的 CCU 為了達成同步器加速運行與動作同步的目的，須針對實際系統內的計時器進行修正，原先實際的 CCU 是利用單晶片中的 Timer 功能，計數了一秒鐘才執行每秒所該做的事情，例如每五秒詢問 HyPV 資料。而 HyPV 模擬器所連接的 CCU 並沒有真實的時間，導致不知道其他模擬器執行到哪一個時刻，需透過同步器與其他控制器進行時間同步，利用同步器訊號的電位變化，可以使 CCU 與模擬器同步執行計算。此方法藉由單晶片裡的中斷功能，當偵測到同步器輸入腳位電位發生變化時，CCU 就必須執行下一個週期的工作，取代了原先 Timer 功能。

為了加速運行的速度，針對電路模擬中的 CCU 通訊速度進行優化，因為外部通訊的傳輸速度相較於單晶片執行速度是非常慢的，因此調整 RS-485 傳輸速率從原本的 19.2KHz 提升至 115.2KHz，使系統運行速度增快了六倍[3]，達成加速運轉測試的目的。



3.3 HyS 運作模擬軟體

由於本實驗為結合微電網與 HyS 系統的雙儲能微電網研究，而原先 4+4 模擬系統僅有針對 HyPV 系統寫出相容的軟體程式，故本研究將新增 HyS 的模擬程式來進行實驗，以下將簡單介紹 HyS 模擬程式的新增。

HyS 系統相比於 HyPV 系統主要就是多了熱水器及需量反應功能，可以大致理解為有熱水器及需量反應功能的 HyPV 系統。基於方便以及無特別需求的情況下，本研究並無新增 HyS 性能模擬器硬體，而是沿用 HyPV 性能模擬器硬體，僅針對軟體部分進行擴增、改寫。利用#define 及#if、#else if 語法在程式最一開始就決定燒入至 HyPV 性能模擬器的是 HyPV 模擬程式或是 HyS 模擬程式，然後進行整個實驗的模擬。本研究最主要就是探討微電網結合蓄熱功能對發電效益是否有提升，故 HyS 模擬程式最重要的數據就是每個瞬間的發電量，並以此為重點來擴增 HyS 模擬程式。

由於模擬程式有模擬電池的電量，故對於 HyS 的調度或是蓄熱的邏輯，都將以電池容量進行判斷，電池最大容量皆為 100Ah。而實體 HyS 是以溫度達到 65 度來結束蓄熱程序，由於本模擬程式並無模擬熱水器的水溫，故以電池放電量 DB 來取代水溫的結束蓄熱條件，觀察實體數據後發現通常進入蓄熱模式後到結束蓄熱期間電池放電量 DB 約為 10~15Ah，故本實驗以 DB=15Ah 來代表結束蓄熱的臨界條件。HyS 的模擬程式主要可分為兩個部分：需量反應期間及非需量反應期間。

在非需量反應時，若逆變器原本關閉，而電池容量超過 85Ah，則開啟逆變器，此時可以供負載使用或賣電。若是未連結調度且負載小於 100W 超過 25 分鐘，則發電量供給熱水器使用，此時模擬程式假設 SCR 控制 30% 熱水器最大功率，故若熱水器最大功率為 3000W，則在模擬實驗的蓄熱模式時，HyS 將會供給 900W 的電量給蓄熱裝置，這時由式(3.3-1)，若該瞬間的最大發電量 P_{pv_A} 大於熱水

器用電量 P_{L_B} 也就是 900W 的話，多出來的發電量為電池的充電量 P_{bat_A} ，此時瞬間發電量 P_{pv} 等於 P_{pv_A} ；直到電池容量達 100Ah，電池無法再充電，這之後的瞬間發電量 P_{pv} 等於 P_{L_B} 等於 900W 直到結束蓄熱；而 P_{pv_A} 若小於 P_{L_B} 則 P_{bat_A} 為負值，及電池處於放電狀態，該瞬間最大發電量 P_{pv_A} 即為系統的瞬間發電量 P_{pv} 。在 $DB > 15Ah$ 後，HyS 會將熱水器切回市電並使逆變器關閉，流程圖如圖 3.3-1。

$$P_{bat_A}(t) = P_{pv_A} - P_{L_B}, \quad (3.3-1)$$

而在需量反應時，若電池容量超過 30Ah 即開啟逆變器並將負載切至太陽能供電，並且不能參與調度。若是負載小於 100W 超過 25 分鐘，則發電改為供給熱水器使用，並且瞬間發電量 P_{pv} 的計算方式如非需量反應期間一樣。而當電池容量小於 30Ah 或是結束需量反應期間則將熱水器切回市電並使逆變器關閉，流程圖如圖 3.3-2。

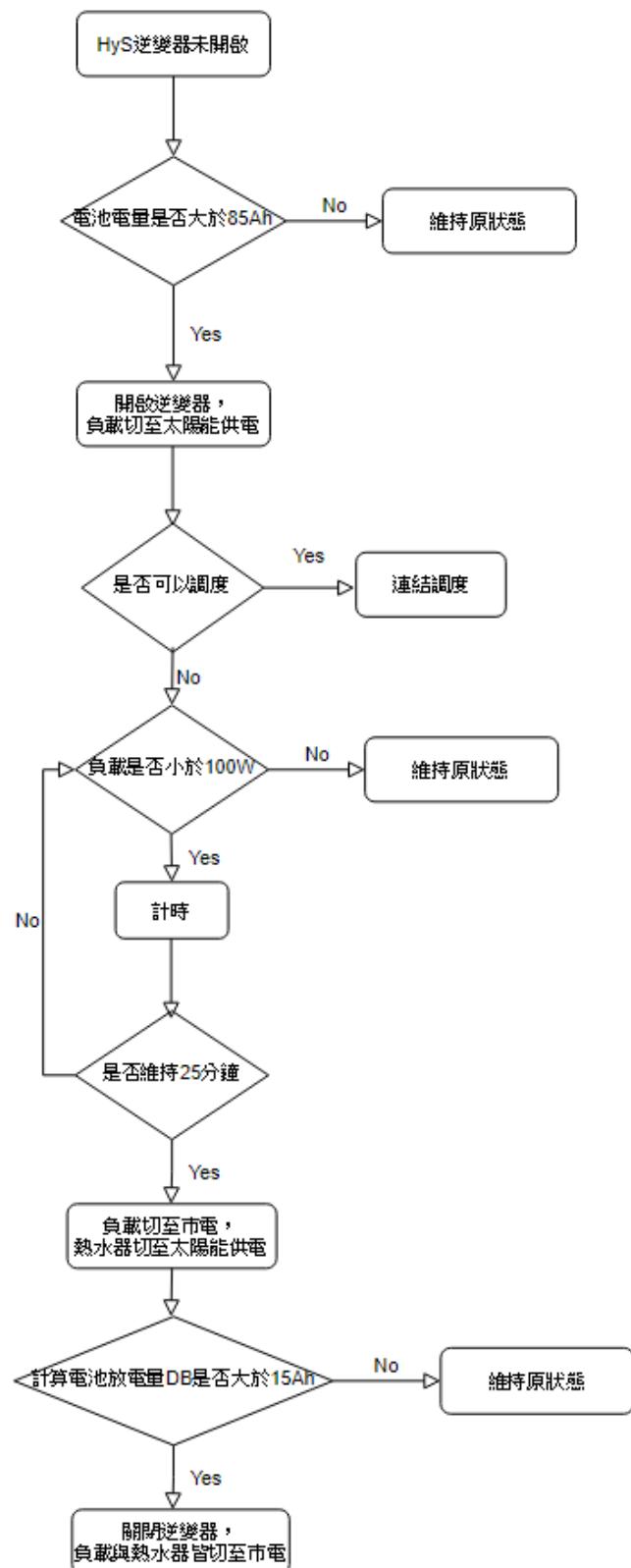


圖 3.3-1、HyS 於非需量反應期間的邏輯流程圖

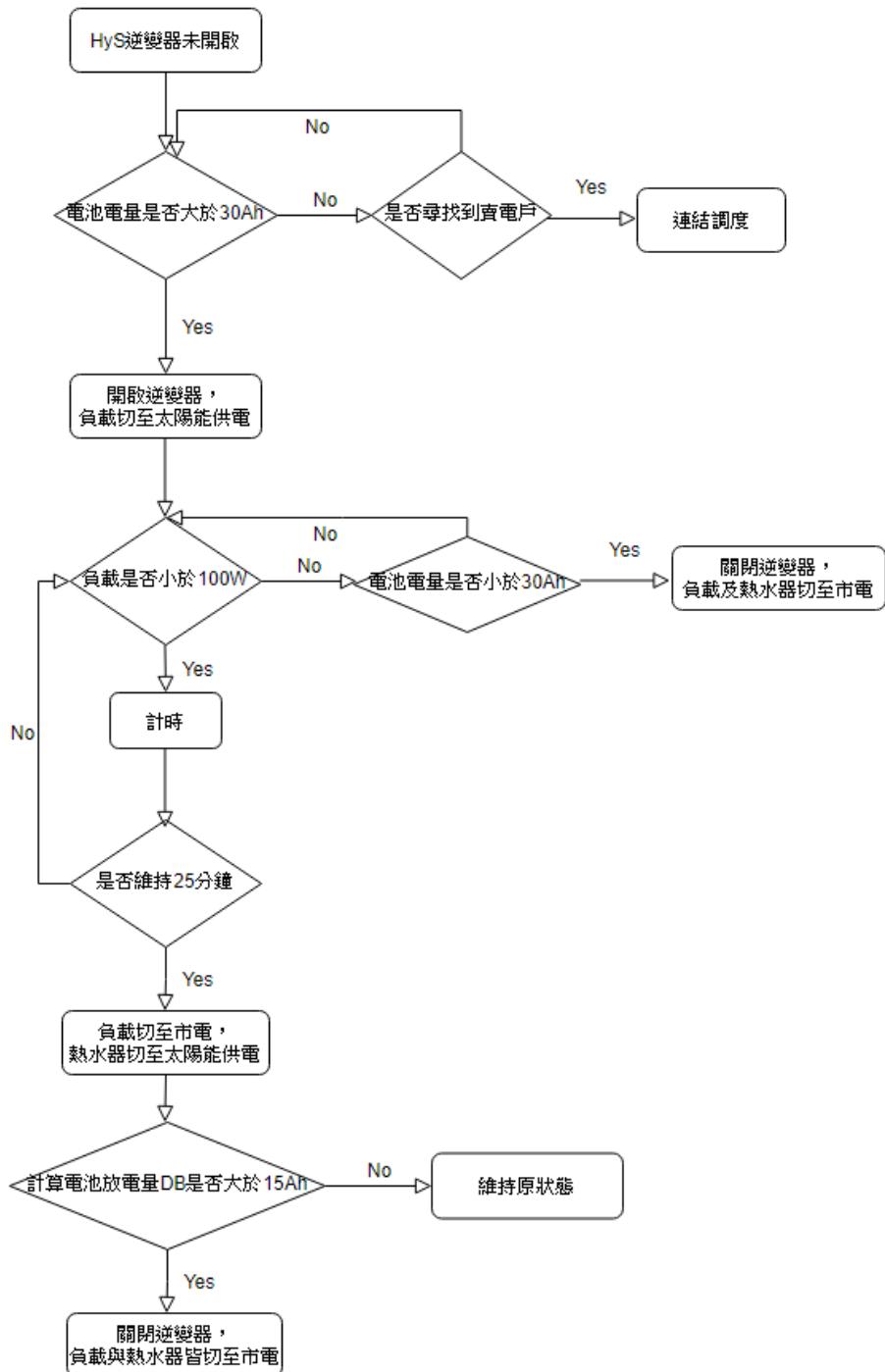


圖 3.3-2、HyS 於需量反應期間的邏輯流程圖

第四章 金子塔太陽能微電網不同指揮調度法的性能分析



4.1 系統設計

本研究首先須先驗證模擬系統的準確度，若準確度符合我們預期，之後以模擬系統進行實驗才有其研究價值。因此首先必須搭建 4+4 的八戶實體個體戶微電網，進行實體微電網實驗，並依實體微電網規格進行相符的模擬系統實驗，最後比較兩者準確度，以下針對實體系統與模擬系統的設計進行詳細的介紹。

4.1-1 4+4 實體系統

本實驗總共搭建了八套實體個體戶系統與 7 台電力調度控制器(CCU)，其中四套個體戶系統為 HyPV 系統，四套為 HyS 系統，每兩個體戶系統從屬一 Master-CCU，故有四台 Master-CCU，而每兩 CCU 又有一更高層的 CCU，故整體架構圖如圖 4.1-1，所以總共為 7 台 CCU。為方便敘述，以下定義八套個體戶代號為 U1~U8，其中 U1~U4 分別代表四套 HyPV 系統，U5~U8 則代表四套 HyS 系統；而四台 Master-CCU 代號為 A1~A4 分別為 U1~U8 的 Master-CCU；接著則是更高層的 B 層級 CCU：B1 和 B2，分別為 A1~A4 的更高層 CCU；最後則是最上層級 C 層級的 CCU：C1。整體微電網架構簡介如表 4.1-1。為方便進行實體實驗的更動，實體微電網指揮調度方面採用機動式指揮調度的方式。

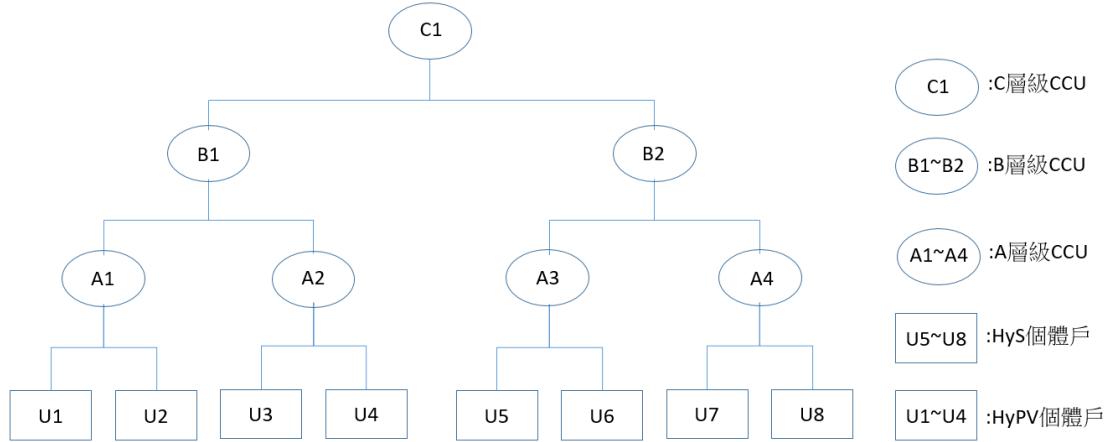


圖 4.1-1、實體微電網架構圖

表 4.1-1、8 戶個體戶簡介

個體戶名稱	個體戶代稱	控制器類別	從屬之 CCU	24V/48V
D0	U1	HyPV	A1	24V
D2	U2	HyPV	A1	24V
T1	U3	HyPV	A2	48V
T2	U4	HyPV	A2	48V
803	U5	HyS	A3	24V
ZEH	U6	HyS	A3	24V
PVT-F	U7	HyS	A4	24V
PVT-N	U8	HyS	A4	24V

以下將以實體照片搭配表格來簡述實體系統的搭建規格。

表 4.1-2、U1 及 U2 詳細規格



個體戶	控制器	電池	太陽能板	逆變器	負載	熱水器
U1	HyPV	12V-100Ah*2	690Wp	COTEK SP-1500	變頻冷氣	無
U2	HyPV	12V-100Ah*2	460Wp	COTEK SE-350	樓梯間燈	無



圖 4.1-2、U1 系統實體圖



圖 4.1-3、U2 系統實體圖

表 4.1-3、U3 及 U4 詳細規格



個體戶	控制器	電池	太陽能板	逆變器	負載	熱水器
U3	HyPV	12V-100Ah*4	1380Wp	COTEK SP-1500	照明用燈	無
U4	HyPV	12V-100Ah*4	1380Wp	COTEK SP-2000	照明用燈	無



圖 4.1-4、U3 系統實體圖



圖 4.1-5、U4 系統實體圖

表 4.1-4、U5 及 U6 詳細規格



個體戶	控制器	電池	太陽能板	逆變器	負載	熱水器
U5	HyS	12V-100Ah*2	1080Wp	Mean Well TS-1500	變頻冷氣	有
U6	HyS	12V-100Ah*2	1080Wp	Mean Well TS-1500	變頻冷氣	無



圖 4.1-6、U5 系統實體圖

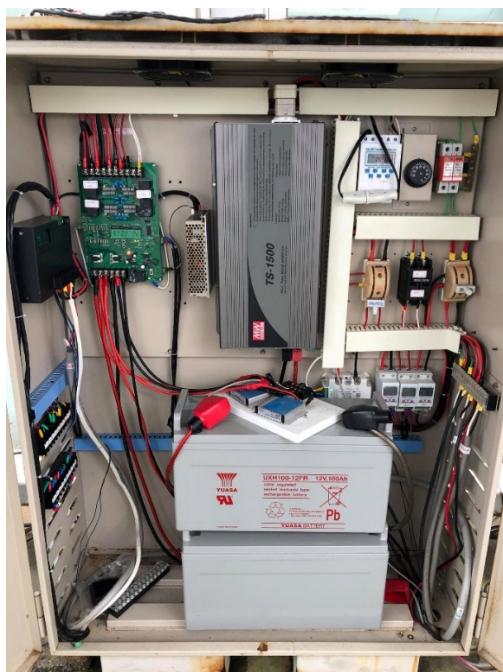


圖 4.1-7、U6 系統實體圖

表 4.1-5、U7 及 U8 詳細規格

個體戶	控制器	電池	太陽能板	逆變器	負載	熱水器
U7	HyS	12V-100Ah*2	1080Wp	COTEK SP-1500	照明用燈	無
U8	HyS	12V-100Ah*2	1080Wp	COTEK SP-1500	照明用燈	有

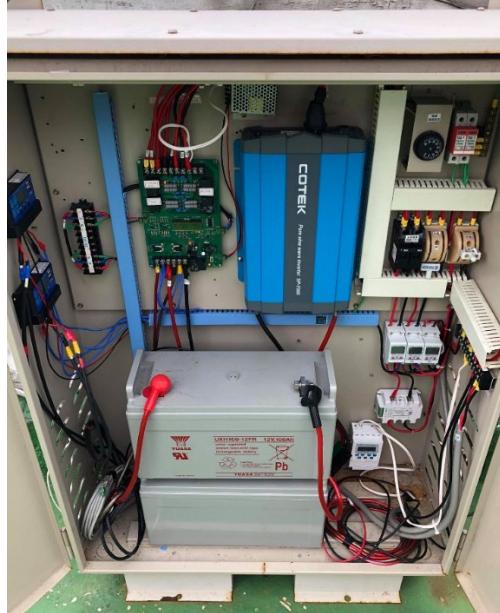


圖 4.1-8、U7 系統實體圖

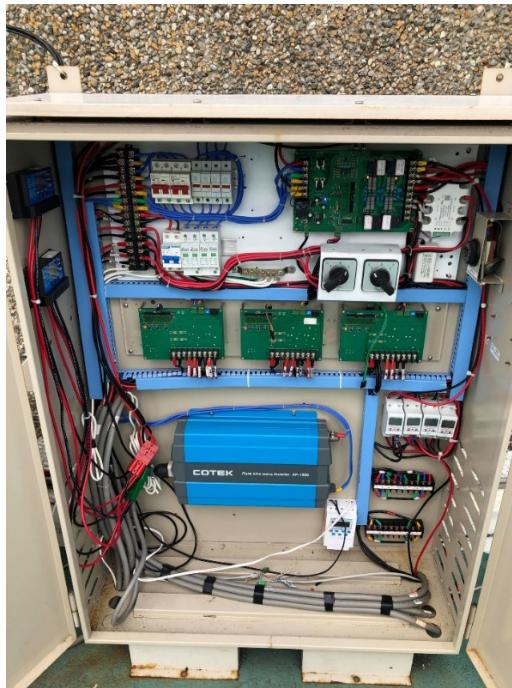


圖 4.1-9、U8 系統實體圖



4.1-2 4+4 模擬系統

如第三章所介紹的 4+4 模擬系統，將實體微電網各項規格以及負載用電取每小時平均，輸入至個體戶性能模擬器軟體中，並且利用輻射儀量測到的瞬時輻射量做每小時平均再以電腦 Matlab 軟體如圖 4.1-10 做預處理得到太陽能板瞬時最大發電量後，輸入至個體戶性能模擬器軟體，即可開始模擬 4+4 微電網運作。

Installing location		System A Parameters	
GMT	+8	Sim Years	1 Years
Latitude	25	Sim Interval	1 Minutes
Longitude	121	PV	1470 Wp
Tilt angle	25	PV Degradation	1 %/year
Azimuth	0	Battery	2400 Wh
Ave. Temp	28 oC	Battery	100 Ah
Meteorological Data			
<input type="checkbox"/> Check Box	2016 Year	<input checked="" type="checkbox"/> Current Limit	0.2 C
NaN		Battery Cycle	2000 Times
<input type="checkbox"/> Check Box	2010 Year	Inverter Eff.	92 %
NaN		Inverter Max	1500 W
<input type="checkbox"/> Check Box	2010 Year	System Loss	2 %
NaN		System Type	
<input type="checkbox"/> Check Box	2010 Year	<input type="radio"/> Grid-Connected	/
NaN		<input checked="" type="radio"/> HyPV	/
<input type="checkbox"/> Check Box	2014 Year	<input type="radio"/> Stand-Alone	RUN
NaN			

圖 4.1-10、Matlab 預處理介面

實體數據總共取了 30 天數據，分別是從 3/16~3/30 與 5/3~5/18，其中 3/23 系統故障進行維修未取其數據，所以總共是 30 天的數據。將這 30 天的日輻射量及負載用電量整理為每小時平均的資料輸入個體戶性能模擬器，並以三種指揮調度方式進行模擬，分析模擬的準確度及三種不同指揮調度是否有不同處。



4.2 實驗結果

4.2-1 實體及模擬結果比較

實體微電網實驗的 CCU 是以機動式調度指揮的方式進行調度指揮，故針對模擬系統的準確度實驗，我們也先以機動式指揮調度的方式進行模擬，並比較其主要數據如日調度量、日發電量、微電網提升的發電量及發電效益等的差異，分析其準確度高低。

實驗結果整理主要數據如表 4.2-1、表 4.2-2，依照這些數據可以看出通常日輻射量越高總發電量與總調度量就會越高，如圖 4.2-1、圖 4.2-2、圖 4.2-3、圖 4.2-4。但是在日輻射量達到 4000Wh 以上的時候，單日的總調度量趨勢將會趨於平緩，也就是日輻射量超過 4000Wh，對總調度量並無明顯的變化。究其原因在於本研究搭載之實體系統每天的負載用電量及用電時段大致固定，在日輻射量非常小時，因為每戶系統的發電量都小，不足以供給別戶使用，所以調度較難成立，而隨著日輻射量增大，每戶系統的發電量也增大，有些負載用電較小或是本身太陽能板安裝量大的系統就有足夠的電力可以供給他戶，此時若有需要買電的用戶，即可達成調度；而當日輻射量達到約 4000Wh 時，大部分在白天有使用的負載都可經由自身系統的發電或是調度而來的太陽能電力來供給用電，所以實驗結果才會呈現此種趨勢，如圖 4.2-3、圖 4.2-4。

表 4.2-1、實體 4+4 微電網 30 日主要數據

日期	日輻射量 (Wh/m ²)	總調度量 (Wh)	日發電量 (Wh)	提升發電量比	發電效益 (Wh/W _p)
3 月 16 日	6378	1566	18887	9%	2.34
3 月 17 日	4186	2913	16467	21%	2.04
3 月 18 日	2393	2361	13572	21%	1.68
3 月 19 日	809	0	5315	0%	0.66
3 月 20 日	3004	2410	18500	15%	2.29
3 月 21 日	5154	2299	20342	13%	2.52
3 月 22 日	4547	2355	19986	13%	2.48
3 月 24 日	3366	701	14444	5%	1.79
3 月 25 日	4689	1930	20552	10%	2.55
3 月 26 日	5290	2678	24006	13%	2.97
3 月 27 日	3455	1225	15993	8%	1.98
3 月 28 日	694	0	4610	0%	0.57
3 月 29 日	3070	871	15753	6%	1.95
3 月 30 日	1691	2175	11132	24%	1.38
5 月 3 日	5394	3103	28132	12%	3.49
5 月 4 日	6369	1221	29030	4%	3.6
5 月 5 日	4818	2426	26429	10%	3.27
5 月 6 日	3082	1975	15849	14%	1.96
5 月 7 日	2647	2151	22108	11%	2.74
5 月 8 日	3848	3427	21693	19%	2.69
5 月 9 日	5910	2664	26827	11%	3.32
5 月 10 日	4309	2960	22112	15%	2.74
5 月 11 日	5323	1665	23968	7%	2.97
5 月 12 日	909	233	5799	4%	0.72
5 月 13 日	7183	2405	28323	9%	3.51
5 月 14 日	5438	2988	23875	14%	2.96
5 月 15 日	4895	1904	23211	9%	2.88
5 月 16 日	3614	2086	19115	12%	2.37
5 月 17 日	6517	2710	27584	11%	3.42
5 月 18 日	2236	2301	14066	20%	1.74
平均	4096	1990	19256	12%	2.38

表 4.2-2、機動式模擬 4+4 微電網 30 日主要數據

日期	日輻射量 (Wh/m ²)	總調度量 (Wh)	日發電量 (Wh)	提升發電量比	發電效益 (Wh/W _p)
3 月 16 日	6378	1476	21398	7%	2.65
3 月 17 日	4186	2889	17338	20%	2.15
3 月 18 日	2393	2040	11588	21%	1.44
3 月 19 日	809	0	3246	0%	0.4
3 月 20 日	3004	0	11204	0%	1.39
3 月 21 日	5154	1555	18950	9%	2.35
3 月 22 日	4547	2825	15525	22%	1.92
3 月 24 日	3366	2253	12510	22%	1.55
3 月 25 日	4689	1583	17304	10%	2.14
3 月 26 日	5290	2715	17503	18%	2.17
3 月 27 日	3455	2155	12637	21%	1.57
3 月 28 日	694	0	3257	0%	0.4
3 月 29 日	3070	342	12083	3%	1.5
3 月 30 日	1691	2094	10832	24%	1.34
5 月 3 日	5394	3595	26300	16%	3.26
5 月 4 日	6369	1922	26486	8%	3.28
5 月 5 日	4818	2886	23025	14%	2.85
5 月 6 日	3082	2445	15128	19%	1.87
5 月 7 日	2647	1334	12027	12%	1.49
5 月 8 日	3848	3101	17041	22%	2.11
5 月 9 日	5910	3758	24037	19%	2.98
5 月 10 日	4309	3891	18314	27%	2.27
5 月 11 日	5323	2701	21787	14%	2.7
5 月 12 日	909	558	4133	16%	0.51
5 月 13 日	7183	3154	26746	13%	3.31
5 月 14 日	5438	3555	20112	21%	2.49
5 月 15 日	4895	2482	20733	14%	2.57
5 月 16 日	3614	2383	14824	19%	1.84
5 月 17 日	6517	2500	23643	12%	2.93
5 月 18 日	2236	1979	9797	25%	1.21
平均	4096	2139	16316	15%	2.02

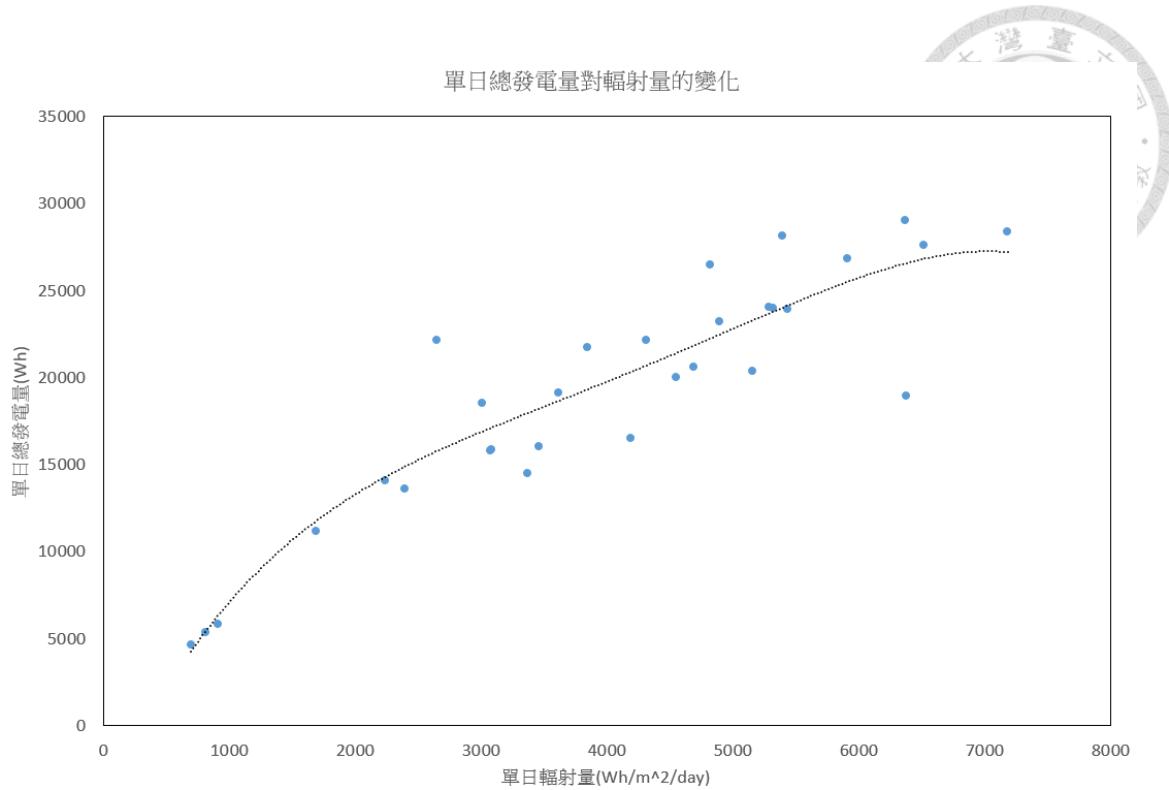


圖 4.2-1、日發電量對日輻射量變化圖(實體系統數據)

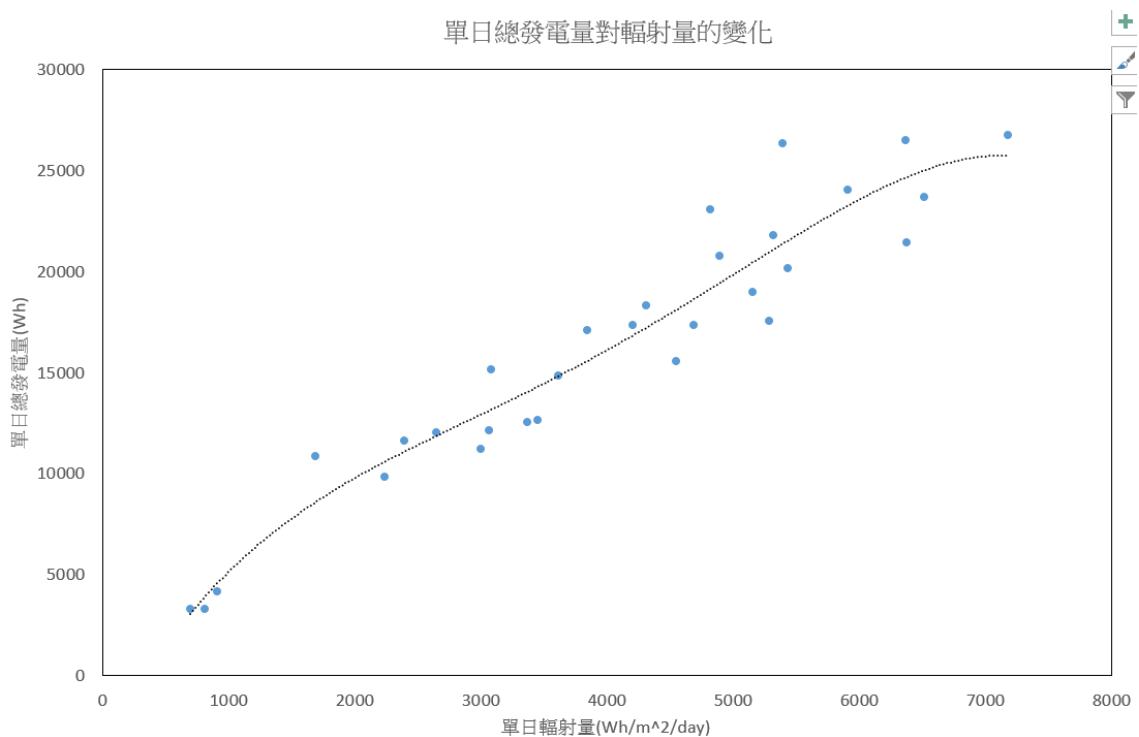


圖 4.2-2、日發電量對日輻射量變化圖(模擬系統數據)

單日總調度量對輻射量的變化

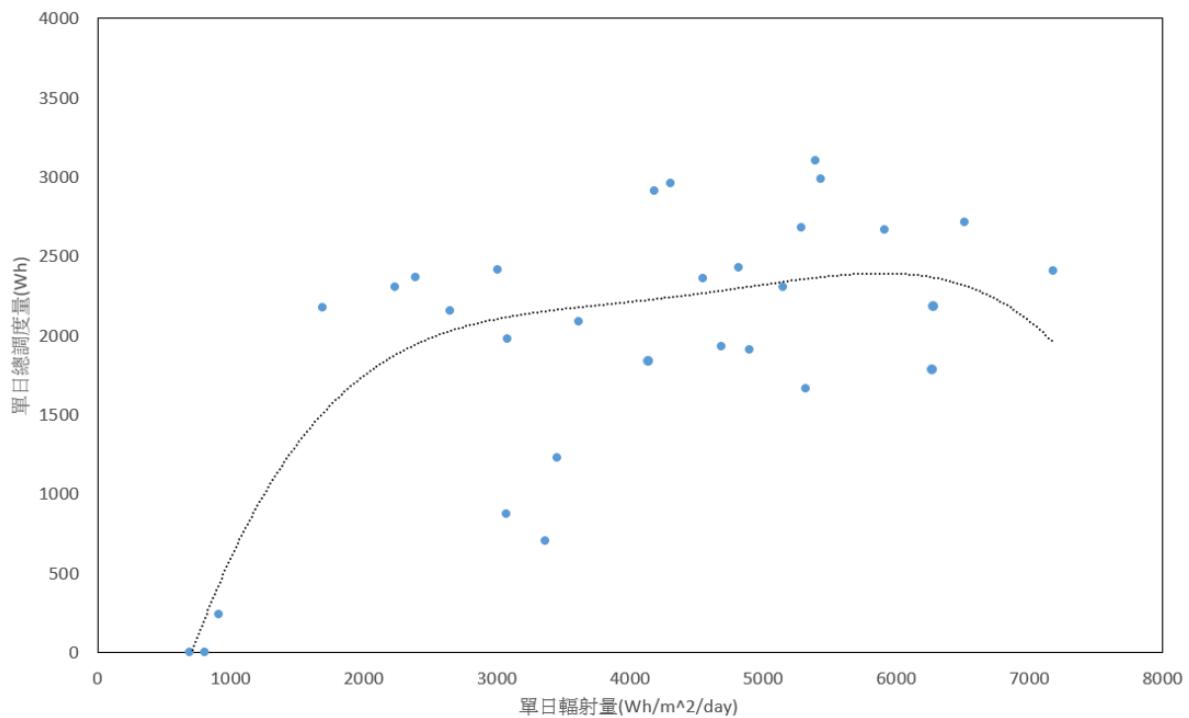


圖 4.2-3、日調度量對日輻射量變化圖(實體系統數據)

單日總調度量對輻射量的變化

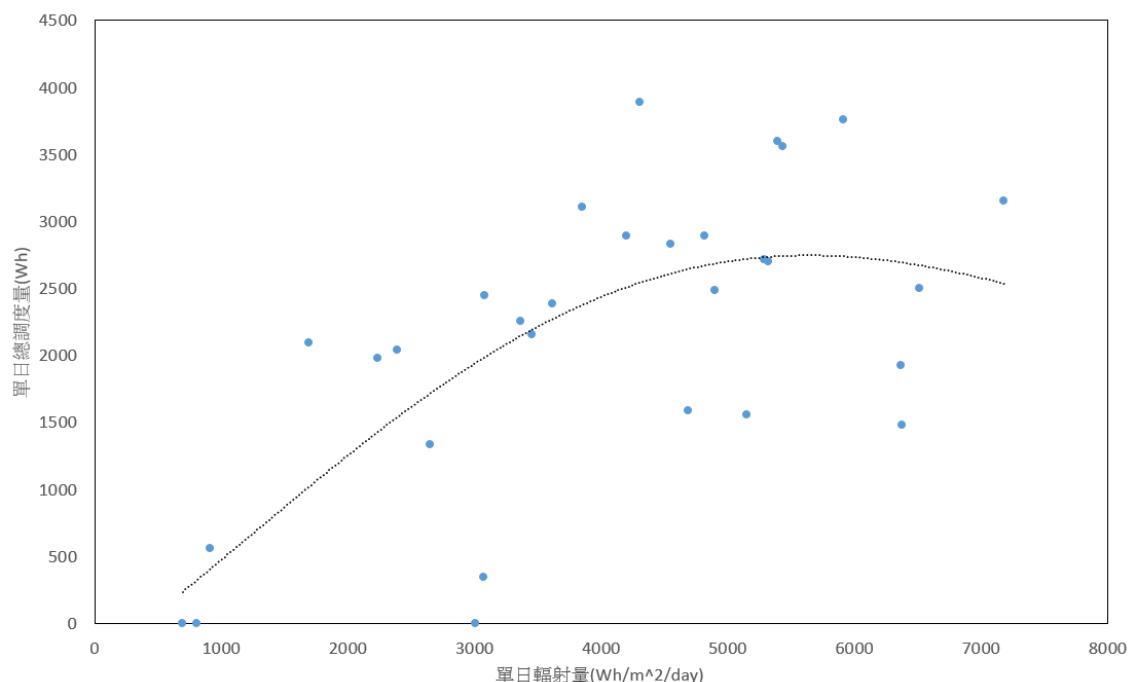


圖 4.2-4、日調度量對日輻射量變化圖(模擬系統數據)

由上述結果已知模擬系統與實體系統大致呈現相同的結果，接著將模擬系統與實體系統每日總調度量與總發電量做比較可得如表 4.2-3 的調度量及發電量差異，可以看到雖然每天的總調度量與總發電量都有差異，但是大致上都在可接受的範圍($\pm 45\%$ 內)，僅少數天數在總調度量上會有較大的誤差。雖然如此，由圖 4.2-5、圖 4.2-6 還是可以看出其模擬的每日總發電量及總調度量之變化趨勢大致與實體數據一致，故此模擬系統對於實體系統的模擬準確度是夠高且有參考價值的！後續實驗都將會以模擬的方式來取代實體的實驗，以此來減少搭建實體系統所需耗費的人力、物力及時間。

表 4.2-3、實體及模擬差異比較

日期	總調度量差異比 (Wh/m ²)	日發電量差異比 (Wh)
3月16日	6%	12%
3月17日	1%	5%
3月18日	14%	-15%
3月19日	0%	-39%
3月20日	100%	-39%
3月21日	32%	-7%
3月22日	-17%	-22%
3月24日	-69%	-13%
3月25日	18%	-16%
3月26日	-1%	-27%
3月27日	-43%	-21%
3月28日	0%	-29%
3月29日	61%	-23%
3月30日	4%	-3%
5月3日	-14%	-7%
5月4日	-36%	-9%
5月5日	-16%	-13%
5月6日	-19%	-5%
5月7日	61%	-46%
5月8日	11%	-21%
5月9日	-29%	-10%
5月10日	-24%	-17%
5月11日	-38%	-9%
5月12日	-58%	-29%
5月13日	-24%	-6%
5月14日	-16%	-16%
5月15日	-23%	-11%
5月16日	-12%	-22%
5月17日	8%	-14%
5月18日	16%	-30%
平均	7%	15%

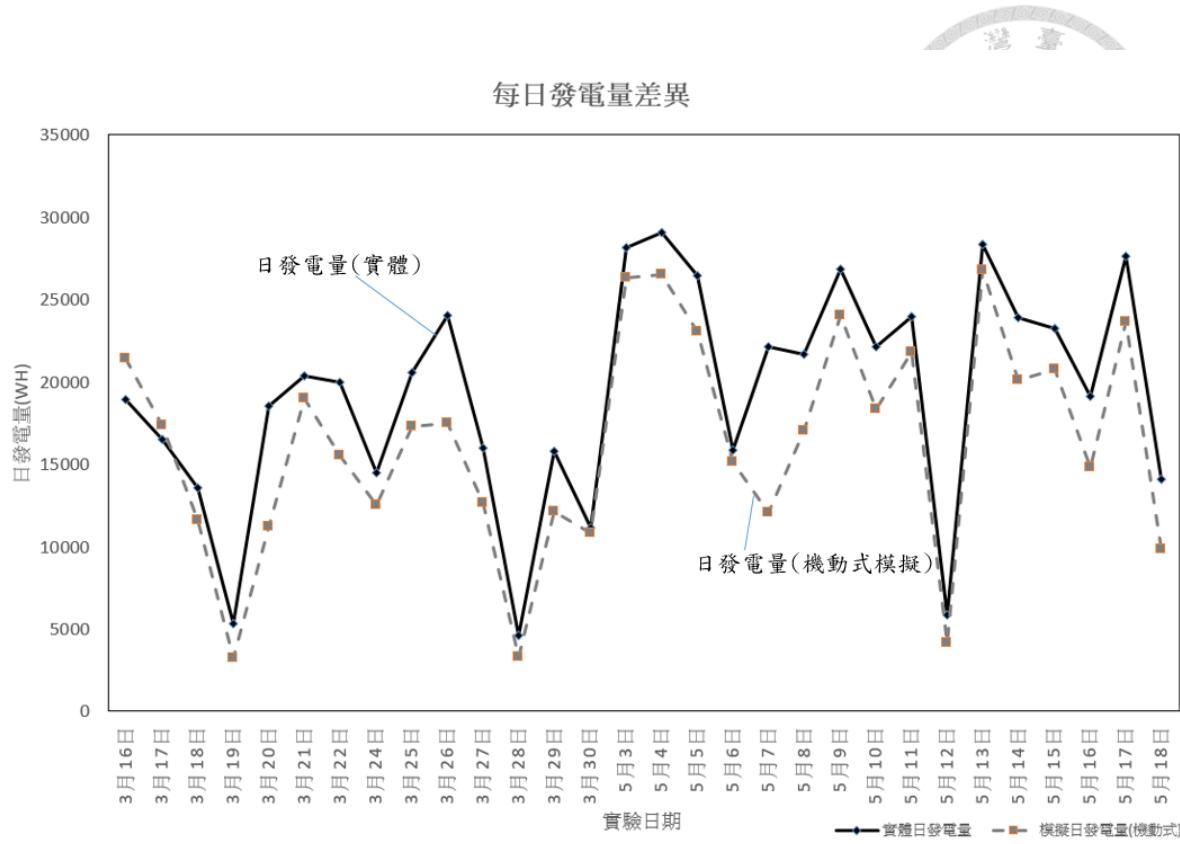


圖 4.2-5、實體及模擬之每日發電量差異圖

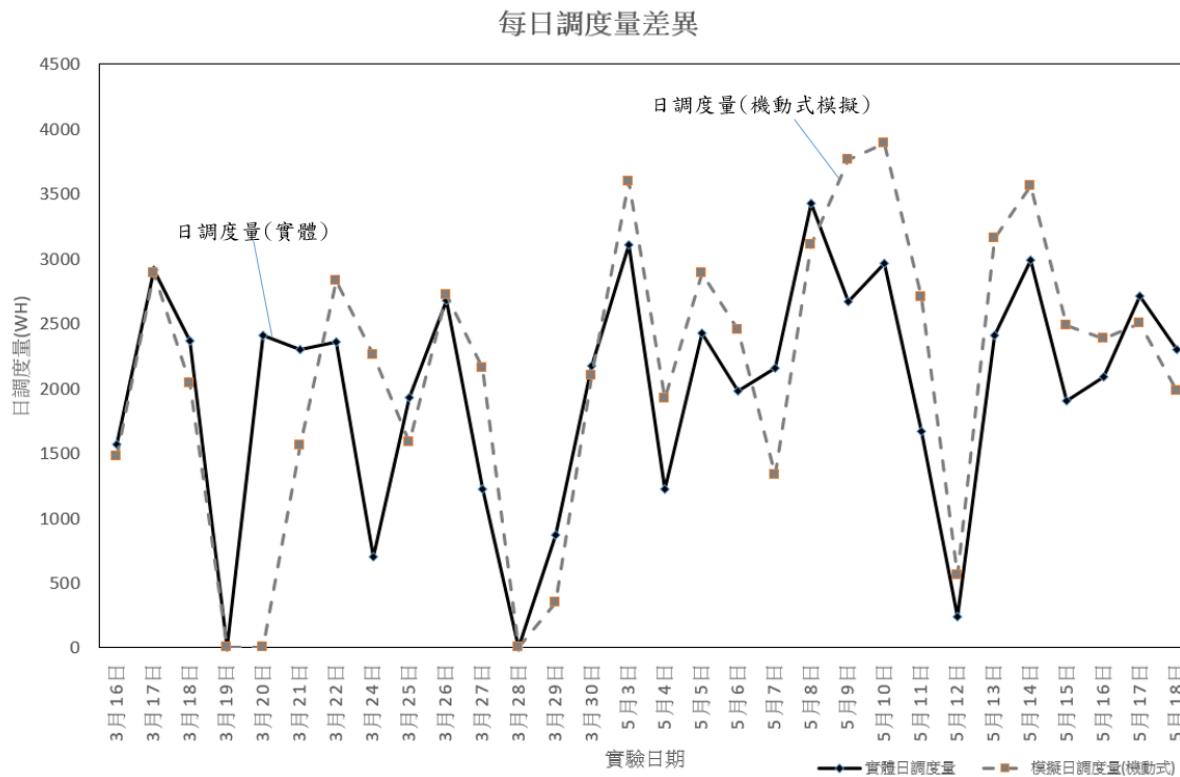


圖 4.2-6、實體及模擬之每日調度量差異圖



4.2-2 三種調度法結果比較

上節比較了實體實驗及機動式模擬實驗數據的差異，我們得到了模擬結果大致符合實體結果的趨勢，所以我們可用模擬實驗來取代實體實驗，使實驗更簡單、方便執行。接著我們就對另外兩種調度法：集權式調度法及分層式調度法進行模擬實驗，並對三種調度法的主要數據進行比較，檢驗是否存在差異。

集權式調度法的模擬實驗結果之主要數據如表 4.2-4，分層式調度法的模擬實驗結果之主要數據如表 4.2-5。我們針對兩者的總調度量及總發電量分別與機動式模擬實驗進行比較如圖 4.2-7 與圖 4.2-8，可以看到不論是調度量或是發電量，以三種不同調度方式模擬出的結果幾乎沒有差異，此與前人所做的實驗及結果[6]大致相符，其不同調度方式僅僅是程式邏輯的不同，對調度的影響幾乎是沒有，但依據前人所言[6]，此三種調度法在資料傳輸穩定度有明顯差異，以下針對此點進行研究及改善。

表 4.2-4、集權式模擬 4+4 微電網 30 日主要數據

日期	日輻射量 (Wh/m ²)	總調度量 (Wh)	日發電量 (Wh)	提升發電量比	發電效益 (Wh/W _p)
3 月 16 日	6378.7	1498	22305	7%	2.76
3 月 17 日	4186.4	2796	17269	19%	2.14
3 月 18 日	2393	1988	11678	21%	1.45
3 月 19 日	809.1	0	3152	0%	0.39
3 月 20 日	3004.7	0	11185	0%	1.39
3 月 21 日	5154.5	1601	18769	9%	2.33
3 月 22 日	4547.6	2698	15078	22%	1.87
3 月 24 日	3366.2	2376	12568	23%	1.56
3 月 25 日	4689.1	1583	17304	10%	2.14
3 月 26 日	5290.4	2686	17526	18%	2.17
3 月 27 日	3455.5	2098	12689	20%	1.57
3 月 28 日	694.8	0	3296	0%	0.41
3 月 29 日	3070.7	426	12113	4%	1.5
3 月 30 日	1691	2282	10965	26%	1.36
5 月 3 日	5394	3675	26652	16%	3.3
5 月 4 日	6369	1851	26438	8%	3.28
5 月 5 日	4818	2886	23025	14%	2.85
5 月 6 日	3082	2297	15246	18%	1.89
5 月 7 日	2647	1377	12178	13%	1.51
5 月 8 日	3848	3179	17158	23%	2.13
5 月 9 日	5910	3525	23169	18%	2.87
5 月 10 日	4309	4021	18562	28%	2.3
5 月 11 日	5323	2691	20686	15%	2.56
5 月 12 日	909	491	4087	14%	0.51
5 月 13 日	7183	3117	26108	14%	3.24
5 月 14 日	5438	3760	21387	21%	2.65
5 月 15 日	4895	2380	20123	13%	2.49
5 月 16 日	3614	2323	16103	17%	2
5 月 17 日	6517	2416	23165	12%	2.87
5 月 18 日	2236	2022	9652	27%	1.2
平均	4096.68	2630	21377.50	14%	2.65

表 4.2-5、分層式式模擬 4+4 微電網 30 日主要數據

日期	日輻射量 (Wh/m ²)	總調度量 (Wh)	日發電量 (Wh)	提升發電量比	發電效益 (Wh/W _p)
3 月 16 日	6378.7	1387	21083	7%	2.61
3 月 17 日	4186.4	2763	18659	17%	2.31
3 月 18 日	2393	1578	11324	16%	1.4
3 月 19 日	809.1	0	3069	0%	0.38
3 月 20 日	3004.7	0	12964	0%	1.61
3 月 21 日	5154.5	1604	18658	9%	2.31
3 月 22 日	4547.6	2703	16109	20%	2
3 月 24 日	3366.2	2287	12687	22%	1.57
3 月 25 日	4689.1	1492	17605	9%	2.18
3 月 26 日	5290.4	2826	18024	19%	2.23
3 月 27 日	3455.5	2189	13106	20%	1.62
3 月 28 日	694.8	0	3963	0%	0.49
3 月 29 日	3070.7	716	13297	6%	1.65
3 月 30 日	1691	2562	12365	26%	1.53
5 月 3 日	5394	4061	27205	18%	3.37
5 月 4 日	6369	1965	26485	8%	3.28
5 月 5 日	4818	2833	23695	14%	2.94
5 月 6 日	3082	2587	15898	19%	1.97
5 月 7 日	2647	1188	11687	11%	1.45
5 月 8 日	3848	3037	18169	20%	2.25
5 月 9 日	5910	2750	22658	14%	2.81
5 月 10 日	4309	4279	19879	27%	2.46
5 月 11 日	5323	2932	21389	16%	2.65
5 月 12 日	909	679	4138	20%	0.51
5 月 13 日	7183	3387	26518	15%	3.29
5 月 14 日	5438	3418	22054	18%	2.73
5 月 15 日	4895	2666	23235	13%	2.88
5 月 16 日	3614	2094	17863	13%	2.21
5 月 17 日	6517	2104	24138	10%	2.99
5 月 18 日	2236	1687	9328	22%	1.16
平均	4096.68	2630	21377.50	14%	2.65

單日總調度量

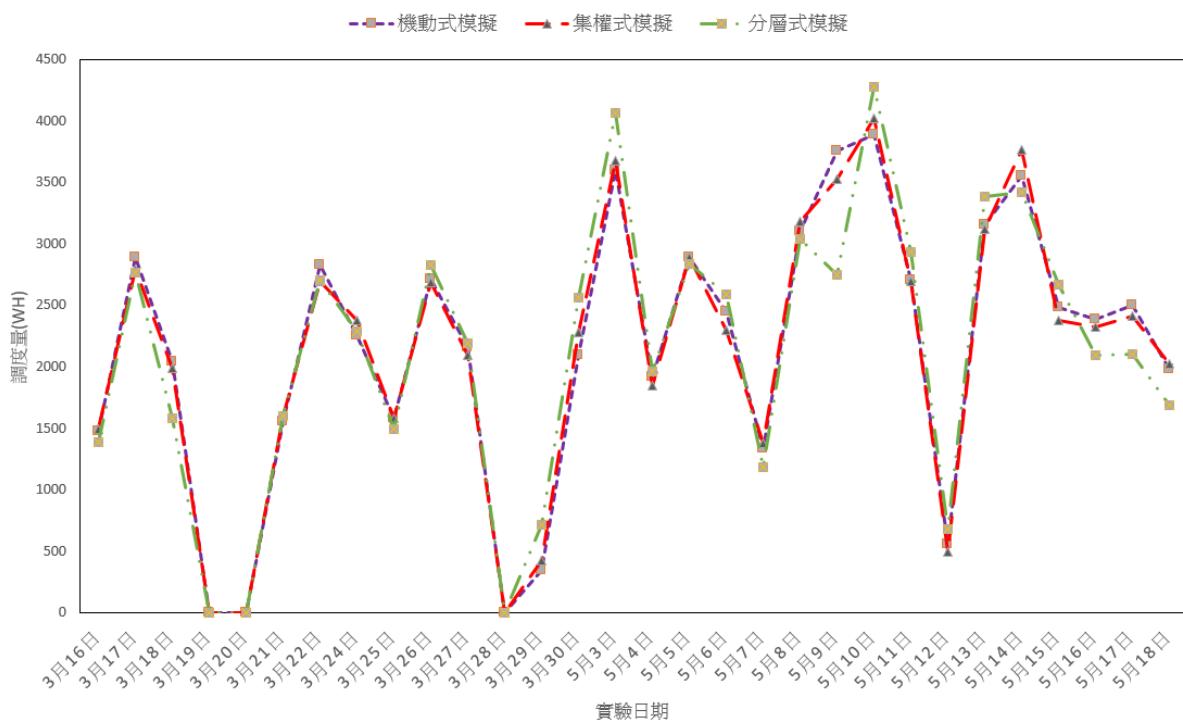


圖 4.2-7、三種調度法與實體實驗之總調度量變化圖

單日總發電量比較

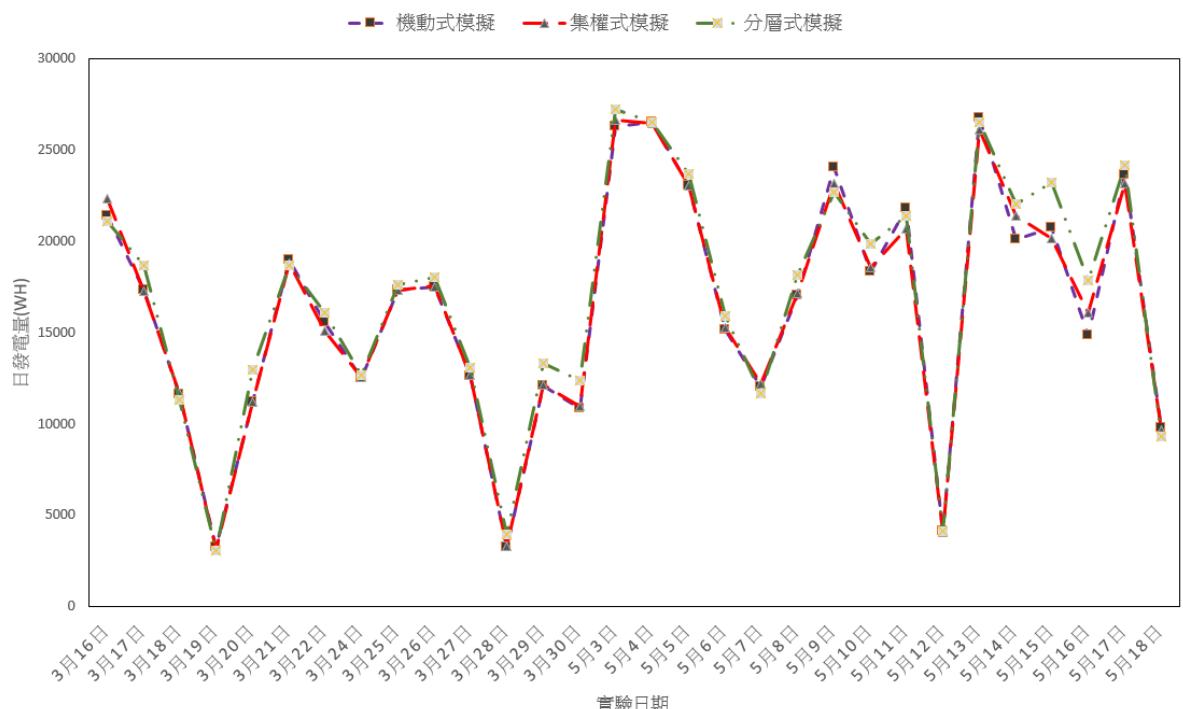


圖 4.2-8、三種調度法與實體實驗之總發電量變化圖

原控制器軟體在 RS485 遇到錯誤而中斷時的處理方式並不正確，詳閱

Microchip 之 PIC18 系列 datasheet 如圖 4.2-9，當連續收到三組訊號後，PIC18 硬體的 OERR bit 會拉至高電位，此時 USART 便不會再接收新訊號，所以依照 datasheet 如圖 4.2-10 將程式進行改良，當 OERR 旗標升起時，將 CREN bit 清零後，再讀一次 RCREG buffer 來清除 OERR bit，依此取代原程式來解決問題。

改良後的 4+4 系統實驗 30 天收集其 RS485 掉包次數如表 4.2-6，而 RS485 之 30 天總傳輸次數為 4147200 次(詳見 2.4-5 節)，即使掉包次數最多的實體實驗也僅掉包 137 次，相比總傳輸次數完全可以忽略不計。將軟體改良前後的掉包率做比較如表 4.2-7，可以看到軟體經改善後資料傳輸穩定度更高了。

FIGURE 16-5: ASYNCHRONOUS RECEPTION

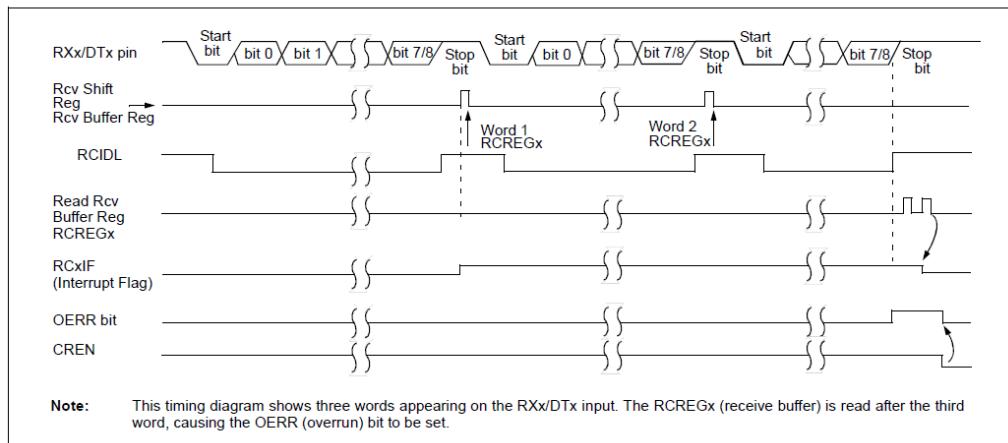


圖 4.2-9、Microchip OERR 發生原因圖



16.4.1.8 Receive Overrun Error

The receive FIFO buffer can hold two characters. An overrun error will be generated if a third character, in its entirety, is received before RCREGx is read to access the FIFO. When this happens the OERR bit of the RCSTAX register is set. Previous data in the FIFO will not be overwritten. The two characters in the FIFO buffer can be read, however, no additional characters will be received until the error is cleared. The OERR bit can only be cleared by clearing the overrun condition. If the overrun error occurred when the SREN bit is set and CREN is clear then the error is cleared by reading RCREGx.

圖 4.2-10、Microchip 如何解決 OERR

表 4.2-6、RS485 掉包次數比較

	實體	機動式模擬	集權式模擬	分層式模擬
A1	25	13	2	0
A2	32	5	0	0
A3	17	12	1	2
A4	63	23	3	3
總共	137	53	6	5

表 4.2-7、軟體改良前後掉包率比較

	實體	機動式模擬	集權式模擬	分層式模擬
改良前	無	9×10^{-4}	6.456×10^{-6}	6.456×10^{-6}
改良後	3.3×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.4×10^{-6}	1.2×10^{-6}



第五章 4+4 微電網最佳個體戶組合研究

5.1 系統設計

本項實驗主要利用模擬器研究在不同個體戶組合成的 4+4 微電網的調度量、發電量與發電效益，並探討何種個體戶組合的效益最佳。本研究設計三種個體戶組合的 4+4 微電網，分別為 8 戶 HyPV 系統個體戶組合以微電網 A 來代稱、8 戶 HyS 系統個體戶組合以微電網 B 來代稱，以及 4 戶 HyPV 加 4 戶 HyS 系統個體戶組合以微電網 C 來代稱，如圖 5.1-1~圖 5.1-3，利用模擬器測試 4+4 微電網的性能，並設計每個體戶太陽能板安裝量為 1470Wp、電池安裝量為 4 顆 12V-100Ah 電池串接為 48V 系統。

雖然以模擬器個體戶運作替代實體可大幅減少時間與成本，但若要模擬一整年的情況仍相當費時、費力，故本文以代表日的算法[11]。在一整年的輻射資料中進行分類，分類方式如表 5.1-1 之定義。

表 5.1-1、代表日分類定義

	晴天	多雲	陰雨天
輻射量 (MJ / m ²)	> 15 MJ / m ²	15 MJ / m ² ~ 10 MJ / m ²	< 10 MJ / m ²

計算整年度三種天氣的比例，並依百分比挑選合適日期及抽樣天數，控制總抽樣天數約在 10 ~ 20 天之間，以 2016 年來說可計算出 16 天代表日如表 5.1-2。

表 5.1-2、2016 年三種天氣狀態比例與平均輻射量

	晴天	多雲	陰雨天
天數	139	68	159
百分比	38%	19%	43%
抽樣天數	6	3	7
平均輻射量 (MJ / m ²)	20.32	12.65	4.59

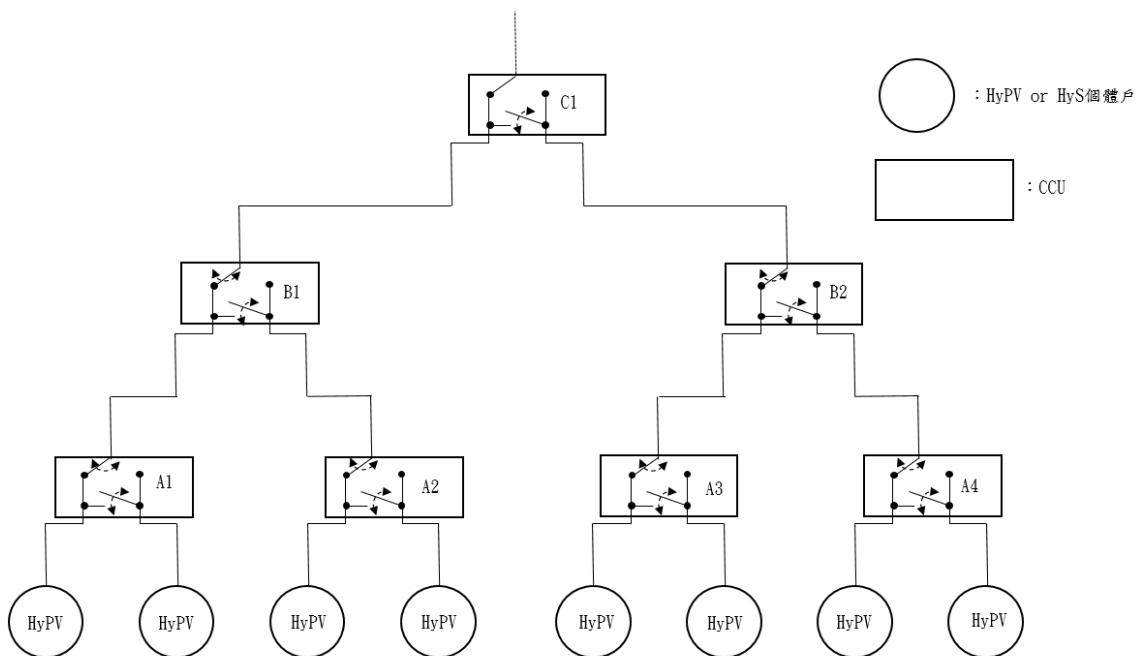


圖 5.1-1、8 戶 HyPV 個體戶組合(微電網 A)

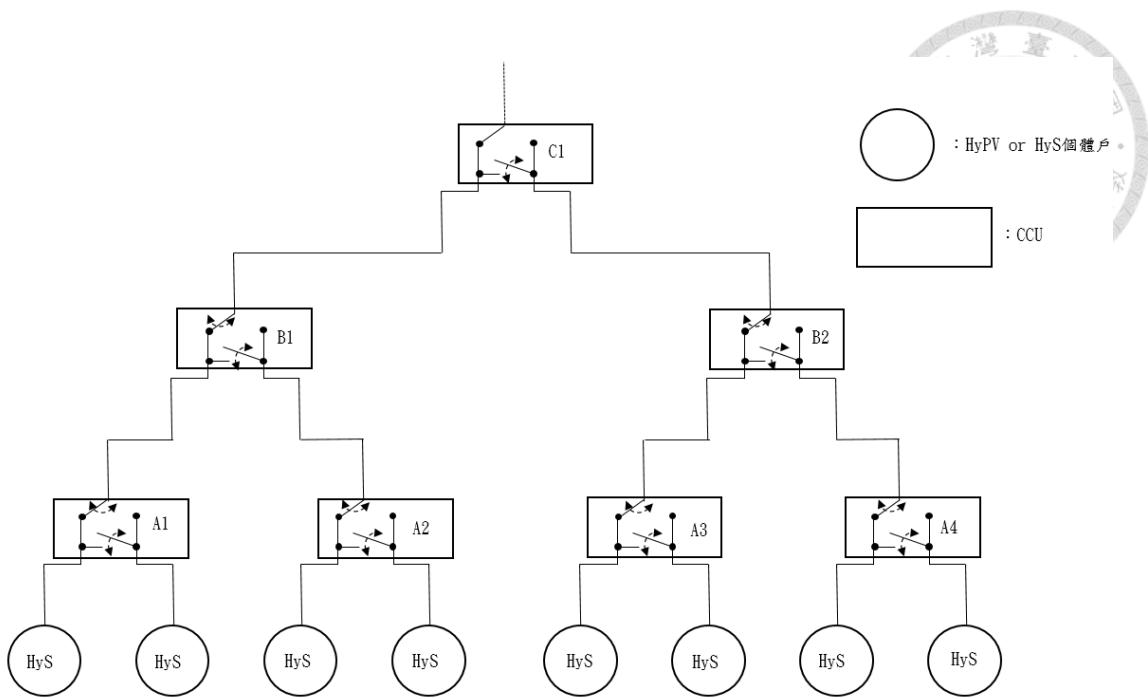


圖 5.1-2、8 戶 HyS 個體戶組合(微電網 B)

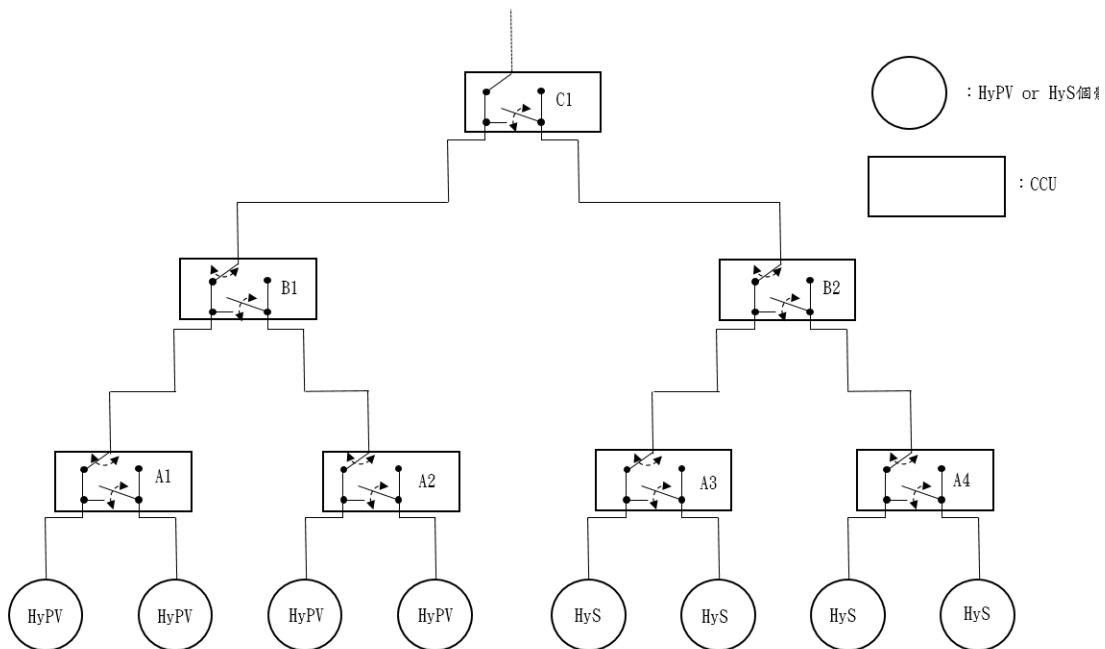


圖 5.1-3、4 戶 HyPV+4 戶 HyS 個體戶組合(微電網 C)

HyPV-net2 研究發現，採取互補性最佳的負載配對對整體互聯最佳[7]，故本研究選用負載模型 B 和負載模型 D 來組合，以此兩種負載模型做配對如圖 5.1-4 與圖 5.1-5，並以個體戶負載總用電量做為變因，分別為 300 kWh/month 和 500 kWh/month。因系統之間配置可鏡向，如圖 5.1-6，可組合出一共七種組合，如表 5.1-3[3]。其中本研究之 HyPV-net2 內的個體戶不僅僅只是 HyPV，也可以是 HyS，為了方便皆以 HyPV-net2 代表。結合上述三種個體戶組合進行實驗，本實驗將有 3 大組個體戶組合，每大組下又有 7 小組互聯形式組合之數據，下節會對實驗結果進行討論及分析。

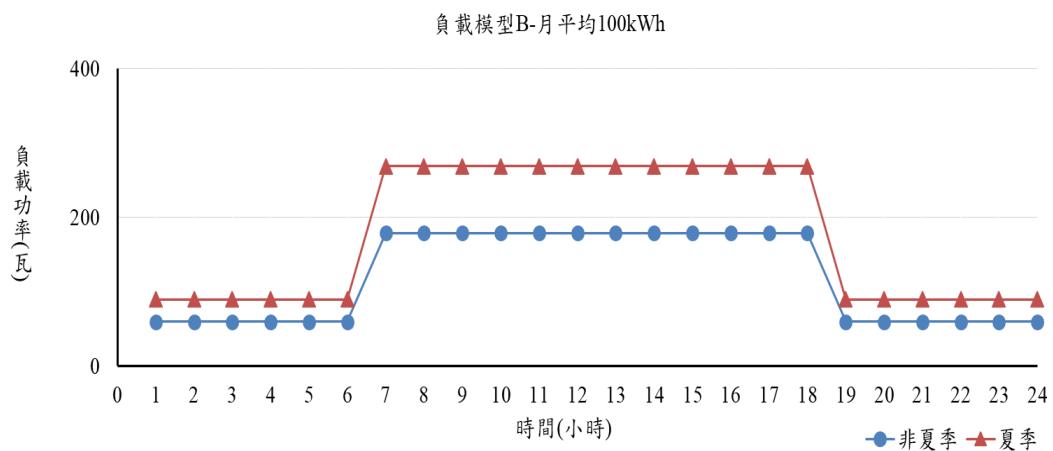


圖 5.1-4、負載模型 B，日間負載占全天 75%

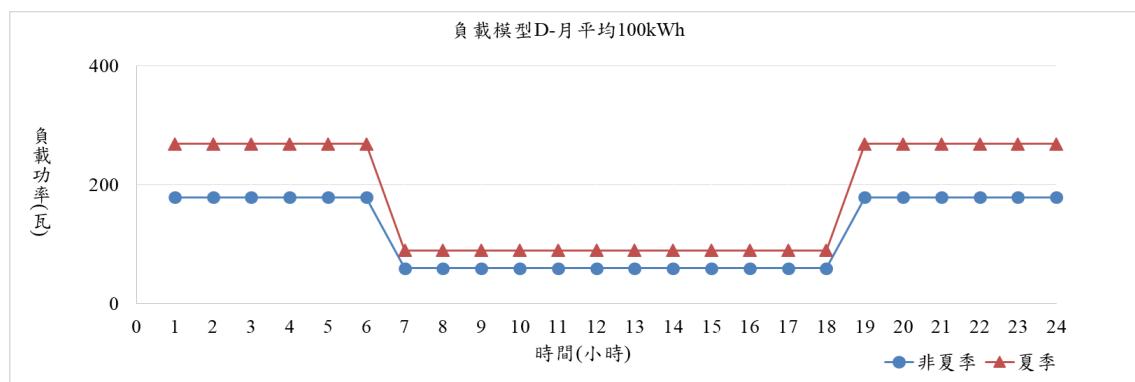


圖 5.1-5、負載模型 D，日間負載占全天 25%

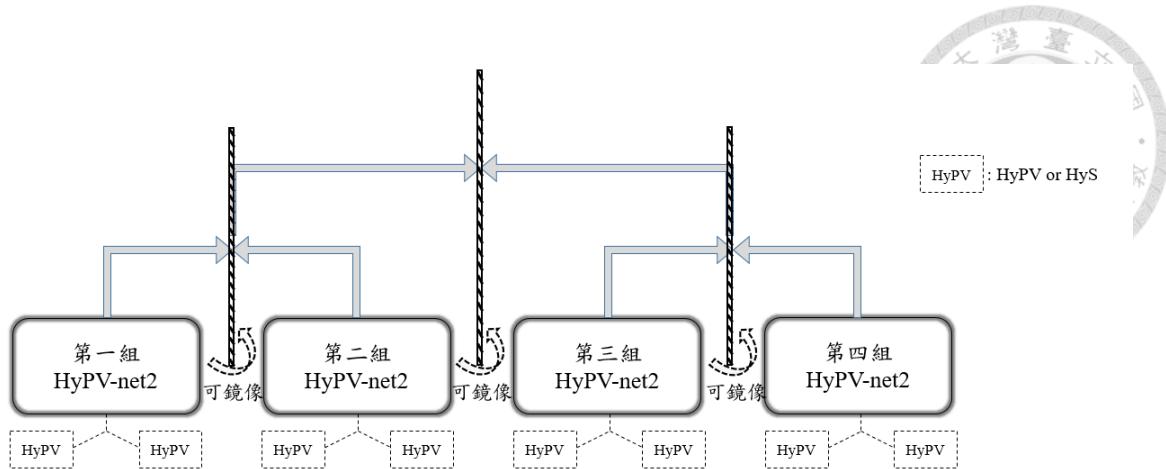


圖 5.1-6、金字塔微電網 4+4 系統架構與 HyPV-net2 單元翻轉對應指示

表 5.1-3、七種互聯形式所對應每一組 HyPV-net2 的每月用電量

		每月用電量 (kWh/month)			
配對組合	負載模型	第一組 HyPV-net2	第二組 HyPV-net2	第三組 HyPV-net2	第四組 HyPV-net2
互聯一	負載模型B	300	300	500	500
	負載模型D	300	300	500	500
互聯二	負載模型B	300	500	300	500
	負載模型D	300	500	300	500
互聯三	負載模型B	300	300	500	500
	負載模型D	500	500	300	300
互聯四	負載模型B	300	500	300	500
	負載模型D	500	300	500	300
互聯五	負載模型B	300	300	500	500
	負載模型D	300	500	300	500
互聯六	負載模型B	300	500	300	500
	負載模型D	300	300	500	500
互聯七	負載模型B	300	500	300	500
	負載模型D	300	500	500	300



5.2 模擬結果分析

以表 5.1-2 及表 5.1-3 建立的長程模擬設計為基礎進行模擬實測，將本研究提出的三種個體戶組合分別執行了一樣的長程模擬，將幾項主要數據結果整理如表 5.2-1、表 5.2-2 及表 5.2-3。

表 5.2-1、微電網 A

負載 配對組合	A層級 調度量 (Wh)	B層級 調度量 (Wh)	C層級 調度量 (Wh)	總調度量 (Wh)	熱水器 用電量 (Wh)	總發電量 (Wh)	因調度提 升之發電 百分比	因熱水器 提升之發 電百分比	發電效益
互聯一	43205	3391	22816	69412	0	461493	18 %	0 %	2.453
互聯二	23693	37945	8032	69670	0	463112	18 %	0 %	2.461
互聯三	63252	2968	11058	77278	0	476325	19 %	0 %	2.531
互聯四	62001	1996	12726	76723	0	477726	19 %	0 %	2.539
互聯五	42448	10371	20172	72991	0	468752	18 %	0 %	2.491
互聯六	55154	3193	12780	71127	0	468649	18 %	0 %	2.491
互聯七	47766	18684	5280	71730	0	467242	18 %	0 %	2.483

表 5.2-2、微電網 B

負載 配對組合	A層級 調度量 (Wh)	B層級 調度量 (Wh)	C層級 調度量 (Wh)	總調度量 (Wh)	熱水器 用電量 (Wh)	總發電量 (Wh)	因調度提 升之發電 百分比	因熱水器 提升之發 電百分比	發電效益
互聯一	32723	0	5690	38413	34244	464739	10 %	9 %	2.470
互聯二	23202	17895	0	41097	32520	467059	10 %	8 %	2.482
互聯三	41993	1458	1888	45339	36330	480716	11 %	9 %	2.555
互聯四	44607	0	2456	47063	32050	480115	12 %	8 %	2.552
互聯五	35130	0	10351	45481	31994	473236	11 %	8 %	2.515
互聯六	31277	3955	10427	45659	28722	471903	11 %	7 %	2.508
互聯七	32767	8565	4575	45907	30699	472118	12 %	8 %	2.509

表 5.2-3、微電網 C

負載 配對組合	A層級 調度量 (Wh)	B層級 調度量 (Wh)	C層級 調度量 (Wh)	總調度量 (Wh)	熱水器 用電量 (Wh)	總發電量 (Wh)	因調度提 升之發電 百分比	因熱水器 提升之發 電百分比	發電效益
互聯一	24889	5964	29805	60658	13792	466532	15 %	4 %	2.479
互聯二	29982	33084	2278	65344	9458	468244	17 %	2 %	2.489
互聯三	50390	2072	7198	59660	22438	481145	15 %	6 %	2.557
互聯四	46456	6396	14619	67471	10198	478672	17 %	3 %	2.544
互聯五	36188	2492	24328	63008	15755	474524	16 %	4 %	2.522
互聯六	47967	2693	9337	59997	14602	472122	15 %	4 %	2.509
互聯七	43514	14584	0	58098	18015	471625	15 %	5 %	2.507

就每日調度量、發電量的變化情形，以負載分配形式互聯一為例如圖 5.2-1 及圖 5.2-2，可以看出調度量與發電量在晴天時大於多雲天大於雨天，即當輻射量越大，調度量與發電量就會越大。而由圖也可看出若是晴天或是多雲天的前一天為陰雨天，其調度量相比其他同為晴天或是多雲天的時候來的較少。究其原因為陰雨天當天電池可使用剩餘的殘電量非常低，因此隔天將電池充電到可以賣電量的時間長，使其可以調度的時間相對其他連續晴天或是多雲天來的少，也就導致整體調度量的下降。而發電量在前一天為陰雨天的晴天或是多雲天相比其他連續晴天或是多雲天並無明顯變化，因為每日發電量主要就是用於負載、電池充電與調度，在每日負載皆相同的情況下，前一天為陰雨天的晴天或是多雲天與其他連續晴天或是多雲天的差異就在於電池充電與調度，前一天為陰雨天的晴天或是多雲天用於電池充電的電量較其他連續晴天或是多雲天來的多，而連續晴天或是多雲天用於調度的電量較前一天為陰雨天的晴天或是多雲天來的多。

輻射量與調度量關係圖

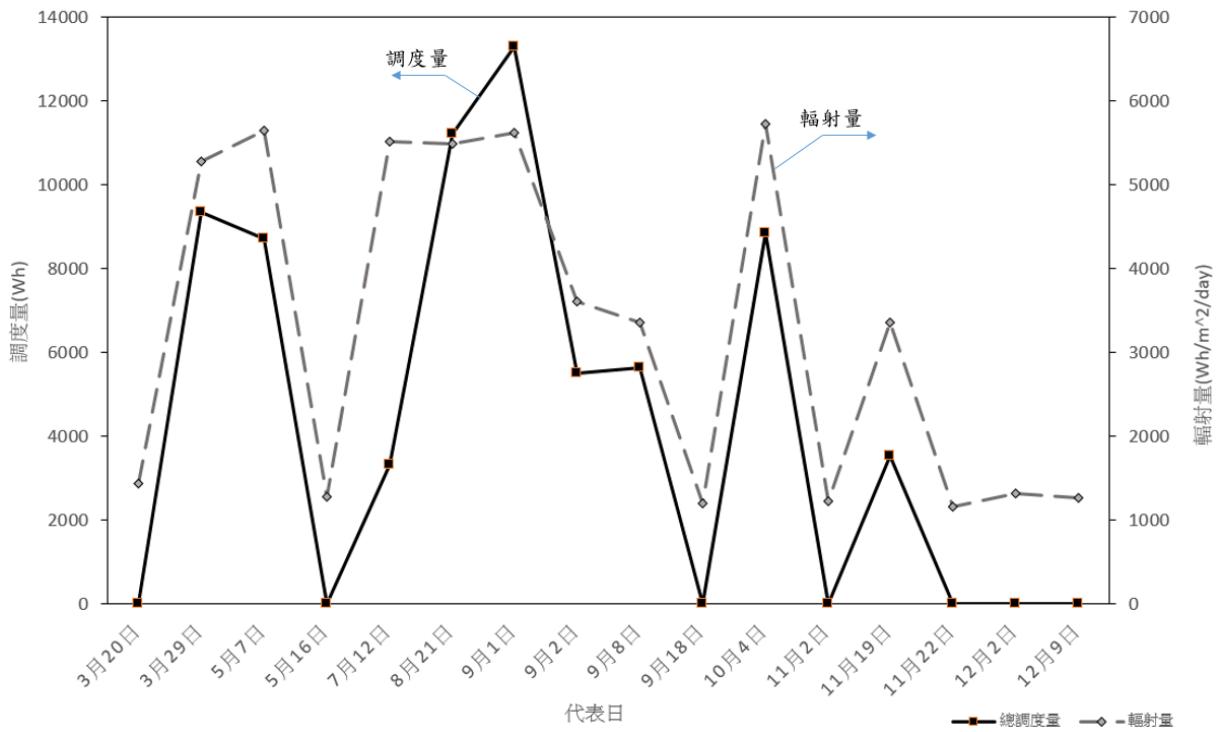


圖 5.2-1、微電網 A 調度量對輻射量的變化圖(以互聯一為例)

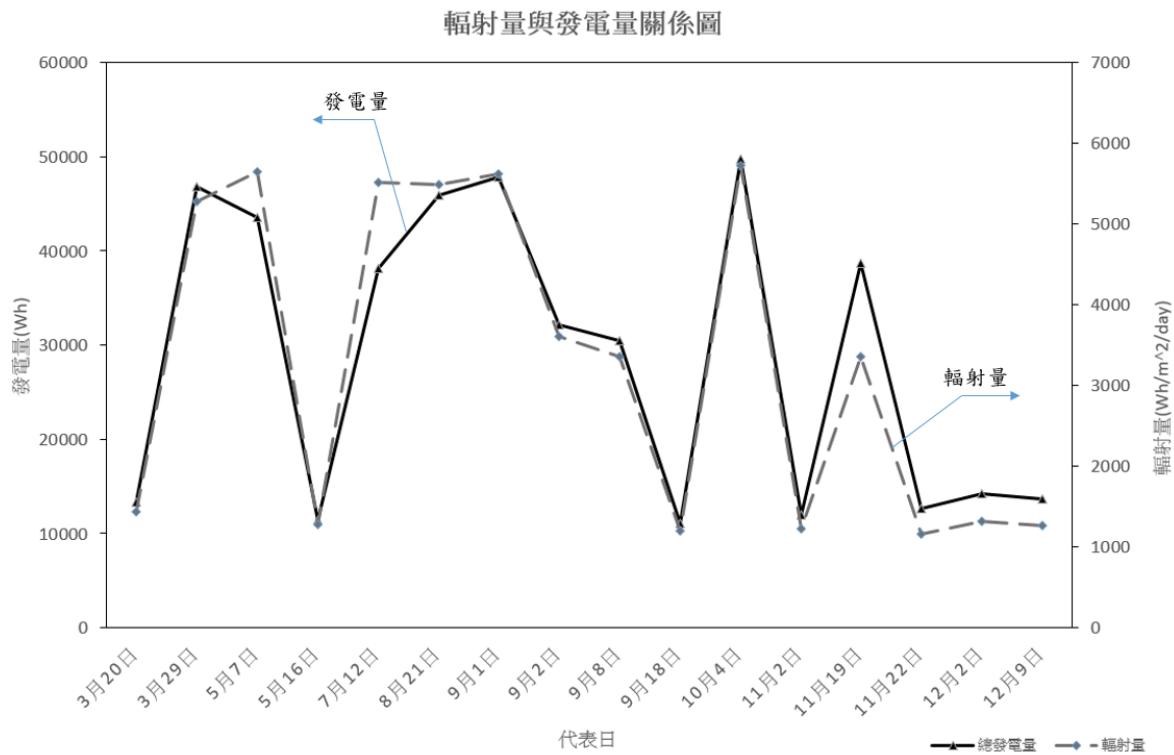


圖 5.2-2、微電網 A 發電量對輻射量的變化圖(以互聯一為例)

接著針對三種個體戶組合之總調度量、總發電量進行比較，同樣以負載分配形式互聯一為例，比較三種個體戶組合之總調度量及總發電量如圖 5.2-3、圖 5.2-4，可以看出微電網 B 及微電網 C 之個體戶組合相比於微電網 A 在調度量上有明顯的落差，造成這樣的結果就是因為 HyS 個體戶多了熱水器蓄熱與需量反應導致的差異。雖然控制邏輯是以調度優先於蓄熱，但 HyS 由於需量反應的設計，在尖載用電時段並不參與調度，電池僅供給自身負載或是熱水器使用，若負載用電量小，電池就會轉而供給熱水器並放電一定電量後才停止放電。當需量反應結束時，電池電量通常已不夠進行賣電，需要先經太陽能充電至可賣電電量才可賣電，也因此影響到調度，故 HyS 加入微電網會導致調度量明顯下降。

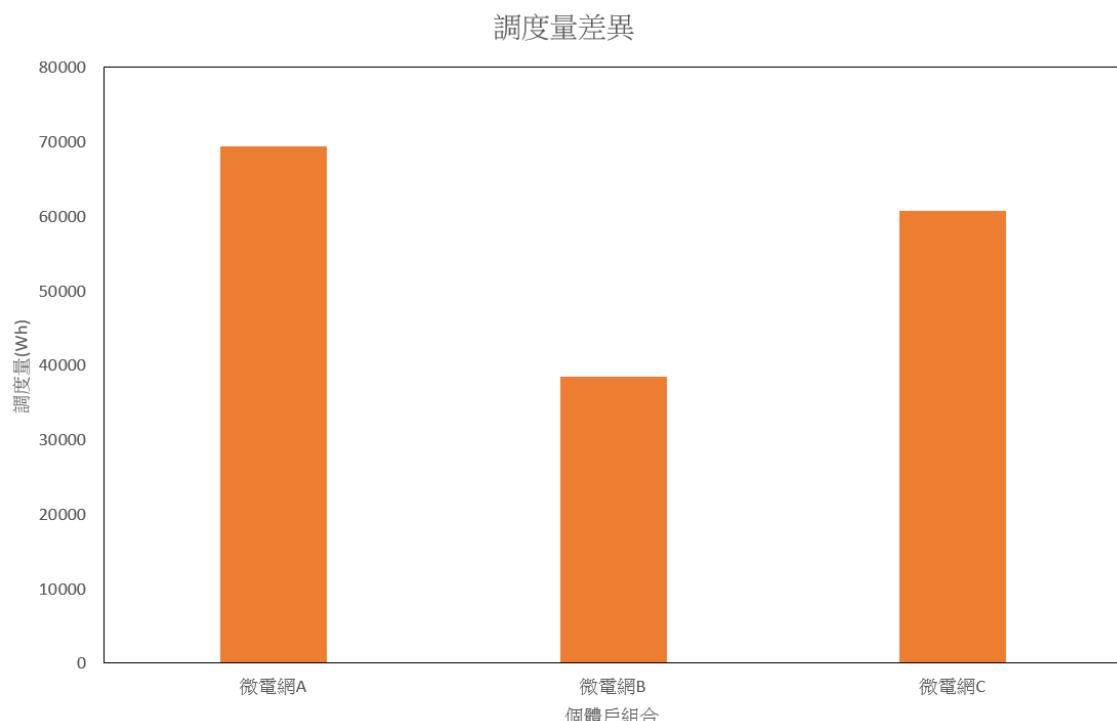


圖 5.2-3、三種個體戶組合之調度量比較圖(以互聯一為例)

接著比較三種個體戶組合於發電量的差異，由圖 5.2-4、圖 5.2-5 若將刻度調整可以看出雖然加入 HyS 個體戶的微電網組合其發電量稍微增加，但若以整體發電量來看，這些增加的量其實連 1%都不到，因此我們可以得到加入 HyS 個體戶的微電網對發電量提升效果非常有限。

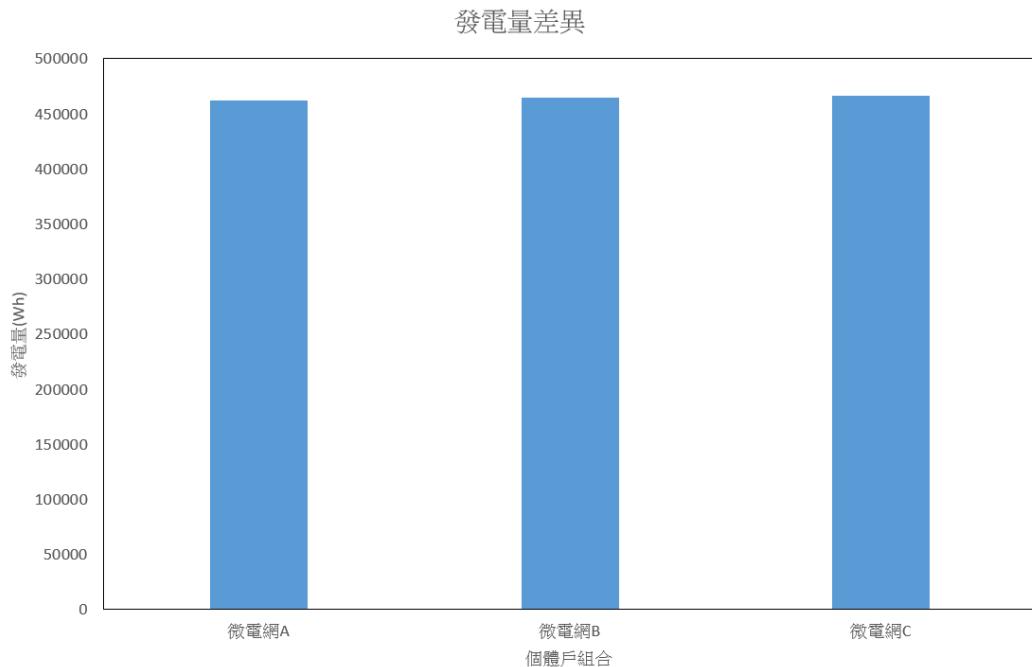


圖 5.2-4、三種個體戶組合之發電量比較圖(以互聯一為例)

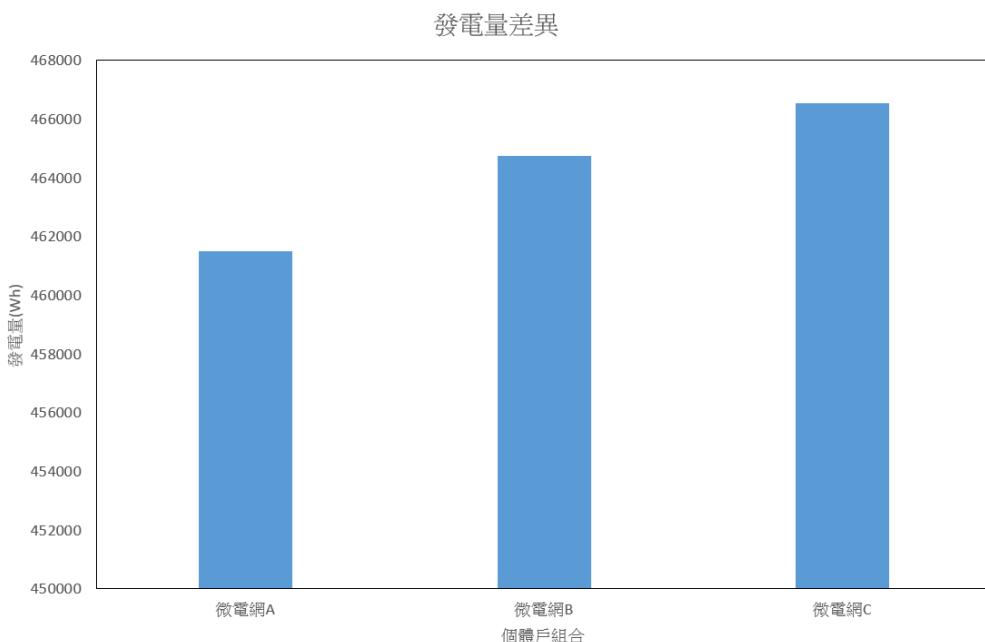


圖 5.2-5、三種個體戶組合之發電量比較圖(以互聯一為例)

由上述結果及表 5.2-1、表 5.2-2 及表 5.2-3，對於微電網整體來說，HyS 加入熱水器對於發電量及發電效益的提升有限，並且雖然已將程式邏輯寫為調度優先於熱水器使用，但因為需量反應與熱水器的存在，還是會影響到微電網的調度。可以看到多了熱水器個體戶(HyS)的微電網雖然多了熱水器對發電的提升，但是在調度對於發電的提升百分比相對 8 戶 HyPV 個體戶較少，將兩者提升的發電量相加並比較如圖 5.2-6，可以看出不論互聯形式，多了 HyS 個體戶的微電網發電提升量相比 8 戶都是 HyPV 個體戶的微電網都稍多。依此結果，我們可以推得 HyS 在微電網中對整體發電量稍有提升，但對電力調度的貢獻不大。

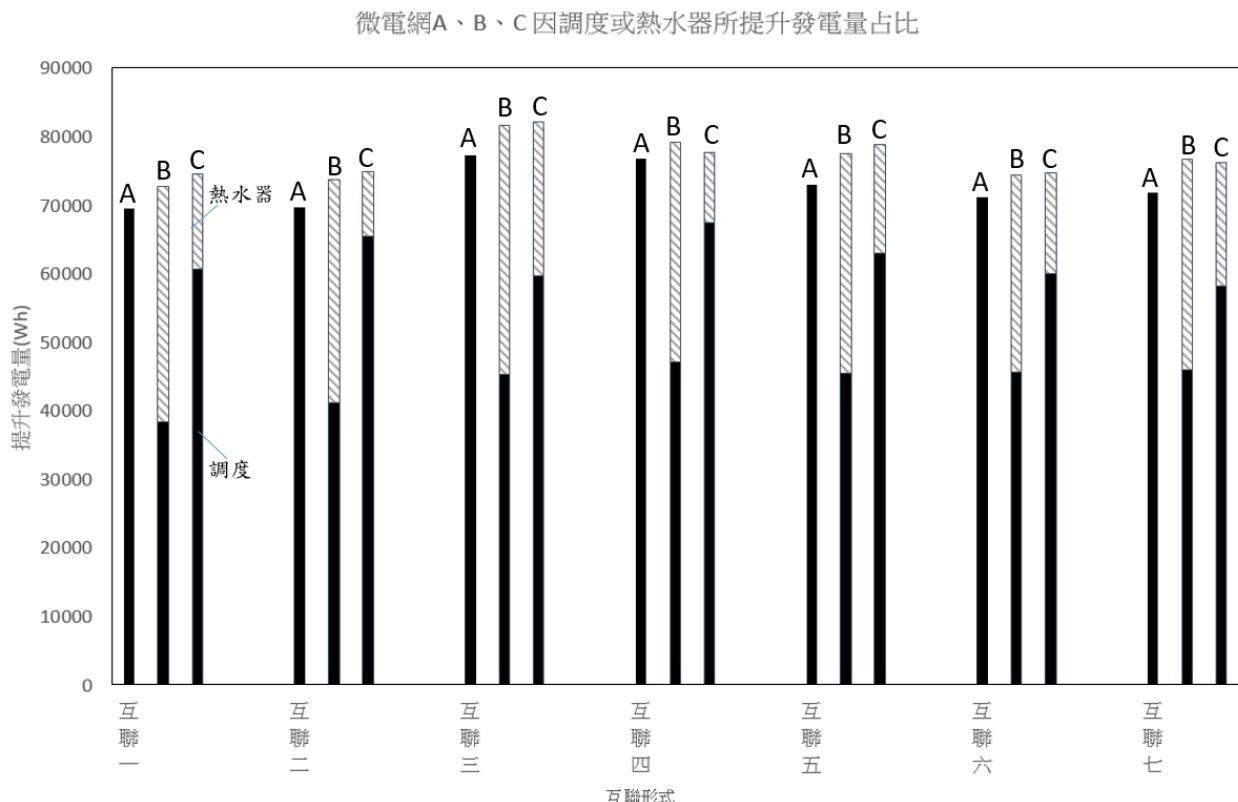


圖 5.2-6、三種個體戶組合之不同因素導致發電提升量比較

接著就其互聯形式作探討，我們分別將總調度量、總發電量及發電效益對七種互聯形式作圖。而由前面論述我們已知 HyS 的設計是會影響到微電網的整體調度的，因此總調度量方面我們僅針對微電網 A 作圖如圖 5.2-7，可以大致看出調度量以互聯三與互聯四最佳，互聯五、互聯六與互聯七次佳，而互聯一與互聯二相對而言較差，從表 5.1-3 的負載模型分配，若將每月用電量 300(kWh/month) 與 500(kWh/month) 視為可互補形成調度的話，其各互聯形式負載用電量的互補性可以大致歸納為 A、B、C 層級互補如表 5.2-4，因為互聯三、四有 4 組可以調度的個體戶組合，所以調度量理應較多，結果也的確是如此。接著次佳的為 3 組，最差的為 2 組及 1 組。而微電網 B 與微電網 C 由於多了熱水器蓄熱影響調度量的緣故，所以調度量較無明顯結果，但是可與發電量的比較來結合出結果並在以下進行討論。

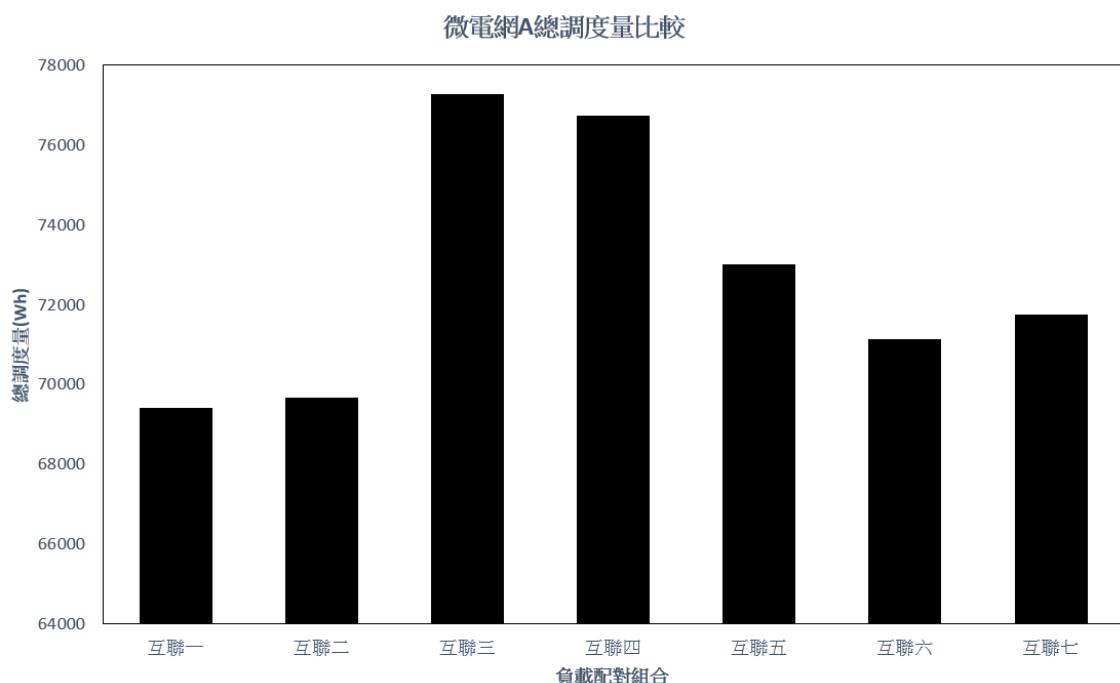


圖 5.2-7、各互聯形式總調度量比較圖

接著分別將總發電量及發電效益對七種互聯形式作圖如圖 5.2-8 及圖 5.2-9，由微電網 A 部分可大致看出發電量與發電效益互聯三與互聯四最佳，互聯五、互聯六與互聯七次佳，而互聯一與互聯二相對而言較差，在輻射量都相同的情況會有這樣的結果是因為調度量的差異，所以此結果更驗證了微電網的確是對發電量有提升效益的。

至於微電網 B 與微電網 C 發電量大致也是互聯三、互聯四最佳，互聯五、互聯六與互聯七次佳，互聯一、互聯二最差，究其原因為其負載分配組合的關係，對於負載分配互補性越高的組合，其發電量就會越高，所以不管個體戶是何種組合，其發電量趨勢都一樣，只是對於微電網 A 的組合其提升的發電量都是由調度量而來，而微電網 B 與微電網 C 的提升發電量有部分是調度量另一部分則是蓄熱量。

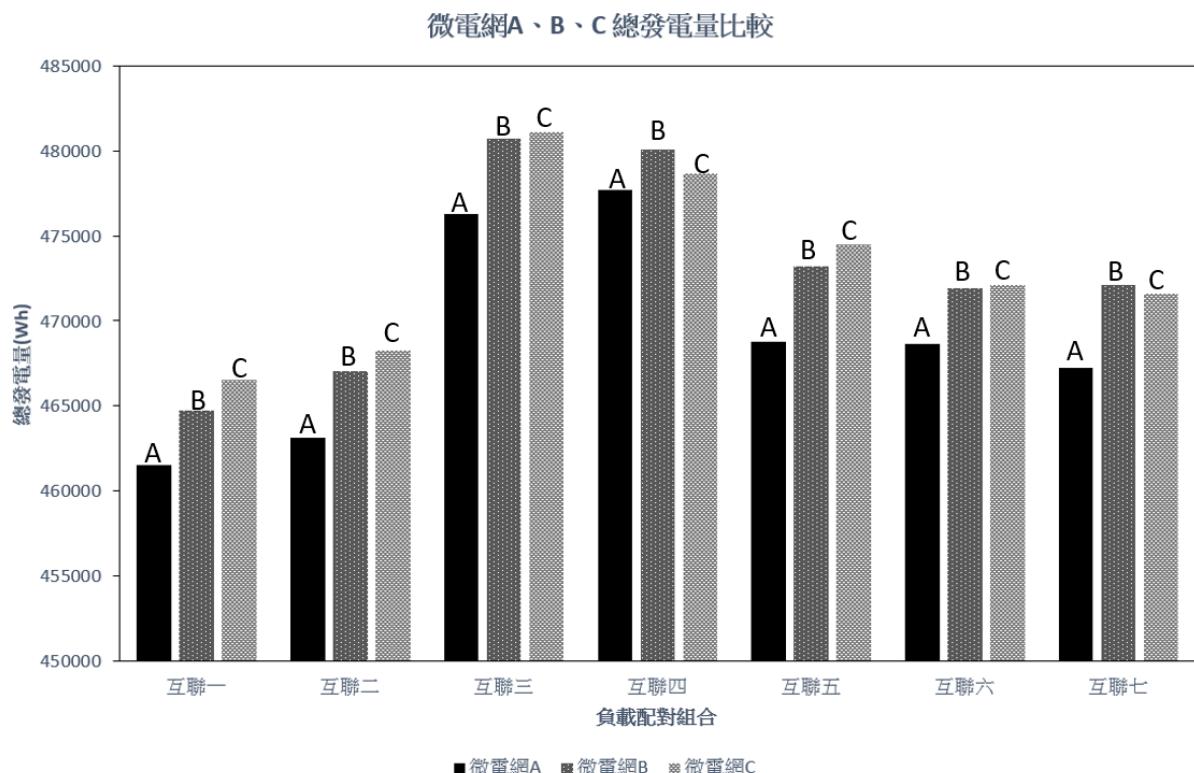


圖 5.2-8、各互聯形式總發電量比較圖

微電網A、B、C發電效益比較

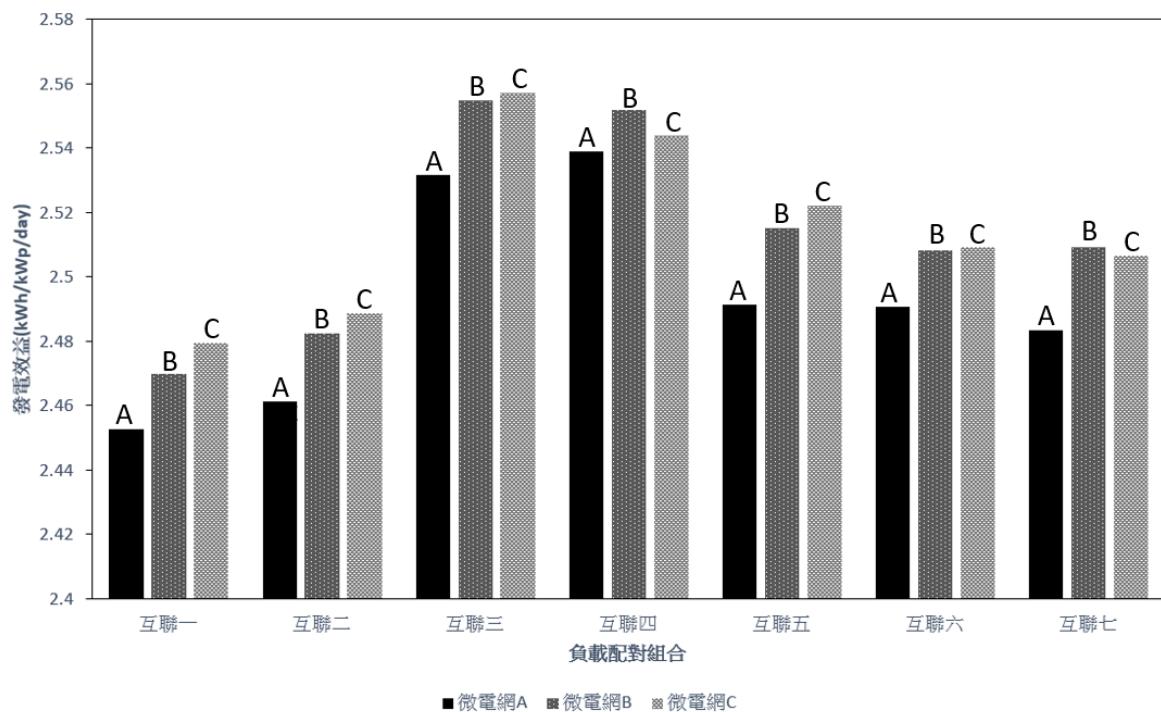


圖 5.2-9、各互聯形式發電效益比較圖

表 5.2-4、以不同層級調度類比方式形容各互聯形式之互補性組合

負載配對組合	互補性組合類層級調度
互聯一	1 個 C 層級
互聯二	2 個 B 層級
互聯三	4 個 A 層級
互聯四	4 個 A 層級
互聯五	1 個 C 層級、2 個 A 層級
互聯六	1 個 C 層級、2 個 A 層級
互聯七	1 個 B 層級、2 個 A 層級



接著討論不同互聯形式下其調度量在不同層級調度之占比，在此僅討論 8 戶 HyPV 個體戶組合微電網 A 的調度分配，因其他個體戶組合有 HyS 的存在，而由前面章節已得出 HyS 會影響調度量。

將不同互聯形式分別依照 A 層級調度量、B 層級調度量及 C 層級調度量做堆疊直條圖如圖 5.2-10，可以看出在總調度量上互聯三、互聯四較高，接著是互聯五、互聯六、互聯七其次，最後則是互聯一、互聯二。細看不同層級調度量的占比，可以看出如互聯三、四之 A 層級調度量遠遠大於其他互聯形式，互聯二則是 B 層級調度量占比遠遠大於其他形式，互聯一及互聯五、六則是 C 層級相較其他形式稍多，結果符合表 5.2-5 的互補性組合。

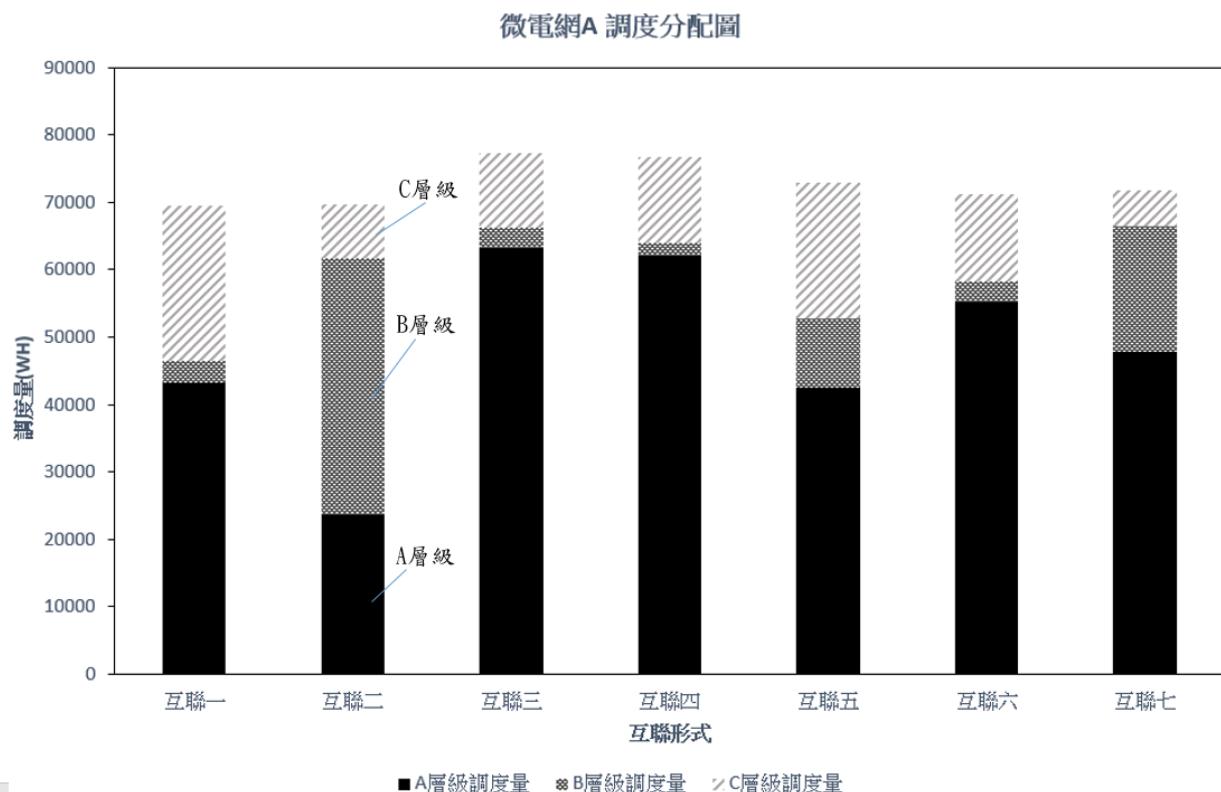


圖 5.2-10、微電網 A 調度分配圖

依照上面所述，若要使微電網效益最佳化，以 4+4 微電網為例，最好能先找到互補性佳的 HyPV-net2，再將多組互補性佳的 HyPV-net2 組合成為更多層的微電網如 HyPV-net4、HyPV-net8……，也就是如互聯三、互聯四的組合，這樣的組合平時很容易就可以達成多組 A 層級的調度，並且在此之外還能有 B 層級、C 層級的多層級調度，如圖 5.2-11。

表 5.2-5、以不同層級調度類比方式形容各互聯形式之互補性組合

負載配對組合	互補性組合類層級調度
互聯一	1 個 C 層級
互聯二	2 個 B 層級
互聯三	4 個 A 層級
互聯四	4 個 A 層級
互聯五	1 個 C 層級、2 個 A 層級
互聯六	1 個 C 層級、2 個 A 層級
互聯七	1 個 B 層級、2 個 A 層級

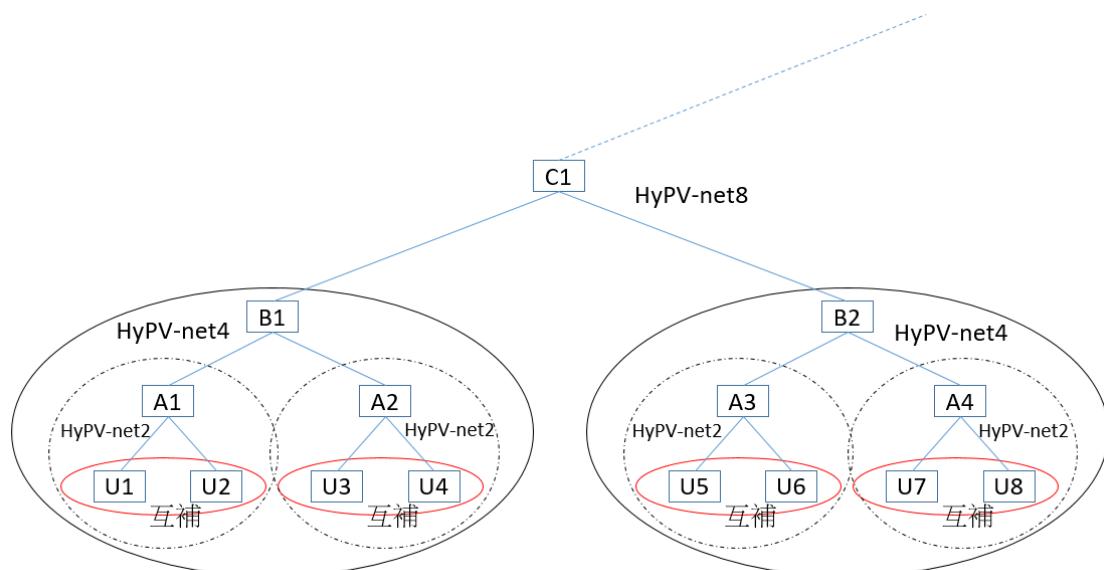


圖 5.2-11、多組互補 HyPV-net2 組合成為 HyPV-4、HyPV-8……

第六章 結論與未來展望



6.1 結論

本研究搭建 4+4 實體微電網系統，並沿用 HyPV 個體戶性能模擬器與實體 CCU 組成的 4+4 微電網模擬系統，針對 HyS 新增相容之模擬軟體，研究模擬系統對實體系統的模擬準確度；接著討論集權式調度、分層式調度、機動式調度等三種調度方式對發電效益及資料傳輸穩定度的影響；最後提出三種個體戶組合並以模擬的方式實驗及分析其相同條件下分別的發電效益，以 8 戶 HyPV 個體戶(微電網 A)、8 戶 HyS 個體戶(微電網 B)及 4 戶 HyPV+4 戶 HyS 個體戶(微電網 C)三種組合進行金字塔微電網長程模擬測試。最終整理結論如下：

- (1) 4+4 微電網模擬系統雖然無法完全準確的模擬實體系統的運作，但對於其趨勢大致符合，並且其誤差大致是可以接受的，所以未來若要進行實體微電網的搭建，可先以模擬系統模擬其效益高低，效益如果夠高才真正進行實體的搭建。
- (2) 在調度連接方面來說，不論是發電效益或是資料傳輸的穩定度三種調度方法皆無明顯差異，此與前人所作略有不同，前人所作之機動式調度法在資料傳輸的穩定度會有明顯的落差，對此本研究依照本實驗所使用單晶片之原廠 datasheet，改良遇到錯誤時的處理方式，並成功使資料傳輸更穩定。
- (3) 本研究提出三種個體戶組合微電網，探討加入 HyS(熱水器)蓄熱功能之微電網是否比傳統微電網有更高的發電效益。最後透過實驗結果發現，加入 HyS 對於發電量的提升不大，雖然多了因蓄熱提升之發電量，但其調度量相比個體戶全為 HyPV 系統之微電網組合要來的小，將三種個體戶組合的兩種提升發電量相加比較相差不大，所以我們得到微電網與 HyS 热

水器的設計最好擇一使用，若合併兩者對發電效益的提升不大，反而成本增加許多，其微電網系統整體效益反而下降了。

- (4) 本研究提出七種互聯形式進行實驗，最後發現對於微電網來說，在搭建或是分配負載組合時，最好先以 1+1 能互補的組合為基礎來搭建，也就是使其可以先達到 A 層級互補的 1+1 微電網，再將 2 組可以達到 A 層級互補之 1+1 微電網組合成 2+2 微電網，並依此類推組合成更高階的微電網。如此搭建成的微電網將會有最高的發電效益。





6.2 未來展望

目前微電網模擬系統規模最高僅實驗至 4+4 的 8 戶微電網，而其單晶片的內部程式記憶體已接近滿載，所以若想要研究更高層級的微電網，最好是以電腦的方式來進行模擬實驗。電腦的記憶體及效能可以是單晶片的數千萬倍不止，不但可以模擬更高層的微電網，也可以將原本輸入至單晶片每小時變化的數據改成每分鐘甚至每秒鐘變化的數據使實驗更準確。所以未來可以朝開發一套完整、優良的微電網模擬軟體程式並以電腦進行模擬的方向來研究。

若能以電腦進行模擬研究，我認為可以以集權式調度法結合人工智慧做為研究方向，現階段的集權式調度法僅是最高層 CCU 收集底層 Master-CCU 的瞬時資料並以此判斷哪戶賣電給哪戶。如果是透過電腦，我認為電腦不只可以收集底層 Master-CCU 的瞬時資料，更可以保留過去的資料，並結合這些資料來計算出對於現在甚至是未來的最佳調度路徑，使微電網的效益可以再提高。

參考文獻



- [1] 為邁向 2025 非核家園目標。行政院。2016 年 09 月 17 日，取自：
<https://www.ey.gov.tw/Page/9277F759E41CCD91/dbbf0e80-8e9e-47a4-9ee1-5579ed3b4d82>.
- [2] B.J.Huang, F.S.Sun and R.W.Ho, Near-Maximum-Power-Point-Operation (nMPPO), Solar Energy, Volume 80, Issue 8, August 2006, Pages 1003-1020.
- [3] 董子銘, “金字塔太陽能微電網電力調度技術改良,” 國立台灣大學機械工程研究所, 2018.
- [4] 王譯鴻, “小區域互助型太陽光發電系統,” 國立台灣大學機械工程研究所, 2015.
- [5] 柯曼佐, “具削峰功能的雙儲能自用型太陽光發電系統研究”, 國立台灣大學機械工程研究所, 2019
- [6] 陳明賢, “金字塔太陽能微電網電力調度指揮控制技術研究”, 國立台灣大學機械工程研究所, 2019
- [7] 唐子喬, “互助型太陽能微電網智能控制,” 國立台灣大學機械工程研究所, 2016.
- [8] 廖榮貴, 許正憲, 王龍發, 蔡能聰, “資料結構與演算法,” 文魁資訊, 2003.
- [9] Po-Chien Hsu, Bin-Juine Huang*, Yi-Hung Wang, Tzu-Chiao Tang, Jia-Wei Wang, Xin-Hong Dong, Kang Li, Kung-Yen Lee, "Solar power sharing between two PV systems in a solar pyramid micro-grid," International Journal of Smart Grid and Clean Energy , pp. 6(2), PP.96-103, 2017.
- [10] 葉振甫, “自用型冷熱電共生太陽能系統開發,” 國立台灣大學機械工程研究所, 2017.
- [11] 李明佳, “二元太陽能互聯網最佳系統設計,” 國立台灣大學機械工程研究

所, 2017.

[12] Wikipedia, "Cyclic redundancy check," [Online]. Available:
https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_redundancy_check

[13] Wikipedia, "CANopen," [Online]. Available:
<https://zh.wikipedia.org/wiki/CANopen>.

[14] 成大資工 Wiki, "CAN," [Online]. Available:
<http://wiki.csie.ncku.edu.tw/embedded/CAN>.

[15] Patrick T. Moseley, Jürgen Garche, C.D. Parker, D.A.J., Rand, "Valve-Regulated Lead-Acid Batteries 1st ed," Elsevier Science, 2004.

[16] Henry Oman, William C. Morchin, "Battery Charging, in Electric Bicycles: A Guide to Design and Use," Wiley-IEEE Press, pp. 85-108, 2005.

[17] K.C. Divya, Jacob Østergaard, "Battery energy storage technology for power systems—An overview," Electric Power Systems Research , no. 79, pp. 511-520, 2009.

[18] V. Pop, H.J. Bergveld, P.H.L. Notten, P.P.L. Regtien, "State-of-the-art of battery state-of-charge determination," Measurement Science and Technology, no. 16, pp. 93-110, 2005.

[19] Jiexun Liu, Dawei Gao, Jianhua Cao, "Study on the effects of temperature On LiFeP04 Battery life," Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) IEEE, pp. 1436-1440, 2012.

[20] A. Sayigh, Comprehensive Renewable Energy 1st ed., Elsevier, 2012.

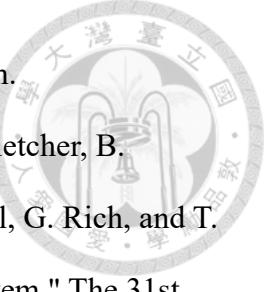
[21] William B. Stine, Michael Geyer, "Power From The Sun," 2001.

[22] E. Skoplaki, J.A. Palyvos, "Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations," Renewable Energy 34, pp. 23-29, 2009.

[23] 中央氣象局, "月平均氣候," [Online]. Available:



https://www.cwb.gov.tw/V7/climate/monthlyMean/Taiwan_tx.htm

- 
- [24] B. Marion, J. Adelstein, K. Boyle, H. Hayden, B. Hammond, T. Fletcher, B. Canada, D. Narang, D. Shugar, H. Wenger, A. Kimber, L. Mitchell, G. Rich, and T. Townsend, "Performance Parameters for Grid-Connected PV System," The 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition in Lake Buena Vista (Florida), 2005.
- [25] Po-Chien Hsu, Bin-Juine Huang, Wei-Chiuan Lin, Yu-Jen Chang, Cheng-Jui Chang, Kang Li, Kung-Yen Lee, "Effect of switching scheme on the performance of a hybrid solar PV System," Renewable Energy , no. 96 , pp. 520-530, 2016.
- [26] 許伯堅, “隔離混合型太陽光發電系統最佳設計,” 國立臺灣大學機械工程研究所, 2014.
- [27] 王泰權, “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,” 國立臺灣大學機械工程研究所, 2014.
- [28] Wikipedia, " Greedy algorithm," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Greedy_algorithm.