

行政院原子能委員會  
委託研究計畫研究報告

智慧型複合儲能系統電力管理與運轉技術  
之研究

**Investigation on Power Management and  
Operational Technologies of Intelligent Compound  
Energy Storage Systems**

計畫編號：107A024

受委託機關(構)：國立聯合大學

計畫主持人：馬肇聰

聯絡電話：037-382482

E-mail address：ctma@nuu.edu.tw

協同主持人：

研究期程：中華民國107年 4 月至107年 12 月

研究經費：新臺幣 54.15 萬元

核研所聯絡人員：沈煜倫

報告日期： 107年 11月 22日

# 智慧型複合儲能系統電力管理與運轉技術之研究

## 摘要

未來在政府積極推動節能減碳的政策下，電能系統將逐漸朝向以再生能源為基礎的分散式發電及微電網系統發展。屆時電網的結構也將呈現傳統電網和大量的中小容量群聚式微電網並存的格局。由於再生能源發電具有無可避免的輸出功率變動性質，適當的智慧型複合式儲能設計與整合運用，即時功率快速調節技術與相關最佳化電能控制方案的提出是以再生能源為基礎的分散式電能系統及微電網得以持續發展的重要基礎。有鑒於此，本計畫之研究目的是基於儲能系統之彈性規劃、即時電能調控設計及電能應用優化的思維並以進階數位控制器之可編程設計條件為基礎，發展具整合多重儲能特性、工作模式及最佳能源管理與應用可能性之智慧型複合式儲能系統(Intelligent Compound Energy Storage System, ICESS)。本計畫所探討之 ICESS 實驗系統主要包含有模擬風力與太陽能發電單元、複合式儲能單元、併網型換流器及電網單元。ICESSE 所需之各式電力轉換器皆以先進半導體元件為基礎進行高效率之整合設計，系統的控制單元則採用以 DSP 為基礎的全數位控制方案以方便實現多重電力轉換器之整合與協調控制。

本計畫已依既定之時程完成 100%之研究項目與內容，執行進度與成果符合預期。本期末報告主要內容安排如下：第一章內容是描述計畫背景、目的與相關文獻之回顧。第二章說明分散式發電系統架構、ICESSE 之系統配置模式及功率與容量規劃方案。

第三章說明 ICEES 之系統功能性應用情境規劃、硬體架構及相關控制器設計與模擬分析。第四章說明 ICEES 之主要電力轉換器系統及情境案例模擬與分析。第五章展示 ICESS 硬體實作與實務應用之情境案例測試結果。第六章是結論。相關參考文獻則列於最後的第七章。

**關鍵字：**複合式儲能系統，再生能源，分散式發電，群聚式微電網，電力轉換器整合控制

# **Investigation on Power Management and Operational Technologies of Intelligent Compound Energy Storage Systems**

## ABSTRACT

In the future, with the government's policy of energy conservation and carbon reduction, Taiwan's power and energy systems will gradually developing toward renewable energy based distributed power generation and micro-grid systems. It is obvious that the structure of the future power grid will be the coexistence of conventional power grids and a large number of small, medium-sized and clustered micro-grids. Due to the unavoidable nature of output power variations in renewable energy based power generations, the appropriate design and integration of intelligent energy storage devices, the fast regulation of real-time power flow and the related intelligent power control schemes are key technologies for sustainable development of the renewable energy based distributed power systems and micro grids. In view of this, the research goal of this project is to develop an intelligent compound energy storage system (ICESS) with integrated multiple energy storage features and operating modes, capability of flexible planning of energy storage systems, features of intelligent power regulation and performance optimization on advanced digital controllers. The test system configuration investigated in this project includes a set of wind turbine generator (WTG) and photovoltaic (PV) power generating units, a compound energy storage unit, a grid-connected converter and a power grid. In this project, various power converters required for the studied system are all designed with advanced semiconductor devices to achieve high-efficiency systems. The control unit of the system is designed with a DSP to achieve a fully digital and coordinated control scheme integrating multiple power converters.

This project has completed 100% of the scheduled research tasks and contents according to the project's execution plan. The progress status and results of the project are in line with expectations. The main contents of this mid-term report are arranged as follows: The first chapter is devoted to describe the background, purpose and the related literature review on the project's subject area. The second chapter describes the configuration of distributed power generation systems, the ICEES hardware systems and the power and capacity planning issues. The third chapter deals with the ICESS control functions, hardware design and the development of controllers for the ICEES. The fourth chapter addresses the control scenario simulations and analysis of the power converter systems and the related controllers of the ICEES. The fifth chapter demonstrates the results of hardware tests. Finally, the sixth chapter gives the conclusion. A list of the related papers is given in the last chapter.

**Keywords:** compound energy storage system, renewable energy, distributed power generation, clustered micro-grid, integrated control of power converters

## 目錄

中文摘要 .....	i
英文摘要 .....	iii
圖目錄 .....	vii
表目錄 .....	xiii
壹、計畫背景、目的及重要性 .....	1
一、計畫之背景 .....	1
二、計畫之主要目的與重要性 .....	6
三、計畫之研究方法與內容 .....	9
四、計畫相關文獻之回顧 .....	10
貳、ICESS之系統架構、配置模式與容量規劃 .....	19
一、ICESS之系統架構與配置模式 .....	19
二、ICESS之功率與容量規劃方案 .....	27
參、ICESS之系統功能性規劃與硬體單元設計 .....	48
一、ICESS之系統功能性規劃 .....	48
二、ICESS之電力轉換器硬體單元設計 .....	50
三、ICESS相關電力轉換器之控制器設計與模擬分析 .....	53
肆、ICESS實務應用之情境案例模擬與分析 .....	65
一、ICESS之應用情境#1: 即時電力調度 .....	65
二、ICESS之應用情境#2: 尖峰電力調度控制 .....	69
三、ICESS之應用情境#3: PV/WTG輸出功率平順控制 .....	76

伍、ICESS硬體實作與實務應用之情境案例測試與分析 .....	82
一、ICESS硬體實作規劃與實現 .....	82
二、ICESS系統整合實作測試 .....	87
陸、結論 .....	94
柒、參考文獻 .....	97

## 圖目錄

圖1-1	世界能源消耗量預測.....	2
圖1-2	世界可再生能源淨發電量預測.....	3
圖1-3	美國加州ISO風力及太陽能發電曲線.....	5
圖1-4	美國加州ISO風力及太陽能發電曲線.....	5
圖1-5	太陽能瞬時發電功率曲線.....	5
圖1-6	氮化鎵及碳化矽為基礎的高功率開關元件特性與應用領域.....	7
圖2-1	基於直流匯流排之獨立運轉型混合式可再生能源發電系統.....	19
圖2-2	基於交流匯流排之獨立運轉型混合式可再生能源發電系統.....	20
圖2-3	基於直流匯流排之市電併聯型混合式可再生能源發電系統.....	20
圖2-4	基於交流匯流排之市電併聯型混合式可再生能源發電系統.....	21
圖2-5	本計畫所探討之基於直流匯流排之市電併聯型混合式可再生能源發電系統.....	22
圖2-6	智慧型複合式儲能系統配置(一):無換流器被動式控制架構.....	23
圖2-7	智慧型複合式儲能系統配置(二):單換流器控制架構(VRFB+SC).....	24
圖2-8	智慧型複合式儲能系統配置(三):單換流器控制架構(VRFB).....	25

圖2-9	智慧型複合式儲能系統配置(四):單換流器控制架構(SC).	26
圖2-10	智慧型複合式儲能系統配置(五):雙換流器控制架構 (VRFB+SC).....	27
圖2-11	包含HESS的太陽光電發電和風力發電發電系統的整體系 統圖.....	31
圖2-12(a)	太陽輻照度.....	32
圖2-12(b)	周圍環境溫度.....	33
圖2-12(c)	電池表面溫度.....	33
圖2-12(d)	太陽光電發電系統發電功率.....	33
圖2-13(a)	風速.....	34
圖2-13(b)	風力發電功率.....	34
圖2-14	HESS儲能系統的能量管理架構.....	35
圖2-15	恆定功率(762.2521W).....	36
圖2-16	太陽能發電/風力發電系統和回市電的功率比較圖.....	36
圖2-17	混合式儲能系統功率.....	37
圖2-18	電池儲能系統(BESS)的功率.....	37
圖2-19	電池功率密度函數(pdf).....	38
圖2-20	電池功率累積密度函數(cdf).....	38
圖2-21	電池容量密度函數(pdf).....	39
圖2-22	電池能量累積密度函數(cdf).....	39
圖2-23	超級電容儲能系統(SCESS)的功率曲線.....	40
圖2-24	超級電容功率密度函數(pdf).....	40
圖2-25	超級電容功率累積密度函數(cdf).....	41

圖2-26	超級電容能量密度函數(pdf).....	41
圖2-27	超級電容能量累積密度函數(cdf).....	42
圖2-28	三階段變動型(500W-1200W-500W).....	43
圖2-29	太陽能發電/風力發電系統和回市電的功率比較圖.....	43
圖2-30	混合式儲能系統功率.....	44
圖2-31	電池儲能系統功率.....	44
圖2-32	電池功率密度函數.....	44
圖2-33	電池功率累積密度函數.....	44
圖2-34	電池容量密度函數.....	45
圖2-35	電池容量累積密度函數.....	45
圖2-36	超級電容儲能系統功率.....	45
圖2-37	超級電容功率密度函數.....	46
圖2-38	超級電容功率累積密度函數.....	46
圖2-39	超級電容容量密度函數.....	46
圖2-40	超級電容功率累積密度函數.....	47
圖3-1	本計畫之ICESSE硬體系統架構圖.....	50
圖3-2	dc/ac單相換流器電路架構.....	53
圖3-3	單電壓極性切換波形圖.....	54
圖3-4	併網型單相換流器控制架構.....	55
圖3-5	降-升壓型轉換器電路架構.....	56
圖3-6	降-升壓型轉換器(a)升壓模式(b)降壓模式.....	57
圖3-7	降-升壓型轉換器控制架構.....	58
圖3-8	單相換流器之PSIM模擬電路架構.....	59
圖3-9	單相換流器基本控制功能模擬之負載功率切換測試流程..	59

圖3-10	換流器之直流匯流排電壓、交流端電壓/電流及負載電流..	60
圖3-11	換流器之直流匯流排電壓及電感電流迴授信號與控制命令.....	61
圖3-12	降-升壓型轉換器之PSIM模擬電路架構.....	62
圖3-13(a)	ICESS蓄電池組低頻充/放電測試結果(1): DC bus電.....	62
圖3-13(b)	ICESS蓄電池組低頻充/放電測試結果(2): 控制命令與回授信號.....	63
圖3-14(a)	ICESS超級電容組高頻充/放電測試結果(1):DC bus電壓、電網端電壓及電流波形、超級電容之高頻充/放電電流波形.....	63
圖3-14(b)	ICESS超級電容組高頻充/放電測試結果(2):控制命令與回授信號.....	64
圖4-1	應用情境#1之功能操作示意圖.....	66
圖4-2	應用情境#1之(a) 風力及光伏發電功率 (b)負載功率 (c)HESS功率 (d)市電端-功率變動情境.....	67
圖4-3	ICESS應用情境#1之情境模擬波形結果.....	68
圖4-4	ICESS應用情境#1之情境模擬控制信號.....	69
圖4-5	應用情境#2之尖峰電力調度控制功能操作示意圖.....	70
圖4-6	(a) PV/WTG發電功率(b)負載功率(c)ICESS電池功率(d)市電端-功率變動流程.....	71
圖4-7	ICESS應用情境#2之情境模擬波形結果(1): 尖峰電力調節功能未起動.....	72
圖4-8	ICESS應用情境#2之情境模擬控制信號(1): 尖峰電力調節功能未起動.....	73

圖4-9	ICESS應用情境#2之情境模擬波形結果(1): 尖峰電力調節功能起動.....	74
圖4-10	ICESS應用情境#2之情境模擬控制信號(1): 尖峰電力調節功能起動.....	75
圖4-11	ICEES工作於上述操作情境時之功率路徑示意圖.....	77
圖4-12	ICESS應用情境#3之情境模擬波形結果(1): PV/WTG輸出功率平順控制功能未起動.....	78
圖4-13	ICESS應用情境#2之情境模擬控制信號(1): PV/WTG輸出功率平順控制功能未起動.....	79
圖4-14	ICESS應用情境#3之情境模擬波形結果(1): PV/WTG輸出功率平順控制功能起動.....	80
圖4-15	ICESS應用情境#3之情境模擬控制信號(1): PV/WTG輸出功率平順控制功能起動.....	81
圖5-1	DSP TMS320F28335控制板功能性配置與規劃.....	83
圖5-2(a)	ICESS之dc/ac 併網換流器.....	86
圖5-2(b)	ICESS之dc/dc電力轉換器.....	86
圖5-3	完整之硬體實驗配置與測試環境.....	87
圖5-4(a)	ICESS應用情境#1之相關實測波形結果.....	89
圖5-4(b)	ICESS應用情境#1之相關實測波形結果.....	89
圖5-5	ICESS應用情境#2之情境實測波形結果(1): 尖峰電力調節功能(未起動).....	90
圖5-6	ICESS應用情境#2之情境實測波形結果(2): 尖峰電力調節功能(起動).....	91
圖5-7	ICESS應用情境#2之情境實測波形結果(3):	

	尖峰電力調節功能(起動).....	91
圖5-8	ICESSE應用情境#3之情境實作波形結果(1):	
	PV/WTG輸出功率平順控制功能(未起動).....	92
圖5-9	ICESSE應用情境#3之情境實作波形結果(2):	
	PV/WTG輸出功率平順控制功能(未起動).....	92
圖5-10	ICESSE應用情境#3之情境實作波形結果(3):	
	PV/WTG輸出功率平順控制功能(起動).....	93

## 表目錄

表1-1	各類推廣目標裝置容量(MW).....	4
表2-1	案例一的HESS不同累積概率密度函數水平下的容量 分佈.....	42
表2-2	案例二的HESS不同累積概率密度函數水平下的容量 分佈.....	47
表3-1	ICESS所屬各電力轉換器系統相關技術規格與參數...	51
表5-1	DSP TMS320F28335控制板各腳位輸出定義.....	83
表6-1	本計畫之預定進度甘梯圖.....	95

## 壹、計畫背景、目的及重要性

本章將敘述計畫之執行背景、目的、重要性及國內外相關文獻之回顧與分析。

### 一、計畫之背景:

自18世紀工業革命以來，人類大規模開採與使用化石燃料，以至於二氧化碳等溫室氣體排放量不斷增加，加劇了溫室效應，造成全球暖化現象日漸嚴重。根據聯合國政府間氣候變化專門委員會(IPCC)於2013年所發表的「第五次氣候評估報告」指出，西元21世紀末全球均溫恐怕將再上升4.8°C[1]，由此可見全球暖化已是目前世界各國須共同解決的重大議題，因此在2015年聯合國氣候變化綱要公約第21次締約國大會(COP21)中，參與之各國共同制定了「巴黎協議」，此協議的主要目標為：將全球平均氣溫升幅抑制在2°C之內，並朝著低於1.5°C的目標努力[2]。然而，隨著全球人口增加及世界各國經濟發展迅速，人類對於能源的需求亦快速提升，美國能源資訊管理局(EIA)於「2017年世界能源展望」中更預測2015~2040年間世界能源消耗量將持續增長28%，如圖1-1所示[3]。以往人類所採用的傳統化石燃料將面臨蘊藏量快速減少及排放溫室氣體等問題，更突顯開發其他替代能源的重要性，因此核能、可再生能源等低碳能源技術成為世界各國致力發展的目標。核能與可再生能源雖同為低碳能源，但核能仍具有安全性、核廢料處理等問題，在過去短短40年間就已發生三哩島、車諾比與福島等三次重大核災，也讓世界各國需重新檢視核能發電的定位。

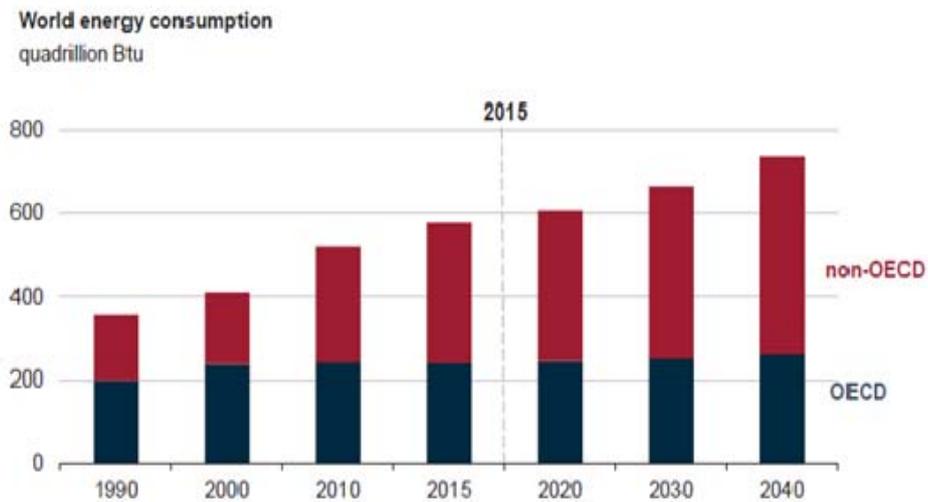


圖1-1世界能源消耗量預測

另一方面，可再生能源則較無安全性上的疑慮，常見的可再生能源包含風能、太陽能、水力能、生質能、地熱能等，其中又以風能與太陽能為發展主流，參考「2017年世界能源展望」的預測資料，2040年時風能與太陽能於可再生能源發電的占比將提高至40%，如圖1-2所示[3]。 可再生能源的優點包含：

- I. 取自於大自然，取之不盡，用之不竭且分佈廣泛。
- II. 碳排放量低，無需任何燃料、無廢棄物與汙染。
- III. 對環境之影響小，極具環保效益。

可再生能源也存在一些明顯的缺點，包含：

- I. 具有間歇性，易受氣候與晝夜影響。
- II. 不可預測性。
- III. 轉換效率低。
- IV. 能量密度低。

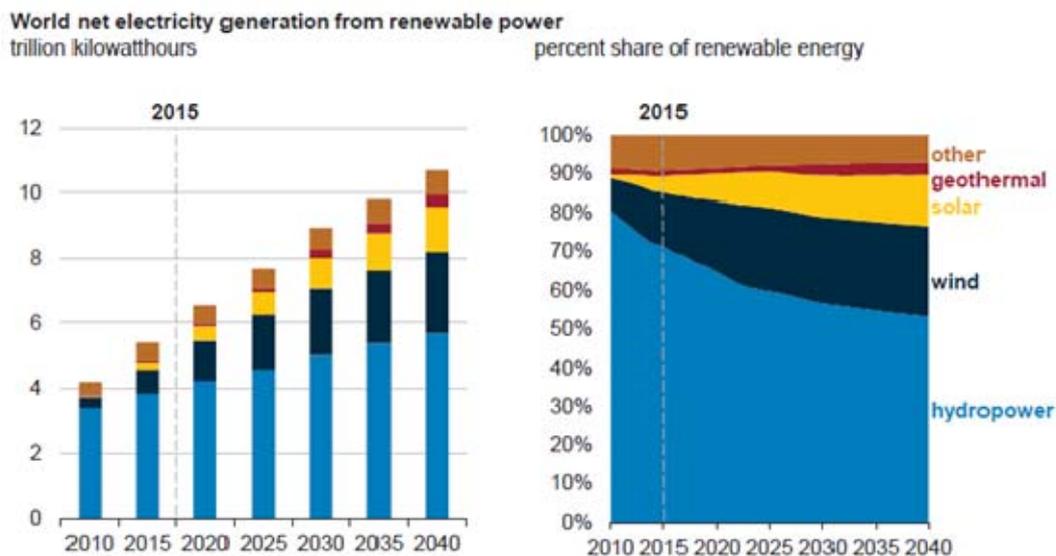


圖1-2世界可再生能源淨發電量預測

臺灣為自產能源匱乏的海島型國家，近98%的能源供給均仰賴進口，對於化石燃料、核能依存度高，電力系統孤立且缺乏備援。而在2011年日本爆發福島核災後，社會大眾對核安問題產生許多疑慮，且為了順應全球減少溫室氣體排放的趨勢，以及降低對進口能源的依賴，政府積極推動風能、太陽能發電等可再生能源，並倡導節能與低碳生活，期望開源與節流雙管齊下，能夠逐漸降低對於化石燃料、核能之需求，同時達成降低排碳量的目標。

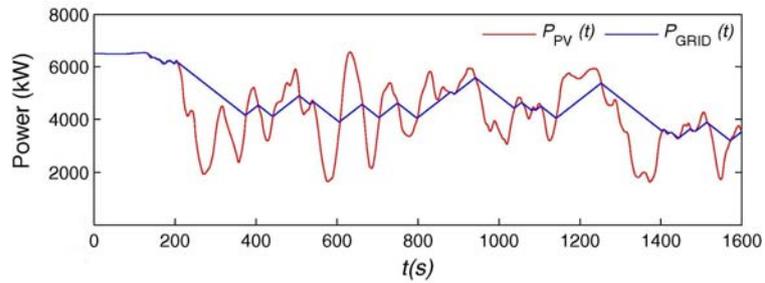
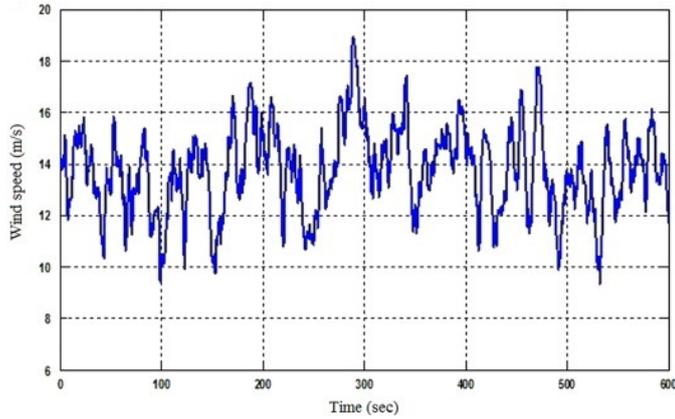
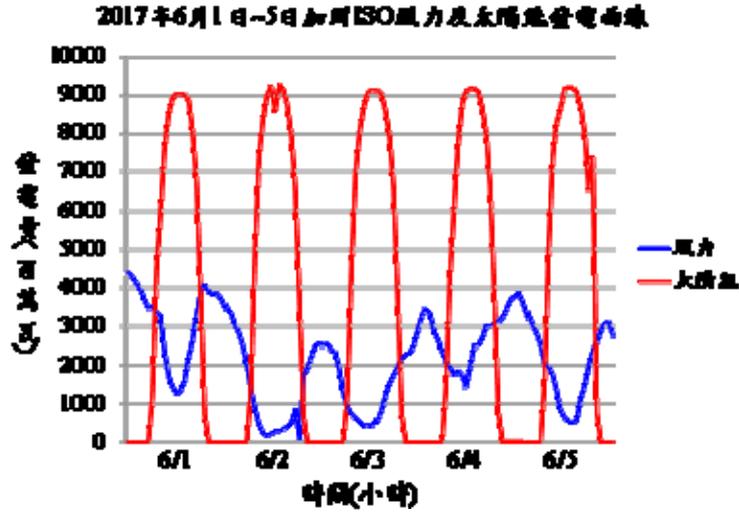
依據經濟部能源局所提出「2016年能源產業技術白皮書」，政府在擴大推廣再生能源方面，規劃於2025年再生能源發電占比達20%，其中2025年之各類推廣目標裝置容量分別為太陽光電20GW、陸域風電1,200MW、離岸風電3,000MW、地熱能200MW、生質能813MW、水力2,150MW及燃料電池60MW，總共27,423MW，如表1-1所示[4]。另外，關於核能發電廠的規劃為龍門發電廠(核四)於封存到期後建置相關再生能源發電系統，茂

林(核一)、國聖(核二)、馬鞍山(核三)發電廠則依照原定年限退役不加以延役，並於2025年正式達成非核家園之目標。

表1-1各類推廣目標裝置容量(MW)

能源別	104年	109年	114年
太陽光電	842	6500	20000
陸域風電	647	814	1,200
離岸風電	0	520	3,000
地熱能	0	150	200
生質能	741	768	813
水力	2,089	2,100	2,150
燃料電池	0	22.5	60
合計	4,319	10,875	27,423

然而，可再生能源發電其具有間歇性、不可預測性等缺點。圖1-3所示為2017年6月1~5日美國加州電力調度中心(ISO)轄區之風力與太陽能發電曲線[5]，圖1-4為風速依時間變化曲線[6]，圖1-5為典型太陽能瞬時發電功率曲線[7]，大量此類不穩定之發電源併網將對於傳統電力系統之供電品質及可靠度造成衝擊。因此，為了降低可再生能源發電功率波動所造成的影響，通常可結合多種可再生能源與儲能裝置組成先進混合式可再生能源發電系統，並藉由儲能裝置吸收發電功率的波動，以達成功率平順及電能優化管理之目標。



## 二、計畫之主要目的與重要性

本計畫之研究構想是基於儲能系統之彈性規劃、智慧電能調控設計及應用效能優化的思維並以進階數位控制器之可編程設計條件為基礎，發展具整合多重儲能特性、工作模式及最佳能源管理與應用可能性之智慧型複合式儲能系統(Intelligent Compound Energy Storage System, ICESS)。研究目的在使ICESSE可以適合應用於未來各式分散型再生能源發電及群聚式微電網之各種進階運轉所需之系統功能性操作與電能儲/放之優化控制。

近年來，半導體材料發展極為迅速，本計畫嘗試將高效率之開關式電力轉換器技術、全數位控制設計方案及系統優化演算法應用到ICESSE之發展與實務應用案例分析。藉由探討智慧型複合式儲能系統之設計原則、可能應用範疇及優點，發展各應用情境所需之電能控制界面、智慧型演算法與相關運轉、控制技術，並以DSP數位控制技術為基礎，發展一種具彈性操作及整合多重控制功能的高性價比ICESSE裝置。所提ICESSE裝置與相關智慧型演算法的提出預期可以達到提高能源使用效率、降低各式分散型再生能源發電系統之建置與運轉成本同時滿足未來新型群聚式微電網各種進階運轉模式所需之系統操作彈性與電能儲/放優化控制等功能。考慮各式再生能源發電，例如，風力與太陽能發電系統具有日夜發電時間互補，輸出功率的變動性質，透過適當之電能儲放機制來增加整體系統的靈活性是必要的規劃。一般而言ICESSE裝置依實際之應用需求可有多種設計方案與考量，例如一個適當的ICESSE容量與控制規劃將有助於降低電力系統的備轉容量、增加能源效率、滿足新的電網補償與控制功能、提升儲能裝置之性價比。

從技術及功能需求來看，目前中小容量的配電層級儲能問題通常透過電池儲能裝置來解決，本計畫所提智慧型複合式儲能系統(ICESS)能同時具備功率及能量儲能之應用性質，加上所屬電力界面採用高效率之系統設計策略、具備智慧型可編程的數位控制功能與規劃彈性，相信是一個極具實際應用潛力的方案。

本計畫將針對含有多重再生能源發電源之主動式配電網絡運轉與電能儲/放優化控制應用之需求規劃相關運轉情境，以案例模擬、小容量電路雛型製作及實驗分析探討所提ICESS之可行性及產業應用潛力。目前最新型之主動式配電網可通過調控具有隨機性和間歇性功率輸出的可再生能源電源、儲能單元、負荷以及其他可控、可調電源組合在一起構建單一微電網或群聚式微電網，主動式配電網中具備可互動的需求端電力和發電端電力被即時調度和彈性控制，目的在於提高整體可再生能源利用率，充分展現分佈式再生能源發電系統併網後為用戶和電網帶來的效益和經濟價值。

本計畫所提智慧型複合式儲能系統(ICESS)與電能優化控制方案，其主要目的在於探討如何將不同類型的儲能形式適當組合應用在上述主動配電網中達到較佳的運轉效率與滿足相關系統優化控制需求。例如功率型儲能單元(超級電容, SC)以及能量型儲能單元(全鈦液流電池, VRFB)各有各的特點，若能按照若干原則進行適當的功能分配則可望獲得整體最大之效益；以微電網中的再生能源發電功率平順控制及系統電能平衡優化控制為例，即非常適合使用複合儲能系統進行規劃與應用，以超級電容等功率型儲能單元負責平滑主動配電網中波動幅值大、頻率高的功率，將其具有的較大的功率輸出密度、快速的響應速度及較多次數的循環優勢得到充分展現；另外以全鈦液流電池或鉛酸電池等能量型儲能單元進行平滑主動

配電中所需之低頻變動功率及電能平衡與調度。採用上述複合儲能系統可以有效地減少能量型儲能系統的充放電次數，降低蓄電池充放電深度，延長蓄電池的使用壽命。

此外，藉由合理的優化配置複合儲能系統容量規格可以使得主動配電網獲得較經濟可靠的運行結果。一般而言若儲能系統的輸出功率或規劃的系統容量不足，可能會導致分佈式能源發電儲存量不夠，不能滿足負載較大的動態平衡需求，經常深度充放電將嚴重影響儲能電池的壽命。若單純以提高系統之設計容量作為解決問題的方式，又會增大初始和整體運轉之成本。因此對儲能裝置進行合理化配置及容量規劃是屬客製化需求及系統優化設計的問題，通常可採用的方法為建立相關數學模型及通過演算法求取最佳解。

針對複合儲能系統進行容量配置，通常需優先滿足系統供電可靠性及某種選定之電能管理規則，同時也需考慮儲能系統運行的經濟性，利用適當之優化演算法可得到各再生能源發電和儲能單元的最佳容量配置組合。然而實務上，針對複合式儲能的容量配置方法並無通用之系統方法，只能在給定條件下合理優化配置複合式儲能裝置，並在此基礎上進行能量優化管理，發揮其特定的優勢。特別是在主動式配電網中高滲透率的可再生能源波動較大、負載突變將導致運行模式頻繁切換，對於複合式儲能系統進行合理地優化配置及智慧型電能控制是急需要探討的關鍵問題。

### 三、本計畫採用之研究方法與內容

- 本計畫採用之研究方法

本計畫所提智慧型複合式儲能系統(ICESS)將特別針對併網型再生能源發電系統之應用情境進行功能性規劃與發展相關智慧型控制演算法。採用之研究方法主要包括:理論探討，系統設計，案例規劃、模擬分析與驗證，全系統硬體實作、測試與效能評估等5大項。

#### ● 本計畫之研究內容

本研究之技術內涵是聚焦於發展儲能系統之彈性規劃策略、智慧電能調控設計及應用性能優化架構，所研擬之系統架構包含有風力與太陽能發電單元、複合式儲能單元、併網型換流器及電網。所規劃之系統將以進階數位控制器之可編程設計條件為基礎，發展出具整合多重儲能特性、工作模式及最佳能源管理與應用可能性之智慧型複合式儲能系統(Intelligent Compound Energy Storage System, ICESS)。此項 ICESS 將可適合應用於未來各式分散型再生能源發電及群聚式微型電網之各種進階運轉所需之系統功能性操作與電能儲/放之優化控制。主要工作項目包括以下5項：1. 文獻探討、系統架構、功率與容量規劃、系統功能性應用規劃、硬體架構設計、案例分析。2. 主要電力轉換器系統單元、控制器架構及相關界面電路設計、分析。3. 控制方案所需之演算法與數位控制器之規劃、量化設計及模擬、實務應用案例系統規格及運轉情境規劃、模擬與分析。4. 電力轉換器硬體系統實作與相關控制演算法之發展、控制案例所需之DSP即時數位控制器規劃、軟硬體系統整合、控制案例之系統實作驗證、整體性能分析與實務應用評估。5. 完成論文及計畫結案報告之撰寫。

#### 四、計畫相關文獻之回顧

近年來，因應節能減碳趨勢，全球再生能源系統與相關技術發展迅速，國內各單位對於此方面的研究亦極為重視。雖然國內在各別分散式發電之系統特性、電力轉換控制技術、最大功率追蹤、孤島偵測等已有不少的研究成果發表，但針對未來新型主動式配電網路、進階智慧型群聚式微電網運轉所需之新式複合型儲能系統設計、電能優化管理等關鍵技術、相關補償策略及進階控制器之發展，還是處於剛起步的階段，急需國人投入更多的研究能量。國外的相關研究則相當多，大部份已發表於文獻中。以下僅針對與本計畫所要探討之複合式儲能系統設計與相關應用進行廣泛之文獻探討。

為了調適光伏發電系統的快速功率波動，文獻[8]評估了由電池儲能系統（BESS）和超級電容器(SC)組成的混合儲能系統（HESS）並提出了確定HESS功率容量規格的經驗方法。所提方法可以概略設計BESS和超級電容器的容量，量化設計原則是以前優化BESS的高能量密度和超級電容器的高功率密度的特性為基礎。研究結果表明，HESS內的超級電容有助於緩解光伏發電系統的功率高頻波動及延長BESS的壽命。此外，超級電容也有助於降低太陽能功率波動的峰值，而重點是它不會產生與BESS相同的能量往返損失。文中所提出的方法使用了紐約長島現有光伏發電廠的實際光伏發電數據進行模擬驗證。近年來，世界各國不斷增加具間歇性可再生能源發電的比重，這已經對工作中電網的穩定性產生令人擔憂的影響，在文獻[9]中，作者探討了鉛酸電池和超級電容器所組成之HESS，使用模擬方式評估HESS在實際電網運作條件下的性能。所提HESS在穩定風電場和光伏的功率波動方面，已證明具有可平衡成本和性能的特性。文中為了進

一步降低系統成本，確實落實風光伏電站的彈性調度工作，有進一步探討影響風電光伏發電成本的主要因素。文獻[10]首先討論了混合儲能系統以及可採用之不同介質中的化學性質。然後使用數學工具Copula以解析風力和光伏電站之間的依賴關係。為降低系統成本，作者提出了緩衝功率分配的基本規則，也同時確定了電池和超級電容的最小容量並介紹了概率分析方法來分析功率和能量在一定水平下如何得到補償。文獻[10]最後也呈現了比利時風電場和光伏電站實際數據的分析結果。結論表明，混合儲能系統的成本受到平穩指標和風電場功率大小的影響。近年來，HESS也廣泛應用於電動車(EV)系統，EV之電池在加速和減速期間，特別是在市區駕駛條件下，由於高峰值功率和較苛刻的充電/放電循環條件而易於加速劣化。超大容量的儲能系統可以滿足高功率要求，但是它的尺寸，體積和成本都會增加。為了降低整體ESS體積並延長電池循環壽命，使用電池與超級電容器混合儲能系統被認為是一個可能的解決方案。在文獻[11]中，作者研究了UC-BESS的優化配置，設計和能量管理。一般認為，HESS的主要挑戰之一是設計一個即時的能源管理控制器，以產生良好的功率分配性能。文獻[11]介紹了這個問題的方法和解決方案。文獻[11]中特別製定了多目標優化問題，使用動態規劃(dynamic programming, DP)的標準驅動循環數據來優化功率分配，以延長電池壽命並降低HESS功率損耗。文中使用DP所得之最優結果進行訓練類神經網絡(NN)，實現了基於NN的最佳功率分配的有效實現。所提在線能源管理控制器適用於360V / 34kWh電池組和270V / 203Wh UC的中型EV模型。所提出的在線能量管理控制器能有效地將負載需求與高功率效率分開，並且有效地降低了電池峰值電流。更重要的是，作者開發了一個38V-385Wh電池和一個16V-2.06Wh的UC HESS硬體原型和一個實驗平台。實驗結果成功驗證了UC-HESS電池控制

器設計的可行性和有效性。據估計，在線能源管理控制器可將電池循環壽命延長60%以上，這是一項很大的貢獻。文獻[12]提出了一個比較性的研究方式來確定船舶用電力系統（SPS）中使用的混合動力儲能系統的最優組合。混合能量存儲器包括兩種或更多種類型的能量存儲元件（電池，超級電容器和飛輪）。在這項研究工作中，分析了這三種類型的最佳組合，以最大限度地減少系統的交流或直流側的脈衝負載功率所引起的電壓和頻率波動。文獻[13]提出了一種適用於混合儲能系統的雙向降壓型DC-DC變換器的低損耗、恆頻、零電壓開關（ZVS）調控策略，主要採用同步整流和軟開關技術。由於調製策略是一種純軟體解決方案，因此不需要額外的有源或無源元件的費用。文獻[13]以模擬及實驗結果驗證了理論分析的正確性，系統轉換器效率約為95.5%。有關超級電容及二次電池等多種儲能裝置組成的混合儲能系統設計問題，文獻[14]提出了基於充電狀態的功率共享策略，所提方法能夠適應不同的功率要求，無論採用多少種類型的存儲設備，均可進行設計。功率分配結果希望能自動匹配設備的功率性能，容量和初始狀態，同時考慮每個設備的充電狀態。模擬和實驗結果呈現並驗證這個策略。在混合動力儲能系統中，電池在需要時起到儲存和釋放能量的重要作用。由於電池通常較為昂貴，增加其生命週期對於儲能系統的成本合理化相當重要。作為一種改善措施，一般可採用超級電容器來減小電流波動以平滑電池電流。文獻[15]提出了一種方法，通過控制超級電容器的電壓來減少電池的電流波動，並使該住宅應用的能量損失最小化，文中使用兩個優化階段：1.預測確定的參考電壓2.在線電壓調整。文中使用了模擬和實測的數據來驗證了所提出的方法與現有技術相比的優越性。近年來，基於電池與超級電容器的混合儲能系統（HESS）經常被提出用於減輕動態交換對電池壽命的影響。文獻[16]進行研究回顧和討論

了獨立微電網中基於HESS的電池超級電容器的技術進步和發展，並比較了系統拓撲結構和能量管理控制策略。文中還討論了獨立微電網系統的技術複雜性和經濟的可持續性。作者介紹了一個獨立的基於HESS的光伏微電網研究案例。此案例表明了混合動力儲能系統可以為電網提供更多的靈活性和平衡，為間歇性可再生能源提供備用電源。可以改善配電網的管理，降低成本，提高效率以緩解可再生能源引入的可能衝擊，提高輸配電的安全和效率，穩定電力市場價格，同時確保更高的能源供應安全。文獻[17]概述了混合動力儲能系統解決方案，藉由將超級電容器與電池集合在一個獨特的饋線上，實現可再生能源的高經濟性，穩定電網並優化能量存儲系統的規模。針對直流微電網中的混合儲能系統，文獻[18]提出了一種與頻率相關的直流電壓下垂控制。只需要對本地直流電壓測量，實現不同放電時間的協調控制。文中對穩定性分析和控制器優化進行了研究，並給出了案例仿真之結果。結果也表明，該混合儲能控制策略具有良好的性能。文獻[19]研究了一種HESS的應用性能，該HESS由一個電池及與電池並聯的超級電容器組成，在注入恆定功率脈衝之後進行比較研究。作者實現了兩種混合配置的等效電路比較研究。文獻[20]特別針對軌道供電系統提出了由超級電容器和電池組成的混合動力儲能系統，以防止制動能量引起的電網電壓過高。根據功率波動和所提分配原則，設計了HESS的容量和控制方法，以實現電網的電壓穩定以及超級電容器和電池之間的比例優化。案例模擬結果表明，所提HESS可以將電壓限制在安全工作範圍內，有效降低系統的冗餘容量和成本。文獻[21]則介紹了一種獨立光伏發電系統中使用電池和超級電容儲能裝置的新型控制方案。所提獨立光伏發電系統是一由光伏陣列，一電池充放電電路，一超級電容充放電電路組成。光伏陣列為負載提供能量，通過控制儲能裝置的充放電來動態調整過剩和不

足的能量。超級電容器吸收光伏輸出功率的高頻分量，並能快速提供負載突然的瞬時功率需求，整個系統能量管理的關鍵在於通過分析直流母線電壓的下垂特性和實時充放電功率，來控制逆變器和雙向DC-DC變換器工作在合適的模式。案例模擬和實驗結果表明，所提能源管理控制策略的有效性。近年來，電力儲能技術是補充國內熱電系統的一項頗具吸引力的技術，因為當熱電系統被調度以滿足供熱負荷時，儲能系統可以協調電力負荷和熱電系統之間的任何不匹配。電能存儲技術的產生功率和能量密度之間的折衷，並延長了存儲系統的使用壽命，但需要較複雜的控制方案。文獻[22]提出了一種新穎的用於微熱電系統的電池與超級電容器混合儲能系統的控制方案。所提出的HESS控制器利用超級電容器電壓的低頻分量來產生電池參考電流，其不僅將低頻功率分配給電池，而且還將電池電流和超級電容器電壓同時保持在其預定限度內。在超級電容器電流中的100Hz漣波分量的負面影響，例如過熱和增加的轉換器損耗等，在此文獻中使用100Hz帶阻濾波器來解決。Simulink的SHIL案例模擬顯示所提HESS的有效操作。文獻[23]提出了一種具有電池及超級電容器混合儲能系統的獨立光伏系統最優控制策略，通過降低電池的動態應力和峰值電流需求來延長電池壽命。與僅使用濾波器的傳統控制方法不同，此文所提出的控制策略包括低通濾波器（LPF）和FLC。首先，LPF從電池需求中去除高動態分量，而FLC在不斷考慮超級電容器的充電狀態的同時，將電池峰值電流需求降至最低。所提方法中，粒子群優化（PSO）算法優化了FLC的隸屬函數，以實現最佳的電池峰值電流降低效果。與僅具有電池儲存的傳統系統相比，所提出的系統可將電池峰值電流，電池峰值功率，功率變化率的最大絕對值及功率變化率的平均絕對值，分別降低了16.05%，15.19%，77.01%和95.59%。此外，與常規控制策略相比，超級電容器利用率可提

高687.122%。光伏發電系統於波動的太陽輻射和變負荷條件下獨立運行需要複合式的儲能量單元。在文獻[24]中，超級電容器用於減少對電池的壓力，並改善其生命週期。在此背景下，作者研究了在不同運行狀態下的電池電流增益、能量損耗增益、總能量效率和浪湧負載功率消除率的性能。這些參數也被用於與SC的成本進行研究。文中所有測試案例都使用不同數量的並聯超級電容器和濾波常數。文獻[25]提出了一種基於佔空比的自適應滑模控制（SMC）方法，應用於電池及超級電容混合儲能系統（HESS）中的升壓轉換器的電流跟蹤控制。基於快速跟蹤電流誤差及處理未知的干擾，作者基於負載電阻、外部輸入電壓、電感電流和輸出電壓的估計來設計狀態觀測器。根據狀態觀測器和Lyapunov函數設計適應規則。作者也提出了實驗結果來驗證所提方法的有效性。與一般PI控制策略相比，自適應SMC方法可以將暫態響應速度的提高20%以應對負載變化。在升壓轉換器啟動期間，它還可以減少75%的時間。目前，具有儲能系統的獨立光伏微電網已成為離網社區供電具有前景的解決方案。而阻礙獨立微電網大量發展的主要問題之一就是儲能電池使用壽命較短。為了解決這個問題，許多研究人員提出了混合儲能系統和新型電源管理策略，以提高電池組的使用壽命。文獻[26]提出了一種新型的多級混合儲能系統拓撲結構及其相關的電源管理策略，以減輕電池的充放電壓力。並開發了不同於一般HESS拓撲的典型獨立光伏微電網的Simulink模型，以評估所提出系統的性能。根據不同天氣條件的實際太陽輻照度數據和估算的負荷曲線來分析不同HESS在減輕電池應力方面的有效性。作者也提出了綜合分析和系統技術和財務可行性指標。案例結果表明，所提出的HESS可以提高電池的預期壽命，降低獨立光伏電池微電網的運行成本。文獻[27]中提出了一種適用於微電網混合能量儲存系統的頻率控制策略，該控制策略由

兩種模式組成。模式1協調頻率控制精度以及電池的充/放電循環。模式2協調電池和超級電容器的充/放電優先次序，實現不同儲能系統的最優控制。文獻[28]分析了於獨立光伏系統之電池與超級電容器混合儲能系統（BS-HESS）和傳統的獨立光伏系統與僅有電池儲能系統的農村家庭的應用案例比較。提出了被動式BS-HESS和半主動式BS-HESS的獨立光伏系統控制策略。為了減少電池應力並延長電池壽命，文中基於規則的控制器（RBC）和基於濾波器的控制器（FBC）兩種控制策略主要是針對具有半主動BS-HESS的獨立光伏系統而發展。案例結果表明，與僅使用電池的系統相比，採用半主動BS-HESS的系統可以顯著降低電池峰值電流達8.607%，並將電池的平均SOC提高到0.34%，從而延長了電池的使用壽命系統。文獻[29]中利用動態規劃（DP）方法來處理綜合優化問題，所探討之混合儲能系統（HESS）包括電池和超級電容器（SC）。在優化過程中，基於LiFePO<sub>4</sub>電池的動態模型，採用預設的成本函數來評估HESS壽命週期成本。研究結果表明，隨著SC的增加，HESS的生命週期成本開始迅速下降，然而隨著SC數量的增加，減少的速率也隨之下降。文獻[30]研究了一個基於dSPACE的混合能量存儲系統（HESS）實驗平台。該實驗平台的拓撲結構使用兩個並聯的雙向dc-dc轉換器和另一個雙向dc-dc來模擬所提系統具有四種工作模式。相關實驗結果證明了用於電池組和超級電容器組之間的控制策略具可行性。文中將混合儲能系統定義為包括兩個串聯連接的儲能單元（可使用不同儲能技術）的儲能系統，其中只有一個直接連接到電網。

有關複合式HESS應用於WTG系統之研究，文獻[31]提出了一種利用動態下垂因子來控制超導儲能(SMES)與蓄電池(Battery)之間充放電優先次序的新型功率共享方法，並證明其具有比一般下垂控制有更好的操作

性能。作者提出一種基於PSCAD的模型，通過使用動態下垂控制來驗證混合能量存儲系統的PFC性能。研究結果表明，所提HESS具有更好的頻率調節能力，並且所提出的動態下垂控制能夠充分利用SMES和電池的不同特點，形成了一種互補的混合儲能系統。此外，所提新控制方案中的電池可以得到更好地防止短時間的頻繁週期和突變電流，從而證明其具有更長的壽命延長。目前隨著風電場數量的增加，在新標準下要保持頻率穩定，必須限制風電場的即時功率變化。基於這個主題，文獻[32]研究了一個工作於PMSG風力發電機組的蓄電池和電容器混合儲能系統的控制測略。所提方法可有效消除傳統方法中不必要的電池充電和放電，該方法提高了能量儲存系統的性能並增加了電池壽命。文中使用MATLAB / Simulink軟體進行若干案例模擬研究。此外，電力系統受到風力發電的功率間歇性和不確定性的限制，嚴重的阻礙了對供電的準確預測和調度計劃。使用適當的儲能系統可能會改善預測的難度。文獻[33]提出了一個WTG整合混合儲能系統的數學模型，該文獻所提演算法的基礎是將混合儲能系統中的電池儲能系統作為慢速單元，飛輪儲能系統則規劃為快速協調單元，以混合儲能系統即時補償WTG之發電變動進而改善預測準確度和輸出電力的調度彈性。

## 貳、ICESSE之系統架構、配置模式與容量規劃

### 一、ICESSE之系統架構與配置模式

目前中小容量可再生能源發電系統大多配置有各式儲能單元，依其是否與市電並聯，可區分為獨立運轉型與市電併聯型兩種系統架構，這兩類型系統又可依照基於直流或交流匯流排的不同負載掛接操作規劃，分為如圖2-1~圖2-4所示之四種架構，圖2-1、圖2-2分別為基於直流、交流匯流排之獨立運轉型系統，圖2-3、圖2-4則為基於直流、交流匯流排之市電併聯型系統。然而，一般混合式可再生能源發電系統雖可輕易結合多種可再生能源，並加入儲能裝置來改善發電功率波動的問題及作為電能管理的界面，但關於可再生能源發電、儲能裝置與電網間的即時電能優化整合管理，以及各個電力轉換器間的功率協調控制等，仍具有相當大的挑戰性。此外，可再生能源本身仍存在轉換效率低、能量密度低等問題，因此，如何設計兼具穩定性與高效能之可再生能源發電系統及相關複合式儲能控制策略成為目前備受矚目的研究議題。

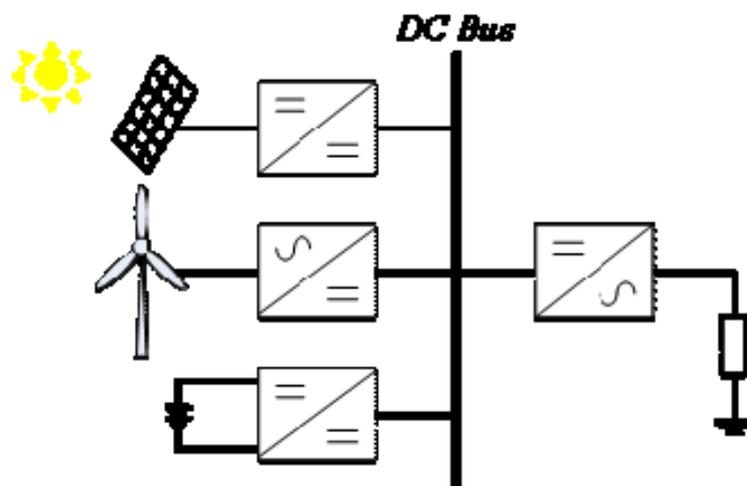


圖2-1 基於直流匯流排之獨立運轉型混合式可再生能源發電系統

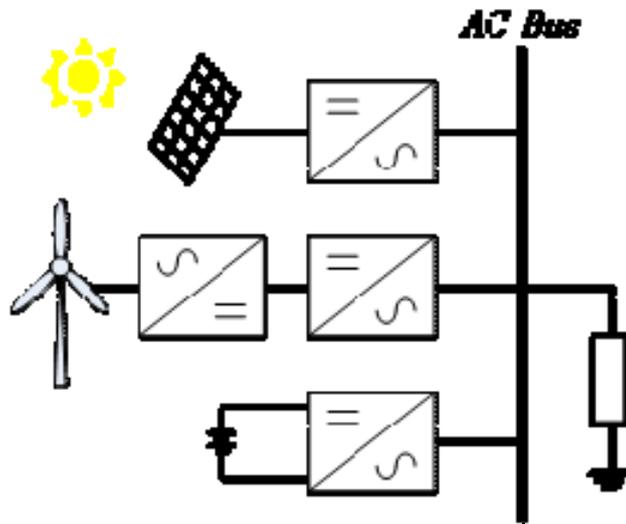


圖2-2 基於交流匯流排之獨立運轉型混合式可再生能源發電系統

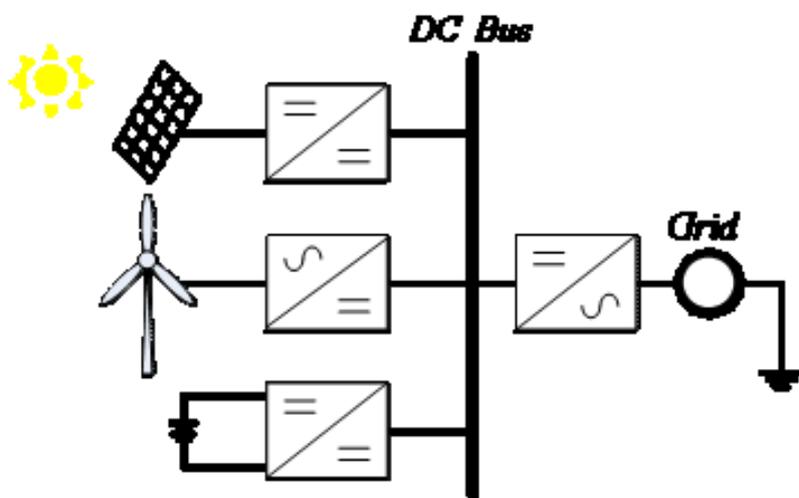


圖2-3 基於直流匯流排之市電併聯型混合式可再生能源發電系統

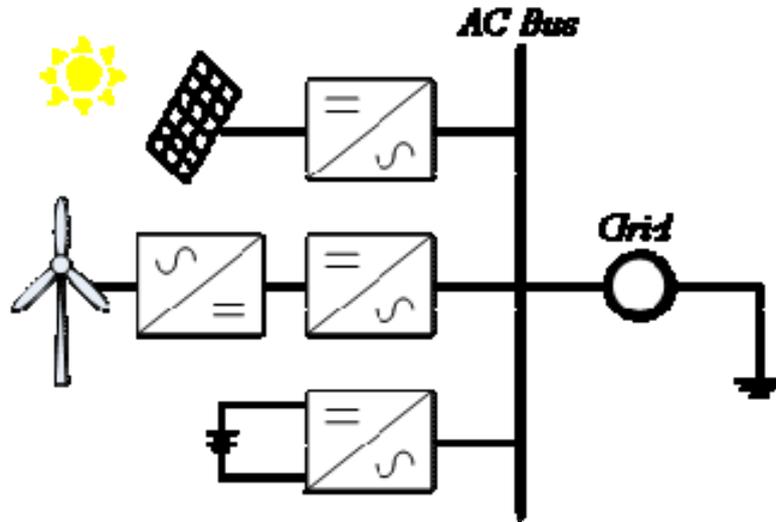


圖2-4 基於交流匯流排之市電併聯型混合式可再生能源發電系統

本計畫之研究目標是發展一種具整合多重儲能特性、工作模式及最佳能源管理與應用可能性之智慧型複合式儲能系統(Intelligent Compound Energy Storage System, ICESS)。ICESS的設計是基於儲能系統之彈性規劃、智慧電能調控及應用性能優化的思維並以進階數位控制器之可編程設計條件為基礎。ICESS可適合應用於未來各式分散型再生能源發電及群聚式微電網之各種進階運轉所需之系統功能性操作與電能儲/放之優化控制。本計畫所探討之典型分散式電網系統如圖2-5所示，完整之系統架構包含有風力與太陽能發電單元、智慧型複合式儲能系統(ICESS)單元、併網型換流器，交直流負載(AC/DC Load)及電網(AC Grid)。

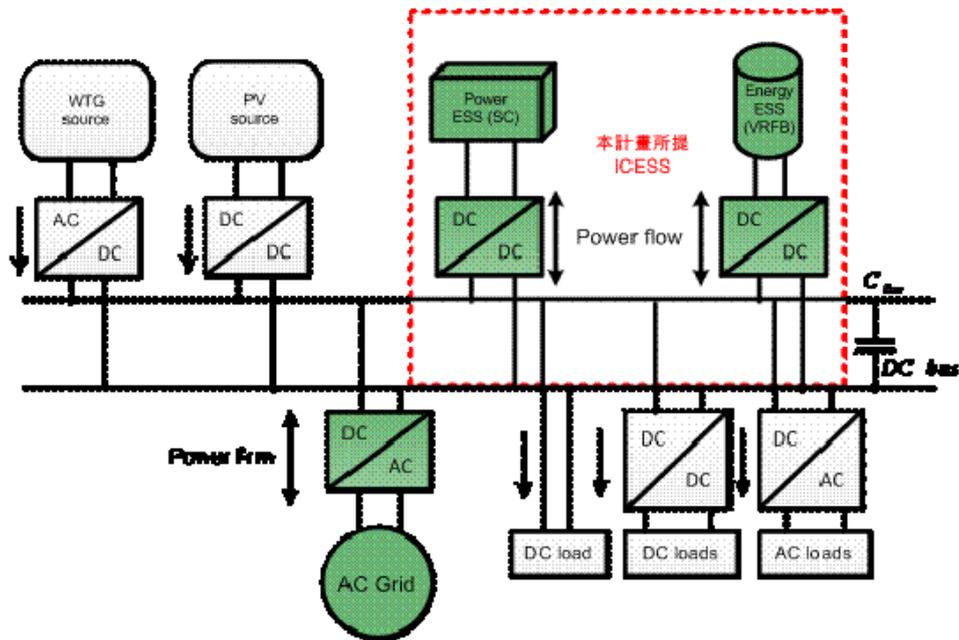


圖2-5 本計畫所探討之基於直流匯流排之市電併聯型混合式可再生能源發電系統

如圖2-5所示，本計畫所探討之智慧型複合式儲能系統(ICESS)單元將包含有兩種以上、不同特性之儲能單元，目前規劃為超級電容(SC)及全釩液流電池(VRFB)或鉛酸電池(LAB)之組合。

理論上，複合式儲能系統之可行電力界面配置有以下五種架構，如圖2-6至2-10所示。

圖2-6之配置為無換流器之被動式控制架構，有下列優點：

- 在脈衝負載條件下可以有效地抑制瞬態電流，增加 DG 之峰值功率。

- 直流母線電壓的波動將最小，確保相對穩定的系統電壓。主要是 SC/Battery 直接連接到直流匯流排使它們有相同的端電壓並取決於電池的充電狀態(SoC)和充電/放電特性。
- 大部分時間電池將以相對較低的放電深度(DoD)進行循環，並以相對較低的 C 率(電流)進行充電/放電。

圖2-6配置之缺點有：系統操作時，所需之工作電流將根據SC/Battery 各自的內部電阻從電池和超級電容器中吸取或饋入，超級電容器的瞬態功率處理能力無法得到最佳利用。由於電池的電壓變化較小，超級電容器也將在小範圍的SoC內工作，從而導致較差的系統利用率。

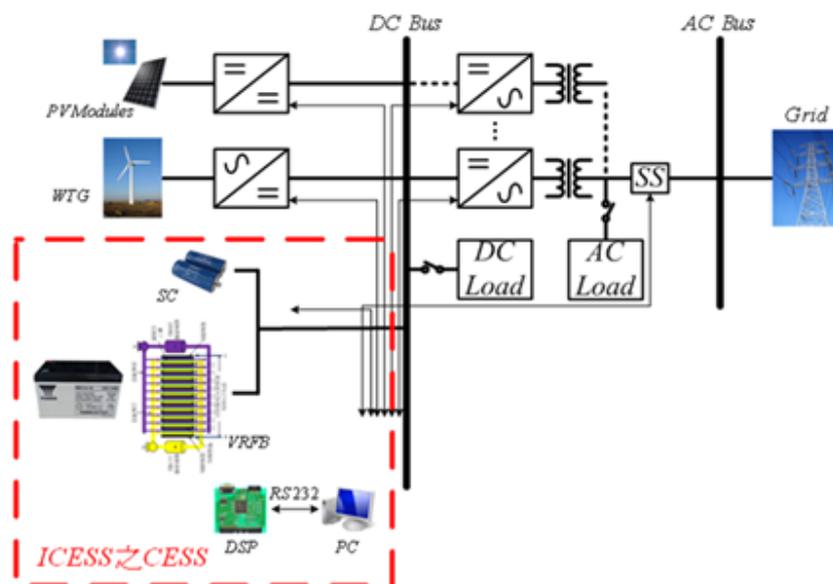


圖2-6 智慧型複合式儲能系統配置(一):無換流器被動式控制架構

圖2-7之配置為單換流器控制架構(VRFB+SC)，有下列優點：

- 在脈衝負載條件下可以彈性地抑制瞬態電流，增加 DG 之峰值功率。
- 直流母線電壓的波動可指定，提供所需之系統電壓穩定度。主要是 SC/Battery 經由共同 DC/DC 轉換器連接到直流匯流排。
- 依電池特性可以給定適當的放電深度(DoD)進行循環，並以相對較高的 C 率(電流)進行充電/放電。

圖2-7配置之缺點可歸納為：因為此處之SC/Battery直接並聯，系統電流將根據SC/Battery各自的內部電阻從電池和超級電容器中吸取或饋入，超級電容器的瞬態功率處理能力無法得到最佳利用。

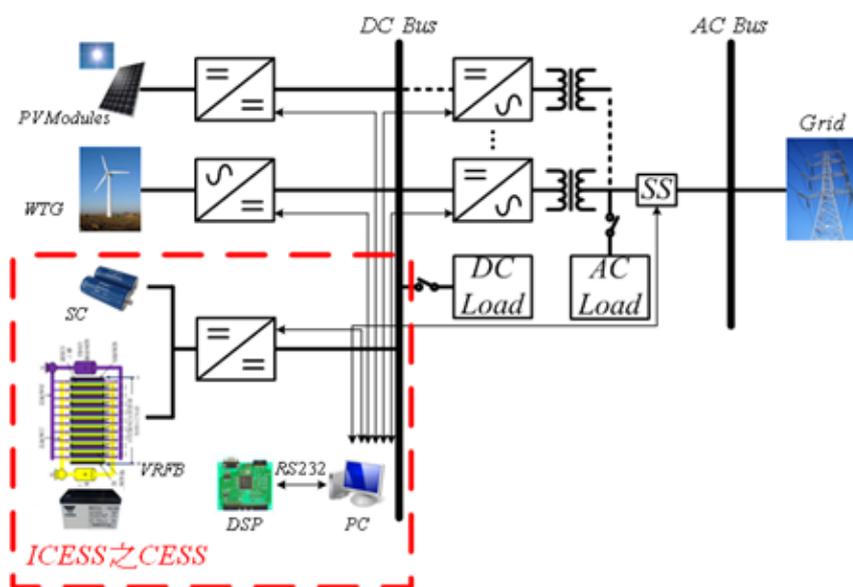


圖2-7 智慧型複合式儲能系統配置(二):單換流器控制架構(VRFB+SC)

圖2-8之配置為單換流器控制架構(VRFB)，有下列優點：

因此架構中，Battery單獨使用一個DC/DC轉換器，無論DC Bus之電源能量需求如何波動，電池電流都可以相對平緩的方式進行控制。電池電壓

也不需要與直流匯流排電壓相匹配，從而實現靈活高效能的容量調整和電池組的配置。

圖2-8配置之缺點可歸納為：

超級電容器的線性充電/放電特性會導致直流匯流排的電壓大幅波動，從而導致DC Bus電能質量和系統穩定性下降，想保持相對穩定的DC Bus電壓，超級電容器的容量勢必非常大，這將導致成本提高。

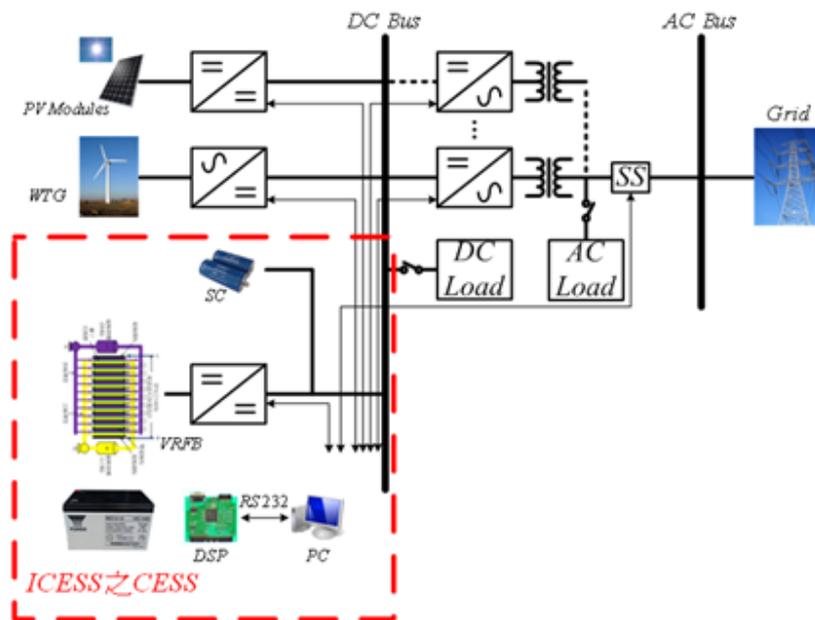


圖2-8 智慧型複合式儲能系統配置(三):單換流器控制架構(VRFB)

圖2-9之配置為單換流器控制架構(SC)，有下列優點：

這種接法使用一雙向DC/DC轉換器將超級電容器與直流母線和電池隔離開來。目的在使超級電容器可以在更寬的電壓範圍內工作進而提高SC系統之使用效率，而電池與DC Bus的直接連接也可以保證具有較穩定的母線電壓。

圖2-9之配置之缺點:

電池與DC Bus的直接連接不可避免地將電池暴露在波動的高脈衝電流條件下，這對電池的壽命有負面影響。

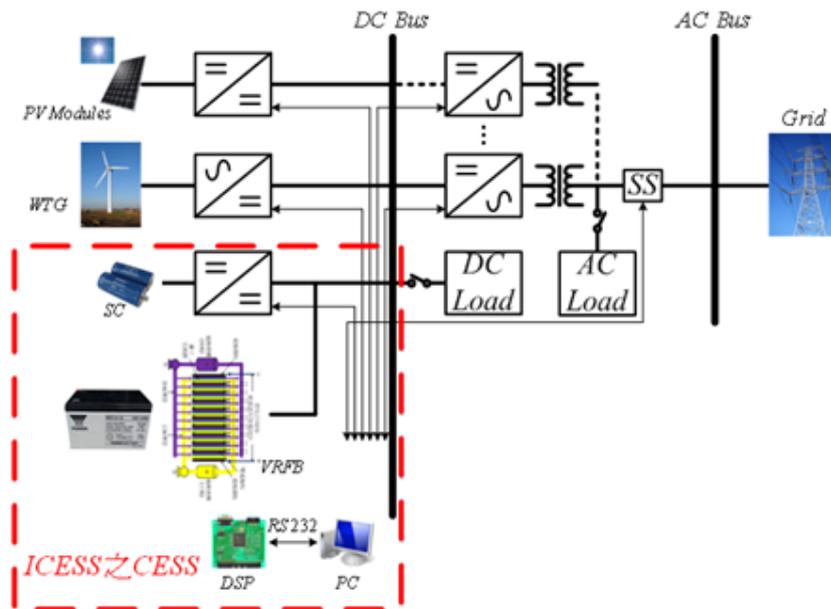


圖2-9 智慧型複合式儲能系統配置(四):單換流器控制架構(SC)

圖2-10之配置為雙換流器控制架構(VRFB+SC)，有下列優點:

此種接法通稱為全主動式CESS拓撲結構，是實務應用中規劃與控制彈性最大的拓撲之一，它允許完全控制兩個獨立的ESS裝置，通過適當的控制策略來滿足系統所需補償性能，提高電池壽命和直流母線電壓穩定性。也允許兩個ESS裝置獨立在較大範圍的SoC上操作，這可以有效提高CESS的系統使用效率。因為需用到兩個DC / DC轉換器，所以控制複雜度及成本皆較高是唯一的缺點。本計畫所提ICESSE後續將採用此拓撲結構進行實作驗證。

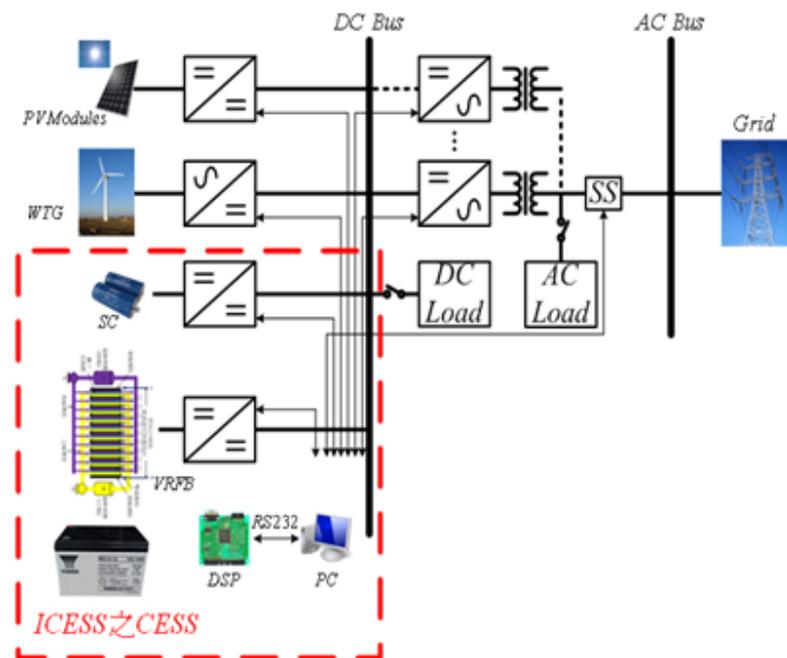


圖2-10 智慧型複合式儲能系統配置(五):雙換流器控制架構(VRFB+SC)

## 二、ICCESS之功率與容量規劃方案

本節將探討一種以統計分析之數值方法進行併網型太陽能/風力發電發電系統中混合式儲能系統(HESS)之功率與容量規劃方案。HESS之操作與電能管理可根據所需之系統動態響應及內部各別儲能裝置之特性進行即時功率分配。即時功率分配之目標在於有效管理個別儲能裝置的電荷狀態(SOC)、功率大小與運轉條件，從而實現整體功率和容量之優化應用。本節所探討之HESS功率與容量規劃方法可適用於大部分給定系統運轉條件下所需之HESS功率和能量規劃。為呈現所提方法具實務應用可行性，本節所探討之HESS應用案例以平滑風能和太陽能發電的功率波動並可確保指定之回市電功率大小及品質為目標。本節之案例規劃將以太陽能/風

力發電發電對應於兩種不同給定饋電功率的情況進行HESS之系統分析及數值比較。以平順功率波動為例，一般儲能系統(ESS)調節的功率變化可細分為低頻和高頻兩部份，所對應之實際情境如電力需求的突然激增或陰天的間歇性太陽能發電、風力發電發電的高頻變動部份以及再生能源的日平均值調節模式等低頻部分[34-35]。以實際應用面考慮，高頻功率的交換通常需要具有高功率密度的ESS元件，而低頻功率交換需要高能量密度之ESS元件。但目前的ESS元件都尚未發現具有同時對高頻和低頻有最佳響應的特性[36]。解決方法之一是將多種類型的儲能器元件整合成混合式儲能系統(HESS)[37]。

HESS常見的形式有：電池-超級電容、電池-超導磁、電池-飛輪、電池-其他電池等或空氣壓縮和熱儲能等。其中最常見的是電池-超級電容器組，因為超級電容與電池的工作原理上的具有相似性、相對低的成本以及可有效地補償彼此的限制，在大多數HESS的初期開發中都會考慮電池與超級電容之組合。HESS的拓撲結構設計及分配規則取決於應用時的功率交換量以及響應的時間特性。理論上，HESS工作時每個單獨的儲能設備必須被精準控制何時作出響應以及提供多少功率而不超過其限制。因此，實務應用中優化HESS各別原件功率及容量大小以避免成本過高和系統規模過大非常重要。由於BESS壽命在不同情況下變化很大，文獻[38]提出了壽命分級的成本分析方法，文獻[39]則討論了決定HESS大小的概率方法。本節主要將評估由超級電容器和電池組成的HESS功率與容量規劃問題，分析的情境是以平順PV-WTG發電的功率波動為案例。而HESS之運轉與動作之頻率管理，是使用低通濾波器將HESS的功率分解為兩個部分，使其與各別ESS功率的高低與動態特性盡量一致。HESS的容量規劃是以統計方式分析功率和能量容量。為了呈現所提方法的實用性，在案例

中HESS的每個儲能組件之功率和能量容量規劃結果可透過不同工作範圍百分比的指定而得到。

由於PV與WTG發電量是仰賴環境與自然條件，因此各種概率分佈工具通常普遍被用來分析即時變化的氣象數據(風速，太陽輻照度和溫度等)。若干研究報告指出Weibull和Normal分佈適合用來分別定義風速和太陽輻射的統計模型。以下做進一步的說明：

● **太陽輻射照度建模：**

一段時間的太陽輻射數據可以使用常態分佈進行分析，該分佈的概率密度函數(pdf)可定義為 $p(s)$ ，相關理論可參考文獻[40,41]，如下所示：

$$p(s) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{(s-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (2-1)$$

(2-1)式中， $\mu$ 是照度平均值， $\sigma$ 是照度標準差， $s$ 是照度(W/m<sup>2</sup>)。

照度平均值的計算式如下：

$$\mu = \frac{1}{N}(s_1 + \dots + s_N) \quad (2-2)$$

照度標準差的計算式：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}[(s_1 - \mu)^2 + (s_2 - \mu)^2 + \dots + (s_N - \mu)^2]} \quad (2-3)$$

上述之連續型隨機變量的機率密度函數(pdf)和累積機率密度函數(cdf)具有下列性質：

若 $x$ 為一維之實隨機變量，機率密度函數定義為 $f(x)$ ，累積機率密度函數為 $F(x)$ ，則 $f(x)$ 與 $F(x)$ 須滿足下列各式之關係。

$$1. \quad \forall -\infty < x < \infty, f(x) \geq 0$$

$$2. \quad F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$$

3. 對於任一隨機變量  $x$ ，其範圍內之累積分佈函數， $F(x)$  可表示為：

$$\forall -\infty < a < \infty, F(x) = \int_{-\infty}^a f(x) dx$$

依上述定義，照度之累積分佈函數  $P(s)$  是照度密度函數的積分，可以表示如下：

$$P(s) = \int_{-\infty}^{s_a} p(s) ds \quad (2-4)$$

### 風速建模：

在文獻中，威布爾分佈最常用於描述風速在特定時間段內的隨機行為 [40-43]。其概率密度函數(pdf)可表示為：

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad \text{其中 } c > 1; k > 0 \quad (2-5)$$

累積分佈函數cdf 可表示如下 [13-17]：

$$F(v) = 1 - e\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (2-6)$$

$v$ ：風速； $c$ ：比例因數； $k$ ：形狀因數。

此處，我們先使用偉伯分佈的瑞利概率密度函數 [43] 來找到特定時間的比例因數  $c$  和形狀因數  $k$ 。若先將比例因數固定於某值 (例如， $c = 8$ )，再

將 $k=1,2,3$ 代入(2-5)式分別比較，我們會發現 $k=2$ 較為適合描述一般風速之分佈。

● 併網型PV-WTG發電系統

圖2-11為本節探討混合式儲能系統(HESS)之功率與容量規劃方案時所使用的含HESS之併網型混和式再生能源發電系統；包含有風力發電系統(WTG)、太陽光電發電系統(PV)、並網的市電(GRID)和混合式儲能系統(HESS)。其中 $P_{PV}$ 、 $P_{WTG}$ 、 $P_{GRID}$ 和 $P_{HESS}$ 分別是太陽光電發電系統、風力渦輪機發電系統、輸送回電力網路和混合式儲能系統所需即時放電或充電的功率。而 $P_{BESS}$ 和 $P_{SCSS}$ 分別為 $P_{HESS}$ 中電池和超級電容的充放電功率。

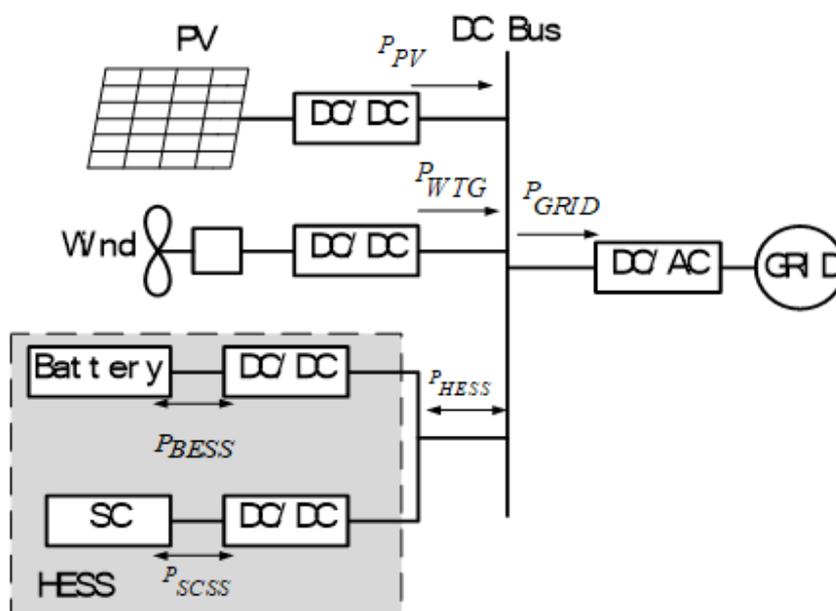


圖2-11 包含HESS的太陽光電發電和風力發電發電系統的整體系統圖

## ● 太陽光電發電系統建模

根據半導體相關理論，太陽光電發電系統的發電功率( $P_{PV}$ )數學模型可由下列公式表示：

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} \times G_{mes} \quad (2-7)$$

$$P_{PV} = \left[ P_{max} \times \frac{G_{mes}}{G_{ref}} + 0.001 \times (T_c - T_{jref}) \times K_p \right] \times N_{pv} \quad (2-8)$$

$NOCT$ ：正常的操作電池溫度( $46^\circ\text{C}$ )； $G_{mes}$ ：太陽輻照度； $P_{max}$ ：標準測試條件下的最大功率( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ )； $G_{ref}$ ：是參考太陽輻照度( $1000 \text{ W/m}^2$ )； $T_{jref}$ ：參考溫度( $25^\circ\text{C}$ )； $K_p$ ：輸出功率對溫度的敏感度； $N_{pv}$ ：PV 面板的數量(此處假設為8個)。

本節後續案例分析所需之氣象數據(風速、太陽輻照度)，統一使用一天24小時之模擬參數，設定每2分鐘記錄一組數據，共有693組數據。圖2-12為本研究使用之太陽能發電系統的環境數據圖，(a)太陽輻照度，(b)周圍環境溫度，(c)電池表面溫度，(d)太陽能發電電池發電功率。

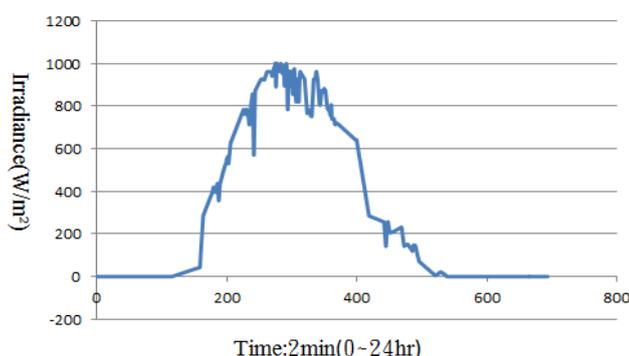


圖2-12(a) 太陽輻照度

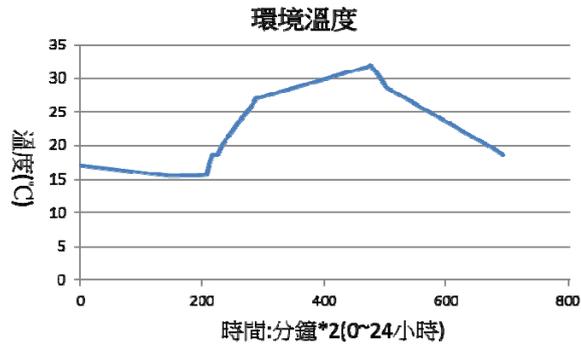


圖2-12(b) 周圍環境溫度

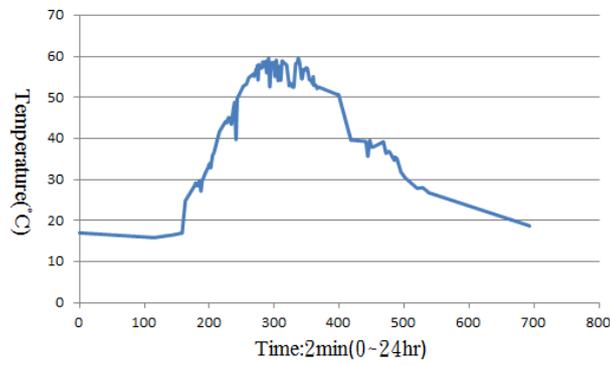


圖2-12(c) 電池表面溫度

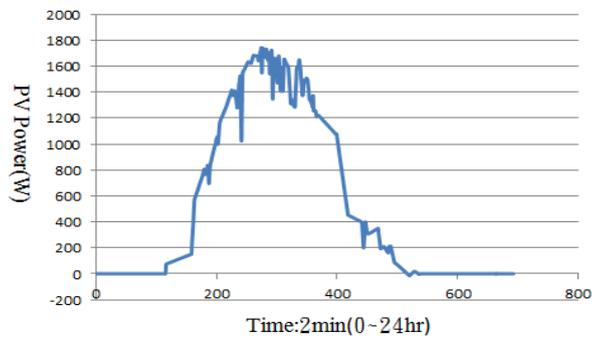


圖2-12(d) 太陽光電發電系統發電功率

● 風力發電發電系統建模

理論上，風力渦輪機的輸出功率可以通過以下計算式計算：

$$P_{wt} = \begin{cases} 0 & v \leq v_{cin}, v > v_{cout} \\ P_{rated} \frac{v - v_{cin}}{v_n - v_{cin}} & v_{cin} < v < v_n \\ P_{rated} & v_n \leq v \leq v_{cout} \end{cases} \quad (2-9)$$

$P_{rated}$ ：是風力發電產生的最大功率(此處為2000W)； $v_{cin}$ ：是切入風速(2m/s)； $v_{cout}$ ：是切出的風速(20 m/s)； $v_n$ ：標稱風速(12 m/s)。圖2-13(a)及(b) 分別為給定之風速及其對應之WTG發電功率。

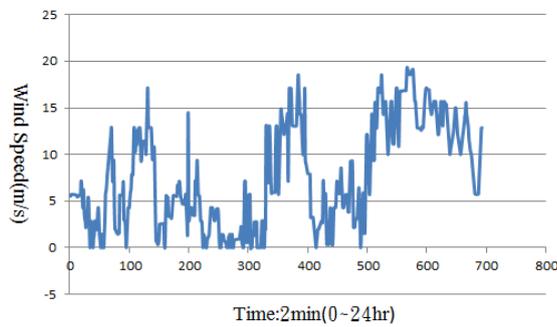


圖2-13(a) 風速

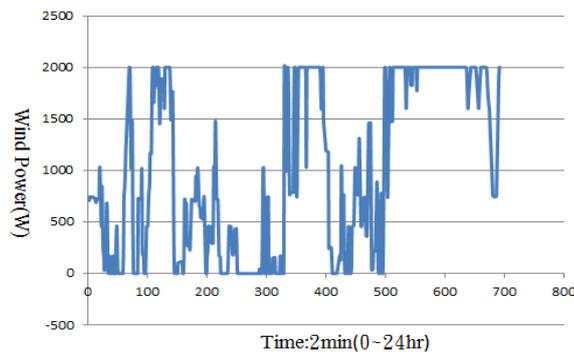


圖2-13(b) 風力發電功率

本節相關案例之HESS基本能量管理策略是基於低通濾波器之分配方式。超級電容器儲能系統因其對充放電週期具有快速的動態響應而負責高頻部份。電池儲能系統則是屬於能量型特性，負責低頻的部份。HESS系統的整體能量管理架構與信號流程如圖2-14所示。

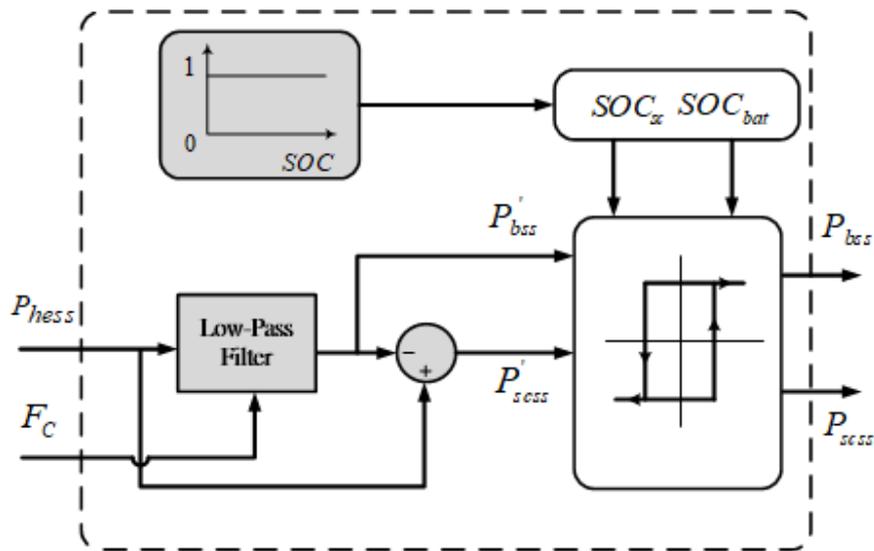


圖2-14 HESS儲能系統的能量管理架構

如圖2-14所示，HESS之各別充電狀態(SOC)的適當操作範圍可以任意給定。其中，充/放電功率極限可應用遲滯控制器來調整每個儲能系統的功率，使其不超過給定之極限。HESS的充/放電功率可以通過以下等式來定義：

$$P_{HESS} = (P_{PV} + P_{WTG}) - P_{GRID} \quad (2-10)$$

### ● 案例分析與討論

本節之案例分析將以若干假設情境及數值計算之方式探討併網型太陽能發電/風力發電系統(圖2-11)之饋電功率平順控制方案中，HESS功率與容量規劃方法。我們依饋送回市電的功率調度條件分析兩個運轉案例。案例一: 24小時恆定之饋送回市電功率(762.2521W)，案例二: 24小時三階段

式變動之饋送回市電功率(500~1200~500W)。每個功率調度條件(饋送回市電之功率)下所需之相關數據主要包括有24小時之太陽能發電系統、風力發電機、混合式儲能系統和饋送回市電之功率。

案例一：

假設圖2-11系統中太陽能發電及風力發電系統之輸出功率如2-12(d)和圖2-13(b)所示，此案例之送回市電網的平順功率(圖2-11的 $P_{GRID}$ )指定為恆定762.2521W，如圖2-15所示。

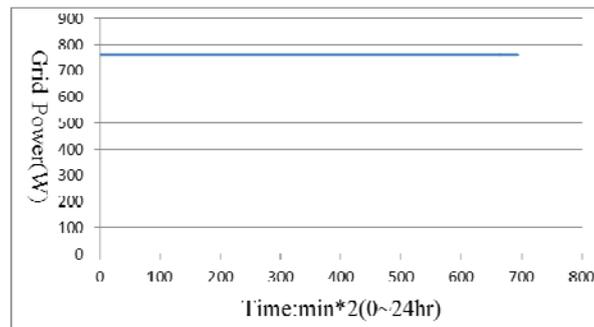


圖2-15 恆定功率(762.2521W)

為了方便觀察HESS所需之即時充放電功率大小，可以將太陽能發電和風力發電系統的發電輸出功率( $P_{PV}$ 和 $P_{WTG}$ )和送回市電的功率( $P_{GRID}$ )進行比較，如圖2-16所示。

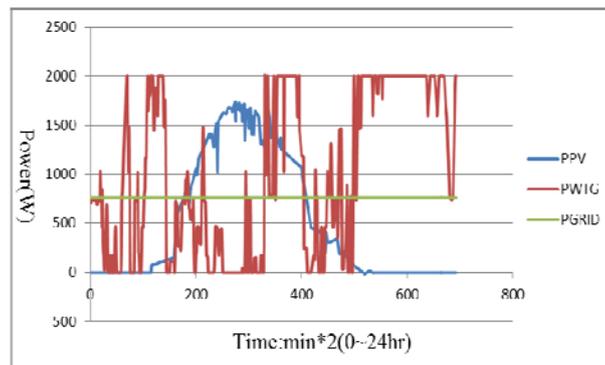


圖2-16 太陽能發電/風力發電系統和回市電的功率比較圖

此處，混合式儲能系統(HESS)與太陽能/風力發電系統和市電網的功率交換關係如(2-10)式所示，其中，混合式儲能系統的功率( $P_{HESS}$ )為太陽能/風力發電系統的功率總合減去回市電之功率，本案例之數值計算結果如圖2-17所示。當 $P_{HESS}$ 為正值，HESS操作在放電狀態，負值則是操作在充電狀態。

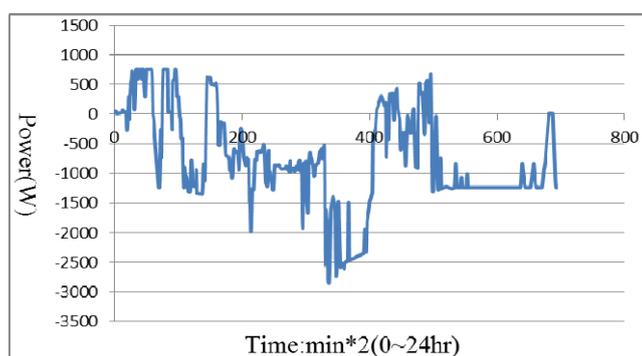


圖2-17 混合式儲能系統功率

如前所述，電池儲能系統(BESS)和超級電容儲能系統(SCESS)的功率可藉由HESS電源管理的控制策略(如圖2-14)得出。一般而言BESS因其能量密度較高，主要負責的功率是HESS功率中較低頻的部份，本案例之數值計算結果如圖2-18所示。

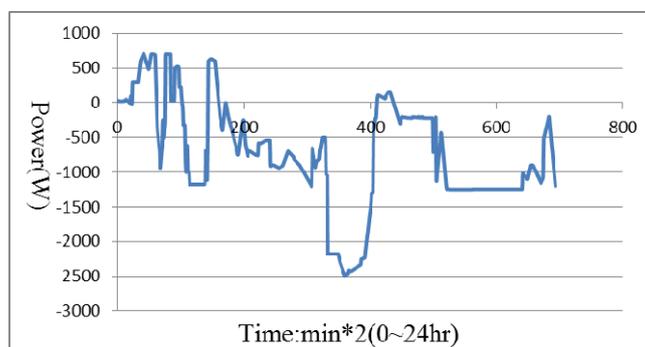


圖2-18 電池儲能系統(BESS)的功率

關於電池儲能系統的功率容量規劃可以通過功率常態分佈的累積密度函數(cdf)來適當選擇，而cdf是由功率密度函數(pdf)積分得來的，此處電池儲能系統的率常態分佈機率密度函數值則可以用 (2-1)式推算出來，如圖2-19所示。此處，處理數據的方式是使用Excel中常態分佈函數式。

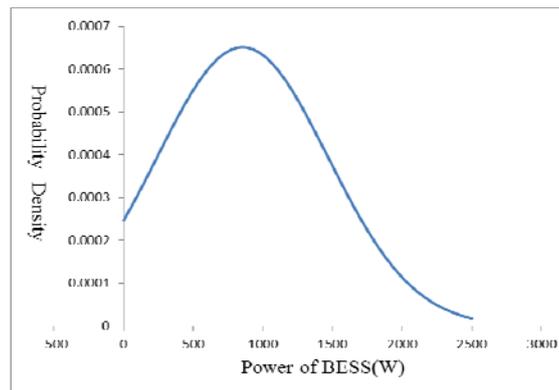


圖2-19 電池功率密度函數(pdf)

電池儲能系統的累積密度函數可以由(2-4)式進行計算，結果如圖2-20所示。以80%累積密度所對應的功率大小約為1300W，代表1300W的電池儲能系統功率能力可以涵蓋本案例中80%的充放電條件。

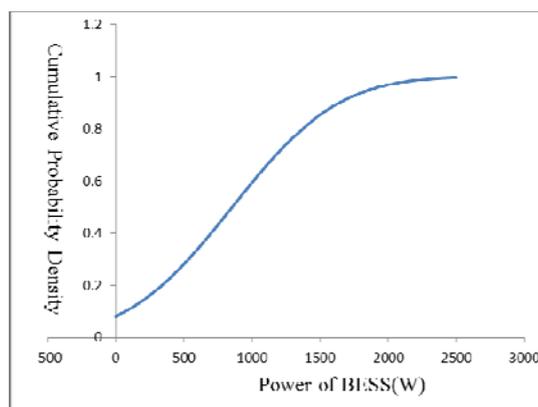


圖2-20 電池功率累積密度函數(cdf)

有關電池儲能系統(BESS)的容量也是用常態分佈的累積密度函數進行數值計算，計算方式跟功率的部份是一樣，在計算之前必須先將功率積分轉成能量。此處積分的時間增量為2分鐘(2分鐘取一個數據)，再進行累加計算，所得的就是整個能量在一整天24小時的變化曲線。電池容量密度常態分佈函數(pdf)的結果如圖2-21所示。BESS的容量的累積密度函數cdf跟功率容量的累積密度計算方式一樣，結果如圖2-22所示，而圖2-22上的容量最大值即代表能夠含蓋本案例之所有工作條件下所需之容量。

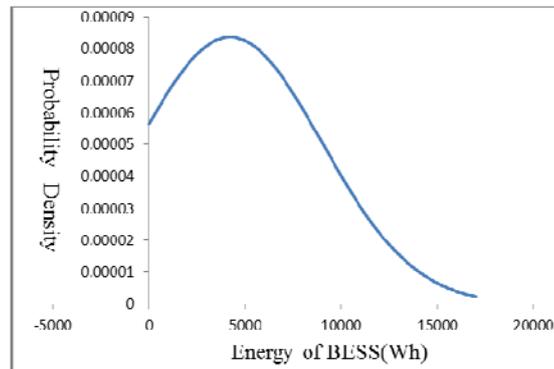


圖2-21 電池容量密度函數(pdf)

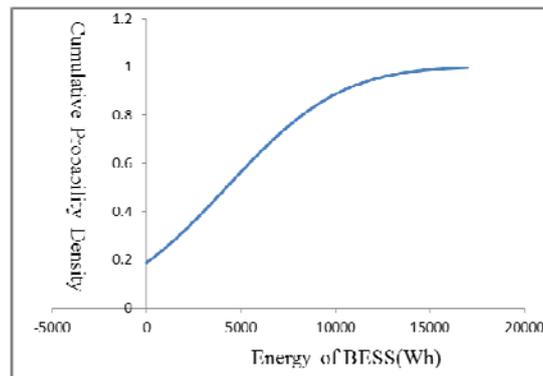


圖2-22 電池能量累積密度函數(cdf)

超級電容儲能系統(SCCESS)的充/放電功率資料之取得與電池儲能系統一樣是由圖2-14的控制策略得到如圖2-23所示。從圖2-23中可發現SCCESS主要負責HESS功率變動頻繁的部份，因此它的功率曲線大部份是在0附近擾動。

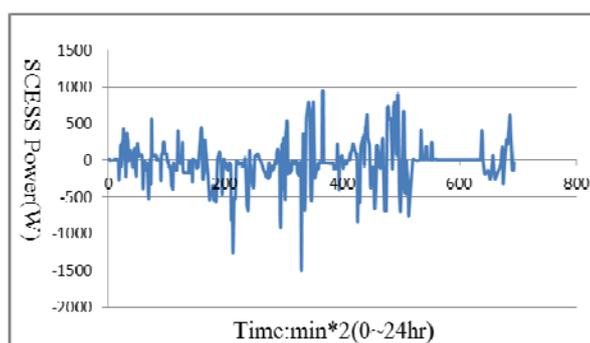


圖2-23 超級電容儲能系統(SCCESS)的功率曲線

接下來超級電容儲能系統的相關計算方式跟上述BESS一樣，超級電容儲能系統的功率的概率密度函數曲線如圖2-24所示。超級電容儲能系統的功率的累積密度函數曲線如圖2-25所示。

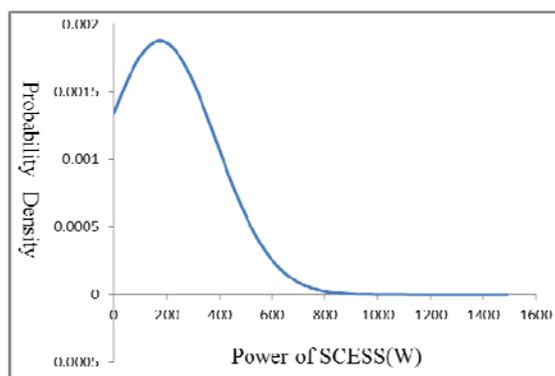


圖2-24 超級電容功率密度函數(pdf)

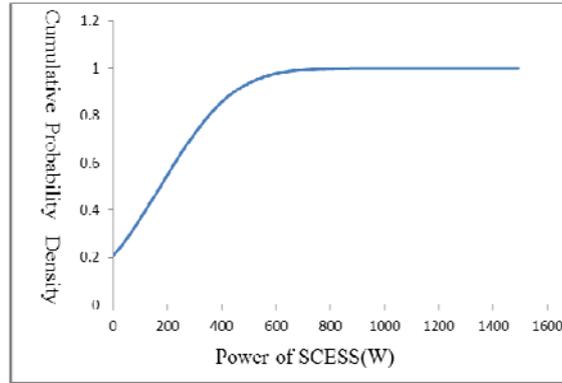


圖2-25 超級電容功率累積密度函數(*cdf*)

超級電容儲能系統的容量的概率密度函數之計算結果如圖2-26所示。

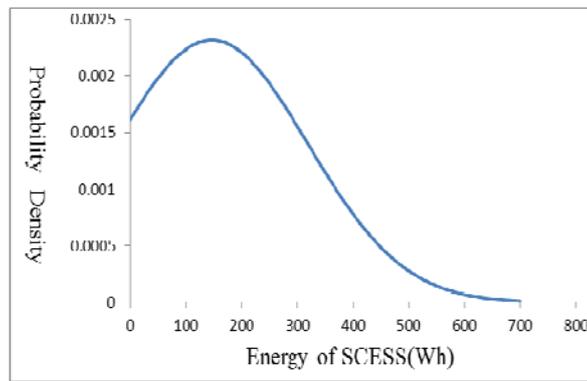


圖2-26 超級電容能量密度函數(*pdf*)

超級電容儲能系統的容量的累積密度函數之計算結果如圖2-27所示。

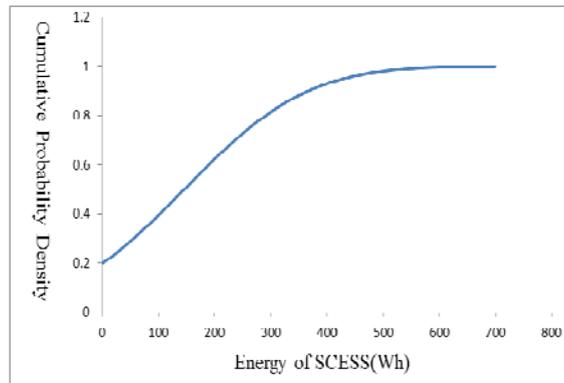


圖2-27 超級電容能量累積密度函數(cdf)

為方便分析，表2-1為案例一中HESS的不同累積概率密度函數水平(百分比)下的功率與容量分佈結果。

表2-1 案例一的HESS不同累積概率密度函數水平下的容量分佈

	累積概率密度函數%				
	30%	50%	75%	90%	100%
$P_{c_{bss}}(W)$	532	860	1266	1690	2500
$P_{c_{scss}}(W)$	62.526	174.252	317.748	448.394	1492.811
$E_{c_{bss}}(Wh)$	1706.441	4239.642	7466.375	10369.84	16990.79
$E_{c_{scss}}(Wh)$	58.203	147.939	263.293	362.898	698.904

接下來的案例二與案例一的處理數據方式完全一樣，案例的計算過程將不再重復解釋。

案例二、

本案例假設圖2-11系統中風力發電及太陽能發電系統之輸出功率與案例一之條件相同，唯一不同的是此案例之送回電網的平順功率(圖2-11的 $P_{GRID}$ )為三階段變動型(500W-1200W-500W)，如圖2-28所示。其他相關曲線依序呈現於圖2-29~圖2-40，曲線之意義及說明可參考案例一，表2-2為案例二中HESS的不同累積概率密度函數水平(百分比)下的功率與容量分佈。

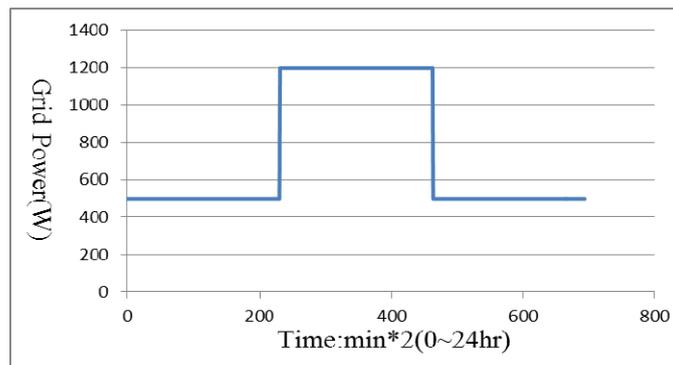


圖2-28 三階段變動型(500W-1200W-500W)

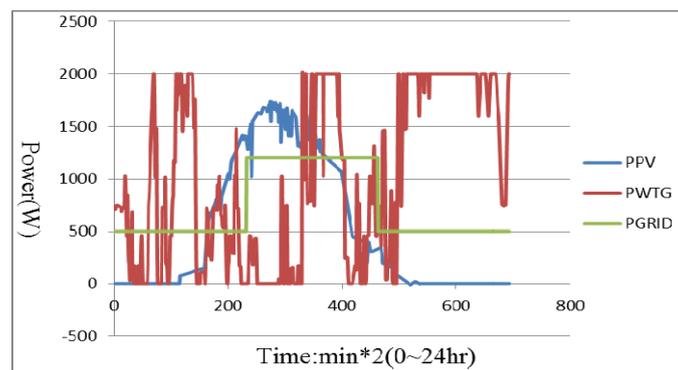


圖2-29 太陽能發電/風力發電系統和回市電的功率比較圖

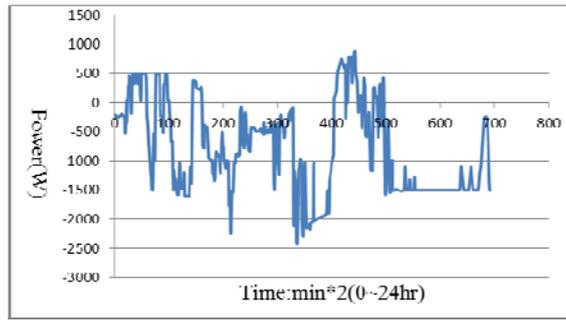


圖2-30 混合式儲能系統功率

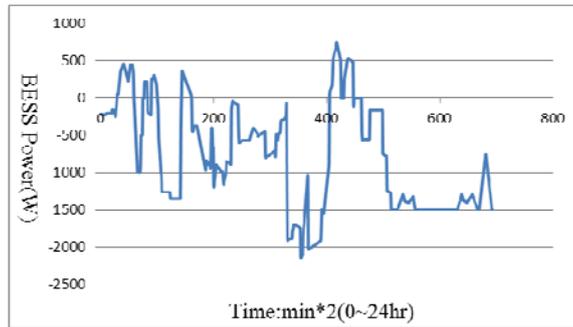


圖2-31 電池儲能系統功率

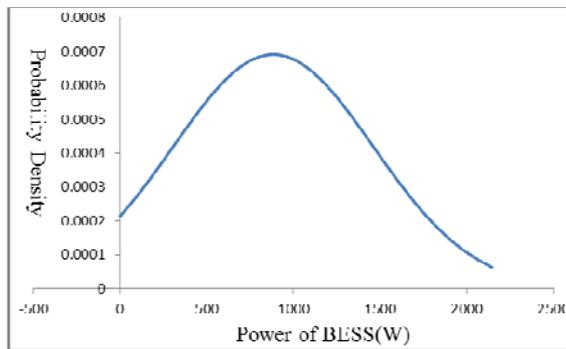


圖2-32 電池功率密度函數

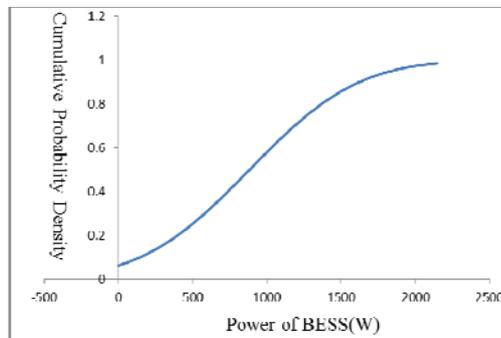


圖2-33 電池功率累積密度函數

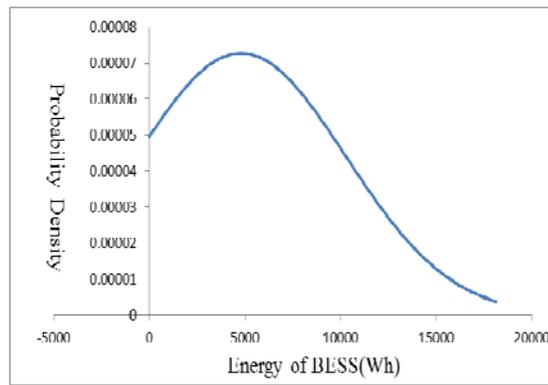


圖2-34 電池容量密度函數

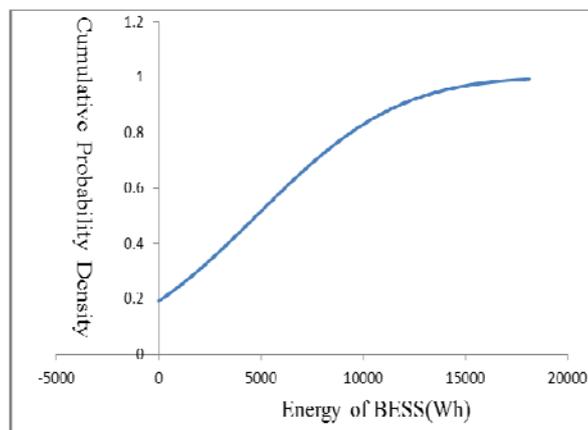


圖2-35 電池容量累積密度函數

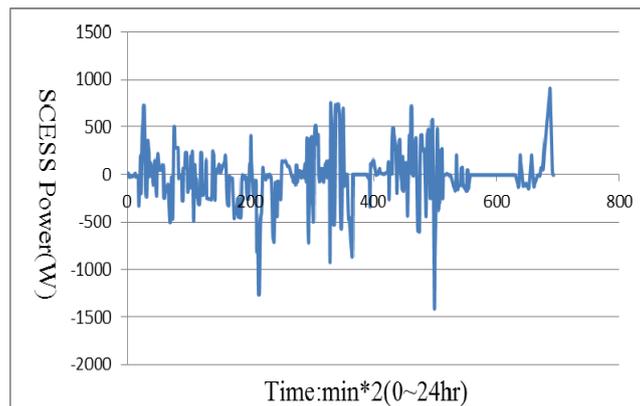


圖2-36 超級電容儲能系統功率

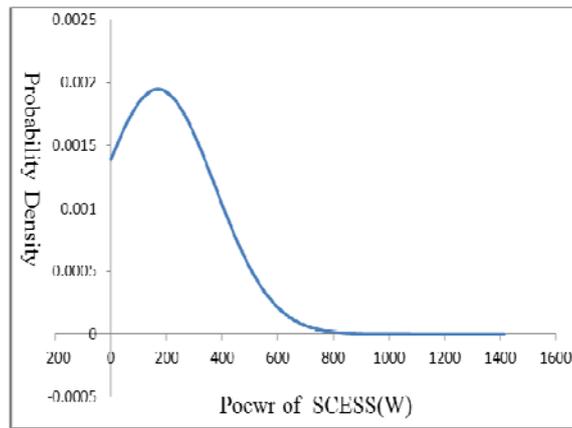


圖2-37 超級電容功率密度函數

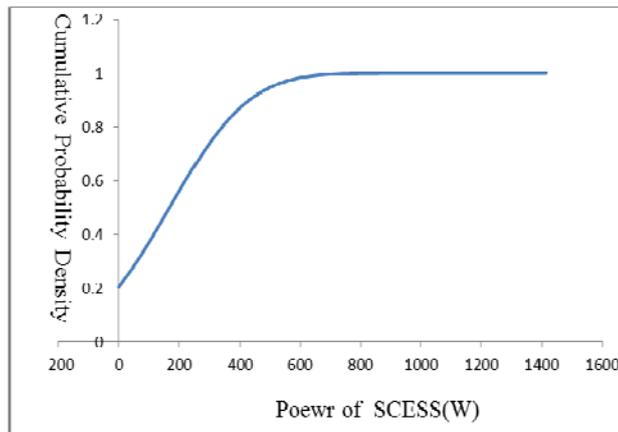


圖2-38 超級電容功率累積密度函數

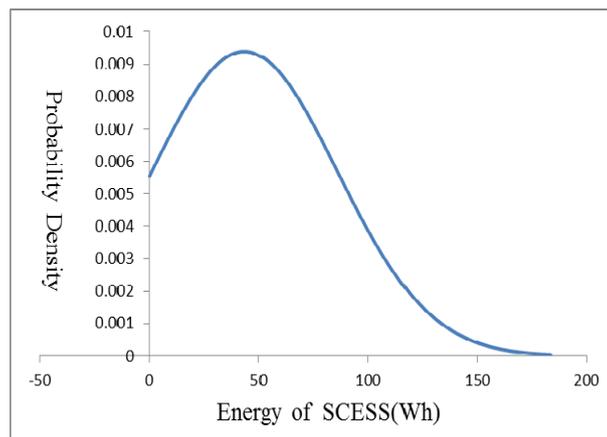


圖2-39 超級電容容量密度函數

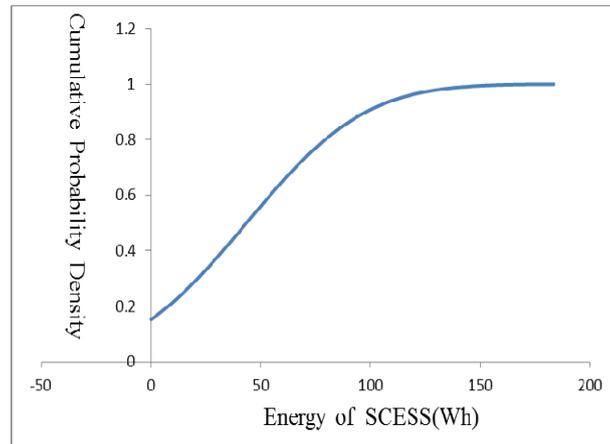


圖2-40 超級電容功率累積密度函數

表2-2 案例二的HESS不同累積概率密度函數水平下的容量分佈

	累積概率密度函數				
	30%	50%	75%	90%	100%
$P_{C_{bss}}(W)$	582	884	1270	1613	2145.68
$P_{C_{scss}}(W)$	60.723	170	311.509	431.335	1413.387
$E_{C_{bss}}(Wh)$	1931.367	4795.3	8489.1	11863.23	18126.68
$E_{C_{scss}}(Wh)$	21.325	43.819	72.189	98.443	183.52

表2-1、2-2的數值結果分別說明了在兩種饋送回市電功率條件下的五個不同滿足程度(百分比)上規劃的結果。由上述兩個案例的數值分析發現，BESS系統容量和功率能力隨著操作範圍滿足程度百分比(%)的下降有較大幅度的下降。這意味著適當的選擇電力平順滿足程度可有效減小BESS之能量容量和功率容量。

## 參、ICESS之系統功能性規劃與硬體單元設計

### 一、ICESS之系統功能性規劃

本計畫以風力、太陽能發電系統配合所提ICESS之小型微電網規劃較具實務應用價值之運轉模式。風力及太陽能發電是台灣目前重點發展之再生能源發電項目，在一般微電網系統中也是規劃為主要再生能源發電類型。以下將簡要說明較常見的幾種併網型風力及太陽能發電系統架構中所提ICESS可能執行之各種進階系統功能性操作與電能儲/放之優化控制技術。

#### 1. 複合式儲能系統(ICESS)之應用情境#1:

本應用情境是有關ICESS之智慧型高效率獨立充、放電控制、PV/WTG之電能管理。夜間離峰時間風力發電機多餘電力可經由ICESS之雙向DC/DC轉換器儲存於VRFB或LAB中，微電網內若有多餘電力也可經由雙向DC/AC換流器逆向儲存於VRFB或LAB。若微電網內臨時需要緊急實功支援，可經由雙向DC/AC換流器將儲存於VRFB或LAB之電力送出。

當夜間無太陽能發電或風力發電機故障時，若電網運轉情況需要也可經由ICESS內之雙向DC/DC轉換器及雙向DC/AC換流器將VRFB或LAB內電能送出，在一定時間內此等效之風力發電機單元仍可持續送出預期之電力。

#### 2. 複合式儲能系統(ICESS)之應用情境#2:

本應用情境是有關ICESS之尖峰電力調度控制。一般負載之電力需求

依白天、夜晚、季節等條件而有峰谷之別，因此電力公司為了反映各時段不同的供電成本訂定不同的用電費率，尖峰時段電價高、離峰時段電價低，此即為時間電價。以用戶利益而言，選擇採用時間電價，並將尖峰時段用電調整至離峰時段使用，可大幅節省電費；以電力公司的角度而言，可降低尖峰負載，同時減少興建電廠並降低供電成本。然而，即便調整用電習慣，用戶仍無法完全避免尖峰時段之用電需求，此時若有其他供電來源，便能避免使用尖峰時段較為昂貴的市電，因此本操作模式規劃為尖峰電力調節模式。此情境模式之運作首要條件為 ICESS 之儲能電池電量需充足，若同時有 PV/WTG 發電條件則更佳，負載之用電需求可優先利用 PV/WTG 發電來供應，發電功率不足之處由儲能電池來補足，而多餘之功率則對儲能電池充電，如此一來即可使用戶避免於尖峰時刻使用市電，達成零尖峰電力需求之目的。

### 3. 複合式儲能系統(ICESS)之應用情境#3:

本應用情境是有關 ICESS 之 PV/WTG 發電系統輸出功率平順控制。本 ICESS 控制功能之目的為降低 PV/WTG 發電系統之併網衝擊及提昇微電網之系統穩定度及電力品質，此控制功能可經由以下之 ICESS 內 VRFB/SC 之快速充/放電操作來達成。

- ICESS 之雙向 DC/DC 轉換器在 VRFB/SC 的安全 SOC 範圍內(0.1~0.9)依命令進行充、放電控制
- 配合 ICESS 內 DC/DC 轉換器之充、放電控制，模組化雙向 DC/AC 換流器僅需負責維持其內部直流鏈電壓 200V，電網端之實功即可自動雙向平衡，達到所需之 WTG 輸出功率平順之目的。

操作情境之進一步說明:在外在條件變動下，PV/WTG發電機若操作於MPPT模式，其輸出電力無可避免將劇烈變動，改善方法可經由ICESS之雙向DC/DC轉換器及雙向DC/AC換流器同步調節進行PV/WTG發電機之輸出功率平順控制。

## 二、ICESS之電力轉換器硬體單元設計

圖3-1為本計畫之智慧型複合式儲能系統(Intelligent Compound Energy Storage System, ICESS) 相關硬體系統架構圖：藍色方塊為本計畫主要研究及設計之ICESS電力轉換器硬體單元。

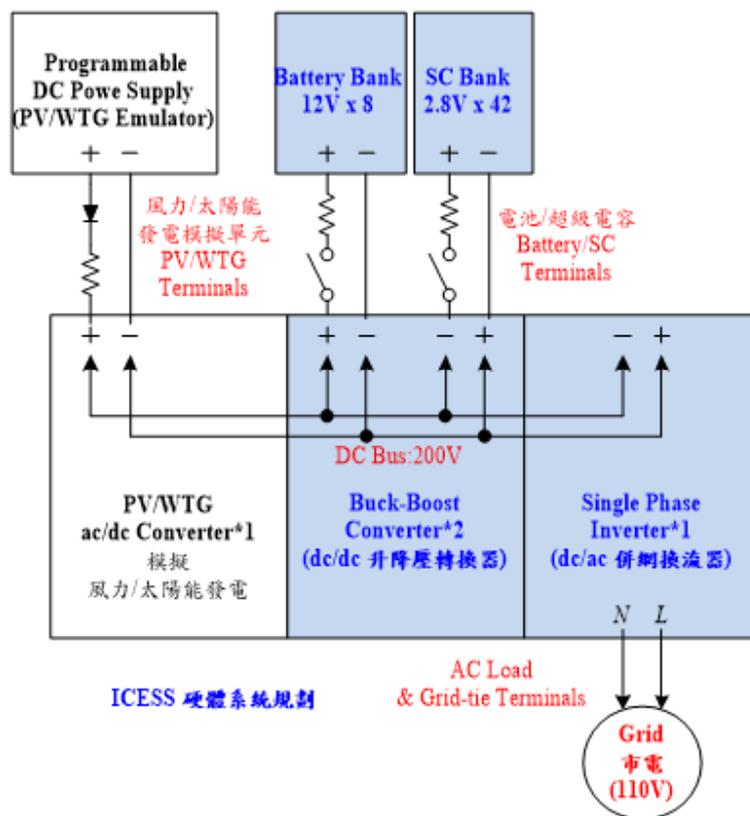


圖3-1 本計畫之ICESS硬體系統架構圖

如圖3-1所示，本計畫所提ICESSE之電力轉換器硬體單元包括：1組dc/ac單相併網型換流器與市電並聯進行雙向電力平衡控制，2組dc/dc雙向升降壓轉換器作為HESS內部之電池組及操超級電容組進行即時雙向充/放電之控制界面。風力與太陽能發電單元則以可程式之電源供應器進行動態功率模擬。圖3-2中ICESSE所屬各電力轉換器系統相關技術規格與參數如表3-1所示。

表3-1：ICESSE所屬各電力轉換器系統相關技術規格與參數

DC bus voltage	200 V
AC output voltage	110 Vrms
Maximum output power	1 kVA
Super capacitor bank(SCB)	117.6V/14.28F (2.8V/600F*42)
Battery bank voltage	100 V /14AH (12V/14AH*8)
Battery charging current	10 Amax
PV/WTG (MPPT) EMULATOR	300W WTGx1, 600W PV(300 W PVM, 35~40 V x2)
Single-phase DC-AC Inverter (dc/ac 單相併網型換流器)	1kVA, 110Vrms, 9.1Arms (10Amax) MOSFET based full bridge inverter dynamic comp. function Switching frequency: 30kHz
PV/WTG AC-DC Programmable Power Converter (DC Power Supply Emulating PV/WTG)	Range: 600~1000W MOSFET based POWER SUPPLY with MPPT function

Battery charger/discharger DC-DC Converter (dc/dc雙向升降壓轉換器)	1kW MOSFET based buck-boost converter Dual-loop voltage and current control scheme Switching frequency: 30kHz
SCB charger/discharger DC-DC Converter (dc/dc雙向升降壓轉換器)	1kW MOSFET based buck-boost converter Dual-loop voltage and current control scheme Switching frequency: 30kHz
Inverter output voltage technical specifications	Voltage regulation error < 2% Voltage distortion (THD) < 3% (full load, resistive)
System efficiency	Inverter>92% , on resistive load DC-DC Converters >92%
Operating temperature	-10~55°C

### 三、ICESSE相關電力轉換器之控制器設計與模擬分析

#### 3.1 ICESSE相關電力轉換器之控制器設計

- dc/ac 單相併網型換流器

單相併網型換流器一般可分為半橋式或全橋式架構，本計畫採用單相全橋式換流器，如圖3-2所示，其主要元件包含4個功率開關( $Q_1\sim Q_4$ )組成全橋架構，以及1個濾波電感( $L$ )和1個交流濾波電容( $C_{ac}$ )組成LC低通濾波電路，還有1個直流濾波電容( $C_{dc}$ )，並採用正弦式脈波寬度調變(SPWM)技術來切換功率開關。

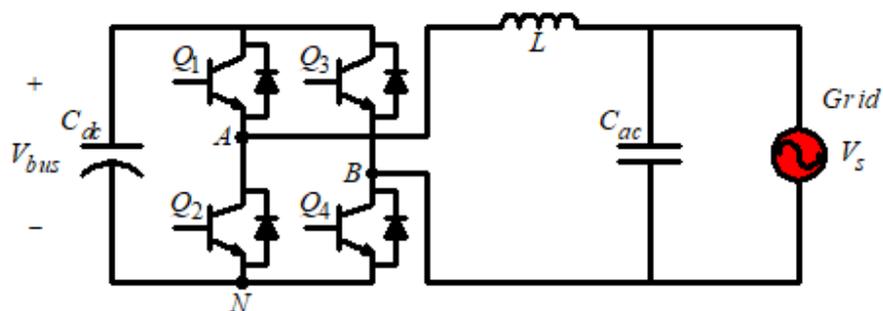


圖3-2 dc/ac單相換流器電路架構

脈波寬度調變應用於單相全橋式換流器架構中，又可分為單電壓極性和雙電壓極性切換，此處選擇使用單電壓極性切換，其可採用較高的切換頻率，降低切換的損耗，而單電壓極性切換的方式為全橋式換流器A( $Q_1$ 、 $Q_2$ )、B臂( $Q_3$ 、 $Q_4$ )獨立切換，切換信號由 $v_{con}$ 、 $-v_{con}$ 與 $v_t$ 比較而產生，如圖3-3所示。

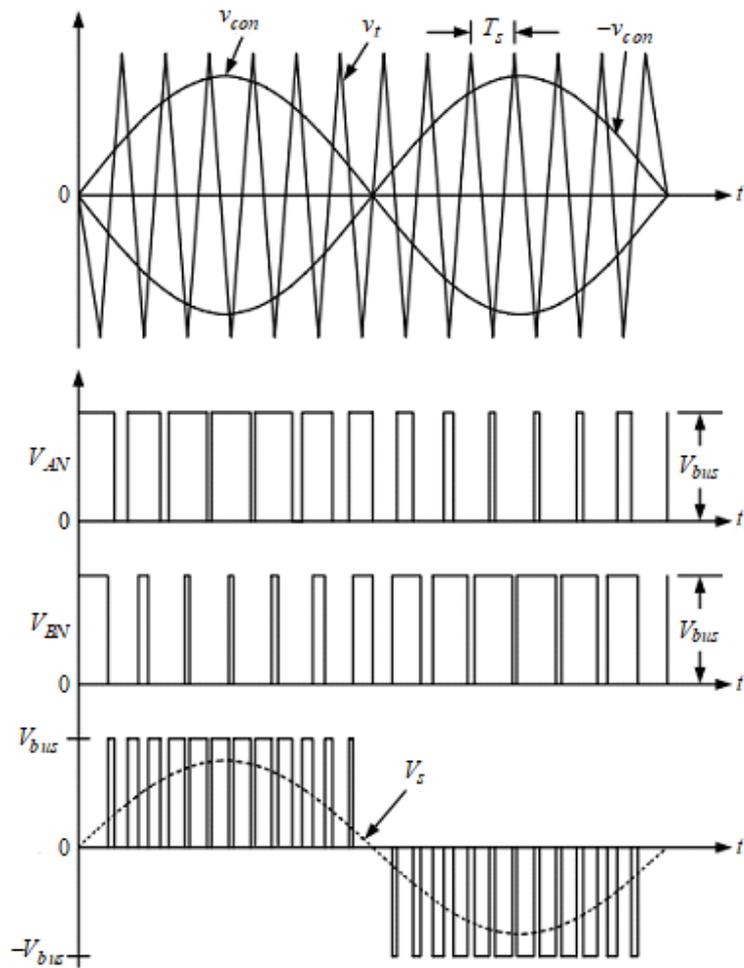


圖3-3 單電壓極性切換波形圖

其中，

A臂：

$$v_{con} > v_t, Q_1 : ON, Q_2 : OFF, V_{AN} = V_{bus} \quad (3-1)$$

$$v_{con} < v_t, Q_2 : ON, Q_1 : OFF, V_{AN} = 0 \quad (3-2)$$

B臂：

$$-v_{con} > v_t, Q_3 : ON, Q_4 : OFF, V_{BN} = V_{bus} \quad (3-3)$$

$$-v_{con} < v_t, Q_4 : ON, Q_3 : OFF, V_{BN} = 0 \quad (3-4)$$

併網型單相換流器採雙迴路控制，外迴路調整直流匯流排電壓，內迴路調整電感電流。直流匯流排電壓經感測器迴授至電壓控制迴路，與電壓命令比較後之誤差經控制器並與輸入電壓的同步信號相乘，再反相即可得電感電流命令，而電流命令與電感電流迴授值比較後之誤差經控制器後與前饋補償量相加，即可得脈波寬度調變(PWM)之控制電壓，並採用正弦式脈波寬度調變(SPWM)單電壓極性切換方式用以產生開關之觸發信號。

圖3-4即為併網型單相換流器控制架構，圖中A、B、N為電路之節點， $V_{bus}$ 為直流匯流排電壓， $I_L$ 為電感電流， $V_s$ 為電網端交流電壓， $k_{v1}$ 、 $k_{v2}$ 及 $k_s$ 分別為交流電壓、直流電壓及電流感測倍率， $v_{bus}$ 及 $v_{bus}^*$ 分別為直流匯流排電壓回授信號及控制命令， $i_L$ 及 $i_L^*$ 分別為電感電流回授信號及控制命令， $v_{sin(\omega t)}$ 為電網端交流電壓經鎖相迴路(PLL)所得同步信號， $v_{con}$ 與 $-v_{con}$ 為SPWM之控制電壓。

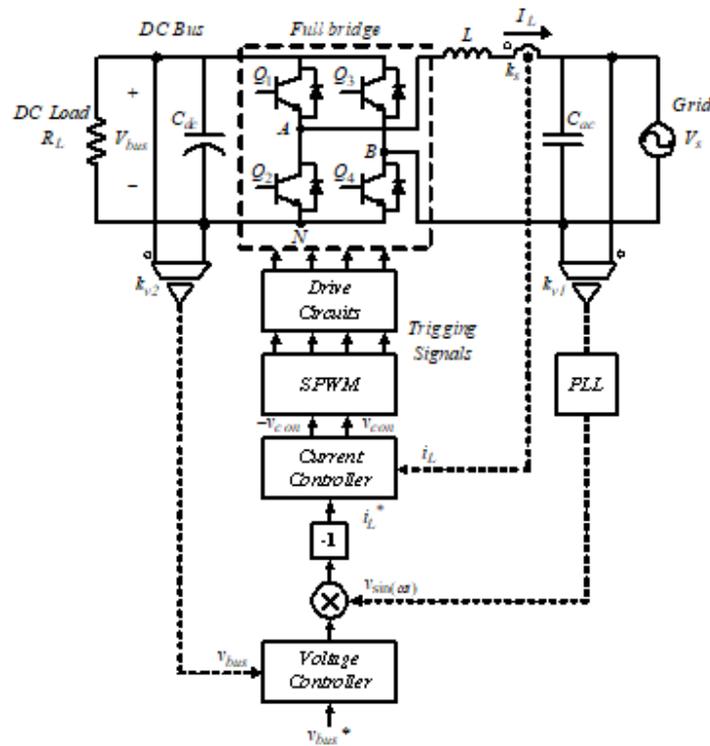


圖3-4併網型單相換流器控制架構

- dc/dc雙向升降壓轉換器

ICESSE中電池組及操超級電容組所需之即時雙向充/放電之控制界面將採用雙開關式降-升壓型轉換器電路，其電路架構如圖3-5所示，此電路主要元件包含2個功率開關( $Q_1$ 、 $Q_2$ )、1個電感( $L$ )、1個低壓側電容( $C_{LV}$ )及1個高壓側電容( $C_{HV}$ )。降-升壓型轉換器之動作原理如下：使用開關 $Q_1$ 作為主開關，電感 $L$ 、開關 $Q_1$ 、二極體 $D_2$ 即組成升壓型轉換器，如圖3-6(a)，當 $Q_1$ 導通時，低壓側電池電壓 $V_b$ 對電感儲能，直流匯流排電壓 $V_{bus}$ 由高壓側電容 $C_{HV}$ 提供；當 $Q_1$ 截止時，電感電壓極性反轉，二極體 $D_2$ 順向導通，電感之能量將由二極體 $D_2$ 傳送至高壓側負載。反之，使用 $Q_2$ 作為主開關，電感 $L$ 、開關 $Q_2$ 、二極體 $D_1$ 組成降壓型轉換器，如圖3-6(b)，當開關 $Q_2$ 導通時，直流匯流排電壓向低壓側負載提供能量，電感電流線性上升；當開關 $Q_2$ 截止時，電感電壓極性反轉，二極體 $D_1$ 順向導通，電感與低壓側電容 $C_{LV}$ 經二極體 $Q_1$ 形成迴路對低壓側提供能量。

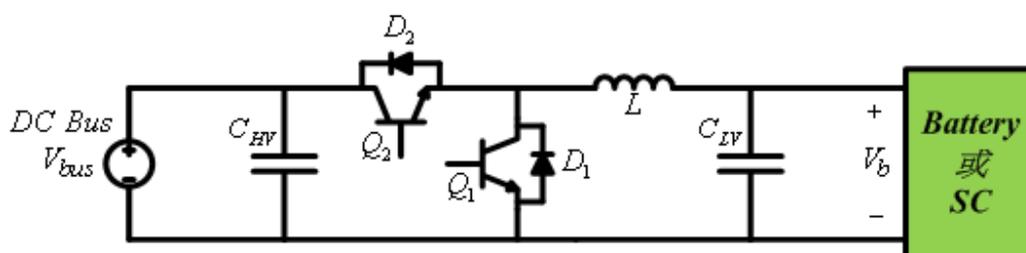
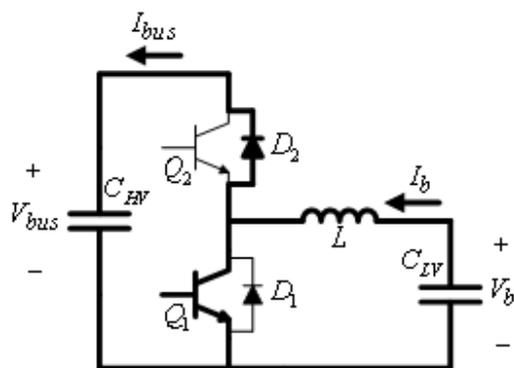
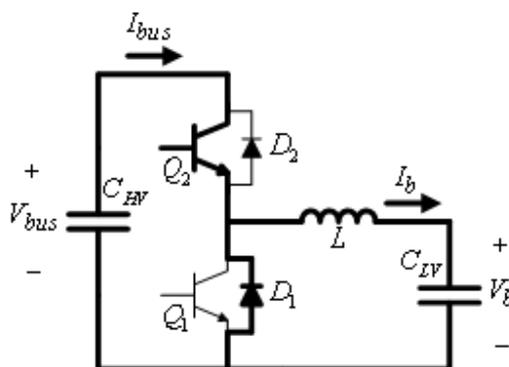


圖3-5 降-升壓型轉換器電路架構



(a)



(b)

圖3-6 降-升壓型轉換器(a)升壓模式(b)降壓模式

圖4-4之降-升壓型轉換器於ICESSE系統中主要是作為電池/超級電容之充放電控制器，此處是採用單迴路控制電感電流。電感電流經感測器回授至電流控制迴路，與電流命令比較後之誤差經控制器即可得脈波寬度調變(PWM)控制電壓，最後產生一互補信號驅動功率開關。降-升壓型轉換器控制架構如圖3-7所示，圖中 $V_{bus}$ 為直流鏈電壓， $I_b$ 為電感電流， $k_s$ 為電流感測倍率， $i_b$ 及 $i_b^*$ 分別為電感電流回授信號及控制命令， $v_{con}$ 為PWM之控制電壓。

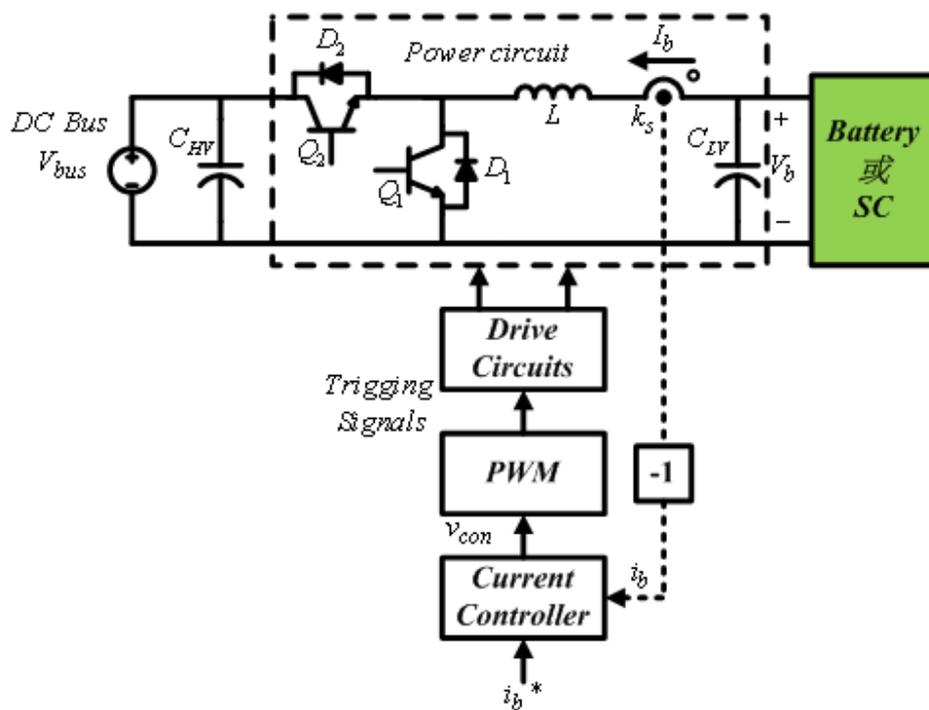


圖3-7 降-升壓型轉換器控制架構

### 3.2 ICESSE相關電力轉換器之模擬分析

本節將針對計畫所提ICESSE之併網型單相換流器及降-升壓型轉換器，使用電力電子系統模擬軟體PowerSIM(PSIM)進行電路基本控制功能模擬，藉此驗證電路控制器設計之正確性及其性能表現。

併網型單相換流器在系統中的主要功能即是與市電併聯，其必須在考量電池充電需求、電網緊急調度、再生能源輸出功率波動等條件所規劃的不同操作模式下，皆穩定控制直流匯流排電壓。因此，可通過切換負載的方式來觀察直流匯流排電壓的穩定性，藉此驗證所提單相換流器的電路與

控制器設計之正確性及性能表現，圖3-8即為單相換流器之PSIM模擬電路架構，圖3-9為本模擬案例所規劃之負載切換測試流程。

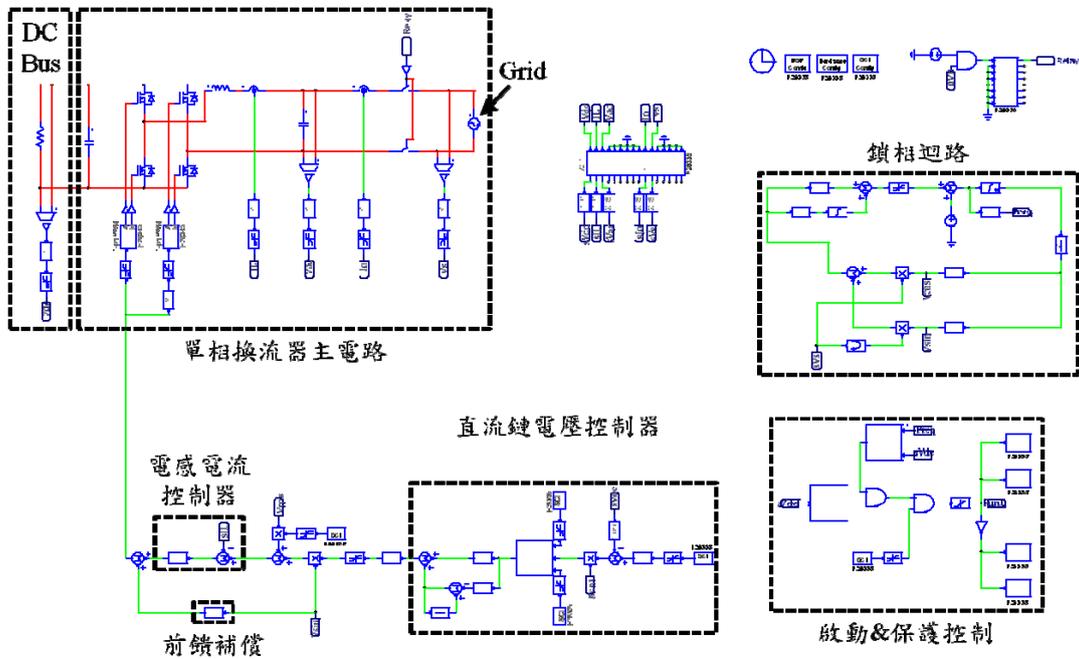
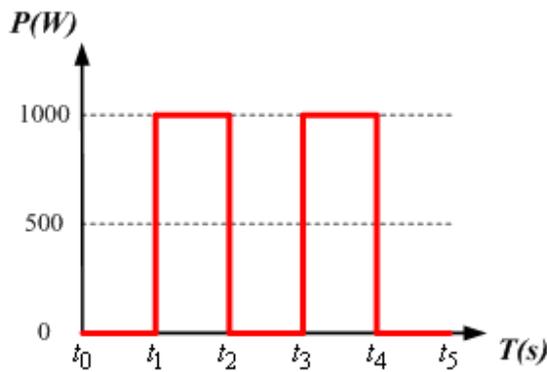


圖3-8單相換流器之PSIM模擬電路架構



( $t_0:0.5s, t_1:1.0s, t_2:1.5s, t_3:2.0s, t_4:2.5s, t_5:3.0s$ )

圖3-9單相換流器基本控制功能模擬之負載功率切換測試流程

圖3-10、3-11即為單相換流器執行負載切換測試之模擬結果波形，圖3-10為直流匯流排電壓( $V_{bus}$ )、交流端電壓( $V_{ac}$ )與電流( $I_{ac}$ )，以及負載電流( $I_{bus}$ )波形圖；圖3-11為直流匯流排電壓回授信號( $sV_{bus}$ )與控制命令( $sV_{bus\_c}$ )，以及電感電流回授信號( $sI_L$ )與控制命令( $sI_L\_c$ )波形。由這2圖可得知在面對1kW負載的切換下，所設計之控制器可將直流匯流排電壓控在目標值，但負載由0W切換至1kW時，電壓下衝量約為19V(9.5%)，而負載由1kW切換至0W時，電壓過衝量約為17.6V(8.8%)，符合10%以內之基本標準。

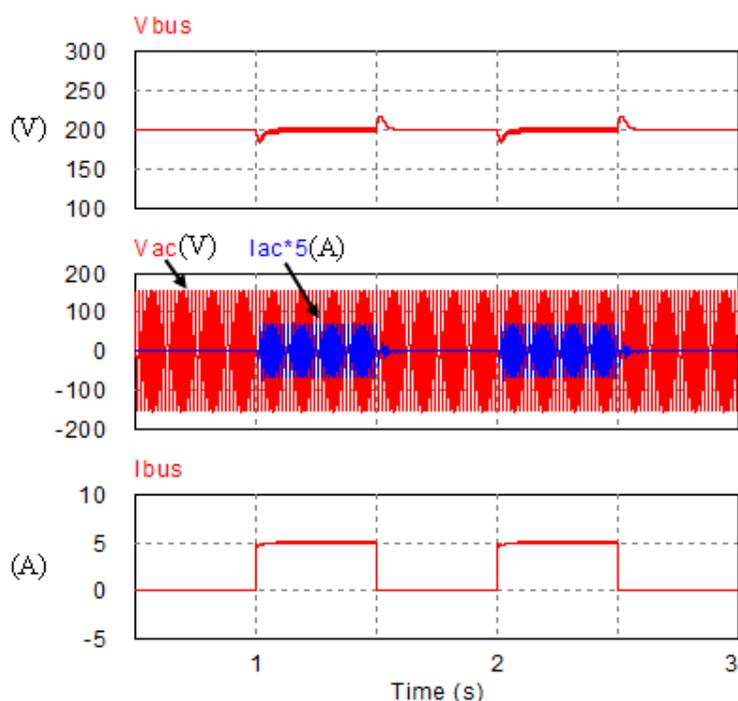


圖3-10 換流器之直流匯流排電壓、交流端電壓/電流及負載電流

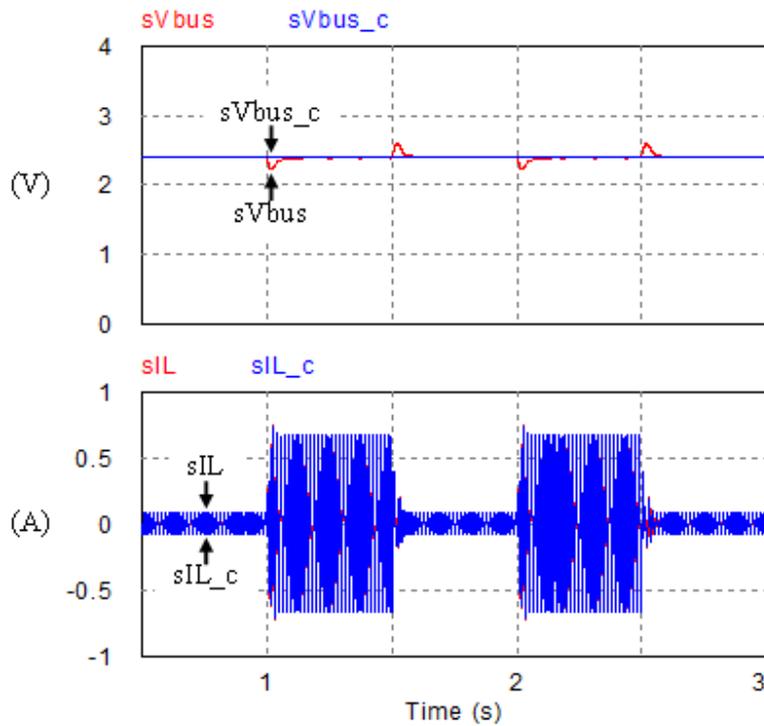


圖3-11 換流器之直流匯流排電壓及電感電流迴授信號與控制命令

本計畫所提ICESS是採用蓄電池組(VRFB或LAB)及超級電容(SC)組作為系統之混合型儲能裝置，而降-升壓型轉換器即作為ICESS之儲能單元與直流匯流排間的接口裝置，ICESS於操作時必須依其他裝置的狀態，如太陽能/風力發電功率的多寡、回市電的功率需求大小等，各別對蓄電池組及操超級電容進行充/放電來達成系統中功率的平衡。因此，可藉由低頻及高頻電流命令的方式驗證所提降-升壓型轉換器的電路與控制器設計之正確性及性能表現，圖3-12即為降-升壓型轉換器之PSIM模擬電路架構，圖3-13 (a)、(b)及圖3-14(a)、(b)分別為本模擬案例所呈現之低頻及高頻充/放電測試結果。

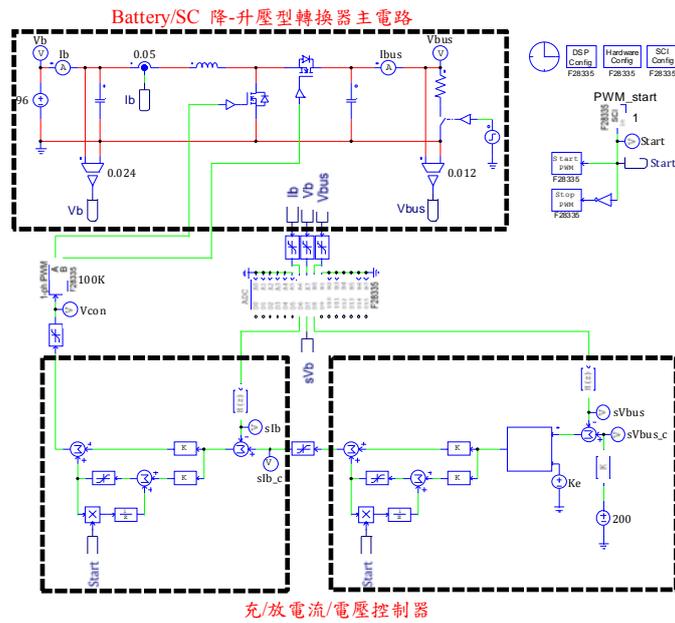


圖3-12 降-升壓型轉換器之PSIM模擬電路架構

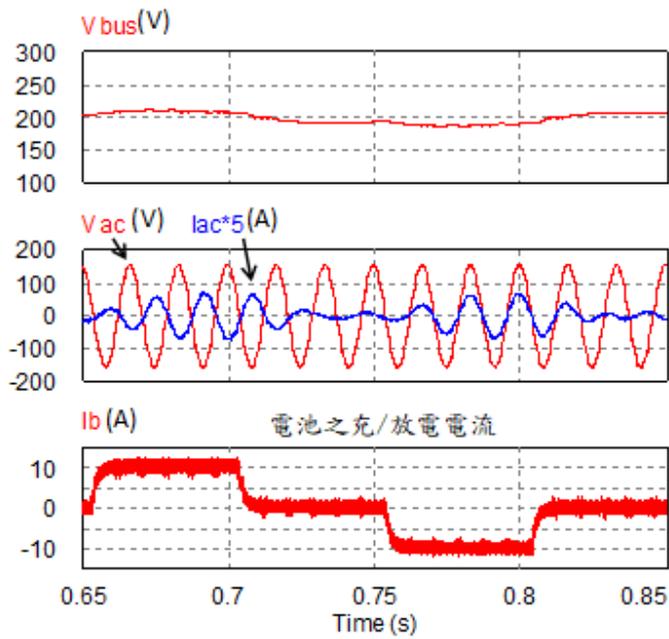


圖3-13(a) ICESS蓄電池組低頻充/放電測試結果(1): DC bus電壓、電網端電壓及電流波形、電池組之低頻充/放電電流波形

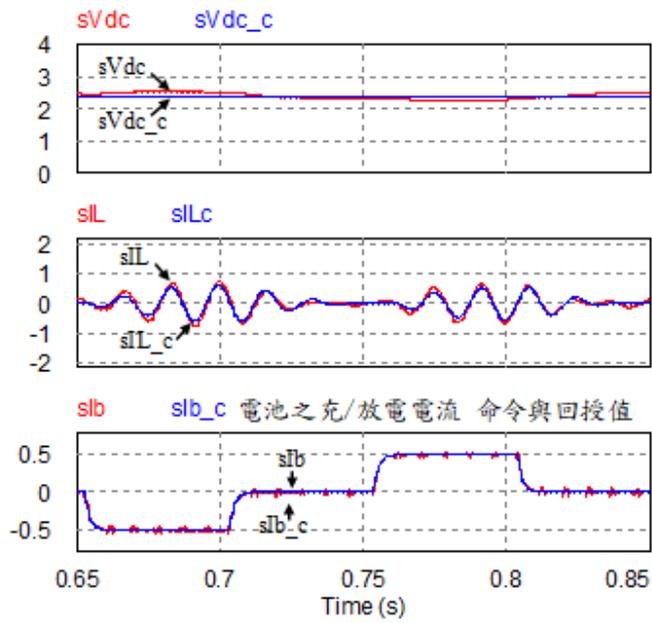


圖3-13(b) ICESS蓄電池組低頻充/放電測試結果(2): 控制命令與回授信號

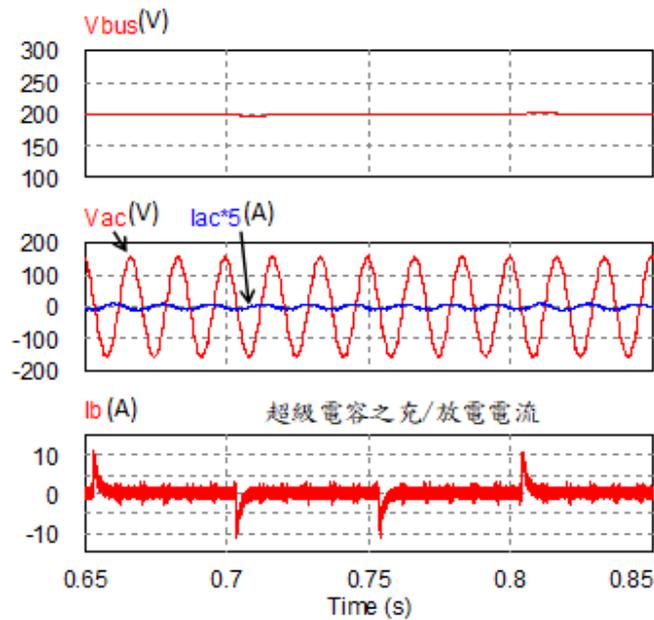


圖3-14(a) ICESS超級電容組高頻充/放電測試結果(1):DC bus電壓、電網端電壓及電流波形、超級電容之高頻充/放電電流波形

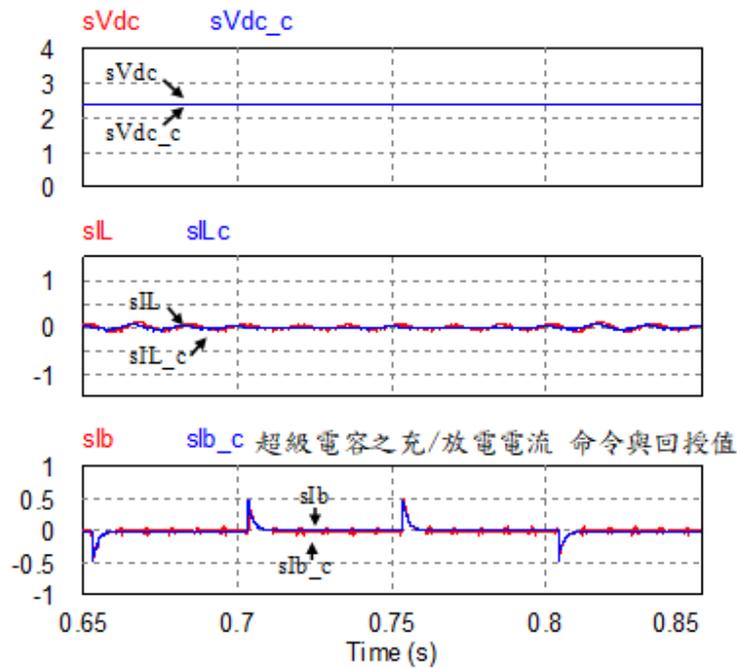


圖3-14(b) ICESS超級電容組高頻充/放電測試結果(2):控制命令與回授信號

分析圖 3-10 之直流匯流排電壓( $V_{bus}$ )、交流端電壓( $V_{ac}$ )與電流( $I_{ac}$ )，以及負載電流( $I_{bus}$ )波形圖、圖 3-13(a)、3-14(a)之 ICESS 蓄電池組低、高頻充/放電測試結果: DC bus 電壓、電網端電壓及電流波形、各儲能單元之低、高頻充/放電電流波形，可確認所提併網型單相換流器及降-升壓型轉換器可以充分滿足 ICESS 工作時相關電能之即時控制需求。

## 肆、ICEES 實務應用之情境案例模擬與分析

本章以併網型風力及太陽能發電系統架構與微型電網之電能控制為基礎，經由情境案例之規劃與模擬探討所提ICESS於執行各種進階系統功能性操作與電能儲/放控制之性能表現。

### 一、ICESS之應用情境#1：即時電力調度

本應用情境之功能性操作是有關ICESS之智慧型高效率獨立充、放電控制、PV/WTG之穩態電能管理。典型的操作情境為夜間離峰時間風力發電機多餘電力可經由ICESS之雙向DC/DC轉換器儲存於VRFB或LAB中，微電網內若有多餘電力也可經由雙向DC/AC換流器逆向儲存於VRFB或LAB。若微電網內臨時需要緊急實功支援或所謂即時電力調度，可經由雙向DC/AC換流器將儲存於VRFB或LAB之電力送出。

本應用情境假設夜間無太陽能發電，風力發電機也故障或處於無風力時，若市電或微電網運轉情況需要進行即時電力調度則可經由ICESS內之雙向DC/DC轉換器及雙向DC/AC換流器將VRFB或LAB內電能送出，此運轉情境可視為在一定時間內此等效之太陽能及風力發電機單元仍具備送出電力之機制。圖4-1為應用情境#1之功能操作示意圖。

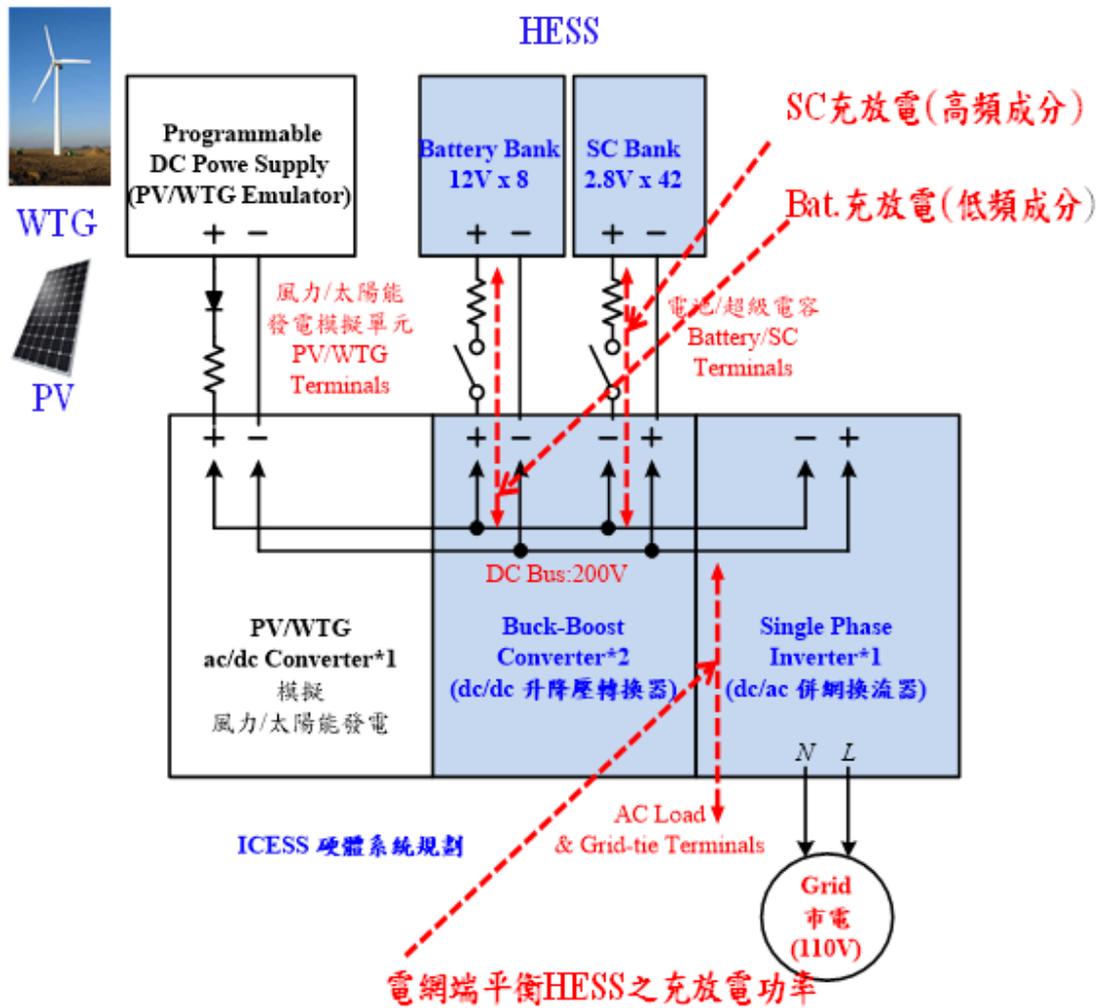


圖 4-1 應用情境#1 之功能操作示意圖

此緊急電力調度模式之情境規劃為：ICESSE 之儲能系統電量充足 ( $SOC \geq 95 \pm 1\%$ )，當下無任何風力及光伏發電條件也無負載電力需求，假設電力公司遭遇自然災害、常規發電機組故障等狀況，需進行緊急電力調度以維持電網的供電安全及穩定，此時系統可配合電力公司需求使儲能電池釋放功率並逆送回電網端。考量後續硬體實作之功率規模及設備上的需求，此處規劃 CESS 以適當功率調度命令(0W-600W-1000W-600W-0W)來

模擬系統配合電力公司之緊急調度功能。依據上述說明，此模式所規劃之風力及光伏發電功率變動情境如圖 4-2(a)所示，而負載功率變動情境如圖 4-2(b)所示，圖 4-2(c)及圖 4-2(d)則分別為電池及市電端功率變動情境圖。

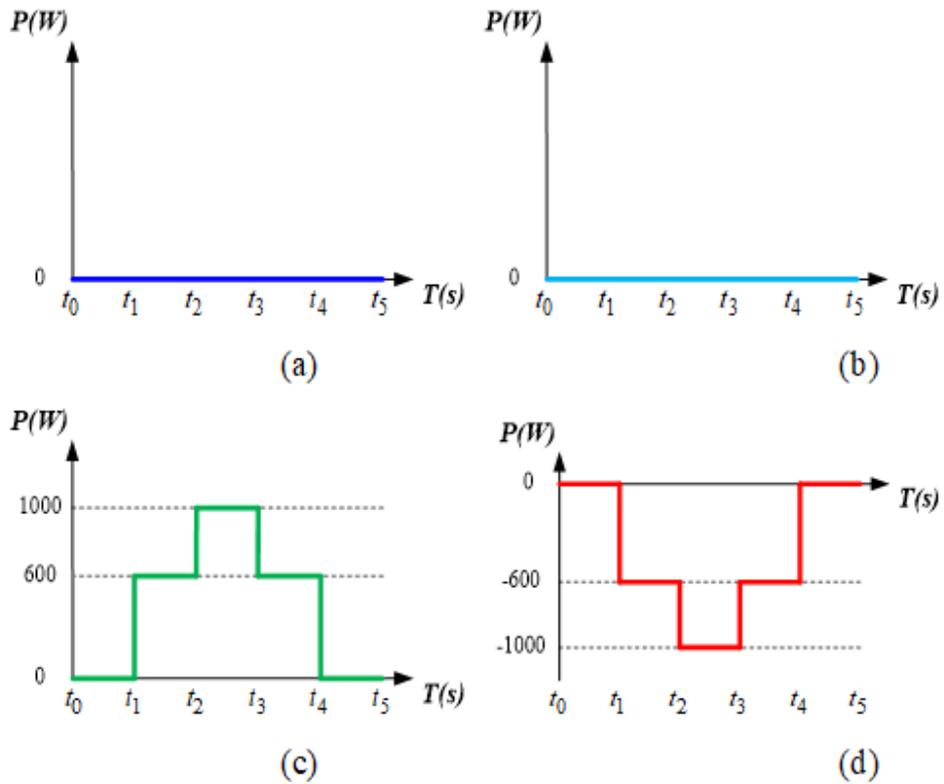


圖4-2：應用情境#1之(a) 風力及光伏發電功率 (b)負載功率 (c)HESS功率 (d)市電端-功率變動情境

圖 4-3 為 ICESS 應用情境#1 之情境模擬相關波形結果，相關波形圖中之功率控制流程及模擬時間可與與圖 4-2 之情境規劃對應。從圖 4-3 可看出 ICESS 可依功率調度命令(0W-600W-1000W-600W-0W)執行控制，由電池負責低頻電流而超級電容則成功分擔功率調度命令之瞬間高頻電流。

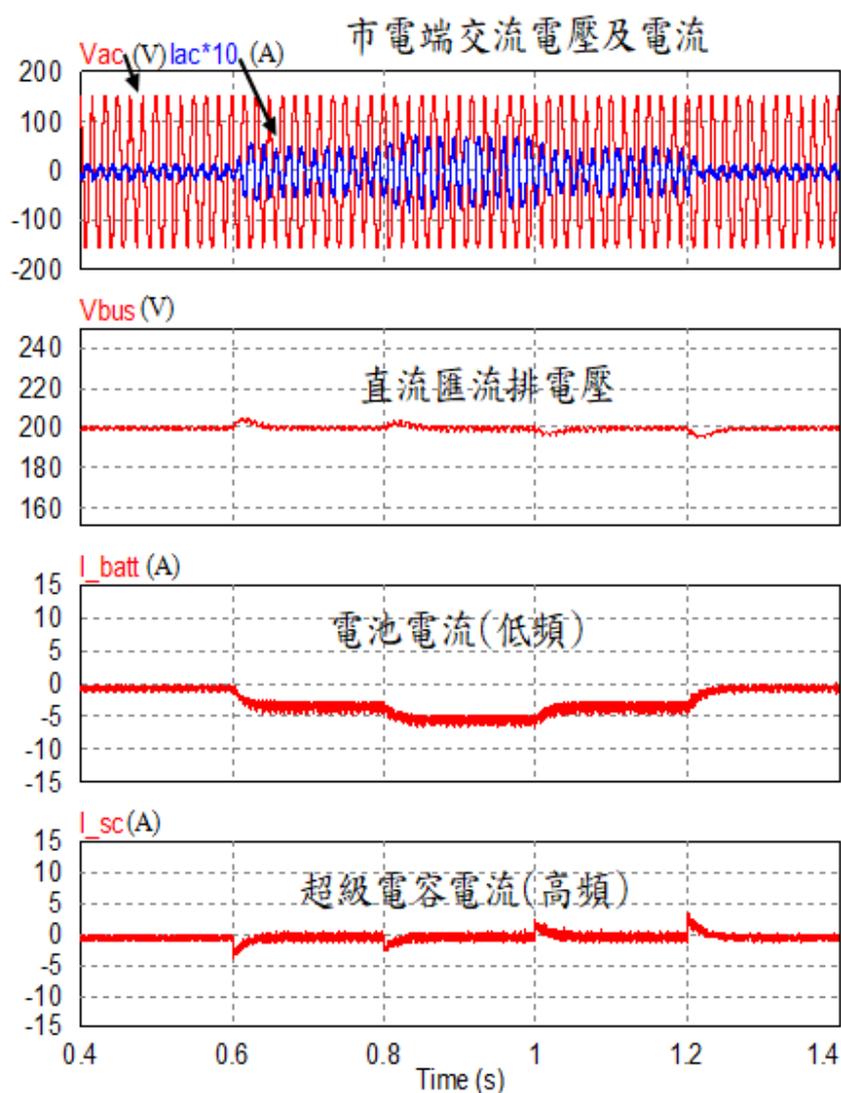


圖 4-3 ICESS 應用情境#1 之情境模擬波形結果

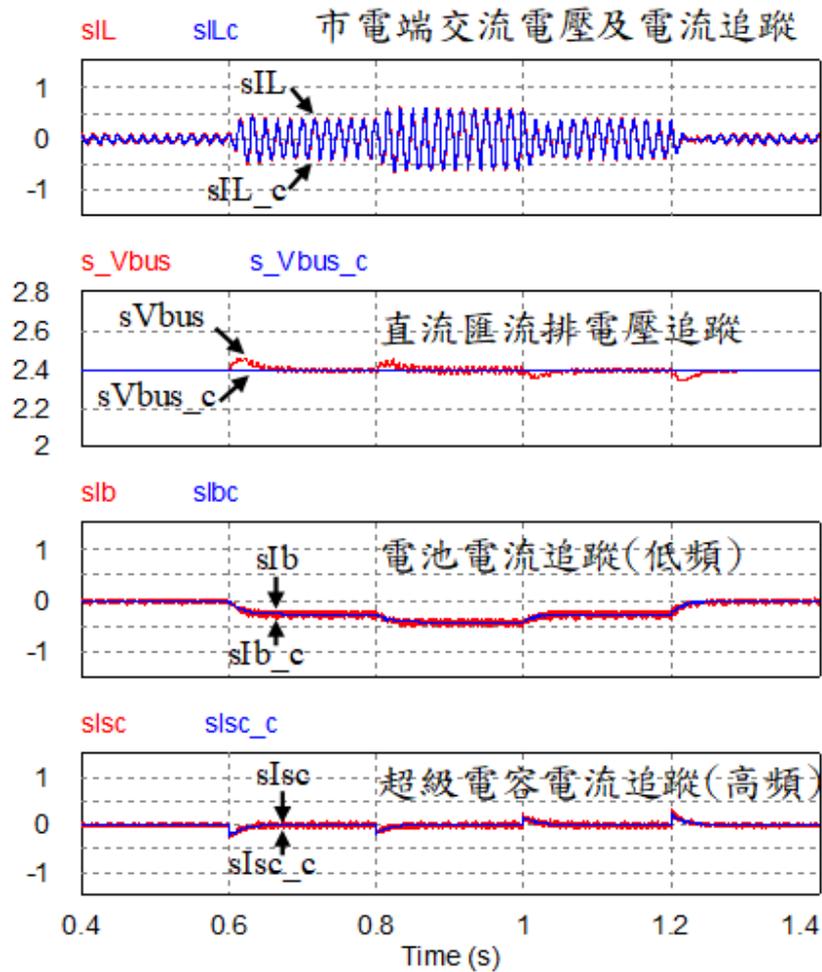


圖 4-4 ICES 應用情境#1 之情境模擬控制信號

## 二、ICES 之應用情境#2: 尖峰電力調度控制

本應用情境是展示有關 ICES 之尖峰電力調度控制與應用。一般負載之電力需求依白天、夜晚、季節等條件而有峰谷之別，因此電力公司為了反映各時段不同的供電成本訂定不同的用電費率，尖峰時段電價高、離峰時段電價低，此即為時間電價。以用戶利益而言，選擇採用時間電價，並將尖峰時段用電調整至離峰時段使用，可大幅節省電費；以電力公司的角

度而言，可降低尖峰負載，同時減少興建電廠並降低供電成本。然而，即便調整用電習慣，用戶仍無法完全避免尖峰時段之用電需求，此時若能有其他供電來源，便能避免使用尖峰時段較為昂貴的市電，因此本操作模式規劃為 ICESS 之尖峰電力調節模式之。此情境模式之運作首要條件為 ICESS 之儲能電池電量需充足，若同時有 PV/WTG 發電條件則更佳，負載之用電需求可優先利用 PV/WTG 發電來供應，發電功率不足之處由 ICESS 之儲能電池來補足，而多餘之功率則對儲能電池充電，如此一來即可使用戶避免於尖峰時刻使用市電，達成零尖峰電力需求之目的。圖 4-5 為應用情境#1 之功能操作示意圖。

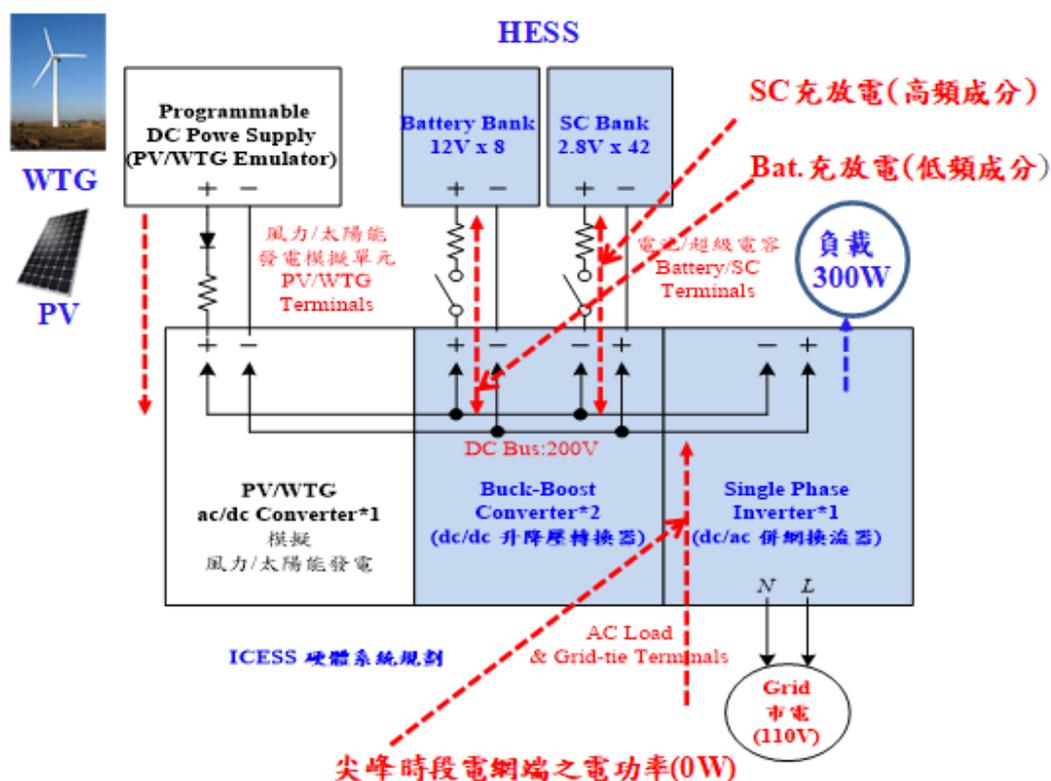


圖 4-5 應用情境#2 之尖峰電力調度控制功能操作示意圖。

由於負載電力需求設定為 300W，在此情境中系統將依照光伏及風力發電功率的大小即時推算電池之充電或放電命令，以達成尖峰電力調度需求，本案例之尖峰電力調度之目標為理想的零電力需求，即尖峰時段完全不使用市電之電力。應用情境#2 所規劃之 PV/WTG 發電功率變動情境如圖 4-6(a)所示，而負載功率變動情境如圖 4-6(b)所示，圖 4-6(c)及圖 4-6(d)則分別為 ICESS 電池端功率及市電端功率變動情境圖。

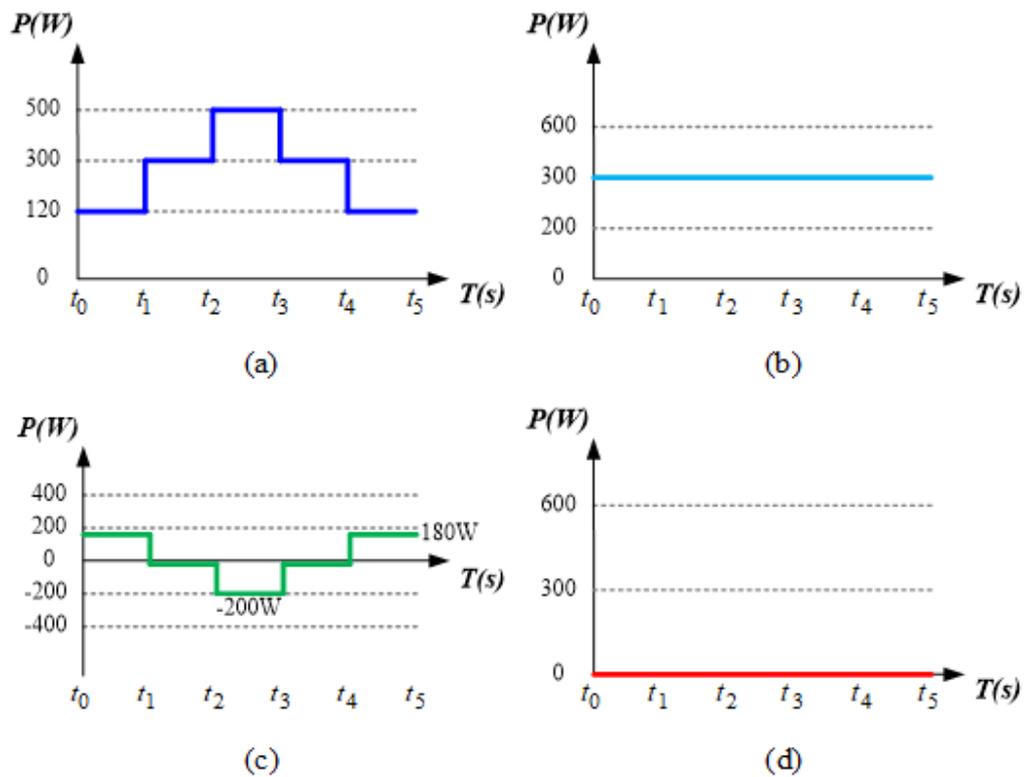


圖 4-6 (a) PV/WTG 發電功率(b)負載功率(c)ICESS 電池功率(d)市電端-功率變動流程

圖 4-7~4-8 為負載 300W 的情況下，系統尚未執行尖峰電力調節功能之情境模擬波形圖。圖 4-9~4-10 為負載 300W 的情況下，系統開始執行尖峰電力調節功能之情境模擬波形圖。觀察圖 4-9、4-10 可得知，若 PV/WTG 之發電發電功率不足 300W，系統可由 ICES 內部儲能電池放電補足負載需求，而當 PV/WTG 之發電超過 300W 則可由電池來吸收多餘功率，使用者可完全避免使用尖峰時刻之市電。

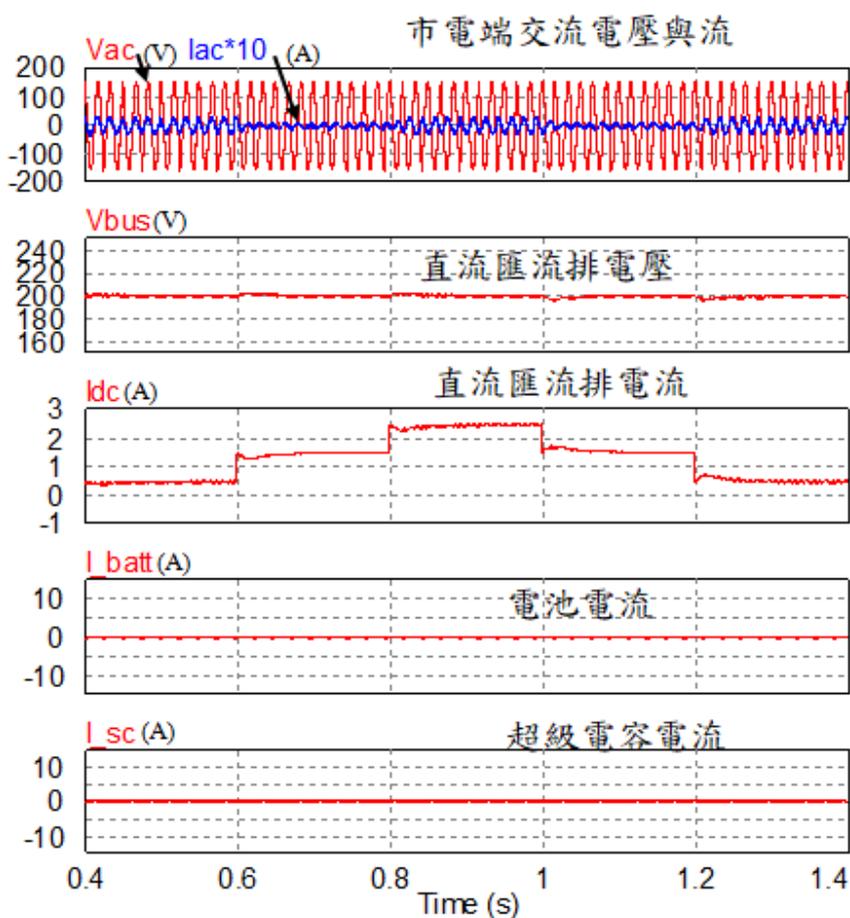


圖 4-7 ICES 應用情境#2 之情境模擬波形結果(1):

尖峰電力調節功能(未起動)

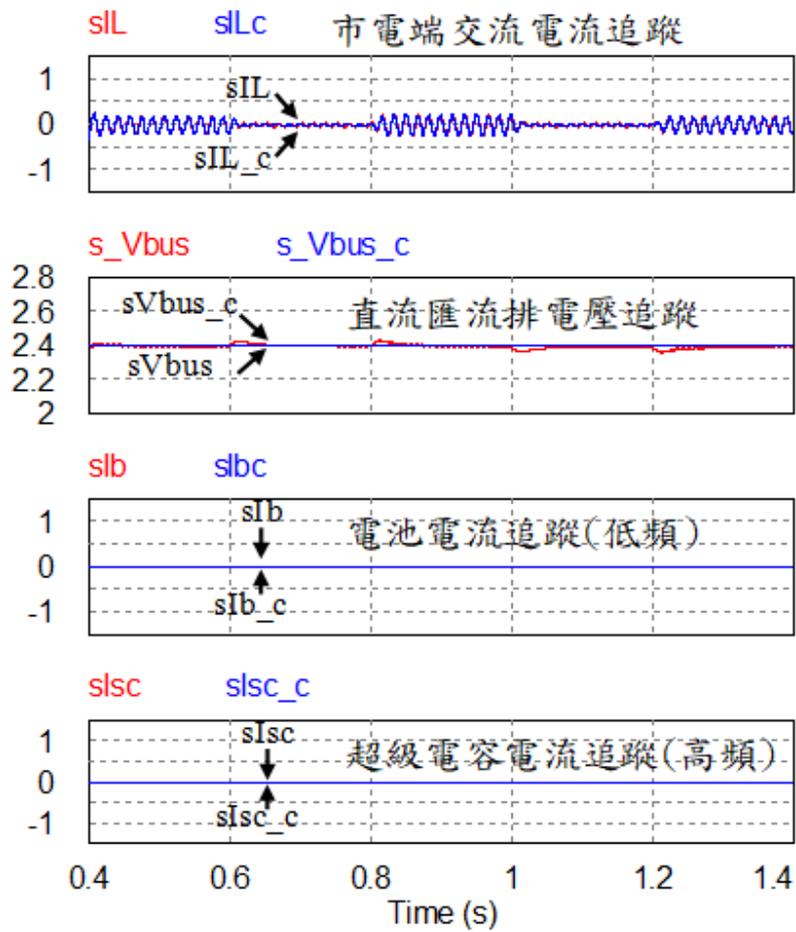


圖 4-8 ICES 應用情境#2 之情境模擬控制信號(1):

尖峰電力調節功能(未起動)

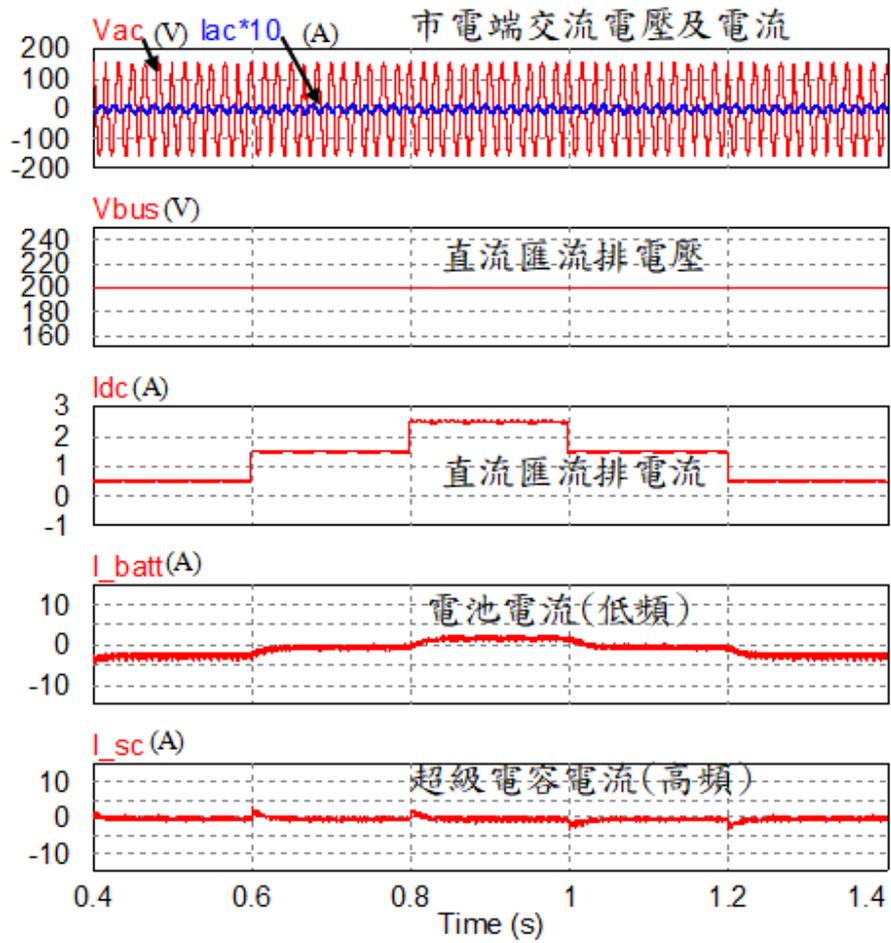


圖 4-9 ICESS 應用情境#2 之情境模擬波形結果(1):

尖峰電力調節功能(起動)

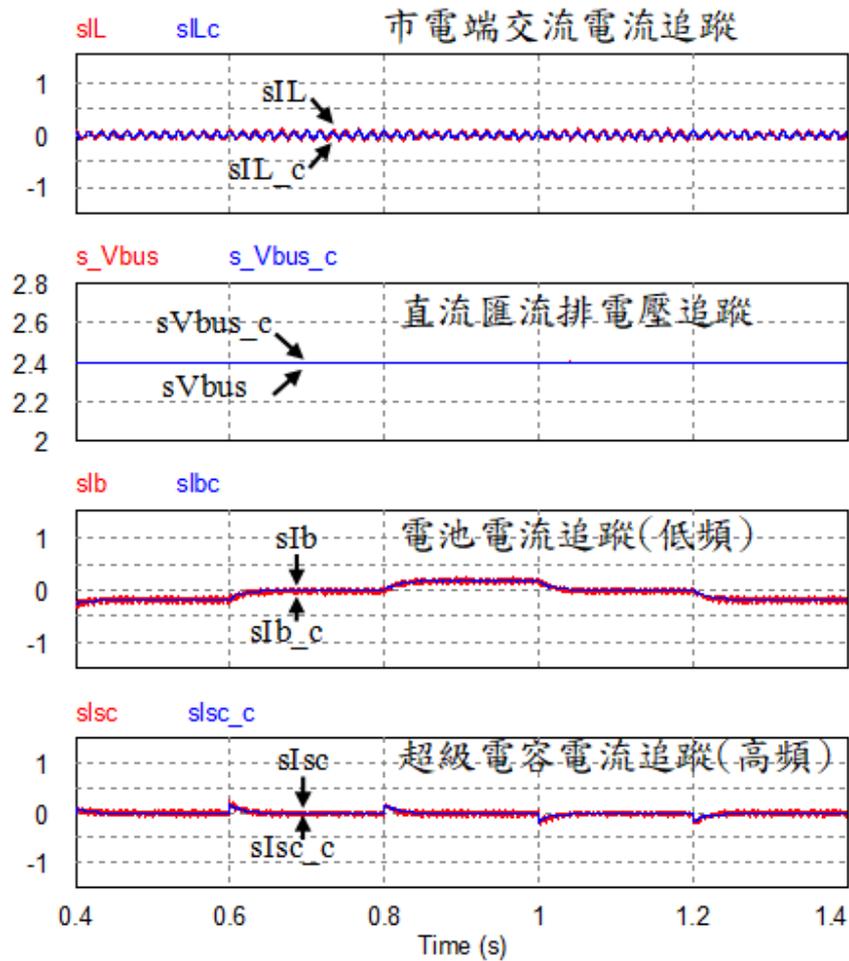


圖 4-10 ICES 應用情境#2 之情境模擬控制信號(1):

尖峰電力調節功能(起動)

由模擬的結果可得知，若處於電力公司所規範之尖峰時段，用戶端之電能監控系統可藉由負載電力需求，以及 PV/WTG 之發電功率的大小，即時推算出電池的充/放電命令，藉由 PV/WTG 之發電與電池電能來優先滿足負載電力需求，避免使用尖峰時段的昂貴電力，達成尖峰電力調節之目標。

### 三、ICESS之應用情境#3: PV/WTG輸出功率平順控制

本應用情境是有關 ICESS 之 PV/WTG 發電系統輸出功率平順控制。本 ICESS 控制功能之目的為降低 PV/WTG 發電系統之併網衝擊及提昇市電或微電網之系統穩定度及電力品質，此控制功能可經由以下之 ICESS 內 VRFB/SC 之快速充/放電操作來達成。

- ICESS之雙向DC/DC轉換器在VRFB/SC的安全SOC範圍內(0.1~0.9)依命令進行充、放電控制
- 配合ICESS內DC/DC轉換器之充、放電控制，模組化雙向DC/AC換流器僅需負責維持其內部直流鏈電壓200V，電網端之實功即可自動雙向平衡，達到所需之PV/WTG輸出功率平順之目的。

此操作情境之進一步說明:在外在條件變動下，PV/WTG發電機若操作於MPPT模式，其輸出電力無可避免將劇烈變動，改善方法可經由ICESS之雙向DC/DC轉換器及雙向DC/AC換流器同步調節進行PV/WTG發電機之輸出功率平順控制。圖4-11為ICESS工作於上述操作情境時之功率路徑示意圖。

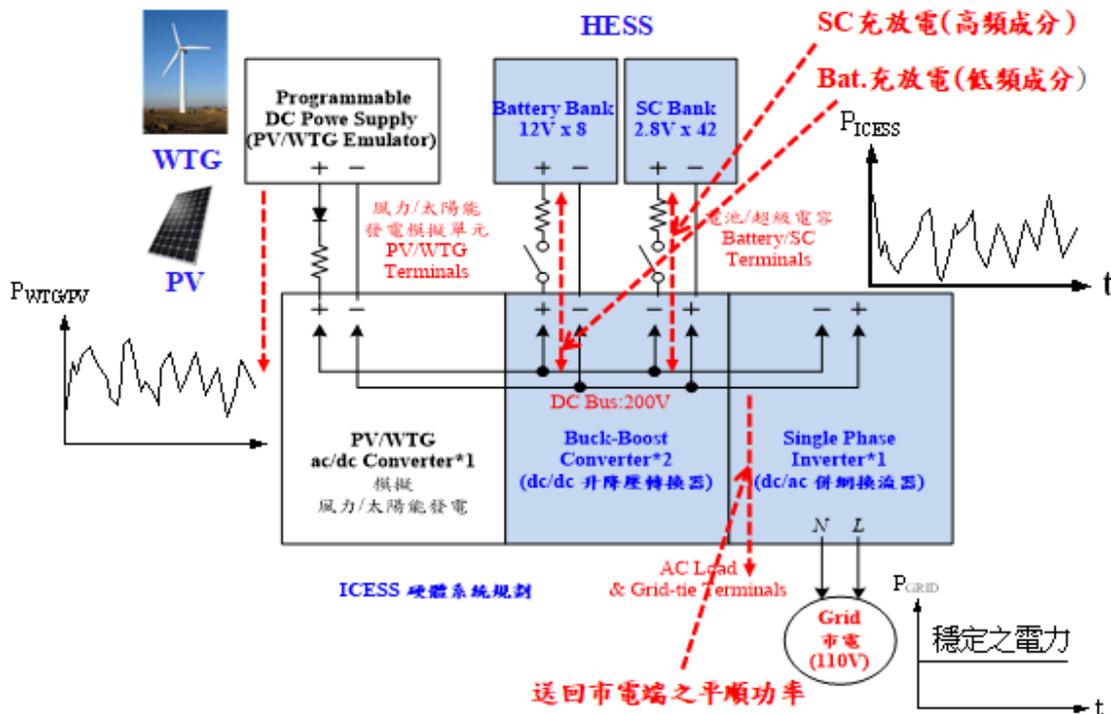


圖 4-11 ICEES 工作於上述操作情境時之功率路徑示意圖

由圖4-11之情境操作示意圖可知，由於PV/WTG並不是穩定的能量源，所以PV/WTG的輸出功率也是忽高忽低，若沒有經過額外的功率平順處理，那送入市電端時會因為瞬間功率變化過大而導致市電端的電壓與電流有所波動，因此操作情境以ICESS之直流/直流轉換器配合電池儲能裝置來實現風力機併網之電力平順控制。本模擬案例使用可程式直流電源供應器模擬PV/WTG在外界條件變化下的不穩輸出功率 $P_{WTG/PV}$ ，利用ICESS執行即時電力平順演算法，其中送入ICESS電的功率為 $P_{ICES}$ ，最後送回市電為一穩定功率 $P_{GRID}$ ，本案例規劃的回送市電功率為固定之200W。

圖 4-12~4-13 為固定送回市電功率 200W 的情況下，系統尚未執行電力平順功能之情境模擬波形圖。圖 4-14~4-15 為相同情況下，系統開始執

行電力平順功能之情境模擬波形圖。觀察圖 4-14、4-15 可得知，若 PV/WTG 之發電發電功率不足 200W，系統可藉由 ICES 內部儲能電池放電即時補足回送市電功率需求，而當 PV/WTG 之發電超過 200W 的部份則可由電池來吸收多餘功率，達成回送市電之功率平順目的。

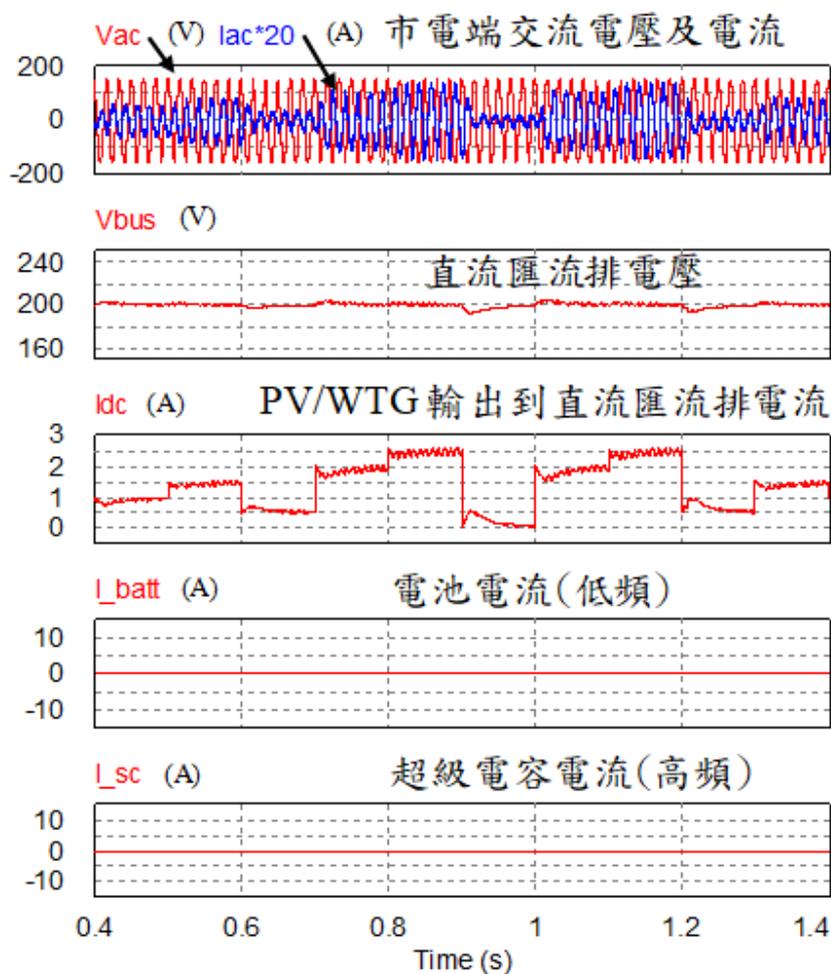


圖 4-12 ICES 應用情境#3 之情境模擬波形結果(1):

PV/WTG 輸出功率平順控制功能(未起動)

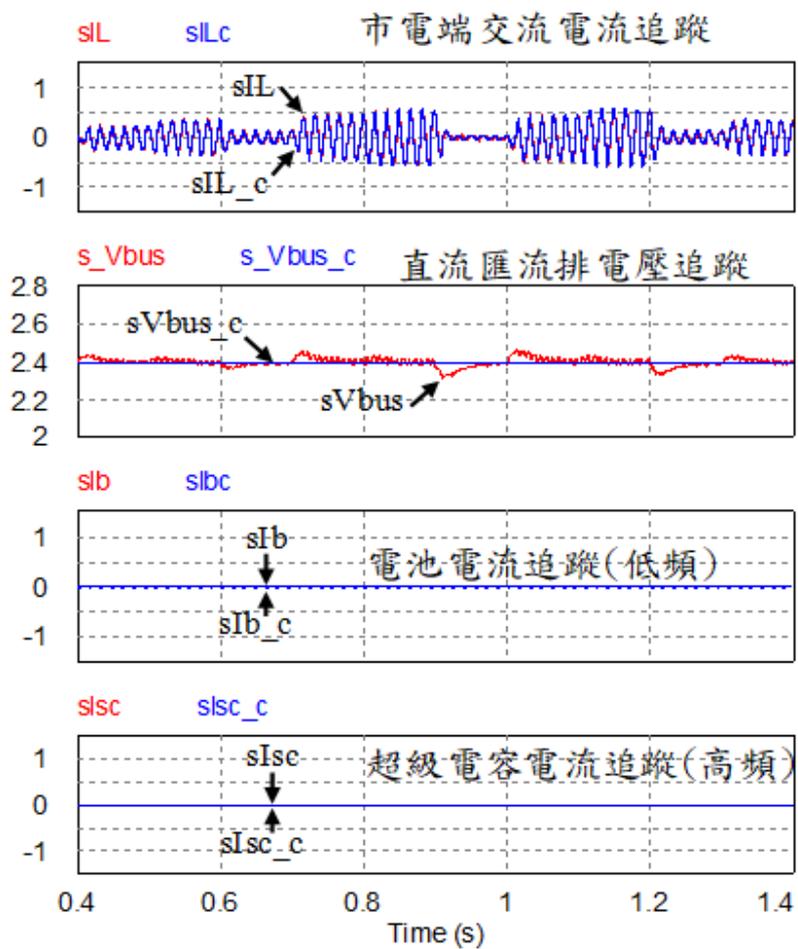


圖 4-13 ICESS 應用情境#3 之情境模擬控制信號(1):

PV/WTG 輸出功率平順控制功能(未起動)

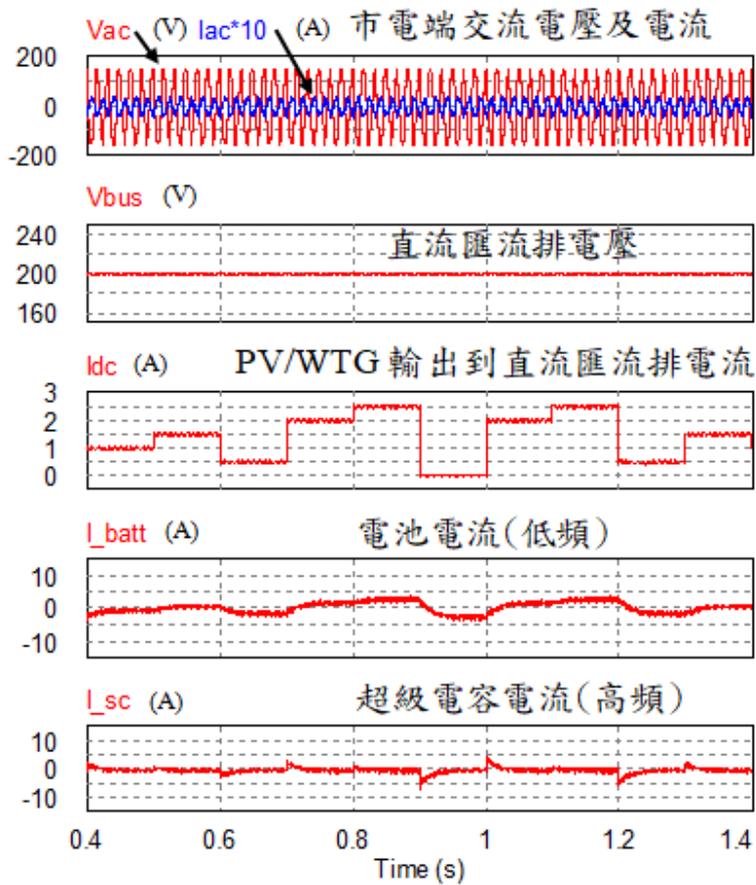


圖 4-14 ICES 應用情境#3 之情境模擬波形結果(1):  
PV/WTG 輸出功率平順控制功能(起動)

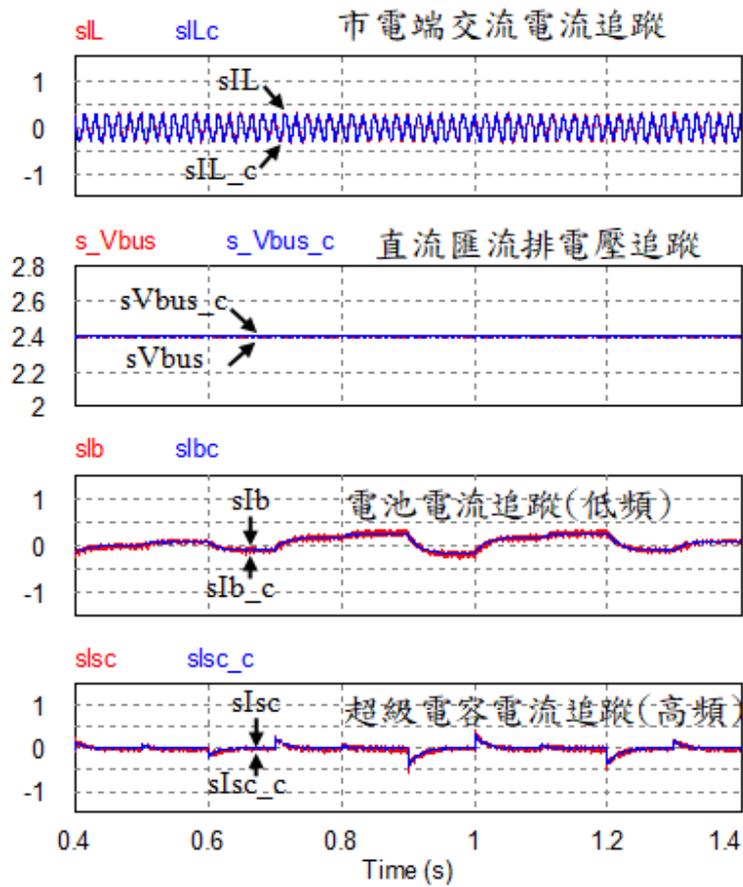


圖 4-15 ICESS 應用情境#3 之情境模擬控制信號(1):

PV/WTG 輸出功率平順控制功能(起動)

## 伍、ICESS 硬體實作與實務應用之情境案例測試與分析

承接前章所介紹之計畫所提ICESS實務應用可能性與3個情境案例模擬，考量硬體電路規格與目前實驗室設備之測試條件，本計畫已研製一小容量1kVA ICESS硬體實驗系統，並以可程式數位控制器(DSP)架構實現全數位化電力轉換器之整合與協調控制，最後藉由實作測試結果檢驗ICESS系統整體性能，相關硬體實作規劃與實作測試結果將於本章中呈現。

### 一、ICESS硬體實作規劃與實現

本論文所研製小容量ICESS硬體實驗系統將使用全數位化控制方式整合三個功能性電路，以滿足系統所需之操作彈性與性能。ICESS系統之控制核心採用德州儀器(TI)公司所推出的數位信號處理器(DSP)TMS320F28335 IC，其功能相當強大，可將複雜之控制運算由軟體實現，簡化硬體電路並降低成本，TMS320F28335控制板功能性配置與腳位輸出定義如圖5-1及表5-1所示，以下即為TMS320F28335的幾個特點：

1. CPU 為 32 位元。
2. 每一週期指令高達 150MHz(6.67ns 的週期時間)。
3. 核心 CPU 使用電壓為 1.9V，I/O 埠使用電壓 3.3V。
4. 採用單精度浮點運算位元(single precision floating point unit , FPU)。
5. 程式撰寫語言可使用 C/C++與組合語言(assembly)。
6. 具有 256K 的 16 位元快閃(flash)記憶體及 34K\*16 的 SARAM。
7. 具有高達 18 個 PWM 埠。
8. 具有 16 個 12 位元的 ADC 埠，最高可達 80ns(12.5MHz)轉換率。
9. 具有 88 個 GPIO 接腳及 3 組 32 位元的 CPU 計時器。

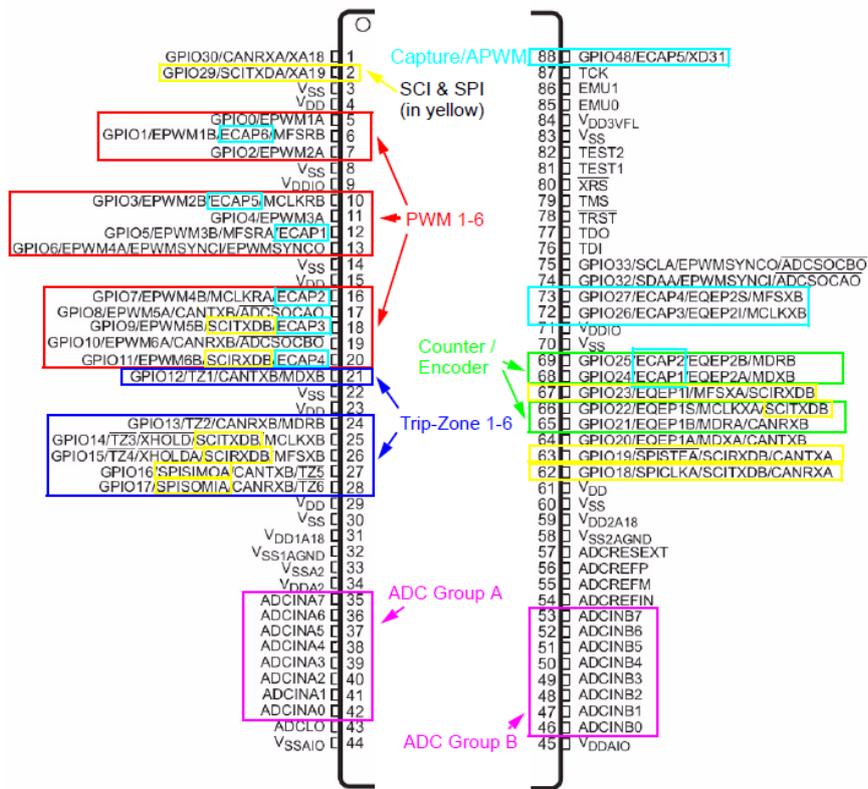


圖5-1 DSP TMS320F28335控制板功能性配置與規劃

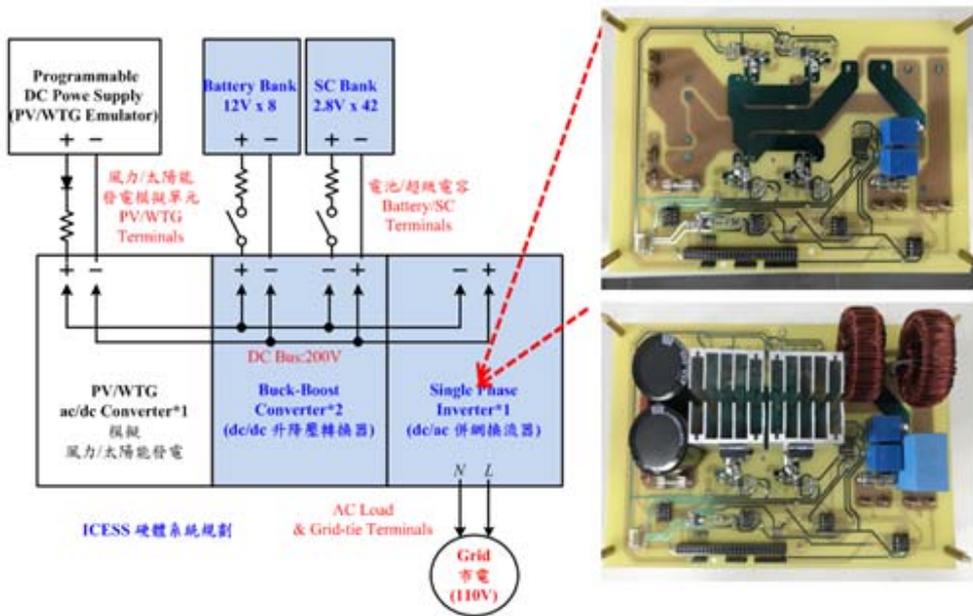
表5-1 DSP TMS320F28335控制板各腳位輸出定義

Definition	Pin Number		Definition
+5V in	1	2	+5V in
GND	3	4	GND
GPIO-00 / EPWM-1A	5	6	GPIO-01 / EPWM-1B / MFSR-B
GPIO-02 / EPWM-2A	7	8	GPIO-03 / EPWM-2B / MCLKR-B
GPIO-04 / EPWM-3A	9	10	GPIO-05 / EPWM-3B /

			MFSR-A / ECAP-1
GPIO-06 / EPWM-4A / SYNCI / SYNCO	11	12	GPIO-07 / EPWM-4B / MCLKR-A / ECAP-2
GPIO-08 / EPWM-5A / CANTX-B / ADCSOC-A	13	14	GPIO-09 / EPWM-5B / SCITX-B / ECAP-3
GPIO-10 / EPWM-6A / CANRX-B / ADCSOC-B	15	16	GPIO-11 / EPWM-6B / SCIRX-B / ECAP-4
GPIO-48 / ECAP5 / XD31 (EMIF)	17	18	GPIO-49 / ECAP6 / XD30 (EMIF)
GPIO-84	19	20	GPIO-85
GPIO-12 / TZ1n / CANTX-B / MDX-B	21	22	GPIO-13 / TZ2n / CANRX-B / MDR-B
GPIO-15 / TZ4n / SCIRX-B / MFSX-B	23	24	GPIO-14 / TZ3n / SCITX-B / MCLKX-B
GPIO-24 / ECAP1 / EQEPA-2 / MDX-B	25	26	GPIO-25 / ECAP2 / EQEPB-2 / MDR-B
GPIO-26 / ECAP3 / EQEPI-2 / MCLKX-B	27	28	GPIO-27 / ECAP4 / EQEPS-2 / MFSX-B
GPIO-16 / SPISIMO-A / CANTX-B / TZ-5	29	30	GPIO-17 / SPISOMI-A / CANRX-B / TZ-6
GPIO-18 / SPICLK-A / SCITX-B	31	32	GPIO-19 / SPISTE-A / SCIRX-B
GPIO-20 / EQEP1A / MDX-A / CANTX-B	33	34	GPIO-21 / EQEP1B / MDR-A / CANRX-B
GPIO-22 / EQEP1S / MCLKX-A / SCITX-B	35	36	GPIO-23 / EQEP1I / MFSX-A / SCIRX-B
GPIO-28 / SCIRX-A /	37	38	GPIO-29 / SCITX-A /

TZ5			TZ6
GPIO-30 / CANRX-A	39	40	GPIO-31 / CANTX-A
GPIO-32 / I2CSDA / SYNCI / ADCSOCA	41	42	GPIO-33 / I2CSCL / SYNCO / ADCSOCB
ADCIN-B7	43	44	ADCIN-A7
ADCIN-B6	45	46	ADCIN-A6
ADCIN-B5	47	48	ADCIN-A5
ADCIN-B4	49	50	ADCIN-A4
ADCIN-B3	51	52	ADCIN-A3
ADCIN-B2	53	54	ADCIN-A2
ADCIN-B1	55	56	ADCIN-A1
ADCIN-B0	57	58	ADCIN-A0
GND	59	60	GND

本計畫依據上述之硬體實作規劃，研製一套 1kVA 小容量硬體實驗系統，其中 ICESS 所屬之各式電力轉換器皆以 MOSFET 元件作為各別電路之功率開關，並採用數位信號處理器實現多重電力轉換器之整合與協調控制，以下首先將針對測試系統之基本硬體進行說明，隨後則依據前章所規劃之 3 個情境模擬案例進行系統整合測試，並將實作測試結果與模擬相互對照，以驗證系統之完整實作性能。圖 5-2(a)及(b)為本計畫所研製之 1kVA 小容量硬體實驗系統照片。5-2(a) 為 ICESS 之 dc/ac 併網換流器，圖 5-2(b) 為 ICESS 之電池及超級電容充/放電 dc/dc 電力轉換器。



5-2(a) ICES 之 dc/ac 併網換流器

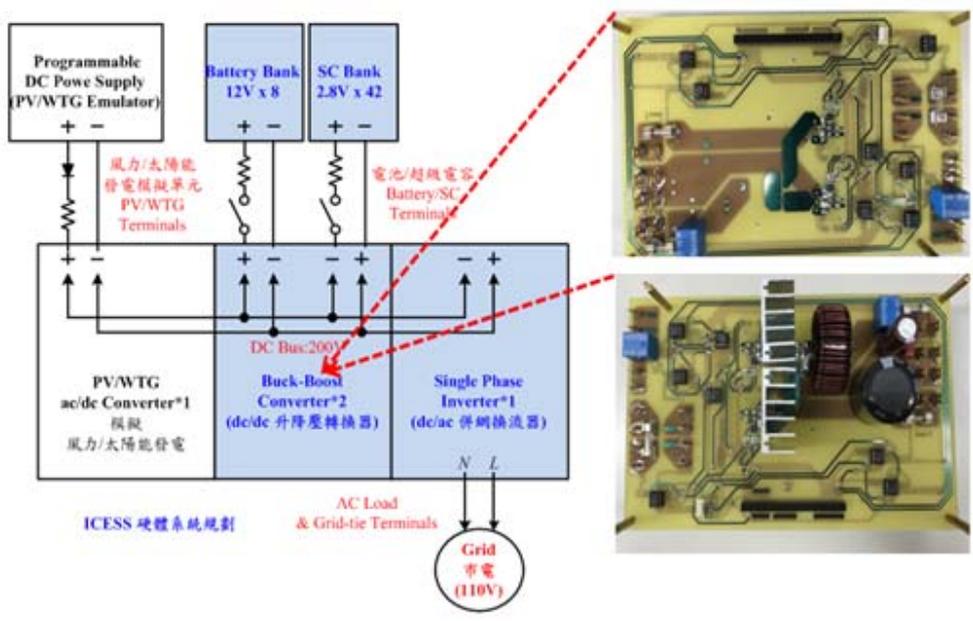


圖 5-2(b) ICES 之 dc/dc 電力轉換器

## 二、ICESS 系統整合實作測試

ICESS 之整合實作測試安排是以 WTG/PV 併網型可再生能源發電系統進行規畫，完整硬體實驗配置與測試環境如圖 5-3 所示，ICESS 系統通過單相換流器與市電併聯(AC 110V)且同時控制直流匯流排電壓(DC 200V)，並串聯 8 顆 12V/14Ah 鉛酸蓄電池作為儲能裝置(DC 96V)，由兩組降-升壓型轉換器作為電池及超級電容的充放電控制器，直流匯流排接上可編程直流電源供應器來模擬 WTG/PV 發電，最後於直流匯流排直接接上直流負載，模擬情境中系統可能面對之區域負載電力需求。

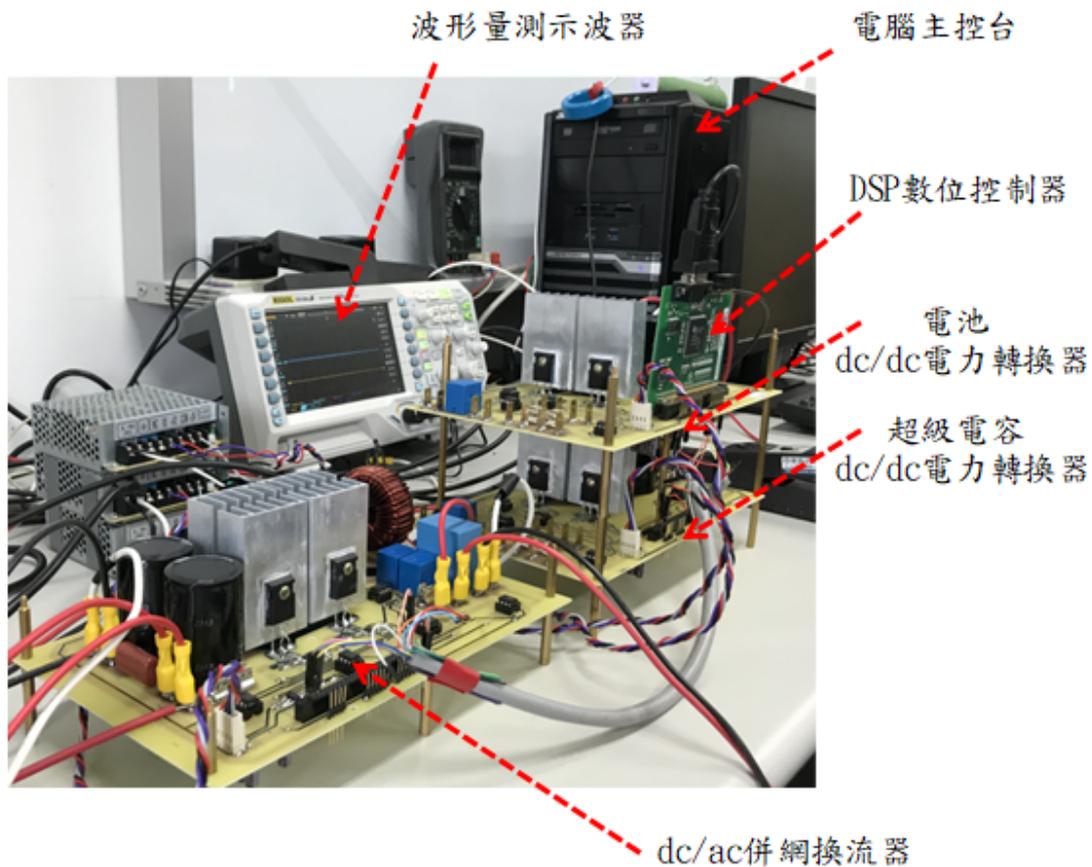


圖 5-3 完整之硬體實驗配置與測試環境

本節將根據前章所規劃之 ICESS 系統操作模式與 3 個情境模擬案例之安排，以所研製之小容量硬體實驗系統進行整合測試，並由實作測試結果檢驗硬體電路在面對各式應用情境下，所執行之操作功能及其實作測試結果是否符合預期之性能表現，以下將針對各個操作模式之情境案例實作結果進行說明與分析。

## 2.1 複合式儲能系統(ICESS)之應用情境#1: 即時電力調度

此緊急電力調度模式之情境規劃及系統條件與前章之應用情境#1 模擬案例完全相同。所規劃之 ICESS 以適當功率調度命令(0W-600W-1000W-600W-0W)來模擬系統配合電力公司之緊急調度功能。此模式所規劃之風力及光伏發電功率變動情境如圖 4-2(a)所示，而負載功率變動情境如圖 4-2(b)所示，圖 4-2(c)及圖 4-2(d)則分別為電池及市電端功率變動情境圖。圖 5-4(a) 及圖 5-4(b) 為 ICESS 應用情境#1 之情境案例相關實測波形結果，相關波形圖中之功率控制流程及模擬時間可與圖 4-2 之情境規劃對應。從圖 5-4(a)及(b)之實測波形可看出 ICESS 可依功率調度命令(0W-600W-1000W-600W-0W)執行控制，由電池負責低頻電流(5-4(a))而超級電容則成功分擔功率調度命令之瞬間高頻電流(5-4(b))。實測結果與圖 4-3 之模擬結果極為接近。

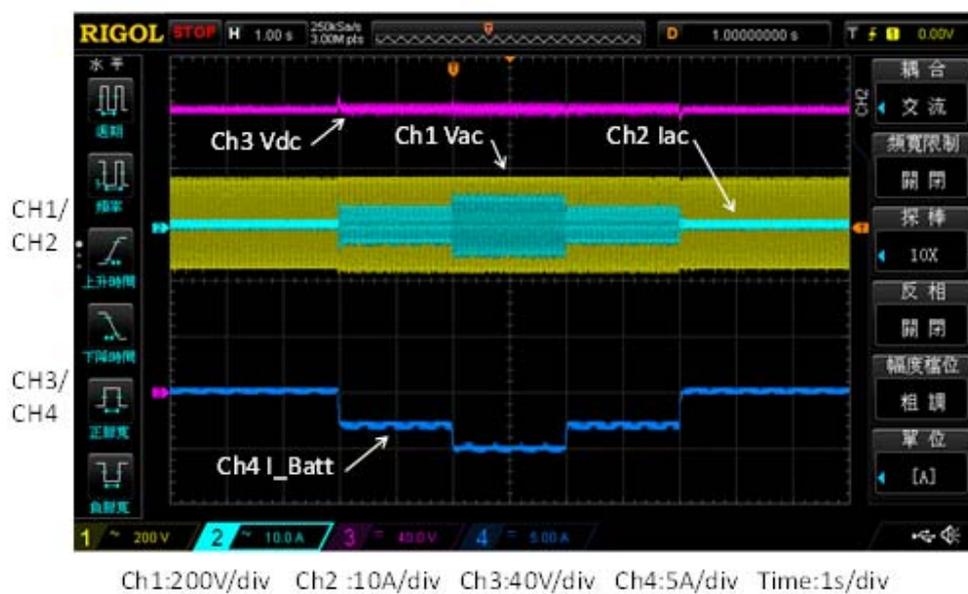


圖 5-4(a) ICESS 應用情境#1 之相關實測波形結果

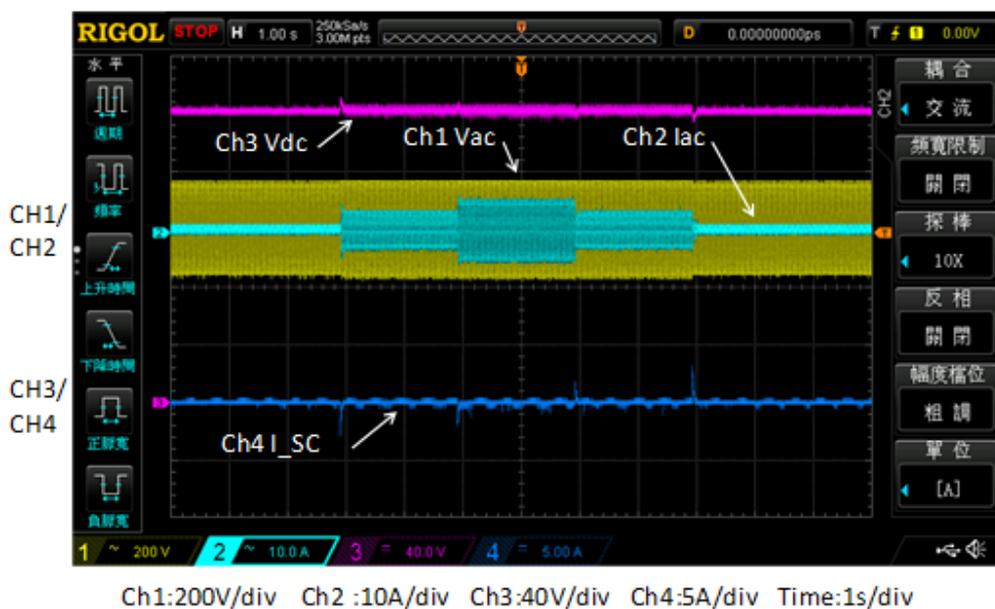


圖 5-4(b) ICESS 應用情境#1 之相關實測波形結果

## 2.2 複合式儲能系統(ICESS)之應用情境#2: 尖峰電力調度控制

本案例實作條件與前章之應用情境#2 模擬案例完全相同。負載電力需求與設定為 300W，在此情境中系統將依照光伏及風力發電功率的大小即時推算電池之充電或放電命令，以達成尖峰電力調度需求，本案例之尖峰電力調度之目標為理想的零電力需求，即尖峰時段完全不使用市電之電力。應用情境#2 所規劃之 PV/WTG 發電功率變動情境如圖 4-6(a)所示，而負載功率變動情境如圖 4-6(b)所示，圖 4-6(c)及圖 4-6(d)則分別為 ICESS 電池端功率及市電端功率變動情境圖。圖 5-5 為系統實測時負載 300W 的情況下，系統尚未執行尖峰電力調節功能之情境模擬波形圖。圖 5-6 及圖 5-7 為負載 300W 的情況下，系統開始執行尖峰電力調節功能之情境模擬波形圖。

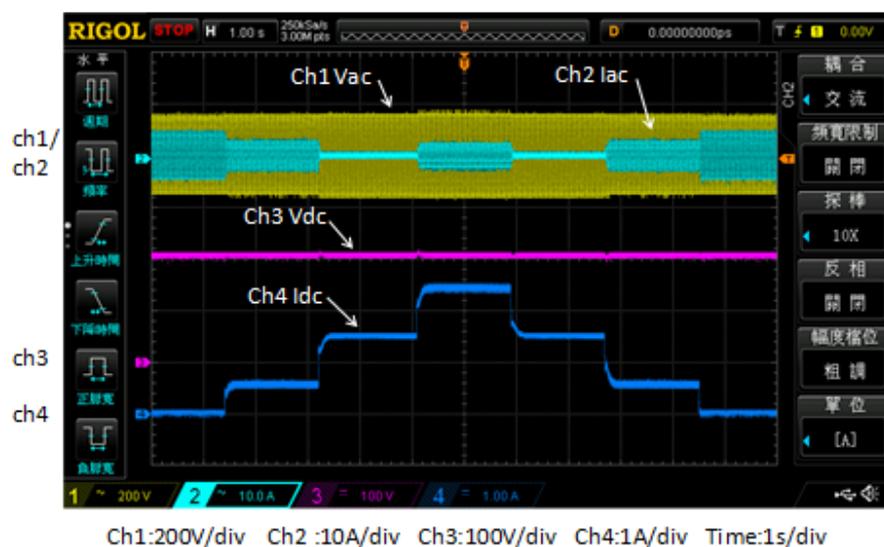


圖 5-5 ICESS 應用情境#2 之情境實測波形結果(1):

尖峰電力調節功能(未起動)

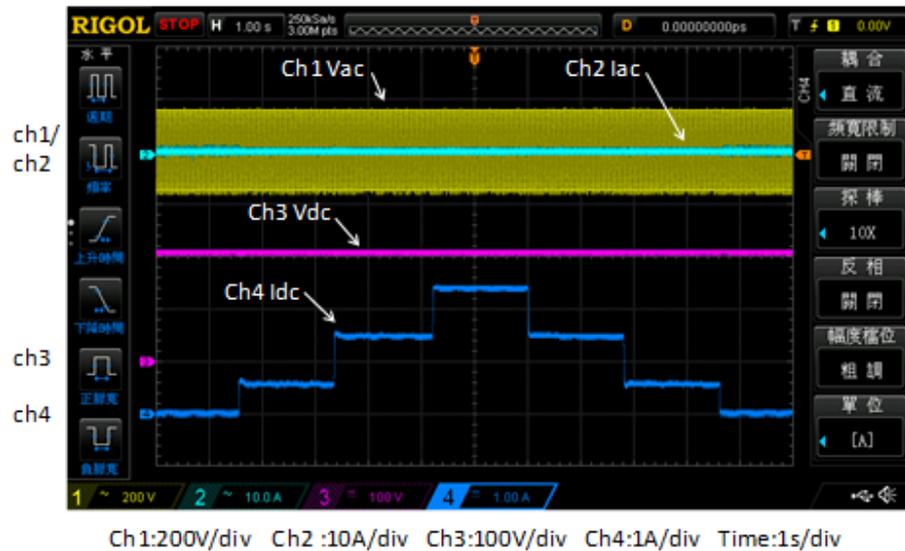


圖 5-6 ICESS 應用情境#2 之情境實測波形結果(2):

尖峰電力調節功能(起動)



圖 5-7 ICESS 應用情境#2 之情境實測波形結果(3):

尖峰電力調節功能(起動)

### 2.3 複合式儲能系統(ICESS)之應用情境#3: PV/WTG 輸出功率平順控制

本案例實作條件與前章之應用情境#3 模擬案例完全相同。圖 5-8 及圖 5-9 為系統尚未執行電力平順功能之實測波形圖。圖 5-10 為相同 WTG/PV 發電條件情況下，系統開始執行固定送回市電功率 200W 的調度式電力平順功能之情境實測波形圖。

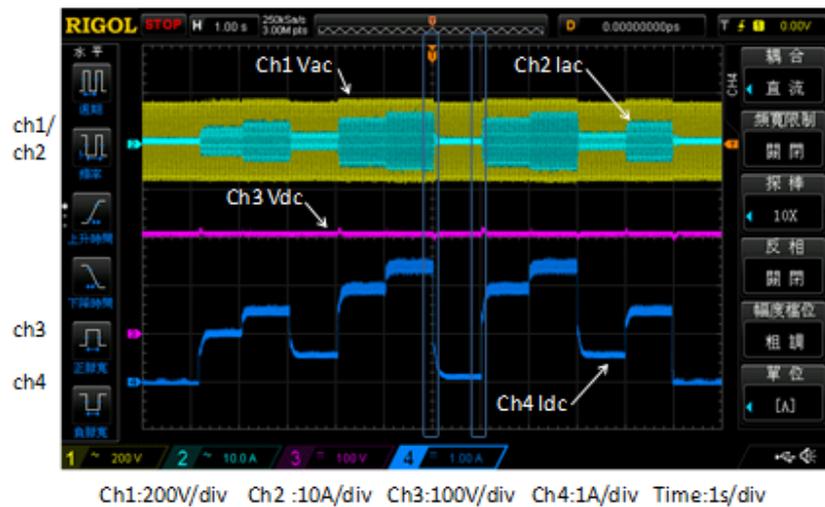


圖 5-8 ICESS 應用情境#3 之情境實作波形結果(1):  
PV/WTG 輸出功率平順控制功能(未起動)

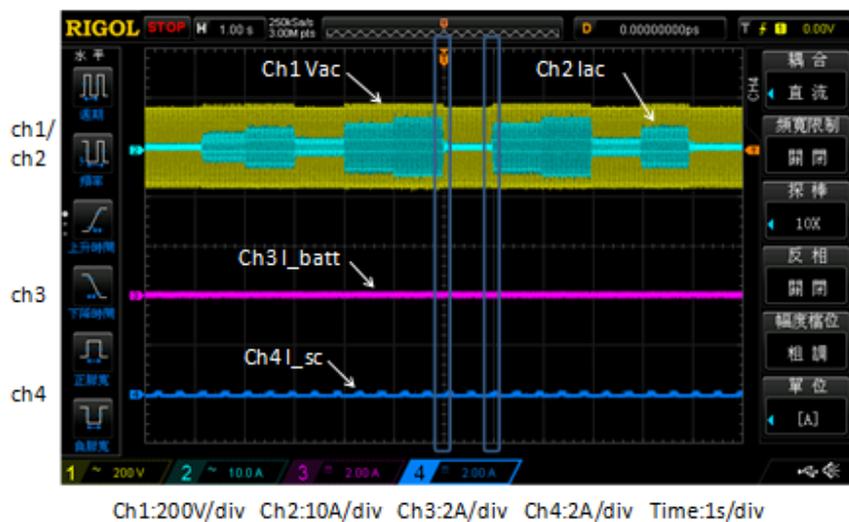


圖 5-9 ICESS 應用情境#3 之情境實作波形結果(2):  
PV/WTG 輸出功率平順控制功能(未起動)

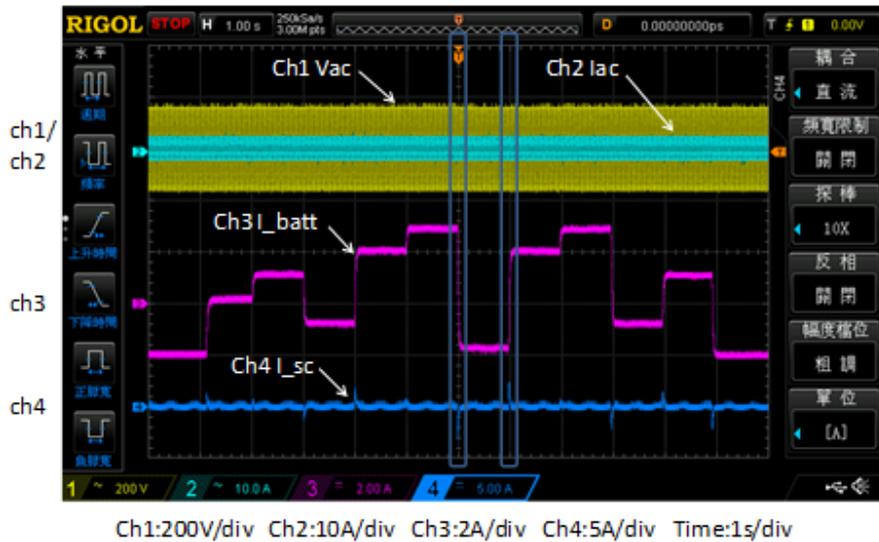


圖 5-10 ICESS 應用情境#3 之情境實作波形結果(3):

PV/WTG 輸出功率平順控制功能(起動)

觀察圖 5-10 可得知，若 PV/WTG 之發電發電功率不足 200W，系統可藉由 ICESS 內部儲能電池放電即時補足回送市電功率需求，而當 PV/WTG 之發電超過 200W 的部份則可由電池及超級電容來吸收多餘功率，達成回送市電之功率平順目的。觀察圖 5-10 也可清楚發現 ICESS 於執行電力平順功能時高頻之功率可由 ICESS 內之超級電容(Ch4I\_SC)模組負責平衡，低頻之功率則由 ICESS 內之能量型電池(Ch3I\_Batt)模組負責平衡。實測波形與整體控制結果與圖 4-9 之模擬結果極為接近。

## 陸、結論

本計畫已依既定之時程完成 100%之研究項目與內容，執行進度與成果符合預期。相關執行內容與成果已呈現於本期末報告中，主要內容安排如下：第一章內容是描述計畫背景、目的與相關文獻之回顧。第二章說明分散式發電系統架構、ICEES 之系統配置模式及功率與容量規劃方案。第三章說明 ICEES 之系統功能性應用情境規劃、硬體架構及相關控制器設計與模擬分析。第四章說明 ICEES 之主要電力轉換器系統及情境案例模擬與分析。第五章展示 ICESS 硬體實作與實務應用之情境案例測試結果。第六章是結論。相關參考文獻則列於最後的第七章。

本計畫考慮 ICESS 硬體系統實作規格需滿足所有功能性控制情境案例之規劃與驗證，計畫之實施重點聚焦在複合式儲能系統之應用情境方案之案例模擬分析並依據系統運轉條件及 ICESS 可能之操作模式擬定可執行之系統進階電能控制功能。為驗證 ICESS 未來實際應用之潛力，本計畫除了模擬分析外同時也進行各電力轉換器硬體實作與發展所需之演算法及數位控制器。相關控制器設計之正確性及系統整體性能表現先以電腦軟體進行情境案例之模擬與分析，再以 TI DSP TMS320F28335 晶片為控制核心配合實驗室相關設備進行 1-kVA 之 ICESS 小容量實驗系統硬體實測驗證及全系統數位化整合控制之性能評估。由 3 個 ICESS 典型情境案例之模擬與實作分析可證明所提 ICESS 之架構操作模式控之規劃及數位控制器之設計皆具正確性，從應用面來評估，ICESS 也極適合應用於中小容量之分散式發電系統中，特別是有關電力品質與電能效率之最佳化控制。表 6-1 為本計畫之預定進度甘梯圖及進度檢核紀錄表。

表6-1 本計畫之預定進度甘梯圖

預定進度：											
工作項次及內容	計畫月份										備註 (查核點)
	(3-4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)		
執行ICEES之文獻探討與分析 (第壹章，第四節)	*	*									完成
執行ICEES之系統功率與容量規劃與案例分析 (第貳章)	*	*	*								完成
執行ICEES之系統功能性應用情境規劃、硬體架構設計、分析 (第參章，第一節)		*	*	*							完成
執行ICEES之主要電力轉換器系統單元、控制器架構及相關界面電路設計、分析 (第參章，第二節)		*	*	*							完成 ※(1)
執行ICEES於執行各式控制方案所需之演算法與數位控制器之規劃、設計及模擬分析 (第參章，第三節)			*	*	*						完成
撰寫期中報告 (2018/08/15)			*	*	*						完成 ※(2)
執行ICEES各式實務應用案例之運轉情境案例模擬與分析 (第肆章)				*	*	*					
執行ICEES之各電力轉換器硬體單元、感測與界面系統實作測試與功能驗證 (第伍章，第一節)					*	*	*				完成 ※(3)
執行ICEES之軟硬體系統整合及各式控制案例之系統實作驗證 (第伍章，第二節)						*	*	*			
執行ICEES系統之整體性能分析與實務應用評估 (第陸章)							*	*	*		
完成論文及計畫結案報告之撰寫							*	*	*		完成 ※(4)
工作進度估計百分比 (累積數)	10	20	30	40	60	70	80	90	100		
預定查核點	※(1) 第1季：1.ICESS之整體系統規劃、設計與分析。 2. ICEES之儲能配置、主要電力轉換器系統、控制器架構設計與分析。										

※(2)第2季：1. ICESS及各式控制器之規劃與設計，基本功能模擬與驗證。  
2. 撰寫期中報告及投稿研討會論文2篇。

※(3)第3季：1. ICEES之電力轉換器硬體系統實作與相關控制演算法之發展與系統驗證。

※(4)第4季：1. 執行ICESSE之系統情境案例實作驗證、性能分析與實務應用評估。  
2. 撰寫期末報告及投稿期刊論文1篇。

## 柒、參考文獻

- [1] IPCC WGI AR5, “Summary for Policymakers,” Sept. 30, 2013.
- [2] U.N. COP21, “Paris Agreement,” Dec.12. 2015
- [3] International Energy Outlook 2017, EIA, 2017
- [4] 經濟部能源局, “2016年能源產業技術白皮書,” 2016.
- [5] CaISO:<http://www.caiso.com/market/Pages/ReportsBulletins/DailyRenewablesWatch.aspx>
- [6] A. Makibar, L. Narvarte, and E. Lorenzo, “On the relation between battery size and PV power ramp rate limitation,” *Sol. Energy*, vol. 142, pp. 182-193, 2017.
- [7] M. Jannati, S.H. Hosseinian, B. Vahidi, and G.J. Li, “A survey on energy storage resources configurations in order to propose an optimum configuration for smoothing fluctuations of future large wind power plants,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 158-172, 2014.
- [8] Xiaoyu Wang and Meng Yue ,“Capacity Specification for Hybrid Energy Storage System to Accommodate Fast PV Fluctuations,” Power & Energy Society General Meeting, 2015 IEEE,pp.1-7.
- [9] Jeremy Dulout, Bruno Jammes, Lionel Segulier and Corinne Alonso, “Control and design of a hybrid energy storage system,” Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), 2015 17th European Conference on,pp.1-10.
- [10] Lin Feng, Jingning Zhang, Guojie Li and Bangling Zhang ,“Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power,” Protection and Control of Modern Power Systems ,2016, 1:11,pp.1-9.

- [11] Junyi Shen, “Energy management of a battery-ultracapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles,” DOI : 10.13016 / M28N5K,pp.1-173.
- [12] Ahmed T. Elsayed and Osama A. Mohammed ,“A Comparative Study on the Optimal Combination of Hybrid Energy Storage System for Ship Power Systems,” Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), 2015 IEEE,pp.140-144.
- [13] Cheng Song, Zhang Yingchao, Lu Jiabin, Zhan Tianwen, Li Long and Qian Xisen, “A ZVS Bidirectional Buck Converter Applied to Hybrid Energy Storage System,” Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014 IEEE Conference and Expo,pp.1-6.
- [14] Xiuqiong Huang, Xi Xiao, Ruoxing Ding, Kui Wang and Peigen Tian, “An Improved Power Sharing Strategy for Hybrid Energy Storage System,” Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014 IEEE Conference and Expo,pp1-5.
- [15] Hooman Samani and Xavier Fernando “Battery Current’s Fluctuations Removal in Hybrid .Energy Storage System Based on Optimized .Control of Supercapacitor Voltage,” IEEE Embedded systems letters, vol. 8, no. 3, September,2016,pp.53-56.
- [16] Wenlong Jing, Chean Hung Lai, Shung Hui Wallace Wong and Mou Ling Dennis Wong “Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: areview,” IET Renew. Power Gener,2017,Vol. 11,Iss.4,pp. 461-469.
- [17] Manuel Reyes, Oliver Martinez, Isaac Gil, Eugenio Domingez, Sergio Vazquezy, Kim McGrathz and Wolfgang Beezz, “Flexible and Cost Effective Hybrid Energy Storage System Based on Batteries and Ultracapacitors,” Industrial Technology (ICIT), 2015 IEEE

- International Conference on,pp.1013-1018.
- [18] Jiaqi Liang, Li Qi, John O Lindtjörn and Frank Wendt, “Frequency Dependent DC Voltage Droop Control for Hybrid Energy Storage in DC Microgrids,” 978-1-4673-8040-9/15/\$31.00 , 2015 IEEE, pp.1-5.
- [19] Rabiaa Mars, Badii Bouzidi and Abderrazak Yangui , “On the Comparison of Two Hybrid Energy Storage Systems: Parallel Connection of Battery-RC Ultracapacitor/- Multibranch Ultracapacitor Circuits,” 2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), pp.1-8.
- [20] Shili Lin, Wenji Song, Ling Luo, Jie Lv and Ziping Feng, “Research on the Capacity of Hybrid Energy Storage System and Its Control Method in Rail Transit Traction Grid,” 2015 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies, pp.103-106.
- [21] Hui Yang , Xiangdong, Sun Ya Zhang, Yang Fei Chen and Bi Ying Ren, “Study on coordinate control strategy for photovoltaic generation and hybrid energy storage system,” Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2016 IEEE 11th Conference on, pp.2339-2344.
- [22] Xudong Wang, Dongmin Yu, Simon Le Blond, Zhengming Zhao, Peter Wilson, “A novel controller of a battery-supercapacitor hybrid energy storagesystem for domestic applications,” Energy and Buildings 141 ,2017, pp.167–174.
- [23] Lee Wai Chong, Yee Wan Wong, Rajprasad Kumar Rajkumar and Dino Isa, “An optimal control strategy for standalone PV system with Battery- Supercapacitor Hybrid Energy Storage System,” Journal of Power Sources 331 ,2016, pp. 553-565.
- [24] Zineb Cabrane, Mohammed Ouassaid and Mohamed Maaroufi, “Analysis and evaluation of battery-supercapacitor hybrid energy

- storage system for photovoltaic installation,” international journal of hydrogen energy 41,2016,pp.20897-20907.
- [25] Bin Wang, Jun Xu, Zhen Yan, Binggang Cao and Qingxia Yang, “Duty-ratio based adaptive sliding-mode control method for boost converter in a hybrid energy storage system,” Energy Procedia 105 , 2017 , pp.2360–2365.
- [26] Wenlong Jing , Chean Hung Lai , Wallace S.H. Wong and M.L. Dennis Wong “Dynamic power allocation of battery-supercapacitor hybrid energystorage for standalone PV microgrid applications,” Sustainable Energy Technologies and Assessments 22 ,2017,pp.55–64.
- [27] QI Yan, QU Bo, YANG Jingjie, MU Yunfei and GUO Bingqing, “Frequency Control Strategy of Hybrid Energy Storage System for Microgrid Based on Frequency Hysteretic Loop,” Energy Procedia 103 , 2016 ,pp. 328 – 332.
- [28] Lee Wai Chong, Yee Wan Wong, Rajprasad Kumar Rajkumar and Dino Isa “Modelling and Simulation of Standalone PV Systems with Battery-supercapacitor .Hybrid Energy Storage System for a Rural Household,” Energy Procedia 107 , 2017,pp.232 – 236.
- [29] Ziyong Song , Heath Hofmann , Jianqiu Li , Xuebing Han and Minggao Ouyang “Optimization for a hybrid energy storage system in electric vehicles using dynamic programming approach,” Applied Energy 139,2015,pp. 151–162.
- [30] Caihui Zheng, Shaoyuan Wei, Zhanguo Wang, Sijia Liu and Ye Yuan, “Research and implementation on hybrid energy storage system experimental platform of rail transit,” Energy Procedia 105,2017,pp.3603-3608.
- [31] Jianwei Li , Rui Xiong , Qingqing Yang , Fei Liang , Min Zhang and

- Weijia Yuan “Design/test of a hybrid energy storage system for primary frequency control using a dynamic droop method in an isolated microgrid power system,” *Applied Energy* 201 ,2017,pp. 257–269.
- [32] Mohammad Eydi, Javad Farhang, Behzad Asaei and Reza Emamalipour, “Increasing the Battery Life of the PMSG Wind Turbine by Improving Power Division of the Hybrid Energy Storage System,” 7th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC 2016),pp.434-439.
- [33] B. Aluisio, M. Dicorato, G. Forte and M. Trovato, “Hybrid Energy Storage System Optimization for Improving Wind Power Integration,” Power Systems Computation Conference (PSCC), 2016,pp.1-6.
- [34] Fu, Q., Montoya, L.F., Solanki, A., et al.: “Microgrid generation capacity design with renewables and energy storage addressing power quality and surety,”, *IEEE Trans. Smart Grid*, 2012, 3, (4), pp. 2019–2027
- [35] Ahn, S.J., Park, J.W., Chung, I.Y., et al.: “Power-sharing method of multiple distributed generators considering control modes and configurations of a microgrid,”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2010, 25, (3), pp. 2007–2016
- [36] Chen, H., Cong, T.N., Yang, W., et al.: “Progress in electrical energy storage system: a critical review”, *Prog. Nat. Sci* (3), 19, 2009, pp. 291–312.
- [37] W. Jing, C. H. Lai, S. H. W. Wong and M. L. D. Wong,” Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: areview,” *IET Renew. Power Gener.*, Vol. 11 Iss. 4, 2017, pp. 461-469.

- [38] H. L. Willis ,W. G. Scott, “Distributed Power Generation Planning and Evaluation,” New York, NY, USA: Marcel Dekker, Inc., pp.141–144, 2000.
- [39] W. Xiaoyu, Y. Meng, E. Muljadi and G. Wenzhong, “Probabilistic approach for power capacity specification of wind energy storage systems,” IEEE Trans Industry Applications, vol.50, no.2, pp.1215-1224, March-April 2014.
- [40] A. ABBASSI, M.A. DAMI, M. JEMLI,”Statistical Characterization of Capacity of Hybrid Energy Storage System (HESS) to Assimilate the Fast PV-Wind Power Generation Fluctuations,” IEEE Conferences, Pages: 467 – 472, 2017
- [41] A. ABBASSI, M.A. DAMI, M. JEMLI, “A statistical approach for hybrid energy storage system sizing based on capacity distributions in an autonomous PV/Wind power generation system,” Renewable Energy 103 (2017), pp. 81-93, 2017.
- [42] P. Kayal, C.K. Chanda, “Optimal mix of solar and wind distributed generations considering performance improvement of electrical distribution network,” Renewable Energy 75 (2015), pp. 173-186,2015.
- [43] B. S. Borowy, Z. M. Salamah, “Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 11, no.2, pp. 367-375, 1996.