

行政院原子能委員會核能研究所
委託研究計畫研究報告

含綠能三相在線潮流分析之研究
Study of Three-Phase Flow Analysis Incorporating
Renewable Energy

計畫編號：109A009

受委託機關(構)：國立中正大學

計畫主持人：劉祐任

聯絡電話：05-5720411 Ext.33225

E-mail address：azenliu@ccu.edu.tw

核研所聯絡人員：姜政綸

報告日期：109 年 12 月 8 日

目 錄

目 錄.....	I
中文摘要.....	1
英文摘要.....	2
計畫參與人員與所屬單位	3
壹、計畫緣起與目的	4
一、計畫背景.....	4
二、計畫目的.....	6
三、計畫重要性.....	8
四、國內外文獻回顧.....	9
貳、研究方法與過程	11
一、系統架構與建模.....	11
(一) 單/三相太陽能發電系統模型	15
(二) 儲能系統模型	25
(三) 有載分接頭切換變壓器模型	32
(四) 單/三相負載模型	37
二、電壓與頻率控制策略	38
(一) 智慧型變流器(Smart Inverter, SI)電壓控制策略	40
(二) 有載分接頭切換(OLTC)變壓器電壓控制策略	43

(三) SI、ESS、OLTC 協調電壓控制策略	46
三、Real-Time 即時模擬技術應用	49
(一) 即時模擬軟、硬體架構	49
(二) 即時模擬技術工具	52
(三) 配電模型分核與平行運算	55
參、主要發現與結論	61
一、案例模擬 1:三相不平衡之潮流、電壓、電流案例分析	61
(一) Case1-1 三相負載不平衡潮流分析	61
(二) Case1-2 單/三相太陽能不平衡潮流分析	65
(三) Case1-3 三相不平衡電壓、電流 (含中性線)分析	69
二、案例模擬 2:電壓變化案例分析	74
(一) Case2-1 啟用 SI 與 OLTC 協調電壓控制	78
(二) Case2-2 啟用 SI、OLTC 與 ESS 協調電壓控制	82
四、結論與後續工作	86
肆、參考文獻	88

中文摘要

綠色/再生能源之技術應用近幾年已成為各國所重要發展之能源電網技術之一，當大量的再生能源併入配電系統後衍生之電壓變動問題將影響區域電網之供電穩定性與安全，此乃自然能之間歇特性導致再生能源發電設施之輸出電力產生變動以及系統中能源設施失衡的安裝設置所造成。常見的電壓變動影響有電壓升/降、電壓不平衡以及電壓閃爍現象等，其嚴重度亦受到併接於饋線上的再生能源安裝容量而有所異。本計畫以核研所示範微電網經配電饋線化後之配電微電網系統作為研究對象，進行配電系統潮流分析技術研究，主要內容包含(i)建立配電系統與相關關鍵能源設施建模技術，用於系統模擬與潮流分析；(ii) 以 MATLAB/Simulink 與 OPAL-RT 等軟/硬體環境作為基礎，建立配電微電網系統即時模擬環境，用於情境模擬測試與方法驗證；(iii)開發 OLTC、智慧變流器與儲能系統之電壓控制策略，用於配電系統電壓問題改善與抑制。

英文摘要

With a large amount of green/ renewable energies integrated into the electric distribution system it may cause various voltage problems, and then further affects the system stability and safety. This is due to the intermittent characteristics of natural energies which cause the output power variation on the renewable energy facilities and unbalanced installations of green/ renewable power generations. The most common seen voltage problems include voltage rise/fall, voltage imbalance, and voltage fluctuation, etc., and the severity is followed with the installation capacities of these green/renewable energies. Thus, to find the solutions for these voltage problems may take more concerned in recent years. This project aims to investigate the power flow analysis technology based on INER microgrid system that be formed as virtual distribution system. The main tasks of this work include (i) to establish the modelling technology of the distribution system and critical energy facilities in system for simulation and power flow analysis; (ii) to build real-time simulation environment of distribution system for scenario simulation test and method validation; (iii) to develop voltage control strategy that be applied to OLTC, smart converter and energy storage system for improvement and suppression of voltage problems.

計畫參與人員與所屬單位

劉祐任： 中正大學電機系 助理教授

楊世丞： 中正大學電機系 碩士生

歐士菖： 中正大學電機系 碩士生

劉偉名： 中正大學電機系 碩士生

孫培皓： 中正大學電機系 碩士生

李承侑： 中正大學電機系 碩士生

吳佳和： 中正大學電機系 碩士生

李政傑： 中正大學電機系 碩士生

葉秉勳： 中正大學電機系 碩士生

鄭圓馨： 中正大學電機系 碩士生

梁壹淞： 中正大學電機系 碩士生

壹、計畫緣起與目的

一、計畫背景

在過去，傳統燃料性發電設施，如大型火力發電廠，一直是國內主要仰賴的電力發電來源。而伴隨國家之經濟成長與工業迅速發展，在工業或民生等領域中上對於電力之需求也越顯增高；於是乎，電力公司經常必須透過提高傳統燃料性發電量來滿足這些增加之用電需求。傳統的燃料性發電，在電力產生後將產生排放物，其恐影響環境與更加劇溫室效應惡化，在現今環保意識受到各界所重視之情況下，傳統燃料性發電正逐漸被具有低/零排放與可再生特點之再生能源所取代。當中，太陽能(Photovoltaic, PV)發電是具有較高技術成熟度之再生能源之一，其憑藉自然太陽光能對太陽能模組進行照射，再透過電能轉換與控制之操作後來獲得可用之電能。由於太陽光日照容易獲得、系統低運轉成本、具低污染的電能轉換過程以及受惠於國家政策與獎勵之支持等之優點，讓太陽能發電在國內未來電力系統規劃中，將於能源供給以及參與系統服務之任務上扮演重要角色。

再生能源設施之發電具有易受季節氣候影響之間歇特性，例如太陽能發電之輸出會受日照變化影響，使得由太陽能發電產生之電

能在遇到劇變天氣時會具有較高之變動性。當於既設配電系統饋線併入一定規模之太陽能發電時，將衍生出不同形式之系統衝擊以及影響系統規劃問題。例如，在系統末端饋線上安裝大量屋頂型太陽能發電設施，造成饋線末端出現電壓變動，嚴重時將產生逆送電流回流至上游饋線，進一步造成線路損失和變電站設施損害。間歇太陽能發電輸出，使太陽能電能具有不穩定及不易預測之特性，使得影響系統之穩定度以及發電機組之排程和調度運轉模式。當系統發生故障時，饋線故障電流將較以往未含太陽能發電設施時之系統出現多樣變化，其將影響保護裝置之動作與設定，在失準的保護協調機制下，恐讓系統的可靠度與安全受到考驗。饋線中，太陽能發電設施除三相系統設計之外，尚有許多群集式的單相系統，散佈於饋線任何位置，在單三相設施交互運轉下，其可能造成系統之不平衡問題加劇。綜觀以上問題，在既設系統饋線併入大量太陽能或其他再生能源時，其讓系統之運轉更加敏感地受到各式衝擊影響；同時，在單三相發電系統交錯運轉之效應下，讓不平衡之運轉特性連到影響到傳統系統潮流之分析方法。有鑒於此，在當下電力公司之配電系統面臨大量再生能源安裝規劃時，應及早尋求能有效抑制各種系統衝擊之策略以及進階之系統轉分析方式。

二、計畫目的

當高占比再生能源整合至電力系統時，所引發之饋線電壓變動一直是相當常見之問題，而尋求適當的改善措施與技術來維持系統之電壓穩定也一直是系統運轉人員所致力之工作。近年來，除傳統安裝固定式切換電容器組與調整變電站內之電壓器分接頭之方式之外，對於含有再生能源之配電系統另一較常採用之饋線電壓控制方法，乃利用再生能源內之變流器裝置所提供之虛功控制來控制併接點上之電壓。而許多變流器之虛功控制主要係以維持單位功因或以固定虛功率設定作為虛功控制目標。然而，實際併接點上的電壓控制能力會受限於所使用變流器的額定視在功率，此可根據變流器之能力曲線決定。某些情況下，為能在超出額定實功率範圍下進行電壓控制，變流器可使用過容量(Over Capacity)運轉方式[1]。面對配電系統中裝設之再生能源安裝容量急遽增加，上述傳統變流器之功率調整功能已無法應付各種因發電或負載變動所帶來之電壓控制需求，使得現行許多配電系統運轉饋線仍會利用安裝在饋線上之其他電壓調整設備或虛功補償裝置，來進行含有再生能源設施時之饋線電壓調整作業，例如使用變壓器有載分接頭切換(On Load Tap Changer, OLTC)等。然而傳統的饋線電壓控制方式通常不具有協調

功能，因此遇到大量再生能源併網時，設備的作動將接連受到影響。例如，當出現逆送電力潮流運轉狀況時，再生能源所產生之電能會逆流回到變電站端，此時將迫使 OLTC 之電壓調整器操作於逆向模式，而由於變電站端之電壓通常高於下游再生能源端，使得 OLTC 必須增加其二次側分接頭數量或切換次數來維持電壓穩定，此舉也連帶造成設備運轉維護之負擔。因此，對傳統電壓控制設備提出具協調控制之策略方法或採用其他先進的饋線控技術，是目前配電系統規劃研究上之趨勢。

目前有許多和再生能源用變流器相關國際標準之制訂，開始對變流器之功能進行要求，例如 California Rule 21 規定[2]、IEEE 1547 系列標準[3]與 UL 1741-SA 標準[4]等，使得傳統變流器裝置得以演變成智慧變流器，並提供諸如饋線電壓控制等更多電網控制功能。除此之外，儲能系統之應用亦是另一項重要之電網技術發展，憑藉其充放電控制設計，同樣可達到參與電網控制與服務之能力。綜合上述，為有效分析配電系統整合諸如太陽能發電之再生能源後，所衍生之系統電壓衝擊問題，以及提出適用之改善對策，本計畫係以核能研究所之微電網場域經配電饋線化後的系統作為研究對象，探討配電系統加入太陽能運轉後潮流與饋線電壓變動之影響，以及研

析包含透過變壓器有載分接頭切換(On load Tap Changer, OLTC)、智慧型變流器(Smart Inverter, SI)控制以及儲能系統運轉來進行電壓問題改善與抑制之作法。最後利用在即時模擬環境下之測試，分析系統電壓問題以及驗證所提出之協調式電壓控制策略之有效性。

三、計畫重要性

太陽能發電成為現今最為快速增長的再生能源項目之一，且為各國家所重視發展。隨著太陽能發電之裝置容量逐漸增加並併入饋線中，潛在的穩定度問題和電力品質危害讓未來配電系統運轉規劃充滿著挑戰。但受惠於再生能源併網規範及各式新能源技術被逐漸引入電網系統，搭配既有發電設施的傳統排程/調度方法與對負載進行需求管理，舒緩了系統運轉之面臨問題。而太陽能等之再生能源發電之安裝占比將持續提高，如何能在安全與穩定之運轉考量下，來增加系統饋線的太陽能發電承載容量會是配電系統管理者追求之目標，而如何有效評估大量再生能源併網對系統造成之衝擊，以及預先規劃好相關改善抑制策略，將是達到此項目標前之重要預先評估課題。而為實現此項評估，開發適當的潮流分析方法、建構合宜之系統/組件模型以及提出有效之協調控制策略將會是必要之任務。

四、國內外文獻回顧

本計畫主要針對含再生能源之配電系統電壓控制技術以及即時模擬技術之應用進行回顧。傳統配電饋線中，影響虛功率變化的不確定因素大多數是因為負載波動所造成。然而，隨著再生能源併入系統後，再生能源發電機組的輸出功率受氣候和地域等因素的影響很大，使得配電饋線中的不確定因素增多，而相較於一般負載變化，再生能源發電系統輸出功率變化更是頻繁，使得含有大規模且具高占比再生能源併入的配電饋線其電壓控制問題變得更為複雜。而為提升安裝有太陽能發電之饋線的承載容量(Hosting Capacity)，許多電壓調節、控制與改善之方法被提出利用，文獻[5]中分析當再生能源參與配電系統自動調壓時，有可能會造成部分配電變壓器上的 OLTC 調控不穩定，因此需要對再生能源和 OLTC 變壓器進行協調控制。文獻[6]提出透過儲能系統解決具高滲透率屋頂型太陽能發電之低壓分散式網路電壓變動問題，當太陽能發電達到尖峰時利用儲能系統儲存能量以調降電壓，而儲存的能量用於提供尖峰負載所需功率。文獻[7]提出一種結合有載分接頭變壓器(OLTC)、步階電壓調整器(SVR)與分散式儲能系統之協調控制策略，以解決低壓配電網因太陽能發電的高滲透率導致電壓上升的問題，該協調控制之目的於

減輕 OLTC 的工作壓力、降低配電網路的尖峰負載並減少在輸配電線路上的功率損耗，透過提出的控制策略可限制儲能裝置的放電深度，藉此使裝置的循環壽命能夠超過十年。

在即時模擬技術方面，電力系統即時模擬技術從早期多應用在電力品質問題研究與電力電子或馬達驅動裝置之設計，到現行將近 10 年的蓬勃發展時間，技術應用趨勢已逐漸朝向先進電網技術發展，其大致可分為幾項研究領域：

- (1) 開發成大型電網模擬器規模，用於再生能源系統之設備測試與併網功能驗證；
- (2) 用於整合再生能源與電網系統之運轉控制與能源管理技術開發；
- (3) 應用在先進電網系統的安全與保護設計；
- (4) 應用於再生能源整合電力系統之穩定度與電力品質分析探討；
- (5) 作為國際標準與電網法規制訂與測試平台建置之基礎等。

國內之研究中，目前僅有部分學研單位有將即時模擬技術導入電力與能源工程應用。當中，本單位過去曾將即時模擬投入在工業電力系統電力品質問題探討與微電網系統技術開發上[8]-[10]。國內其他學術單位，從事即時模擬研究的尚包含有清華大學應用於微電

網與其介面電能轉換器之垂降控制(Droop Control)設計研究等[11]，中原大學應用於微電網運轉與保護設計等[12]，聯合大學則應用於保護電驛系統設計等[13]。研究單位部分，則有台電綜合研究所致力於利用 RTDS 即時模擬技術進行台電系統之保護協調設計與事故分析等研究[14]，以及核能研究所曾應用於微電網運轉規劃等工作[15]。

貳、研究方法與過程

一、系統架構與建模

核能研究所(Institute of Nuclear Energy Research, INER)先期投入微電網、再生能源建置與研發，於 2010 年完成國內首座「百瓩級自主式(Autonomous)微電網試驗場」的建置[16]，於 2014 年實際併接台電龍潭 OQ38 高壓饋線，可於 20 公里外接受台電區處調度指令，進行微電網負載需量卸載、解聯與併聯，以及完成配電層級儲能系統的平滑控制、穩壓調控及調頻功能開發及實測，於 2015 年完成連續 100 小時孤島運轉測試，與台電解聯並透過微電網電能管理系統的排程與運轉控制技術可保持長時間孤島運轉，於 2018 年完成保護技術開發，偵測與隔離微電網外部故障，並使微電網轉為孤島運轉與低頻卸載，而現階段將應用微電網技術及整合本土產業技術，於 2019 年開發「先進配電管理系統 (ADMS) 關鍵技術」，開

發微電網與配電網功率調節系統之協調控制技術以及即時調度技術，以提升協助配電系統之微電網與再生能源的即時調度能力[17]。圖 1 為核能研究所微電網發電設備總額定共 470 kW，其中包含 100 kW 太陽能發電系統、150 kW 與 25 kW 風力發電系統、100 kVA 與 250 kVA 儲能系統、三組 65 kW 微型渦輪發電機、200 kW 柴油發電機以及一組電動車充電樁[18]。

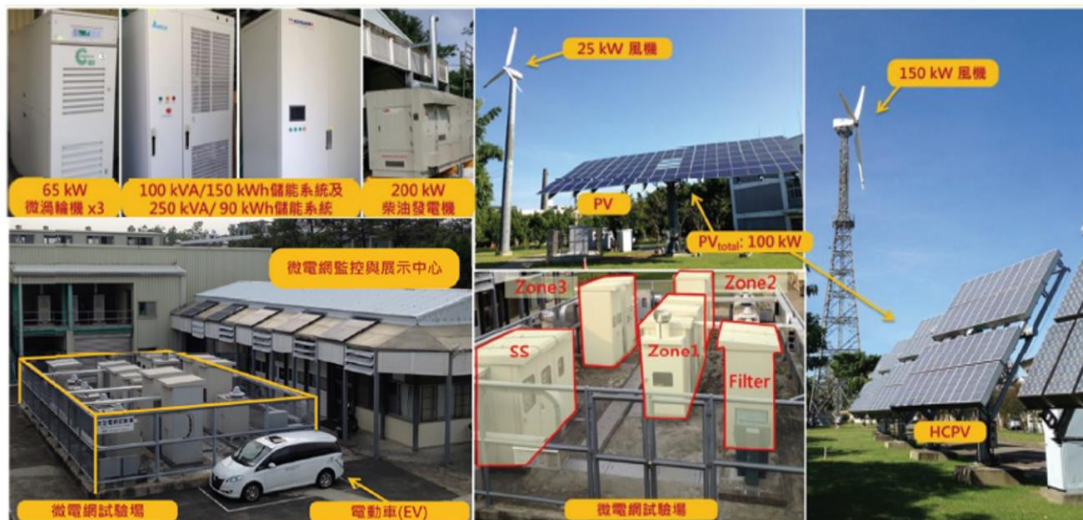


圖 1:核能研究所微電網場域實景圖

本計畫主要研究具高占比太陽能之配電微電網系統，並以核能研究所朝向配電饋線化設計之既有交流微電網作為系統架構基礎如圖 2 所示。

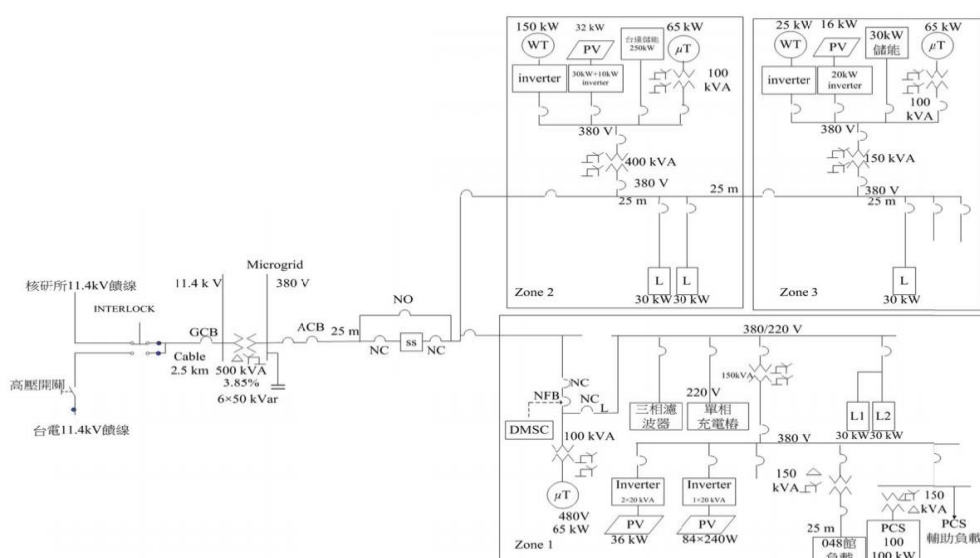


圖 2:核能研究所微電網單線圖

而本研究著重探討太陽能系統併入系統對系統所造成的影響，其系統架構中風力發電系統、微型發電機、柴油發電機與電動車充電樁則不納入本研究考量，經由調整架構後本計畫研究之系統架構如圖 3 所示，所研究系統經由市電網 11.4 kV 連接 11.4kV/380V 三相變壓器後與微電網系統連接，其責任分界點(Point of Common Coupling, PCC)位於三相變壓器之後，表 1 為系統中主要設備包括既設與模擬增設之相關參數，系統中包含 141.6 kW 太陽能發電系統(由 19.6 kW、20 kW、36 kW、66kW 所組成)、兩組 250 kVA 儲能系統、具有載分接頭切換之變壓器、變動三相負載、變動單相負載、能源管理系統(Energy Management System, EMS)與饋線末端資訊設

備(Feeder Terminal Unit, FTU)等。圖 3 中橘色虛線代表設備之間通訊路線，FTU 可將量測資訊、系統狀態經由通訊傳輸回傳至 EMS 主控中心，而 EMS 主控中心可經由當前系統狀態更改控制策略、發出調度與管理命令。整體系統於本計畫中以 MATLAB/Simulink 進行建模並搭配使用 OPAL-RT 進行即時模擬，用以加速模擬速度並觀察、分析系統的穩態及動態響應。以下將針對所研究系統中關鍵組件使用之建模技術進行說明。

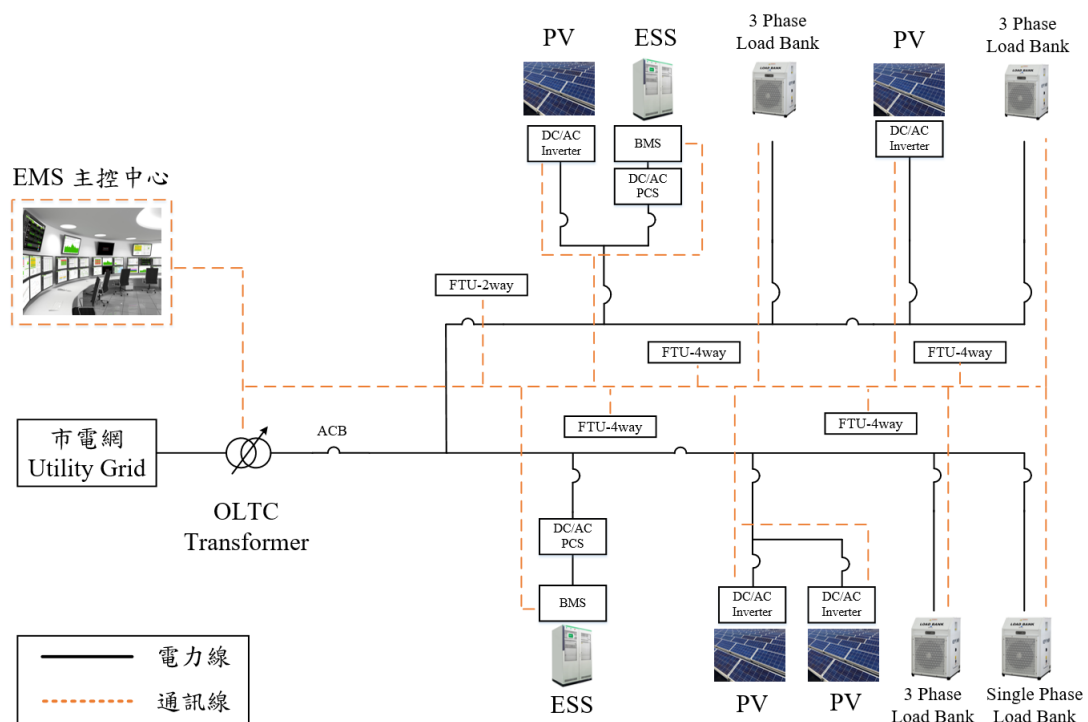


圖 3:本計畫採用微電網系統架構圖

表 1:本計畫採用微電網系統設備額定容量與負載需求

系統設備額定容量與負載需求			
能源	類別	組數	總計
	PV	4 組	總額定 141.6 kW
	ESS	2 組	總額定 500 kVA
負載	三相負載	3 組	30-80 kW (依時間變化)
	單相負載	1 組	5-18kW (依時間變化)

(一) 單/三相太陽能發電系統模型

太陽能發電系統併網型架構可分為兩種，分別為單級式併網架構與雙級式併網架構，單級式架構雖然組成架構較簡單，但使用組合彈性較低，而雙級式架構具有前級直流轉換器，太陽能陣列電壓可經由直流轉換器升、降壓，後級交流變流器前端直流鏈電壓具有較高穩定度，且太陽能陣列組合彈性也較大，而本計畫中太陽能發電系統模型使用雙級式併網型架構進行建模。

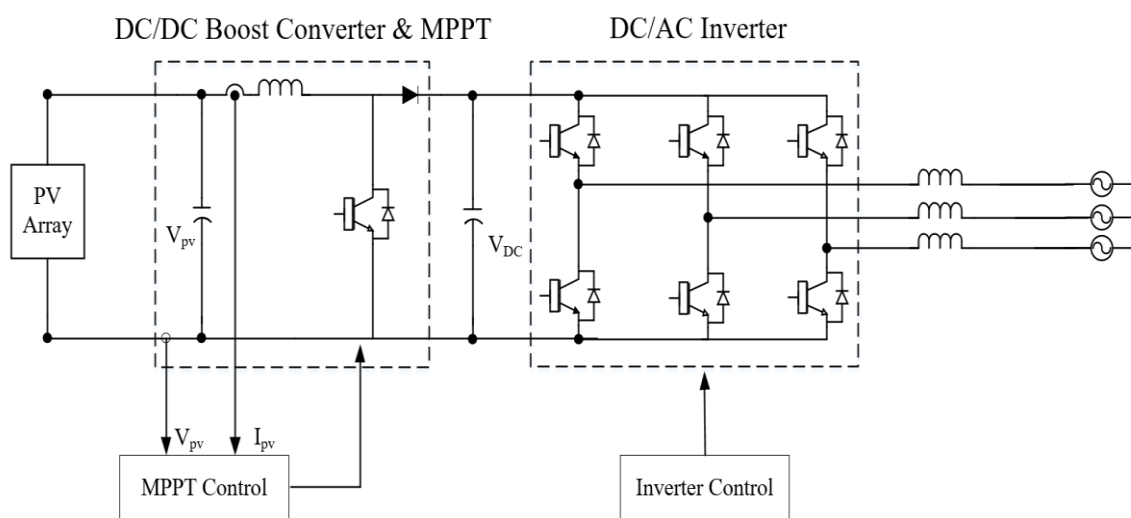


圖 4:太陽能發電系統併網型雙級式架構

1. 單相/三相太陽能模組

本計畫使用於微電網系統中所應用於單相、三相太陽能發電系統的太陽能模組(PV module)參數設定皆使用表 2 之太陽能模組參數規格。其中單片模組由 60 個多晶矽太陽能電池(PV cell)所組成，最大功率輸出電壓、最大功率輸出電流分別為 30.35 V 與 7.91 A，其單片所輸出功率為 240 W，而太陽能陣列(PV array)則是由多組太陽能模組串、並聯所組成，以獲取更高輸出功率，其中單相太陽能發電系統中太陽能陣列連接直流轉換器、交流變流器、變壓器併入系統，而三相太陽能發電系統中由太陽能陣列與直流轉換器、交流變流器組成，由變流器轉至交流後併入系統。

表 2:太陽能模組參數規格

太陽能模組參數	
最大額定輸出功率	240 Wp
太陽能電池(PV cell)	60 個
最大功率輸出電壓(V_{pm})	30.35 V
最大功率輸出電流(I_{pm})	7.91 A
開路電壓(V_{oc})	37.83 V
短路電流(I_{sc})	8.38 A
溫度係數(I_{sc})	0.046 % /°C
溫度係數(V_{oc})	-0.313 % /°C
溫度係數(P_{max})	-0.042 % /°C
模組效率	14.7 %

本模擬中透過相關文獻中所述之單二極體等效電路模型進行太陽能模組特性之模擬，其中太陽能模組發電效率受到其元件中之串聯電阻 R_s 、並聯電阻 R_{sh} 以及外在環境的照度和溫度等因素影響。圖 5 為太陽能模組等效電路模型，其太陽能模組所輸出電流 i 可由式(1)所表示。

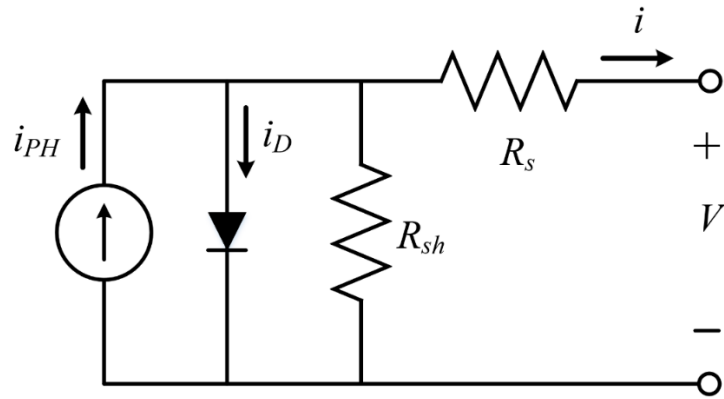


圖 5:太陽能模組單二極體等效模型

$$i = i_{PH} - I_D \left[\exp \left(\frac{q(V + iR_s)}{kAT} \right) - 1 \right] - \frac{V + iR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

參數名詞如下表示:

i :太陽能模組輸出電流(A)

V :太陽能模組輸出電壓(V)

R_{sh} :光電模組並聯阻抗(Ω)

R_s :光電模組串聯阻抗(Ω)

i_{PH} :光電流(A)

I_D :二極體飽和電流(A)

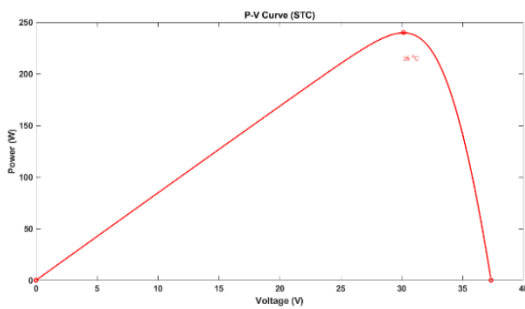
q :電子電荷量($1.6 \times 10^{-19} C$)

k :波茲曼常數($1.38 \times 10^{-23} J/^{\circ}K$)

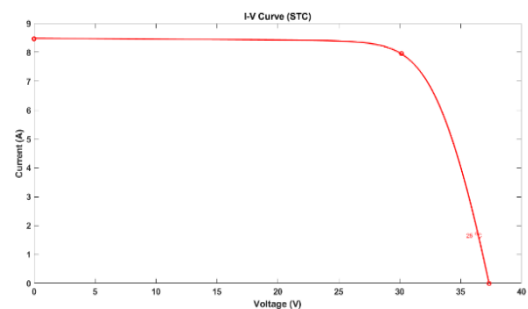
T :絕對溫度($^{\circ}K$)

A :光電電池理想因子($A = 1 \sim 1.5$)

標準測試條件(Standard Test Conditions, STC)，為太陽能模組可靠度檢測驗證，其太陽能模組測試條件溫度需保持為 25°C、太陽光之日照度為 1000 W/m²、大氣質量(Air Mass, AM)定義為光線通過大氣距離比上大氣的厚度，測試條件需為 AM1.5，依據標準測試條件於所建立之太陽能模型進行模擬，其特性曲線模擬結果如圖 6 所示。太陽能模型於標準測試條件下之最大功率點電壓、電流、輸出功率與參數規格所標示工作點進行比較，所建立之太陽能模型誤差值皆於可接受範圍，表 3 為模型與規格輸出參數比較。



(a)功率-電壓特性曲線



(b)電流-電壓特性曲線

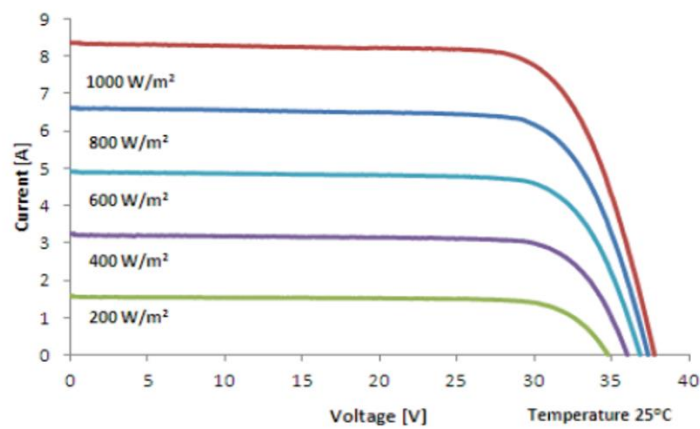
圖 6: 太陽能模型之特性曲線(STC)模擬

表 3: 參數規格與模型測試比較

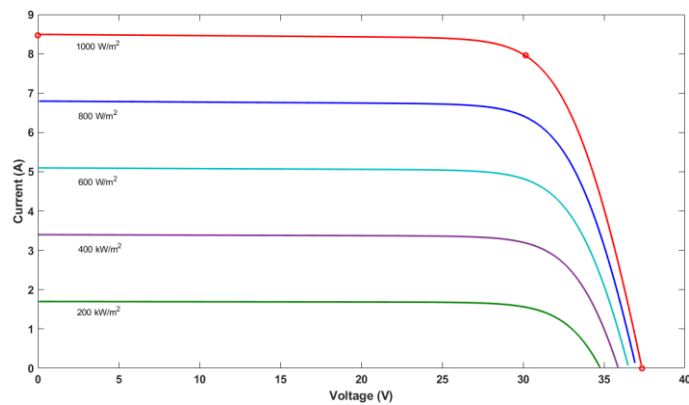
參數名稱	參數規格	模型測試
最大功率點電壓(V_{mp})	30.35 V	30.16 V
最大功率點電流(I_{mp})	7.91 A	7.96 A
最大輸出功率(P_{max})	240 W	240.1 W

使用參數規格所標示之參數進行建模，將所建模之太陽能模組與參數規格提供之數據及 I-V 特性曲線進行比較，可得知模擬測試之太陽能模型與參數規格所提供之數據相差甚小，其 I-V 特性曲線測試結果如圖 7 所示。

Dependence on Irradiance



(a) 參數規格



(b) 模型測試

圖 7: 特性曲線比較

2. 最大功率追蹤法

太陽能模組在對應的溫度、照度下僅有一處為最大功率輸出，該處即為最大功率點，太陽能模組於不同溫度、照度條件下會相對應有不同最大功率點如圖 8、圖 9，為了提高太陽能發電系統之發電效率，使其能保持在最適應工作點位置，因此需要藉由最大功率點追蹤法以追蹤不同溫度與日照條件下的最大功率點，而最大功率追蹤法較為常見有幾種控制方法:恆電壓追蹤法、增量電導法、擾動觀察法。

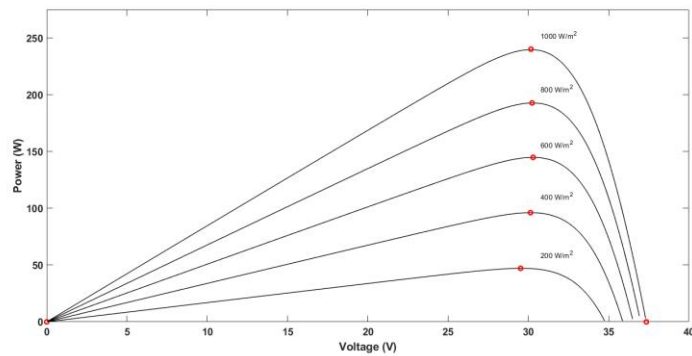


圖 8:不同日照、相同溫度情境下之最大功率點

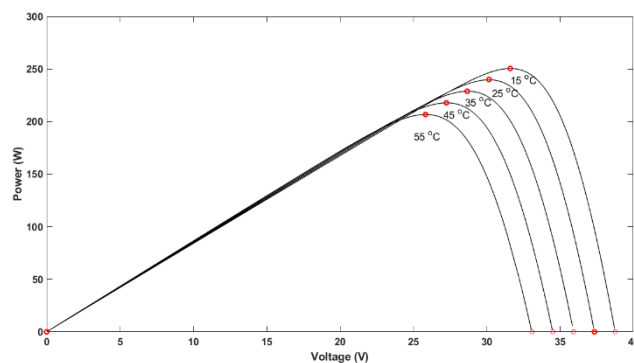


圖 9:不同溫度、相同日照情境下之最大功率點

計畫中太陽能發電系統採用最大功率追蹤法為擾動觀察法[19]，週期性的給予輸出電壓擾動，並觀察輸出電壓對於功率變動量影響作為控制法調整依據，其動作示意圖與流程圖如圖 10、圖 11 所示。

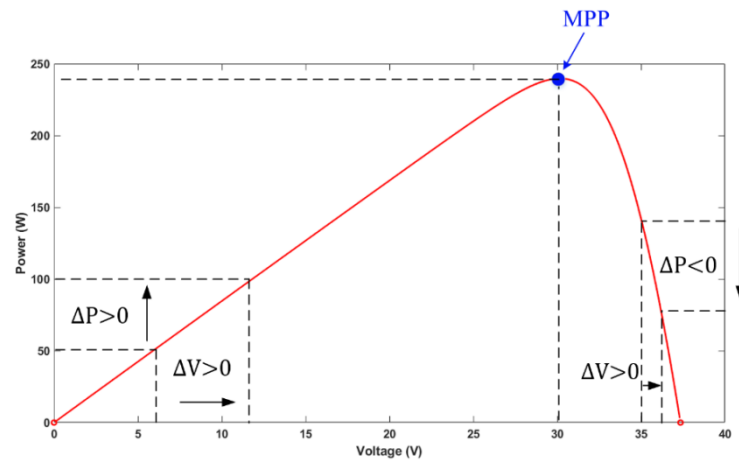


圖 10: 擾動觀察法動作示意圖

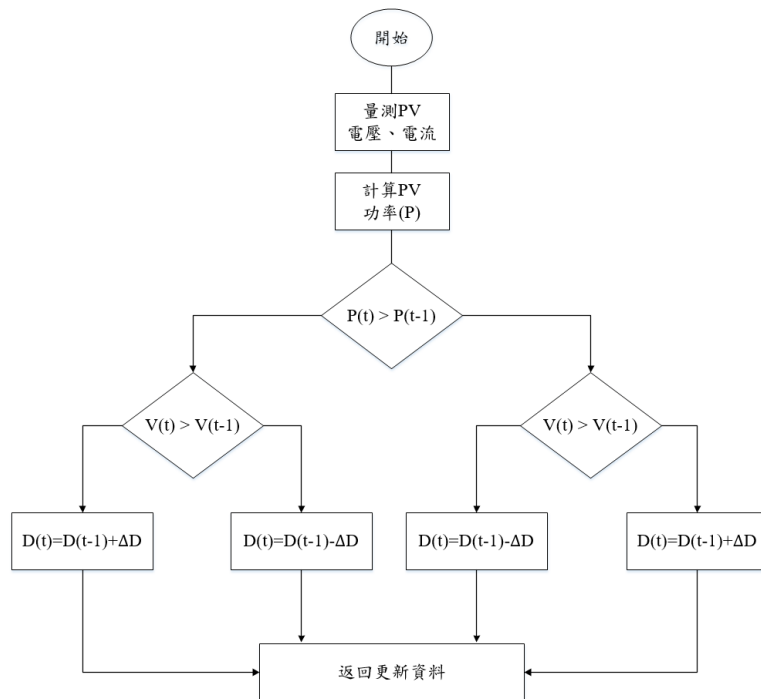


圖 11: 擾動觀察法流程圖

3. 併網變流器控制策略

圖 12 為併網太陽能發電系統之架構，本計畫併網太陽能發電系統採用雙級式架構，由直流轉換器搭配最大功率控制法作為前級控制，而後級控制則由交流變流器負責直流鏈電壓穩定與實、虛功率的控制。

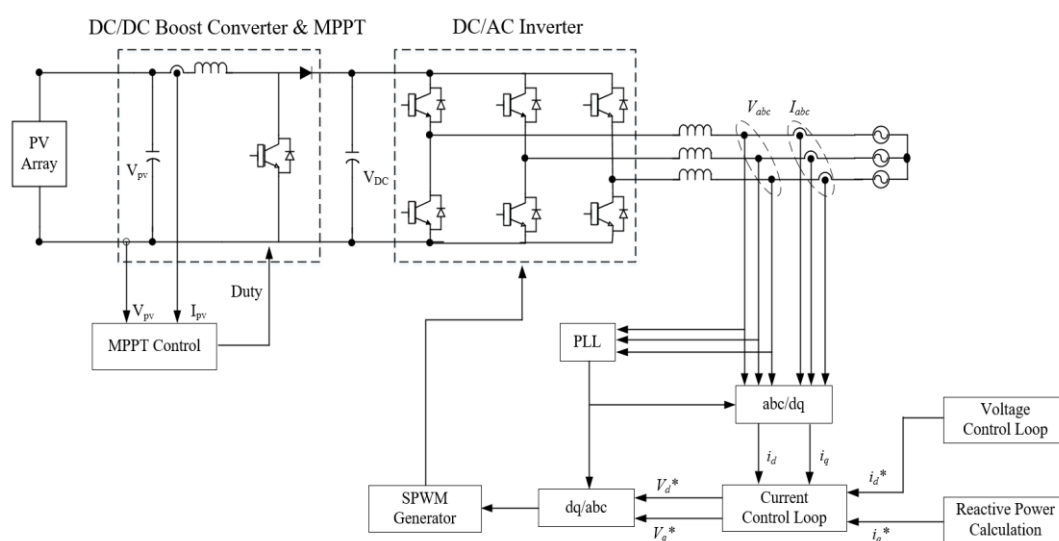


圖 12: 太陽能發電系統架構

以太陽能併網變流器較為常見使用的控制方法為電壓電流雙環控制策略[20]，其構造簡單、實現容易，圖 13 為雙環控制架構，其中電壓外環作為直流鏈電壓穩定控制，電壓外環比較所輸出之值作為參考電流 i_d^* ，電流內環則以電壓外環輸出之參考電流 i_d^* 以及虛功控制策略輸出之參考電流 i_q^* 與電網側所採樣之電流 i_d 、 i_q 進行比較，而其輸出值經由 PI 調節器控制，並經由同步參考軸鎖相迴路

(Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop, SRF-PLL) 使得變流器輸出的相位與市電網可以保持同相位以實現併網運轉下控制，最後可得參考電壓 $V_{inv_d}^*$ 、 $V_{inv_q}^*$ ，太陽能變流器則依據參考電壓作為開關調節之訊號。

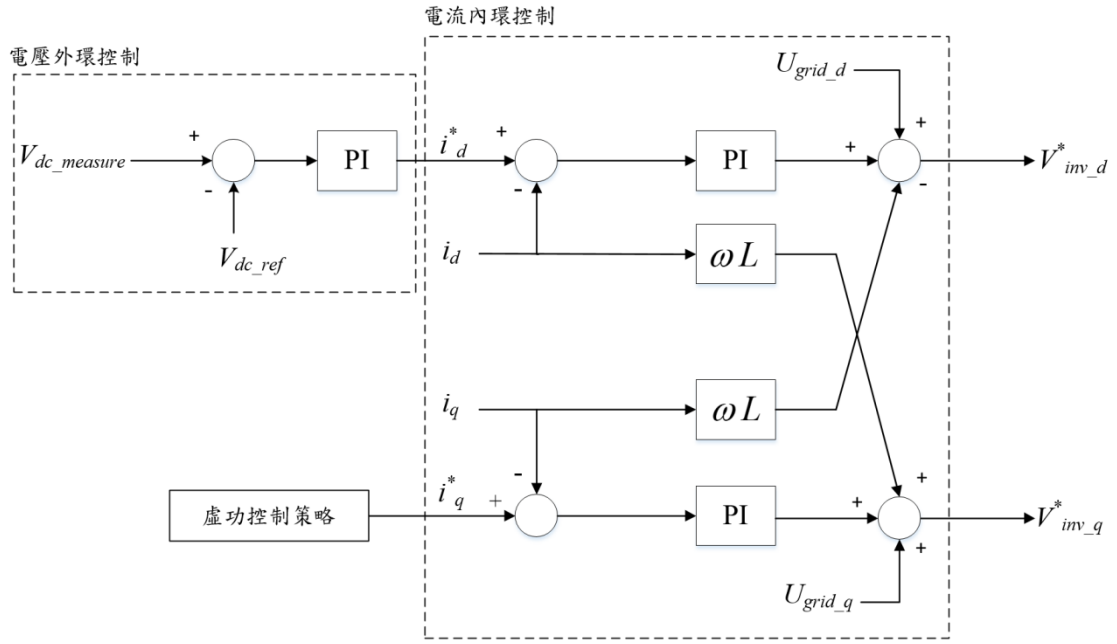


圖 13:雙環控制架構

在雙環控制中，參考電壓控制訊號 $V_{inv_d}^*$ 、 $V_{inv_q}^*$ 於 dq 座標軸電流分量會受到開關變量以及交叉耦合量影響。可表示成式(2)和式(3)

$$V_{inv_d}^* = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_d^* - i_d) - \omega L i_q + U_{grid_d} \quad (2)$$

$$V_{inv_q}^* = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_q^* - i_q) + \omega L i_d + U_{grid_q} \quad (3)$$

(二) 儲能系統模型

儲能系統可依據其使用技術、能源的方式進行分類，主要有電化學、化學、機械、儲熱、混合儲能系統類型，其分類類型可細分更多種類，可根據使用組成架構、使用材料進行區分[21]。而本計畫使用之儲能系統為電化學儲能系統分類中電池儲能系統。

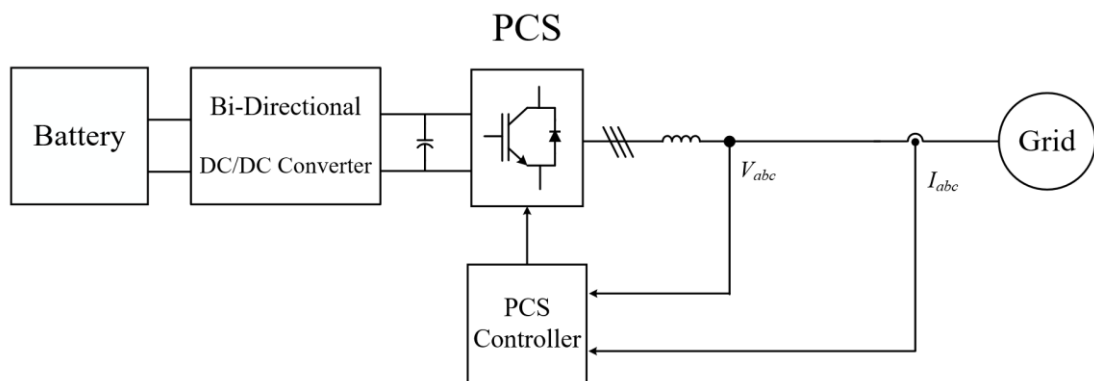


圖 14:電池儲能系統架構

1. 儲能電池模型

儲能電池可依據其組成類型不同有著各種形式，例如鎳氫電池、鋰離子電池、鈉硫電池與鉛酸電池，而各類型電池皆有其優、缺點之特性，使用者可依據其特性選擇適合於系統之電池儲能系統。建立儲能電池模型主要有三種類型，分別為實驗型、電子電路型與電化學型模型，實驗型與電化學型模型不適合呈現於電池充電狀態下估測元件響應，而電子電路型模型對於電池呈現電子狀態反

應則是相當合適，而 Shepherd 所建立出方程式依據電池端電壓、開路電壓、內阻與放電電流描述電池之電化學反應特性[22]，而本計畫採用鋰離子電池儲能系統，其鋰離子電池模型中充/放電電壓方程式可由式(4)、(5)表示，圖 15 為儲能電池之基本特性，圖 16 為儲能電池之等效模型。

放電模式($i^* > 0$)

$$V_{oc} = E_0 - K \frac{Q}{0.1Q + it} \cdot it - K \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - R \cdot t + A \exp(-B \cdot it) \quad (4)$$

充電模式($i^* < 0$)

$$V_{oc} = E_0 - K \frac{Q}{0.1Q + it} \cdot it - K \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - R \cdot t + A \exp(-B \cdot it) \quad (5)$$

其中參數名詞:

V_{oc} : 開路電壓

E_0 : 電池電壓

K : 極化常數(V/Ah)或極化阻抗(Ω)

Q : 電池電容大小(Ah)

$it = \int i dt$: 實際電池充電電流(Ah)

A : 指數區振幅(V)

B : 指數容量(Ah)⁻¹

R : 內阻(Ω)

i : 電池電流(A)

i^* : 動態低頻電流(A)

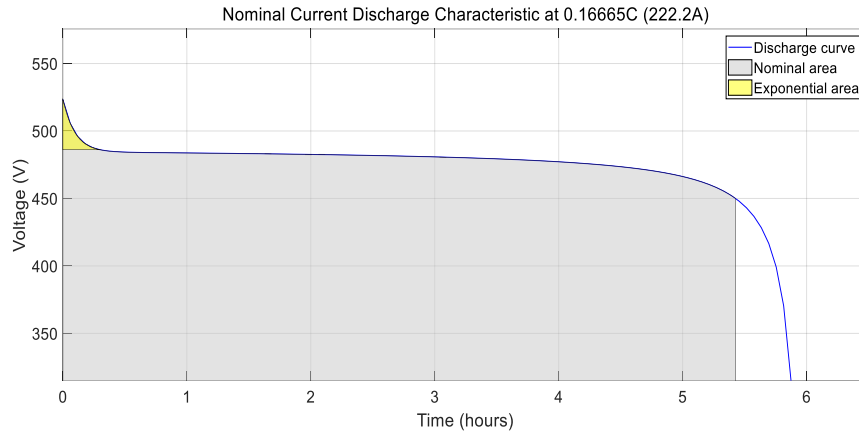


圖 15:儲能電池基本特性

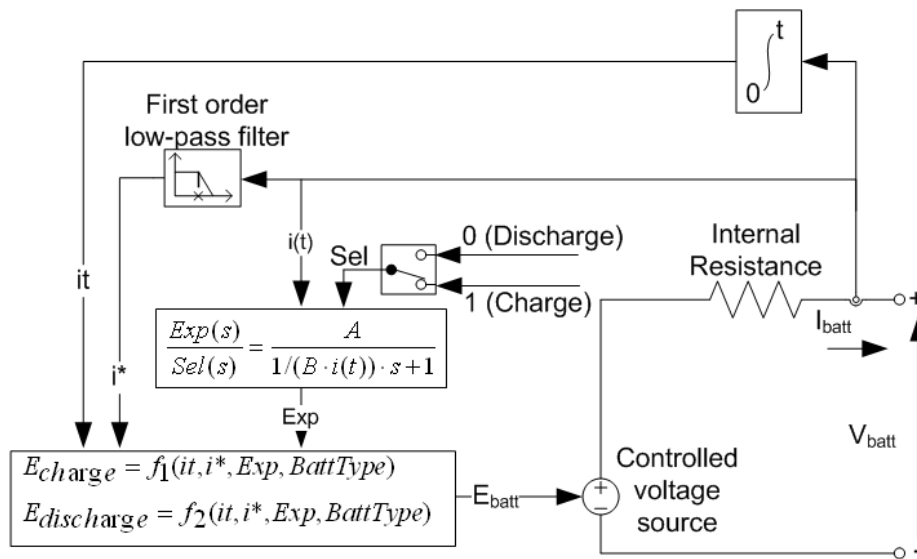


圖 16:儲能電池等效模型

2. 雙向直流轉換器

雙向直流轉換器位於儲能系統 PCS 和電池組之間，主要負責控制、穩定直流鏈電壓[23]，其架構如圖 17，而儲能電池充放電的操

作模式，當電池進行放電時雙向直流轉換器操作於升壓模式以符合 PCS 工作電壓區間，反之進行充電時則操作於降壓模式，降壓至電池工作電壓區間，而雙向直流轉換器控制方法採用雙迴路控制法，由外部電壓迴路控制以及內部電流迴路所組成，當直流鏈電壓低於參考電壓時開關 S_2 導通，而當直流鏈電高於參考電壓時開關 S_1 導通，透過此方式調整升/降壓轉換過程，而圖 18 為直流轉換器控制方塊圖。

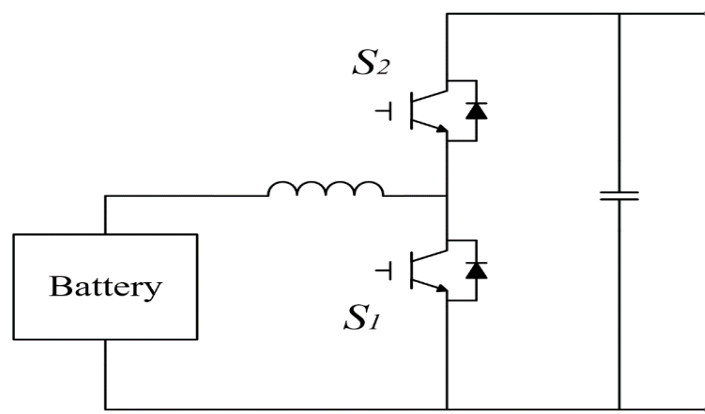


圖 17: 雙向直流轉換器架構圖

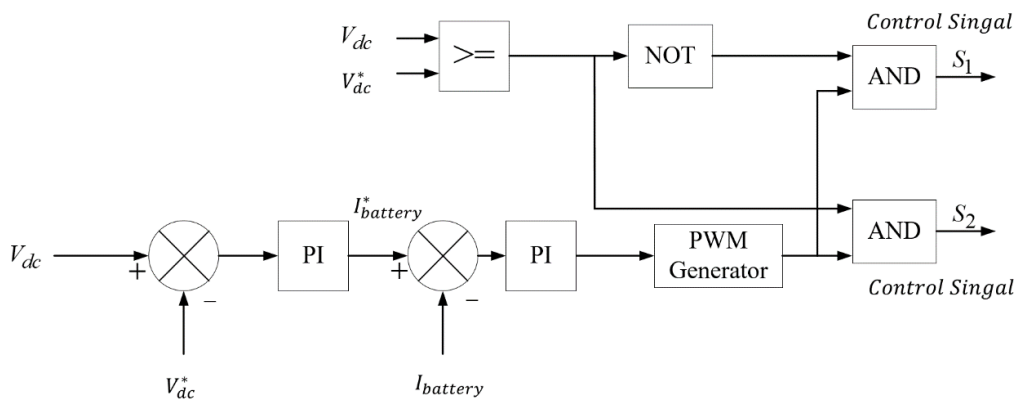


圖 18: 直流轉換器控制方塊圖

3. 併網控制策略

實/虛功控制(P/Q Control)為儲能系統常見的控制方法，P/Q Control 通常用於實現變流器之併網控制，其主要目的使設備按照預定功率設定下輸出，在 P/Q Control 中主要利用交直軸轉換，並透過同步參考軸鎖相迴路(SRF-PLL)確保變流器輸出的相位與電網保持同相，藉此達到 PCS 輸出實/虛功控制之目的，併網模式控制架構如圖 19 所示。

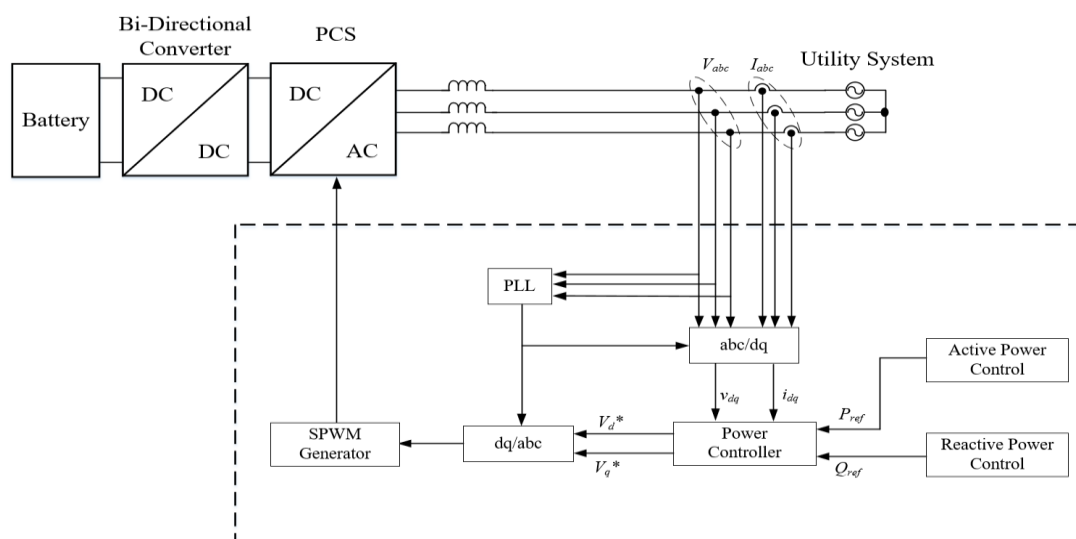


圖 19: 儲能系統併網控制架構

P/Q Control 中，實虛功率經由 dq 軸轉換後可分別表示為式(6)、式(7)，經由同步參考軸鎖相迴路轉換可簡化成式(8)、式(9)。圖 20 為 P/Q Control 電流環架構，儲能變流器則依據參考電壓 $V_{inv_d}^*$ 、 $V_{inv_q}^*$ 作為開關調節訊號。

$$P = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (6)$$

$$Q = \frac{3}{2} (v_q i_d - v_d i_q) \quad (7)$$

$$i_d^* = \frac{2}{3} \frac{P}{v_d} \quad (8)$$

$$i_q^* = -\frac{2}{3} \frac{Q}{v_d} \quad (9)$$

其中參數名詞：

v_d : 實際 d 軸電壓值

v_q : 實際 q 軸電壓值

i_d : 實際 d 軸電流值

i_q : 實際 q 軸電流值

i_d^* : 參考 d 軸電流值

i_q^* : 參考 q 軸電流值

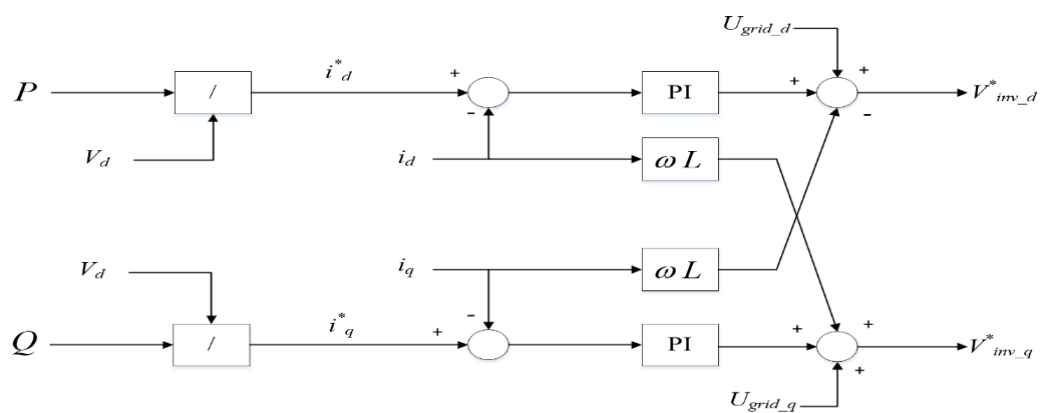


圖 20: 實/虛功控制電流環架構

成立時，判斷 SOC 容量是否足夠啟動充電模式，充電模式將 PV 所產生過多逆送功率部分功率移轉至儲能系統，輔助市電所輸出功率並同時可達到減緩太陽能併網導致饋線電壓上升情境。

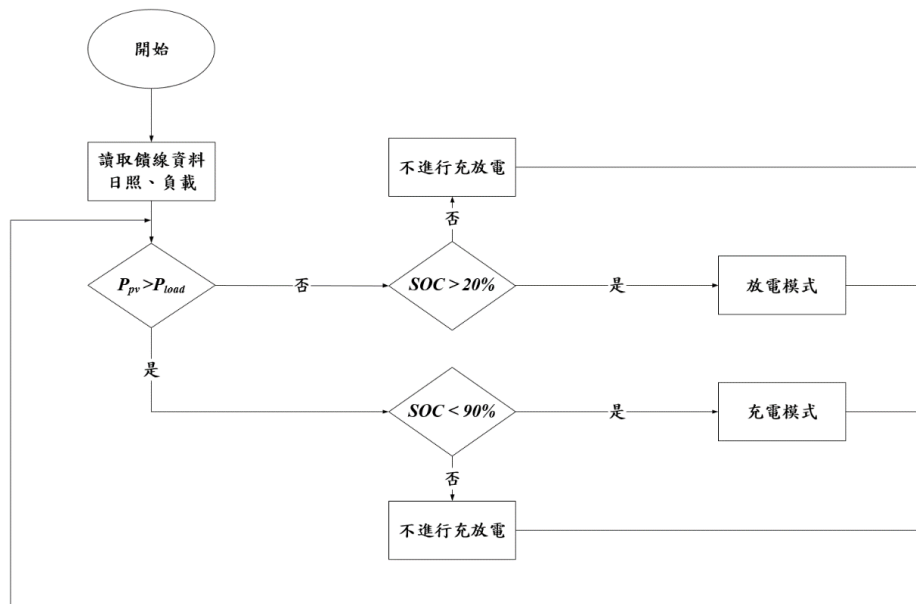


圖 22:ESS 輔助市電輸出功率之策略流程圖

(三) 有載分接頭切換變壓器模型

傳統配電系統常以放射狀的饋線架構供電給住宅用戶，在沒有裝設具有電壓補償設備下，饋線線路上電壓降的問題會隨饋線傳輸距離增加而電壓降更加嚴重，甚至可能使饋線末端住宅用戶電壓低於電壓限制值；而通常解決方法會裝設有載分接頭切換器於變壓器，使得變壓器具有調整輸出電壓能力，因此可以調整變壓器下游饋線電壓，其安裝於系統架構如圖 23。此外有載分接頭變壓器搭配

可切換式電容器也是一種常見調整饋線電壓的設備組合[24]。

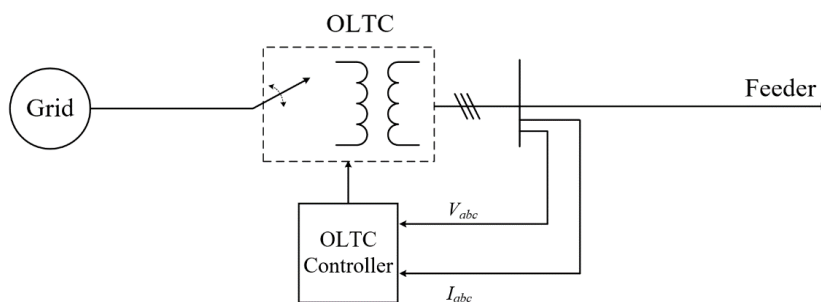
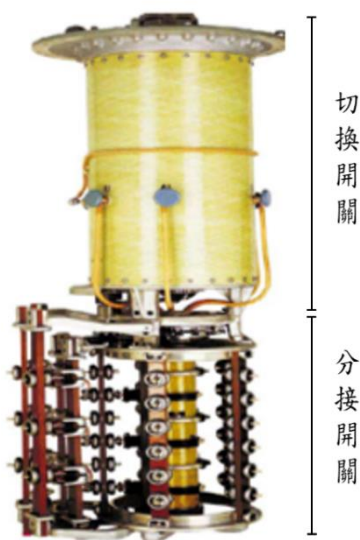


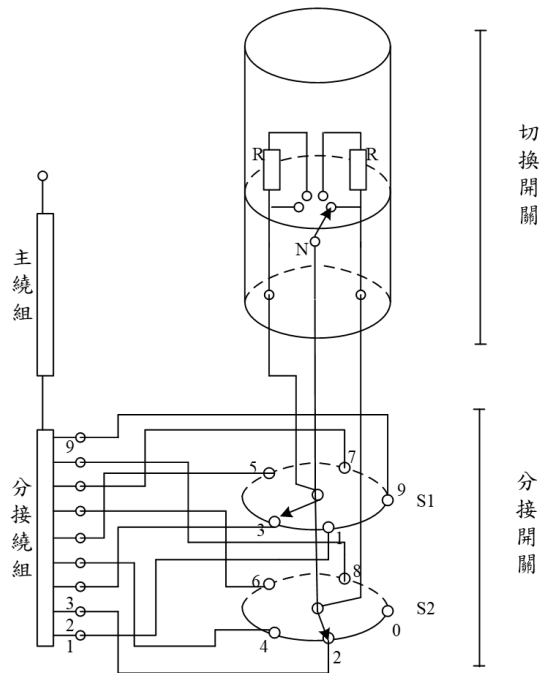
圖 23:OLTC 架構

1. OLTC 裝置架構

有載分接頭切換器實體與裝置架構如圖 24 所示，有載分接頭切換器基本構造可由切換開關、分接選擇開關與電動機構所組合而成，當分接頭進行切換時，切換開關承擔切換負載電流使切換過程中電流不會中斷，分接選擇開關則依據 OLTC 控制調整分接頭位置，電動機構則為 OLTC 操作控制動力源[25]。



(a) OLTC 實體圖 (MR 製)



(b) OLTC 裝置架構圖

圖 24:有載分接頭切換器

2. OLTC 操作原理

有載分接頭切換器操作原理是經由調整分接頭位置來改變變壓器一次側與二次側之匝數比如圖 25 所示，有載分接頭切換器安裝位置可安裝於一次側或二次側，通常安裝位置會選擇一次側(高壓側)，其原因高壓側相較於低壓側進行分接頭切換時造成的切換電流值較低，以變壓器構造角度變壓器內部構造高壓側繞組通常位於構造外側，而低壓側繞組通常於構造內側，OLTC 分接頭連接高壓側繞組較為容易。

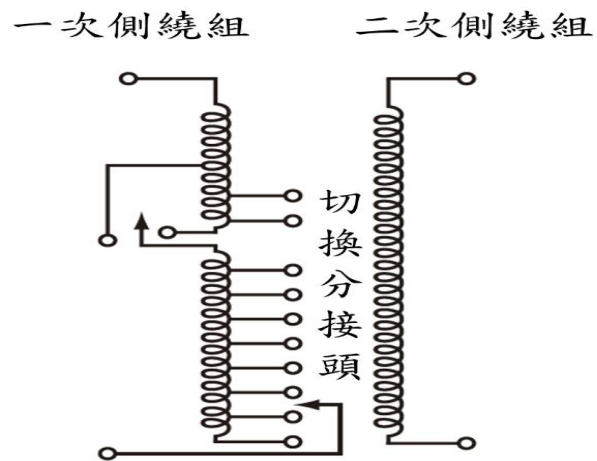
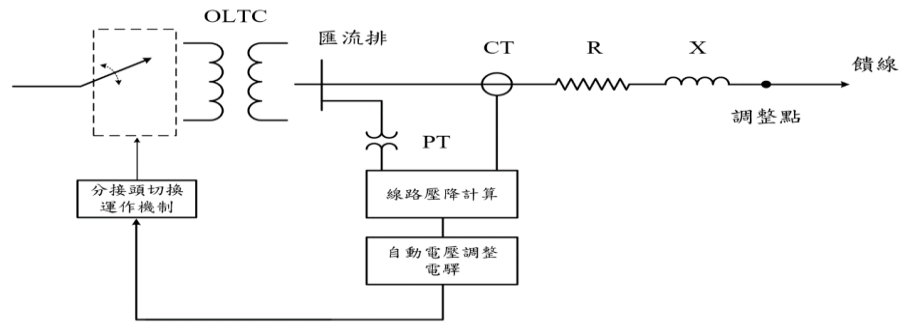


圖 25:OLTC 變壓器一次側/二次側繞組示意圖

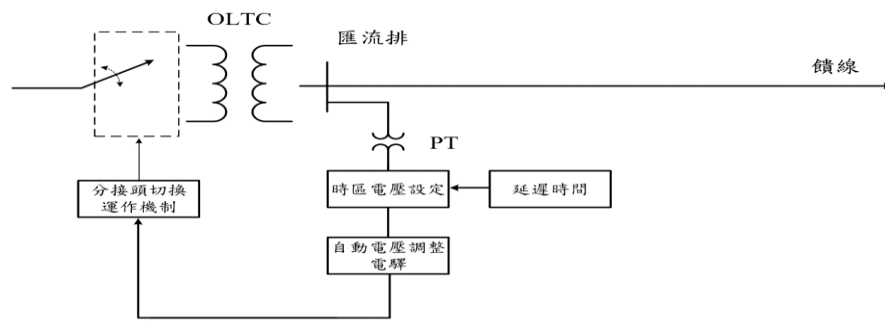
調整 OLTC 變壓器分接頭位置時，改變了一次側與二次側之匝數比，使得 OLTC 變壓器可進行電壓調節，OLTC 變壓器主要對饋線電壓超過設定之基準值時進行穩態電壓調整及降低電壓變動範圍；而現今運用於 OLTC 控制策略有查表法、當地電壓準位法(Local Voltage Level, LVL)、線路壓降補償法(Line Drop Compensator, LDC)[26]，其個別方法控制迴路如圖 26 所示。



(a) 查表法



(b) 線路壓降補償法



(c) 當地電壓準位法

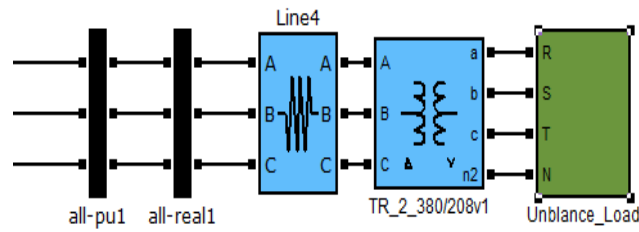
圖 26:OLTC 控制策略

而本計畫使用當地電壓調控法(LVL)作為 OLTC 控制策略,依據文獻[27]中比較不同控制策略查表法、當地電壓準位法、線路壓降補償法對於 OLTC 調整饋線影響,並觀察當併入分散式發電系統對於 OLTC 調控能力的差異,由其結論可得知查表法不適合用於變化較大之負載環境,線路壓降補償法不適合用於系統中具有分散式發電系統,當地電壓準位法適用於變化大之負載環境,但對於饋線末端掌握度較差,本計畫研究具有高占比太陽能之配電微電網系統,選

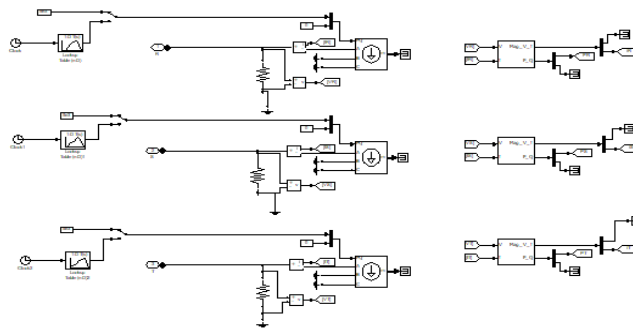
擇當地電壓準位法作為 OLTC 控制法較適合系統中包含再生能源之調控方法。

(四) 單/三相負載模型

負載模型如圖 27 所示，一般基本之方式是直接利用電阻性、電感性或電容性組合之串/並聯阻抗所表示，而此種阻抗式模型較無法反應系統之動態響應，大部分用於功率潮流之計算用途。進行模擬分析時如能明確知道負載之類型與其運轉特性，則可透過線性負載/非線性建模之方式來準確描述負載行為，例如具有電能轉換功能之裝置，可採用多脈波整流器模型，具有馬達運轉特性之器具，可採用交/直流電動機模型等。另外，針對某些特定分析用途，負載模型亦可以特定之形式表示，例如欲進行諧波分析時，負載可以諧波電壓或電流方式注入系統，當中的諧波成分可由假設或實際量測所得；進行電壓閃爍分析時需要有明顯之無效功率變化特性，因此可利用變動之有效/無效功率來呈現負載行為。而在進行三相潮流分析時，定阻抗、定電流、定功率與負載之接線架構，亦可作為建模使用。



(a) 含中性線負載模型



(b) 負載模型細部

圖 27:負載模型

二、電壓與頻率控制策略

微電網中設備採用控制策略由 EMS 主控中心進行發佈控制命令，經由遠端量測設備將系統中各饋線點位置電壓、電流以及設備等資訊回傳至 EMS 主控中心，判斷系統中電壓、頻率是否超出限制值，並進行決策當前系統所需採用之電壓/頻率調控策略，並傳送控制命令至各設備調整設備所採用之控制方法，其調控策略流程圖如圖 29 所示。

調控策略包含電壓控制策略與頻率控制策略，電壓控制策略中

會依據過電壓情境選擇控制方法，分別為設備獨立控制與設備協調控制，其中設備包含智慧型變流器、OLTC 變壓器、儲能系統，而設備協調控制則分別對智慧型變流器、OLTC 變壓器進行協調控制，以及三項設備智慧型變流器、OLTC 變壓器、儲能系統進行協調控制。

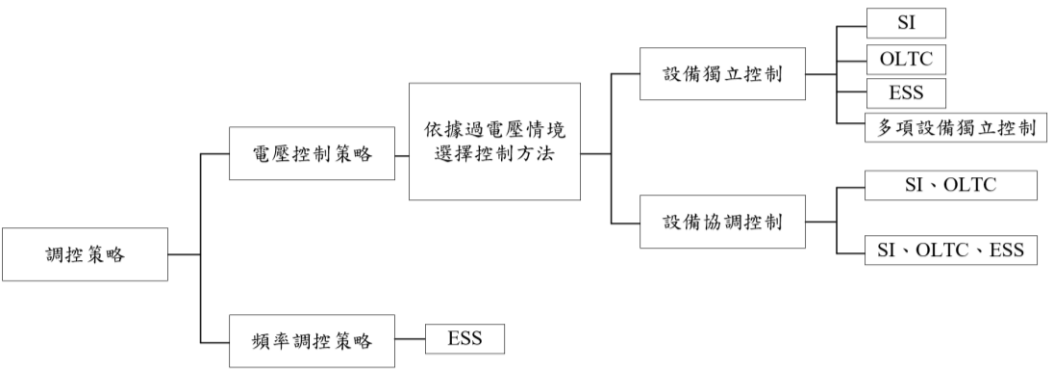


圖 28:調控策略架構

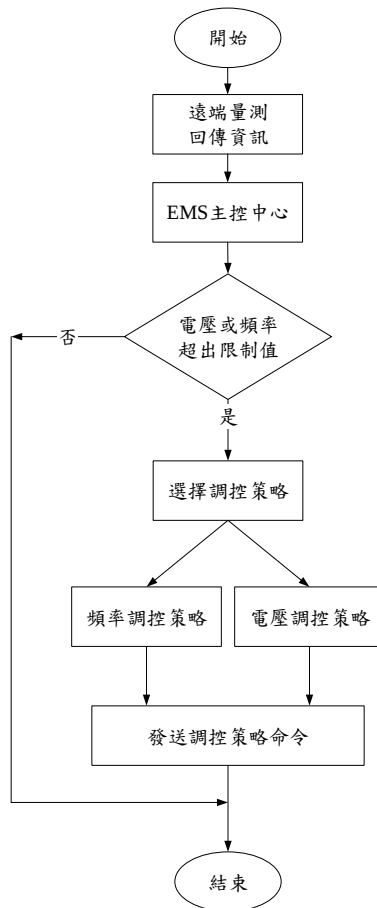


圖 29:微電網調控策略流程圖

(一) 智慧型變流器(Smart Inverter, SI)電壓控制策略

美國電力科學研究院 (Electric Power Research Institute, EPRI) 智慧變流器技術文件中評論最具有效率之控制方法分別為電壓/虛功控制法(Volt/Var Control)、定功因控制法(Fix PF Control)、電壓/實功控制法(Volt/Watt Control)[28]，而本計畫之電壓調節控制採用之控制方法為電壓/虛功控制法與定功因控制法，電壓控制之目的在於提供一種機制，使能控制變流器輸出實虛功率以對饋線之電壓變動進行調節。圖 30 為電壓/虛功控制法其中 V1、V2、V3、V4 位置可

由調控者自行設定調控點，依據不同系統情境適用不同曲線設置，其中 V2 至 V3 區間為不感帶區間，當所量測饋線電壓位於不感帶區間中，將不進行任何虛功量補償，而超出不感帶區間則依據曲線設置輸出相對應虛功補償。

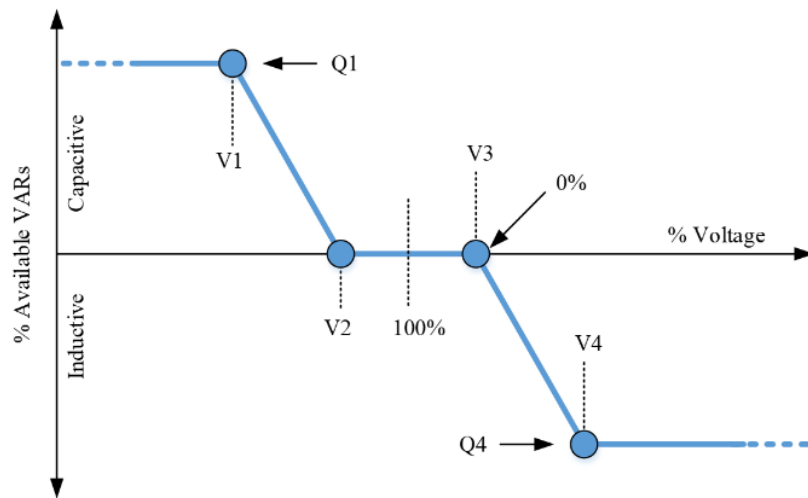


圖 30: 電壓/虛功控制法

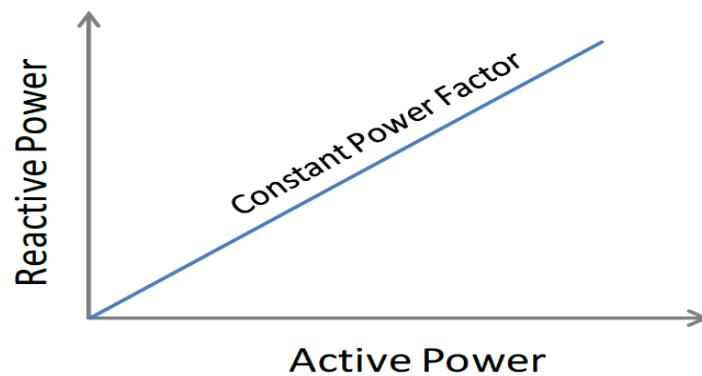


圖 31: 定功因控制法

而本計畫所採用電壓/虛功控制法曲線如圖 32 所示，不感帶區間設置為 0.975 p.u.至 1.025p.u.，若饋線電高出 1.035 p.u.或低於 0.965 p.u 則補償最大虛功可補償量。

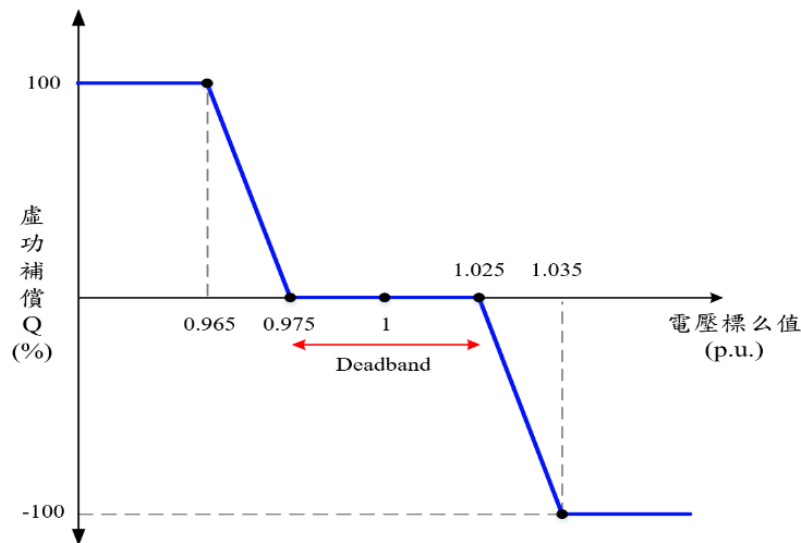


圖 32:本計畫採用電壓/虛功控制法之補償曲線

另外，為避免在進行協調控制時與其他電壓調控設備發生追隨現象，本計畫亦在協調控制設計中，於智慧變流器上額外加入定功因控制法，其設定如圖 33 所示，定功因控制法可設定之功率因數範圍取決於智慧型變流器的工作能力，計畫所採用變流器工作區間可設定為 PF 0.9(超前)~PF 0.9(滯後)，而本計畫採用之定功因控制法固定為 PF 0.9(滯後)，當太陽能系統發電功率上升時，則依據相對應固定功率因數 0.9(滯後)，補償相對應之虛功率。

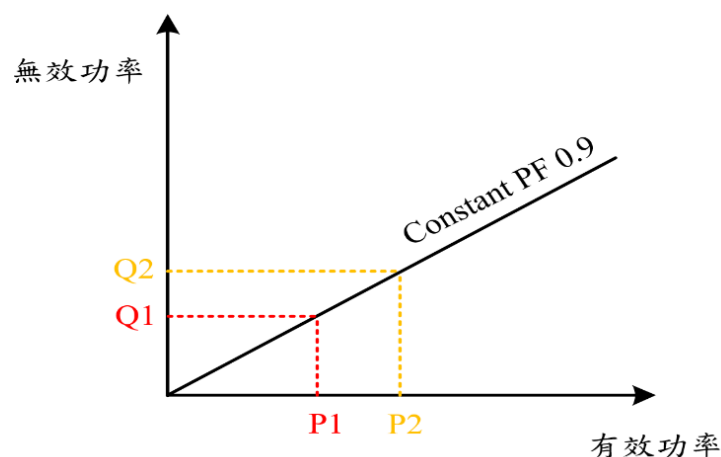


圖 33:本計畫所採用定功因控制法之設定

(二) 有載分接頭切換(OLTC)變壓器電壓控制策略

有載分接頭切換變壓器，為常見用於傳統饋線電壓調整之設備，OLTC 分接頭會連接至變壓器繞組，OLTC 的原理是透過改變變壓器兩側匝比數，改變輸出電壓，達成調整變壓器其下游饋線電壓。現今運用於 OLTC 控制策略有查表法、電壓準位法(Local Voltage Level, LVL)、線路壓降補償法(Line Drop Compensator, LDC)，而本計畫所採用控制策略為基於電壓準位法所進行優化的改良型電壓準位法，圖 34 為 OLTC 使用改良型電壓準位法之電壓控制策略流程圖，經由具有遠端量測功能之設備將系統中所量測各饋線點電壓、電流以及計算功率等資訊回傳至控制中心，並進行評斷電壓是否超出範圍，如果電壓過低則調降 OLTC 分接頭位置一次，如果電壓過高則調升 OLTC 分接頭位置一次，而每進行一次分接頭切換時都會累加一次

操作次數，當操作次數大於每日可允許操作次數則會發出警報，警告當日 OLTC 所操作分接頭切換次數過多，並進行評斷電壓是否仍然超出範圍、調整分接頭位置等控制，改良型電壓準位法架構如圖 35 所示。

比較 OLTC 傳統 LVL 法與改良型電壓準位法，傳統 LVL 法僅會量測單一位置作為調控點如圖 36 所示，而改良 LVL 法經由遠端量測獲得系統中各匯流排資訊，將量測多點位置作為調控點如圖 37，相較傳統方法具較全面調控能力，使得饋線末端具有較大調整空間且 PCC 點符合電壓限制範圍。

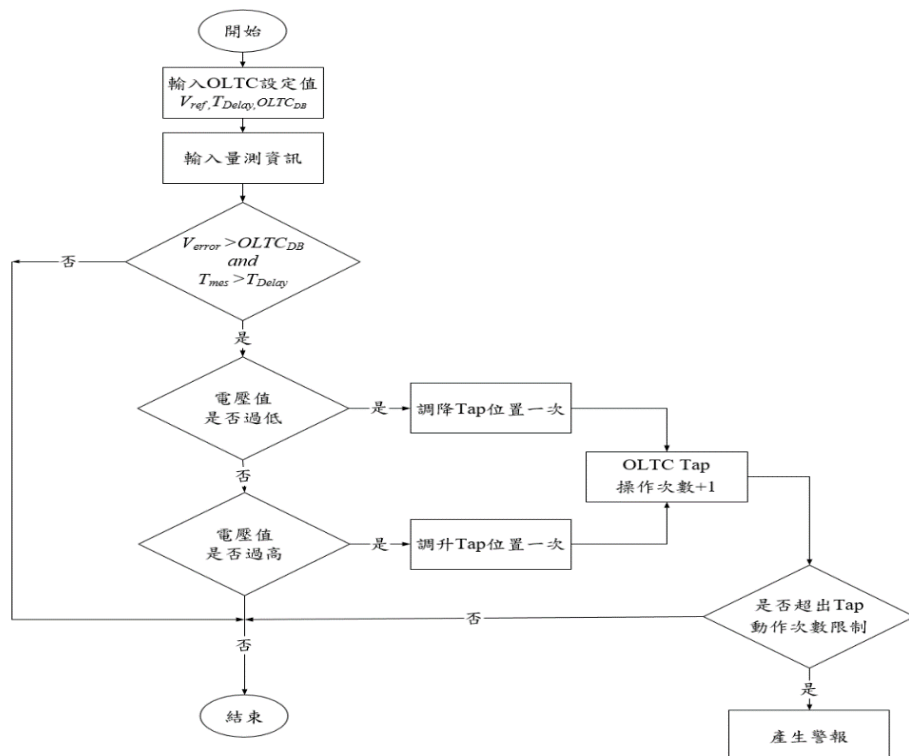


圖 34:OLTC 電壓控制策略流程圖

(三) SI、ESS、OLTC 協調電壓控制策略

當太陽能發電系統逐漸增加併入系統時，僅靠單一設備進行電壓控制無法如預期將饋線電壓調整至限制範圍內，可加入其他設備協同進行電壓調節，而當系統具有多組不同電壓調節設備時，需要有一協調控制策略管理各項設備之間的輸出調控。

1. SI 與 OLTC 協調電壓控制策略

圖 38 為本計畫所使用 SI 與 OLTC 變壓器之協調電壓控制策略，經由具有遠端量測功能之設備將系統中饋線、設備之狀態回傳至 EMS 主控中心，由主控中心決策當前系統狀態所需採用控制策略，如系統饋線電壓超出限制範圍，則會優先啟動 SI 電壓/虛功控制法，依據量測電壓對應於電壓/虛功法之曲線設置，輸出相對應之虛功率補償，而當 SI 啟用電壓/虛功控制法補償虛功後，仍然超出電壓限制值，且其持續時間大於模式延遲時間，則切換至協調控制，其中模式延遲時間為判斷 SI 電壓/虛功控制法是否成功將電壓調整至限制範圍，如大於延遲時間代表僅使用 SI 電壓/虛功控制法無法將電壓調整至限制範圍，啟動協調控後會先將 SI 模式切換至定功因控制法後，OLTC 才啟動加入進行電壓調節，調整 OLTC 分接頭位置進行調整饋線電壓，調整後會再進行判斷電壓狀態，如饋線電壓依

然超出限制範圍，則再進行調整分接頭位置；而其中啟動協調控轉換 SI 模式是為了避免設備之間產生追逐現象。

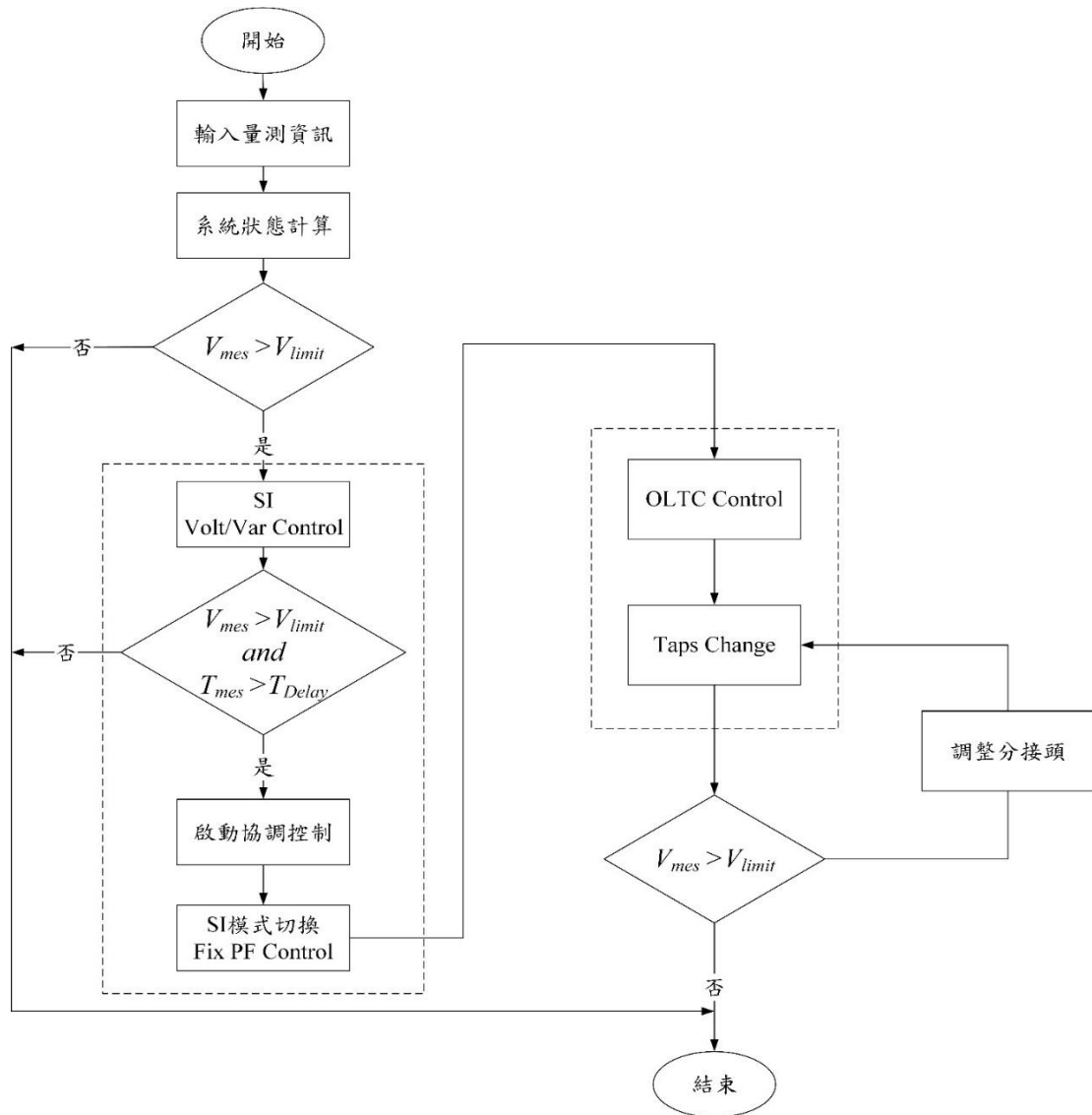


圖 38:SI 與 OLTC 協調電壓控制流程圖

2. SI、OLTC 與 ESS 協調電壓控制策略

圖 39 為本計畫所使用 SI、OLTC 變壓器與 ESS 之協調電壓控制策略，經由具有遠端量測功能之設備將系統中饋線、設備之狀態回傳至 EMS 主控中心，由主控中心決策當前系統狀態所需採用控制策略，如系統饋線電壓超出限制範圍，則會優先啟動 SI 電壓/虛功控制法，而當 SI 啟用電壓/虛功控制法補償虛功後，仍然超出電壓限制值，且其持續時間大於模式延遲時間則切換至協調控制，首先將 SI 模式切換至定功因控制法後，排定調控順序且計算補償量，同時開啟 ESS 電壓控制策略以及 OLTC 電壓調節器讀取饋線電壓，因儲能系統具有快速反應之特性，會先經由儲能系統啟用功因調節功能透過虛功率補償進行電壓調節，而 OLTC 僅開啟電壓偵測，尚未進行分接頭切換，其原因為 OLTC 需經由延遲時間後才會切換分接頭位置，而經由 ESS 進行電壓調整後，如果饋線電壓仍超出限制範圍且持續時間大於 OLTC 延遲時間，則再次排定調控順序由 OLTC 先進行分接頭切換調整電壓，ESS 則依據 OLTC 調整後饋線電壓輸出相對應虛功補償量，調整後會再進行判斷電壓狀態，如饋線電壓依然超出限制範圍，再進行調整分接頭位置以及 ESS 虛功補償量。

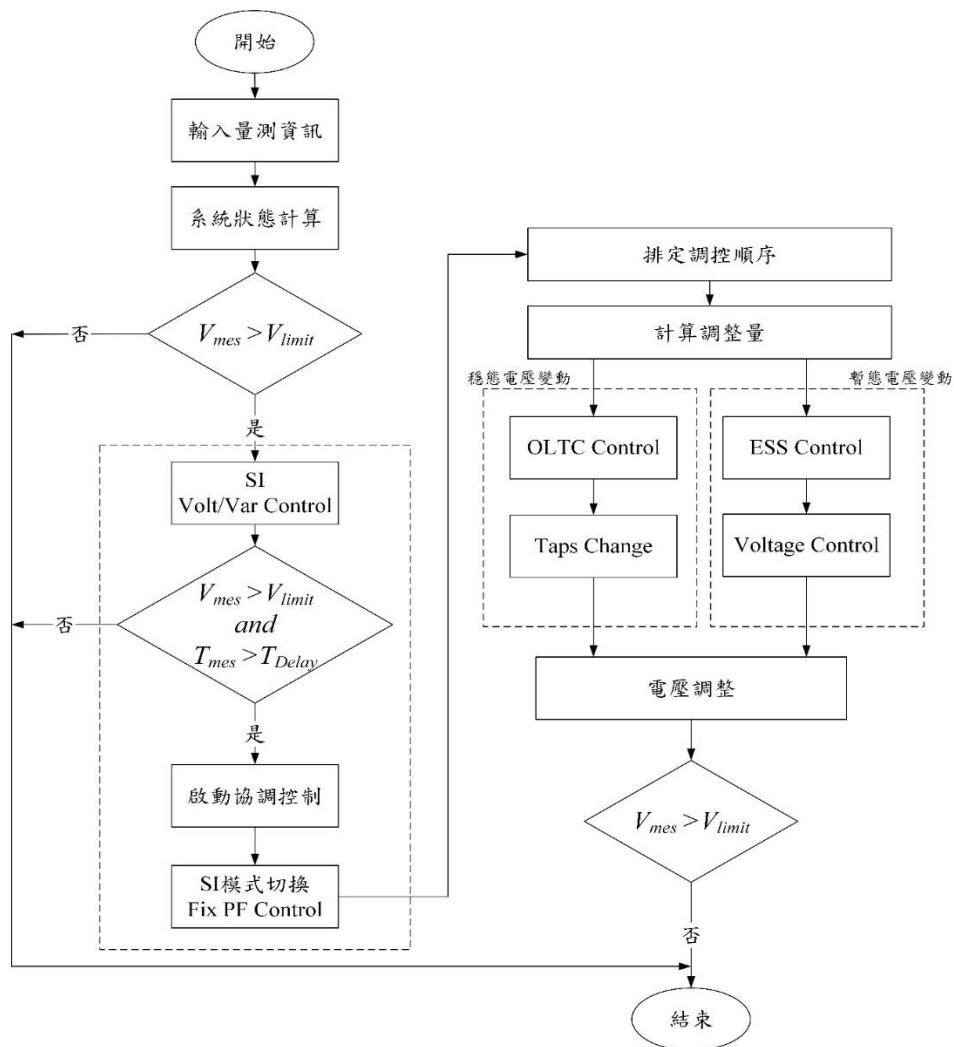


圖 39:SI、OLTC 與 ESS 協調電壓控制流程圖

三、Real-Time 即時模擬技術應用

(一) 即時模擬軟、硬體架構

本計畫使用即時模擬技術應用，即時模擬硬體架構需要透過複合式電腦系統進行運算，可分為目標叢集(Target Cluster)與主機電腦(Host PC)。本計畫採用 Opal-RT 即時模擬器做為 Target Cluster，而 Host PC 則選用一般桌上型電腦，其具備單顆 Intel i5-4590 CPU。

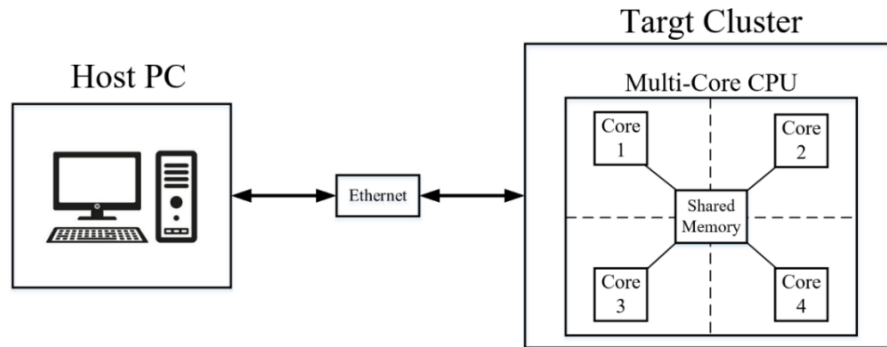


圖 40:即時模擬硬體架構

目標叢集軟體架構需使用即時操作系統（Real Time Operation System, RTOS）來管理模擬器的計算資源，可以使即時模擬器具有更高的效率和靈活性[29]，本計畫模型是以 MATLAB/Simulink 環境下所開發，應用於 Host PC 軟體架構如圖 41 所示，當進行即時模擬時，需要經由 Host PC 所執行 RT-Lab 軟體與 Target Cluster 連接，RT-Lab 為即時模擬圖形使用者界面（Graphical User Interface, GUI），並搭配使用 ARTEMIS 用於即時模擬的進階固定步長求解器，以及 RT-Events 工具箱其具有補償演算法，應用於即時模擬離散事件具備更高的精確度。

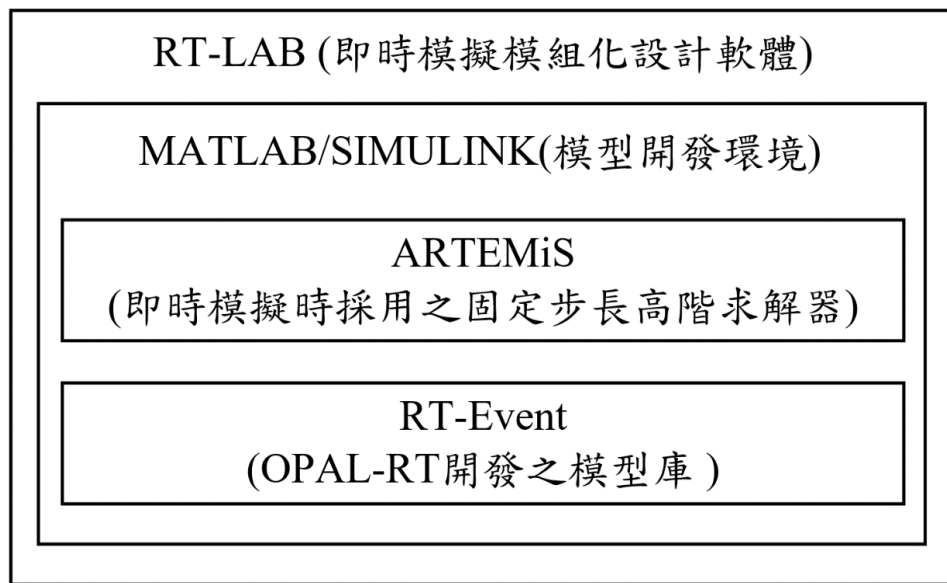


圖 41:即時模擬 Host PC 軟體架構

圖 60 為即時模擬操作架構，使用由 MATLAB/Simulink 建置的模型進行即時模擬時，須要透過 Host PC 所執行 RT-Lab 軟體將模型編譯為 C 語言再加載至 Target Cluster 上進行運算，而 Host PC 的另一個任務是執行即時模擬時，作為模擬過程中的控制平台以及用於觀察模擬結果。即時模擬期間，將有一個節點(Node)被視為 Master 用於管理 Target Cluster 與 Host PC 之間的通訊，而其他節點則作為 Slave 負責完成運算任務。

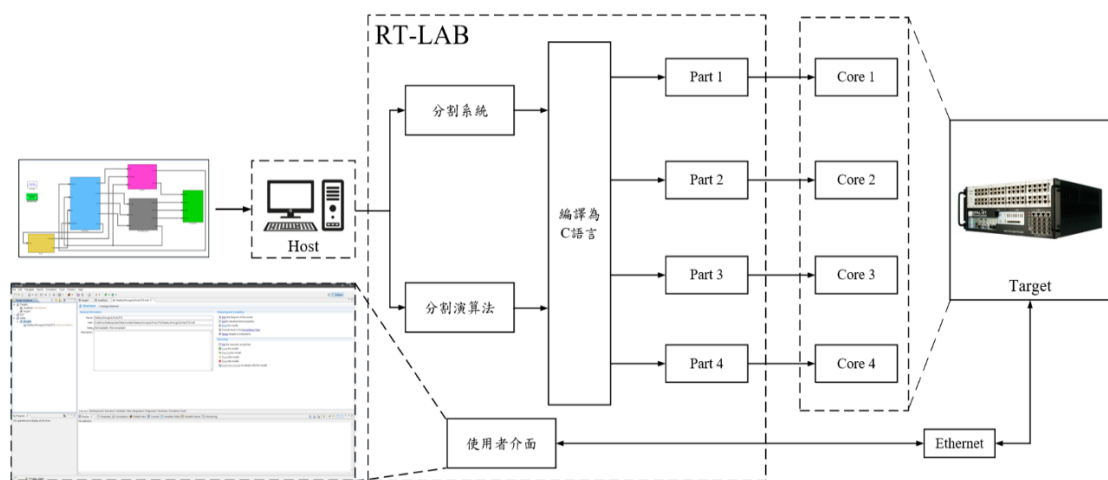


圖 42:即時模擬操作架構圖

(二) 即時模擬技術工具

1. RT-LAB

RT-LAB 是 Opal RT 所開發的使用者介面平台，主要負責模型編譯、加載編譯語言、修改模型之控制變數以及觀測、獲取模擬結果 [30]，RT-LAB 將分核模型編譯成代碼語言，並應用於多核心電腦或單核心電腦上使用 CPU 進行運算，其提供之工具可將系統及演算法切割，以實現平行運算並可運行更高複雜度之模型，通過使用者介面平台，可以更輕鬆、更有效執行模擬以及管理即時模擬器和所建構模型。

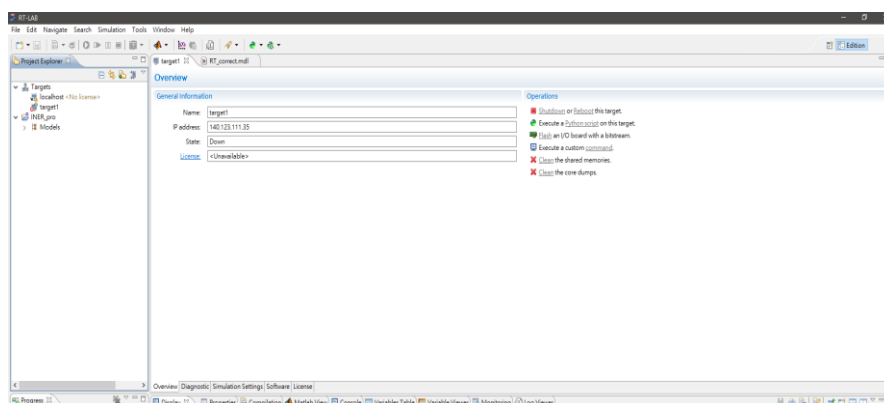


圖 43:即時模擬 RT-LAB 操作介面

2. ARTEMiS

圖 44 為 ARTEMiS 求解器，用於複雜的電氣系統中之固定步長模擬軟體，具備高效能的求解器與計算技術如圖 45，主要用於求解高難度系統的即時模擬。art5 與 art3 分別將矩陣指數泰勒展開近似至五次及三次項；art3hd 則為用於高度非線性網路的高度穩定方法；Trapezoidal 等效於 SPS(SimPowerSystems)中提供之 Tustin 方法。ARTEMiS 提供一種內插補償法，其為即時模擬中的重要技術，可在處理具有開關事件的電路時保持可接受的準確度[31]。

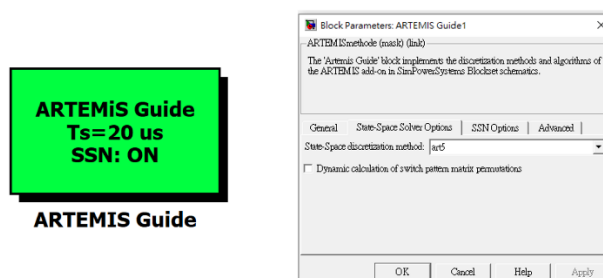


圖 44:ARTEMiS 求解器

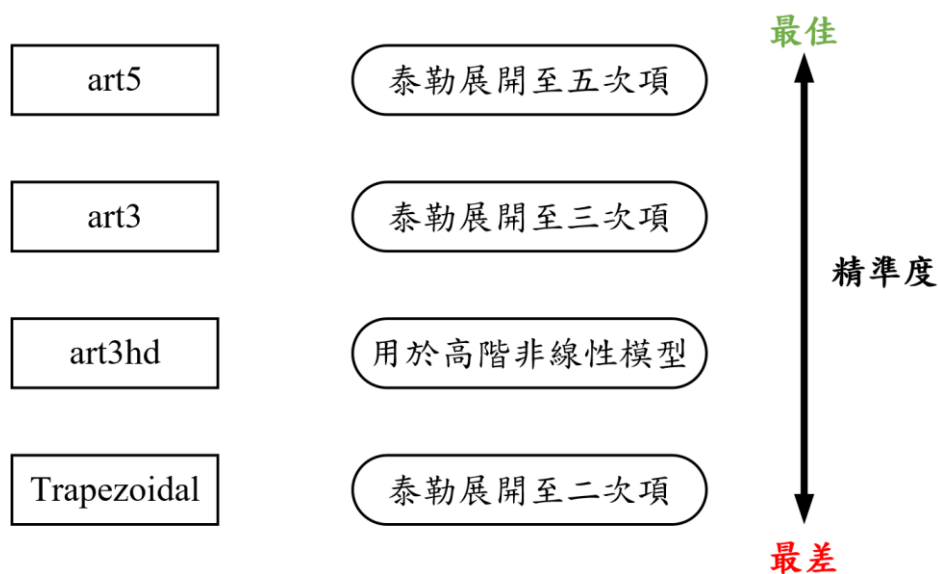


圖 45:ARTEMiS 求解器計算法

3. RT-Events

RT-Events 為 Simulink 工具箱之一，可用於混合事件系統(hybrid event-based systems)中之固定時間步長模擬，涉及相對於模擬時區異步的動態和離散事件[32]。由於 RT-Events 之模塊皆為固定步長，因此相容於 RT-LAB 並可於即時模擬中使用，混合系統的即時模擬中，只有固定步長求解器可用於自動的程式碼生成；但是，Simulink 的標準固定步長求解器會產生錯誤的結果，將其應用於混合系統。可能會累積並導致飄移和大幅相移。RT-Events 將補償演算法即時應用於離散事件，因此具備更高的精確度。

(三) 配電模型分核與平行運算

MATLAB/Simulink 所建立模型於即時模擬環境中運行，需將原本模型進行分核，經由手動方式將模型分割為多個子系統，其必須包含一個主控子系統(SM)、數個子系統(SS)和一個監測子系統(SC)，並加入通訊模塊 OpComm、延遲方塊等才得以進行平行運算[33]。

本計畫利用 MATLAB/Simulink 並且結合 OPAL-RT 軟硬體進行模擬與分析，第貳章所敘述之建模方式完成單相/三相太陽能發電系統、儲能系統、OLTC 變壓器、單相/三相負載、EMS 主控中心模型、FTU 模型，並將各模型組合而成配電微電網系統。搭配即時模擬技術運用平行運算前需將原先建立模型進行分割，圖 46 為建立之配電微電網系統之分核模型，將模型分割成適用於四核心之四核模型，其中分核架構由一個主控子系統(SM)、三個子系統(SS)以及一個監測子系統所組成，其各系統所包含模塊功能與應用如下所示。

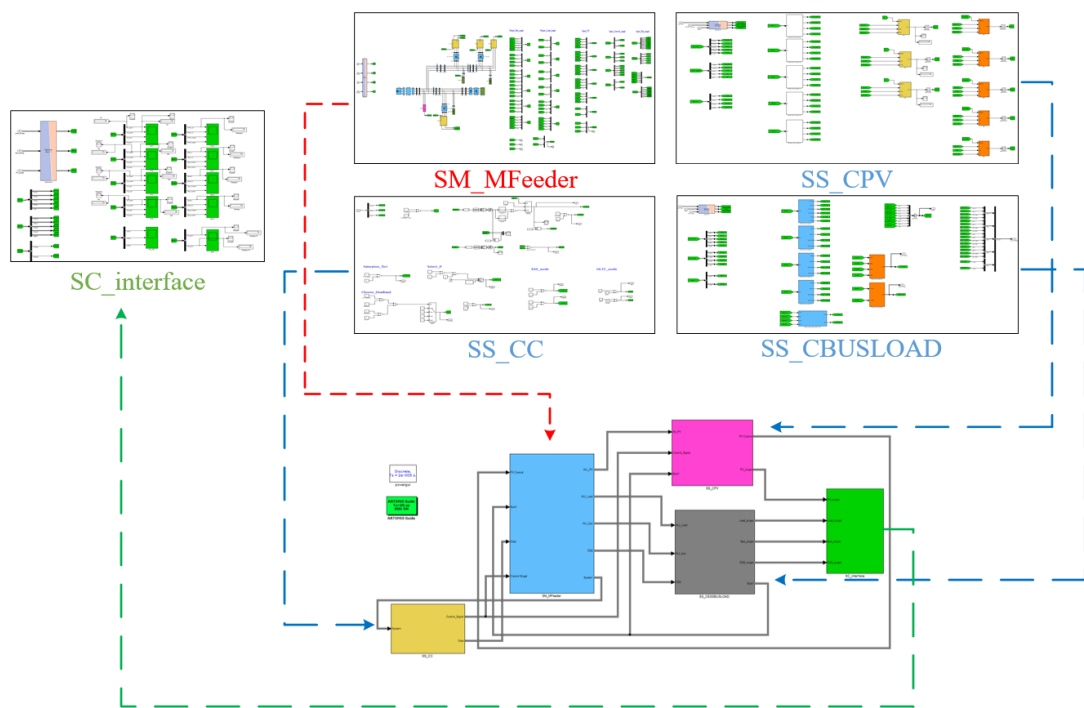


圖 46:配電微電網系統 MATLAB/Simulink 分核模型

1. SM_MFEEDER 模塊

圖 47 為該模塊之細部模型圖，此模塊為配電微電網的饋線主架構，其中包含單/三相太陽能發電系統模型(PV)、有載分接頭切換(OLTC)變壓器、儲能系統模型(ESS)、三相負載、單相負載、與市電模型，由市電端 11.4 kV 經由三相變壓器轉至 380 V 連接至配電微電網。

- 太陽能發電系統模型(PV):包含最大功率追蹤控制模組、太陽能智慧型變流器、變壓器等模型，太陽能發電系統之日照變化、溫度變化由此模塊調整，利用最大功率追蹤可得到當下

再生能源之最大輸出功率，再透過轉換器將其升壓，藉由變流器輸出交流電至微電網中。

- 有載分接頭切換(OLTC)變壓器:包含 OLTC 分接開關、切換開關模型和 OLTC 電壓調節器、控制器模型以及三相變壓器所組成 OLTC 模型，經由輸入電壓資訊至 OLTC 電壓調節器作為量測電壓調控點，並經由 OLTC 控制器模型輸出調整分接頭訊號至開關模組。
- 儲能系統模型(ESS): 包含儲能電池、雙向直流轉換器、電力調節系統、電池管理系統(BMS)等模型，負責進行儲能系統之功率調控，藉由雙向直流轉換器決定其充、放電時使用之模式，電力調節系統透過 PQ 控制調控併網時之實虛功輸出。
- 單/三相負載模型:系統中包含三相負載以及單相負載，其中單相負載組成三相不平衡負載。

2. SS_CPV 模塊

圖 48 為該模塊之細部模型圖，此模塊為太陽能發電系統計算模塊，模塊中包含太陽能發電系統電壓、電流量測模組和實、虛功率輸出計算模組以及智慧型變流器虛功補償控制策略的補償量

計算模組，此模組依據太陽能智慧型變流器所採用虛功控制策略，並算出當前智慧型變流器所輸出之實、虛功參數及控制訊號。

3. SS_CESSBUSLOAD 模塊

圖 49 為該模塊之細部模型圖，此模塊為 FTU 計算模型，負責量測系統饋線上電壓、電流，以及計算系統功率、負載功率等資訊，並將系統、設備狀態回傳至 EMS 主控中心作為控制策略之決策依據，並可經由 EMS 主控中心發佈命令至 FTU 進行控制與調整策略。

4. SS_CC 模塊

圖 50 為該模塊之細部模型圖，此模塊為 EMS 主控中心模型，負責發佈系統中各設備控制命令，由 FTU 遠端量測將系統、設備狀態回傳至 EMS 主控中心，而本計畫所提出之多樣設備間協調電壓控制策略也是由 EMS 主控中心進行決策，由 EMS 主控中心發佈命令傳至各設備採用獨立設備調控亦或是多樣設備協調控制策略，並且 EMS 具有監控系統整體狀態，經由 FTU、BMS 回傳等資訊可掌握整體系統電壓、功率等狀態以及太陽能發電功率、儲能系統電池之電壓、電流、SOC 等狀態。

5. SC_interface 模塊

圖 51 為該模塊之細部模型圖，此模塊作為執行即時模擬過程中的控制平台，以及觀察模擬結果之數據與輸出波型。此模塊包含系統中太陽能系統、儲能系統、負載功率、系統功率、系統頻率等輸出之數據以及波型。

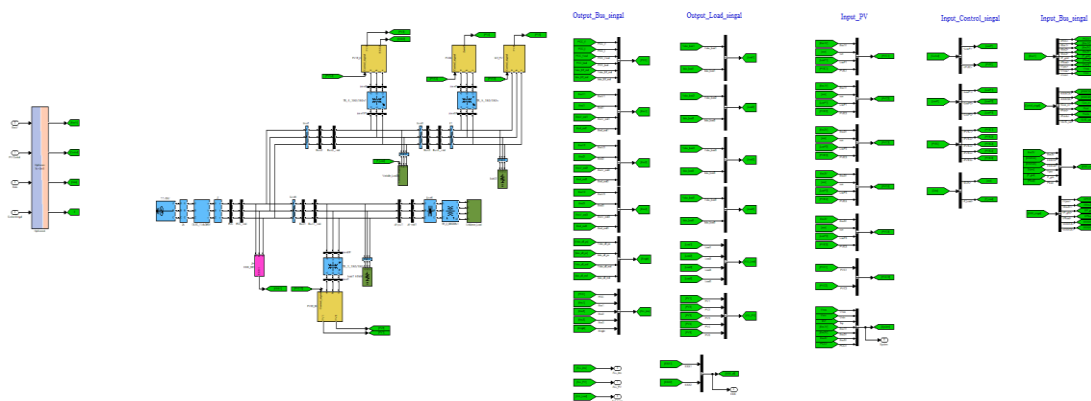


圖 47:SM_MFEEDER 細部模型

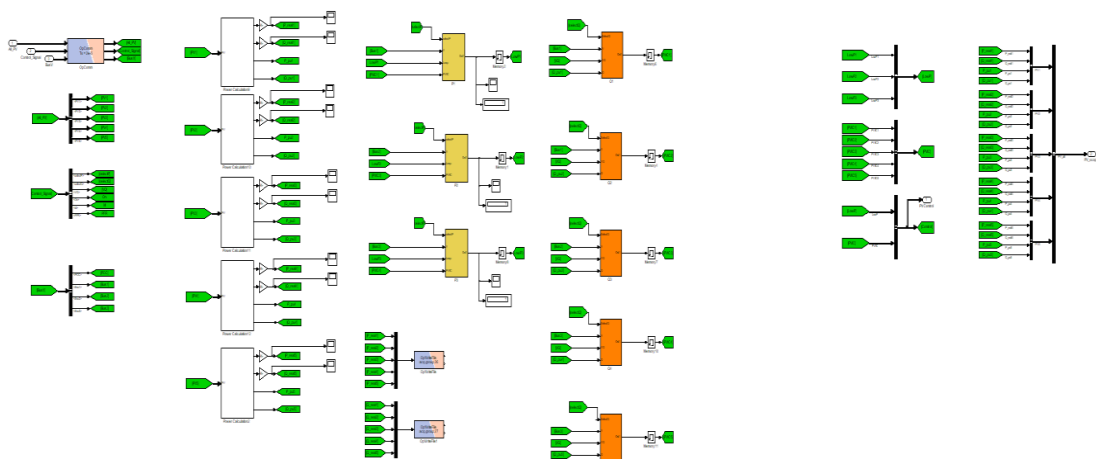


圖 48:SS_CPV 細部模型

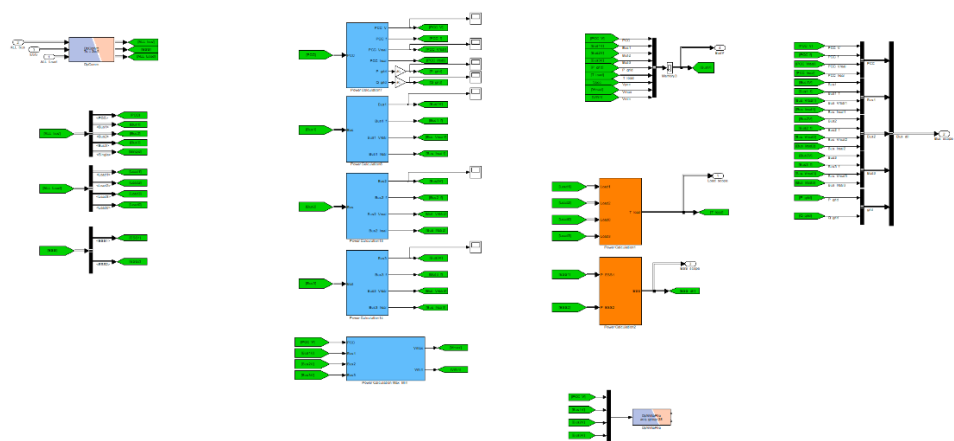


圖 49:SS_CESSBUSLOAD 細部模型

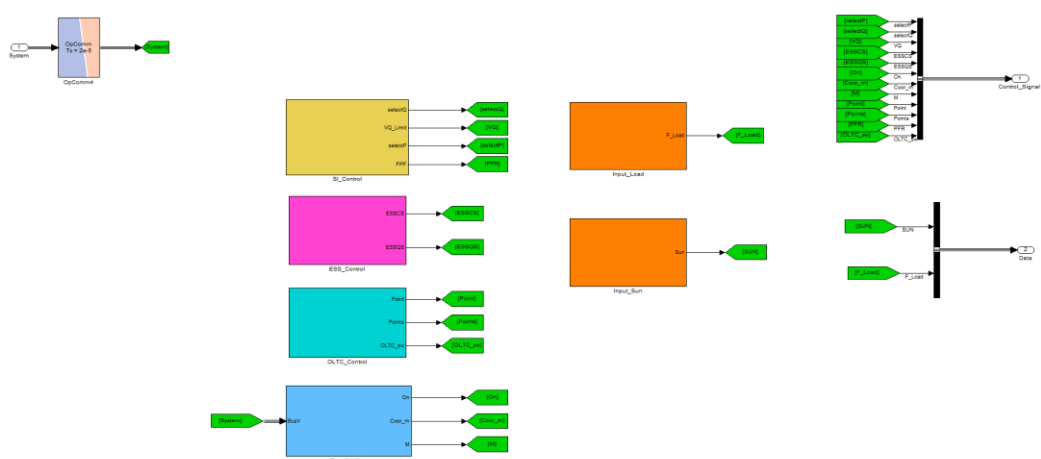


圖 50:SS_CC 細部模型

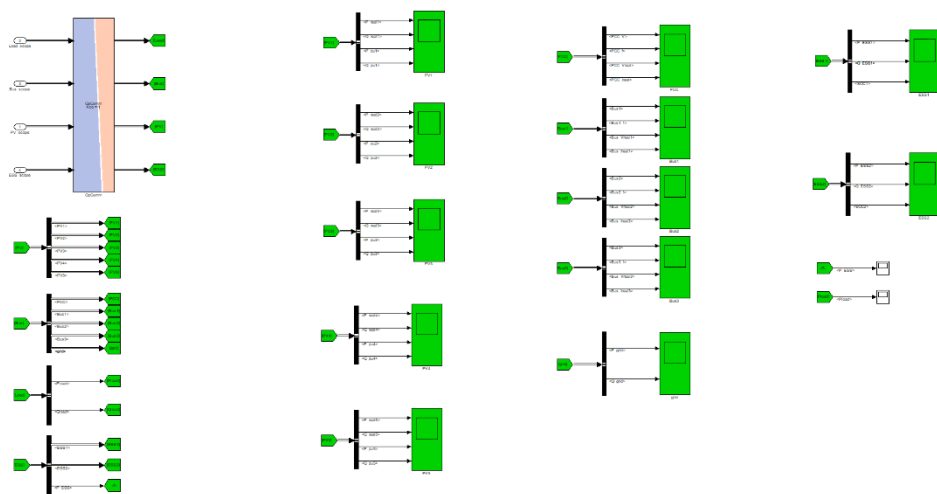


圖 51:SC_interface 細部模型

參、主要發現與結論

一、案例模擬 1:三相不平衡之潮流、電壓、電流案例分析

三相不平衡案例模擬中，使用 MATLAB/Simulink 內建之潮流分析 Load Flow Bus 工具模塊，可執行三相平衡正相序之負載潮流分析以及三相不平衡負載潮流分析。

(一)Case1-1 三相負載不平衡潮流分析

Case1-1 案例模擬中使用圖 52 作為案例模擬之架構，其中系統架構包含三組三相平衡負載以及一組單相負載組成三相不平衡負載，模擬系統架構為單、三相負載所構成三相不平衡系統，並以潮流分析工具分析當系統為三相不平衡時，三相電壓、功率潮流等狀態變化。

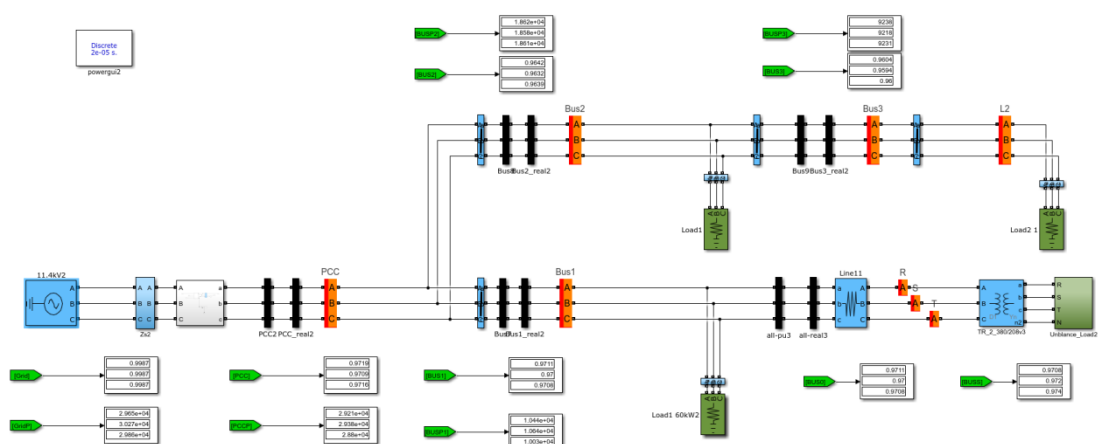


圖 52:Case1-1 三相負載不平衡潮流分析之架構

表 4 為 Case1-1 模擬案例中所使用負載，其中包含三相負載 60 kW 電阻性負載組成，以及一組單相負載由電阻性負載與電感性負載所組成不平衡三相負載。

表 4:Case1-1 模擬系統中所包含負載

負載型態 單位	三相負載	單相負載		
		R 相	S 相	T 相
kW	60	60	20	50
kvar	0	30	10	20
組數	3 組	1 組		

圖 53 為執行三相不平衡潮流分析之結果，由分析結果可知由市電端傳輸進系統中實功率為 312.28 kW、虛功率為 60 kvar，系統中單、三相總負載功率為 300kW、60 kvar，其中傳輸損失與阻抗損耗共 2.24 kW，由分析結果可知由市電端輸入功率至各饋線點位置之實、虛功率，觀察三相不平衡之功率潮流各饋線中各點位置之電壓、功率損耗、實/虛功率之傳輸方向，並可從中得知因三相負載不平衡使得系統中各饋線點位置 R、S、T 三相電壓皆有些許偏差。

The Load Flow converged in 2 iterations !

SUMMARY for subnetwork No 1

Total generation : P= 312.38 kW Q= 60.00 kvar
 Total PQ load : P= 310.00 kW Q= 60.00 kvar
 Total Zshunt load : P= -0.00 kW Q= 0.00 kvar
 Total losses : P= 2.38 kW Q= -0.00 kvar

Bus1		-----A-----		-----B-----		-----C-----		---V1---PQtotal---	
	V (pu deg.)	0.9968	0.07	0.9984	0.02	0.9972	0.05	0.0006	111.96
	Gen (kW kvar)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	PQ load (kW kvar)	20.00	-0.00	20.00	-0.00	20.00	-0.00	60.00	-0.00
	Z shunt (kW kvar)	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-> PCC	(kW kvar)	-80.18	-30.00	-40.02	-10.00	-70.12	-20.00	-190.32	-60.00
-> R	(kW kvar)	60.18	30.00					60.18	30.00
-> S	(kW kvar)			20.02	10.00			20.02	10.00
-> T	(kW kvar)					50.12	20.00	50.12	20.00
Bus2		-----A-----		-----B-----		-----C-----		---V1---PQtotal---	
	V (pu deg.)	0.9919	-0.00	0.9919	-0.00	0.9919	-0.00	0.0000	-49.63
	Gen (kW kvar)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	PQ load (kW kvar)	20.00	-0.00	20.00	-0.00	20.00	-0.00	60.00	-0.00
	Z shunt (kW kvar)	-0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00
-> Bus3	(kW kvar)	20.17	0.00	20.17	0.00	20.17	0.00	60.51	0.00
-> PCC	(kW kvar)	-40.17	0.00	-40.17	0.00	-40.17	0.00	-120.51	0.00
Bus3		-----A-----		-----B-----		-----C-----		---V1---PQtotal---	
	V (pu deg.)	0.9878	-0.00	0.9878	-0.00	0.9878	-0.00	0.0000	-50.32
	Gen (kW kvar)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	PQ load (kW kvar)	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Z shunt (kW kvar)	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00
-> Bus2	(kW kvar)	-20.08	-0.00	-20.08	-0.00	-20.08	-0.00	-60.24	-0.00
-> L2	(kW kvar)	20.08	0.00	20.08	0.00	20.08	0.00	60.24	0.00
L2		-----A-----		-----B-----		-----C-----		---V1---PQtotal---	
	V (pu deg.)	0.9837	-0.00	0.9837	-0.00	0.9837	-0.00	0.0000	-51.08
	Gen (kW kvar)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	PQ load (kW kvar)	20.00	0.00	20.00	0.00	20.00	0.00	60.00	0.00
	Z shunt (kW kvar)	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00
-> Bus3	(kW kvar)	-20.00	-0.00	-20.00	-0.00	-20.00	-0.00	-60.00	-0.00

PCC		-----A-----	-----B-----	-----C-----	---V1--PQtotal---			
	V (pu deg.)	1.0000	0.00	1.0000	0.00	1.0000	0.00	108.43
	Gen (kW kvar)	120.97	30.00	80.58	10.00	110.83	20.00	312.38
	PQ load (kW kvar)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Z shunt (kW kvar)	-0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00
-> Bus1	(kW kvar)	80.48	30.00	40.09	10.00	70.33	20.00	190.90
-> Bus2	(kW kvar)	40.49	-0.00	40.49	-0.00	40.49	-0.00	121.47
								-0.00
R		-----A-----	-----B-----	-----C-----	---V1--PQtotal---			
	V (pu deg.)	0.9944	0.14					
	Gen (kW kvar)	0.00	0.00				0.00	0.00
	PQ load (kW kvar)	60.00	30.00				60.00	30.00
	Z shunt (kW kvar)	-0.00	0.00				-0.00	0.00
-> Bus1	(kW kvar)	-60.00	-30.00				-60.00	-30.00
S		-----A-----	-----B-----	-----C-----	---V1--PQtotal---			
	V (pu deg.)		0.9976	0.05				
	Gen (kW kvar)		0.00	0.00			0.00	0.00
	PQ load (kW kvar)		20.00	10.00			20.00	10.00
	Z shunt (kW kvar)		-0.00	-0.00			-0.00	-0.00
-> Bus1	(kW kvar)		-20.00	-10.00				
T		-----A-----	-----B-----	-----C-----	---V1--PQtotal---			
	V (pu deg.)			0.9952	0.09			
	Gen (kW kvar)			0.00	0.00	0.00	0.00	
	PQ load (kW kvar)			50.00	20.00	50.00	20.00	
	Z shunt (kW kvar)			-0.00	0.00	-0.00	0.00	
-> Bus1	(kW kvar)			-50.00	-20.00			

圖 53:Case1-1 執行三相不平衡潮流分析之結果

(二)Case1-2 單/三相太陽能不平衡潮流分析

Case1-2 案例模擬中使用圖 54 作為案例模擬之架構，系統架構中包含單相、三相太陽能發電系統，由 R、S、T 三相不同功率單相太陽能系統與三組三相太陽能發電系統所組成，負載由三組三相負載組成；以此系統觀察單相、三相太陽能系統併入造成不平衡變動，並分析系統潮流變化狀態，圖 55 為本計畫所建置之潮流分析模組，分析太陽能系統併入系統後對各相所造成變化，並計算 R、S、T 各相功率潮流。

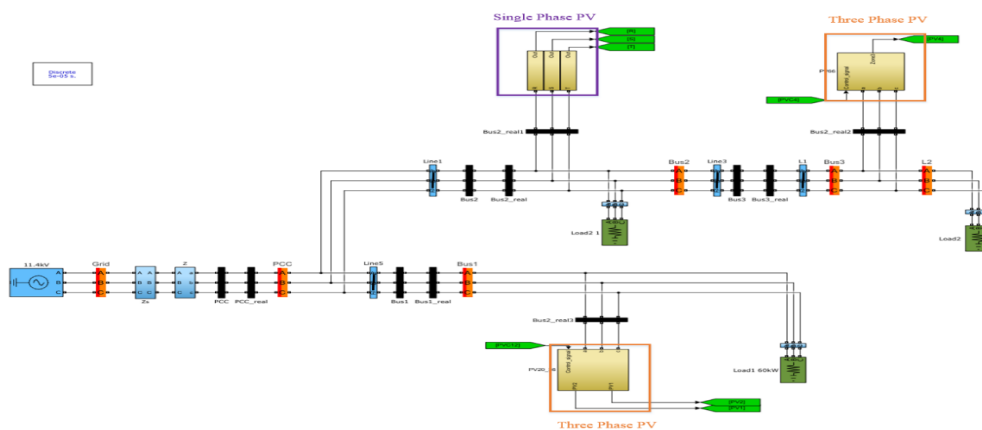


圖 54:Case1-2 單/三相太陽能不平衡潮流分析之架構

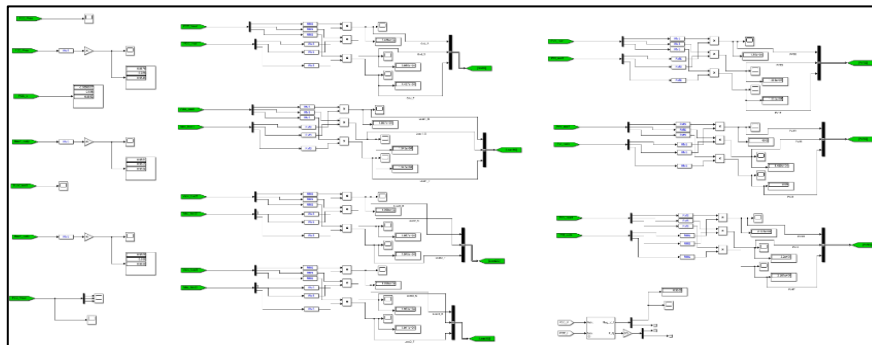


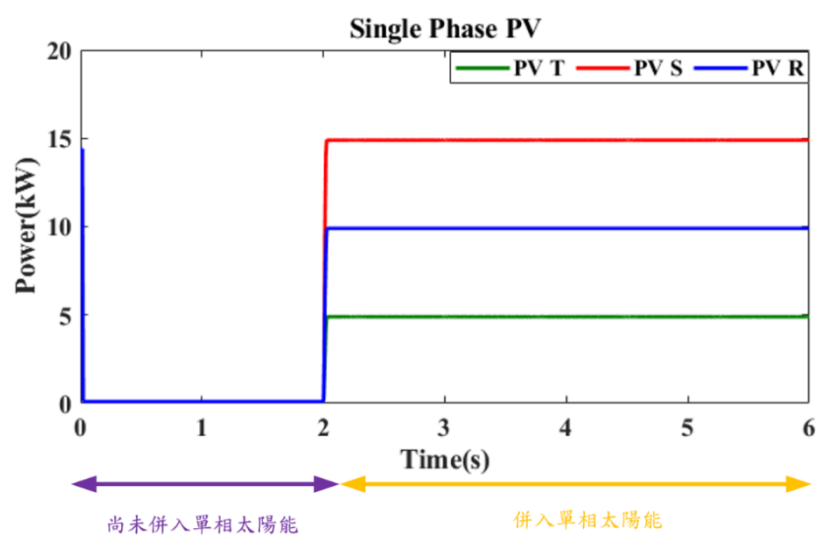
圖 55:本計畫所建置潮流分析模組

表 5 為 Case1-2 模擬案例中所使用單相、三相太陽能發電系統，單相太陽能發電系統分別併入 R、S、T 三相，其額定功率分別為 10 kW、15 kW、5 kW，以及三組三相太陽能系統總額定功率為 122 kW，而系統中負載由三組三相負載組成，總負載功率 60 kW。

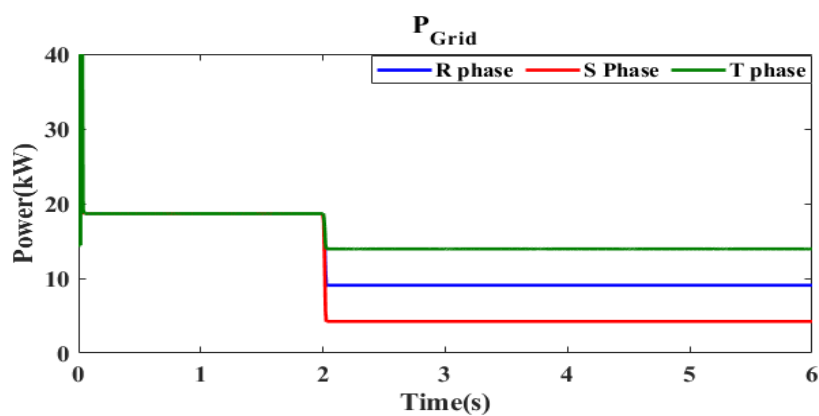
表 5:Case1-2 模擬系統中所包含單/三相太陽能

型態 單位	三相太陽能系統	單相太陽能系統		
		R 相	S 相	T 相
總額定功率 (kW)	122	10	15	5

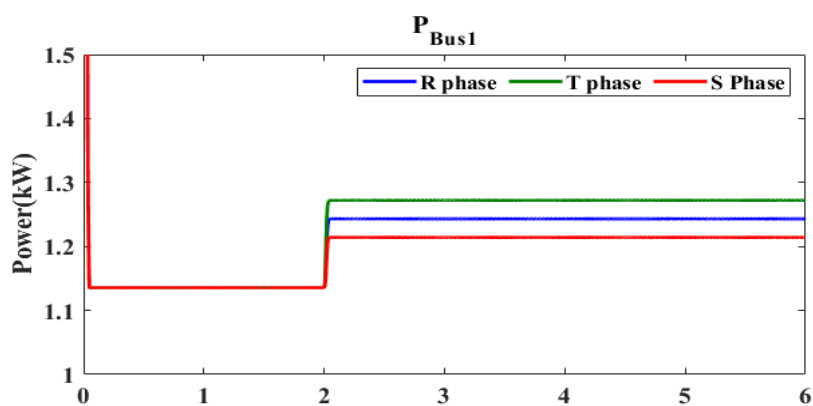
圖 56 為 Case1-2 模擬結果，圖 56(a)為單相太陽能發電功率，0 至 2 秒時尚未併入單相太陽能，於 2 秒後單相太陽能併入系統，圖 56(b)為市電端輸入之功率，由模擬結果可觀察當併入不同發電功率之單相太陽能發電系統時，太陽能發電功率三相不平衡使得由市電端供應至系統功率也同為三相不平衡，圖 56(c)(d)(e)為系統中各饋線點位置之潮流狀態，可得知當未併入單相太陽能時三相功率潮流皆平衡，當併入單相太陽能後三相功率潮流因此不平衡，圖 56(f)為依據模擬結果所繪製系統三相不平衡功率潮流。



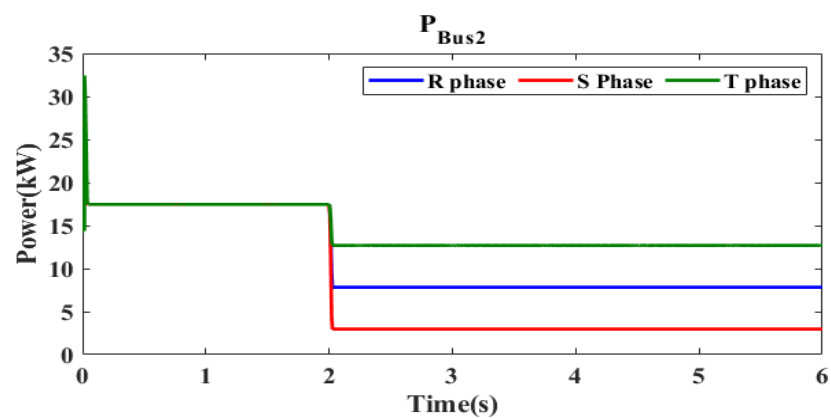
(a) 單相太陽能發電功率(R、S、T 相)



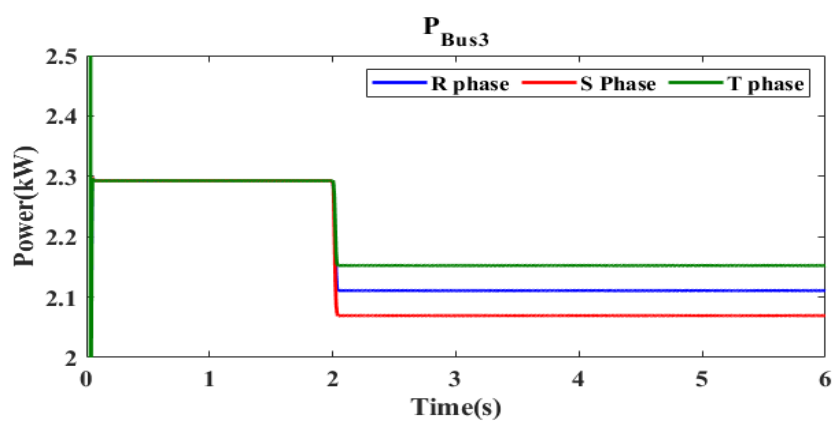
(b) 市電端功率



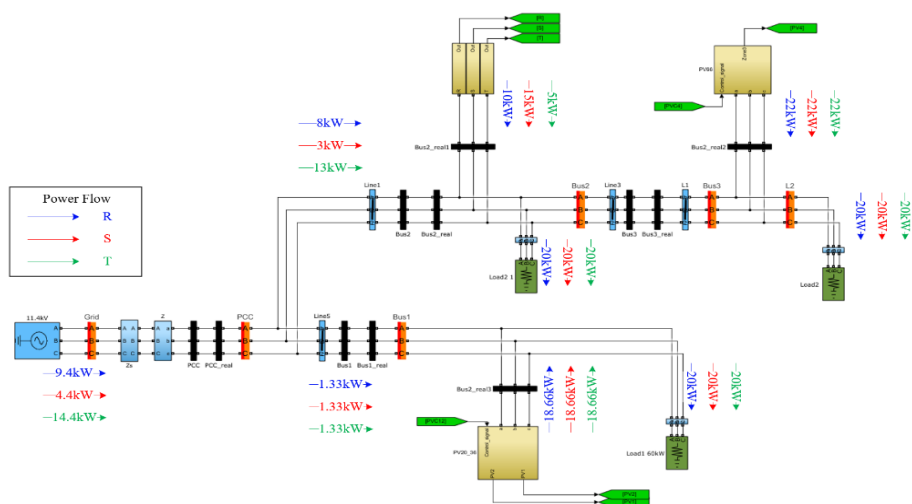
(c) Bus1 功率



(d) Bus2 功率



(e) Bus3 功率



(f) R、S、T 三相潮流分析

圖 56:Cae1-2 潮流分析結果

(三)Case1-3 三相不平衡電壓、電流 (含中性線)分析

Case1-3 案例模擬中使用圖 57 作為案例模擬之架構，其中系統架構包含單相、三相太陽能發電系統組成三相不平衡太陽能發電系統以及三組三相平衡負載與一組單相負載所組成三相不平衡負載，其額定容量與負載功率如表 6 所示，分析當系統併入單相、三相太陽能發電系統以及三相負載不平衡變動時，對於系統三相電壓、電流(含中性線)因三相不平衡所造成的狀態變化。

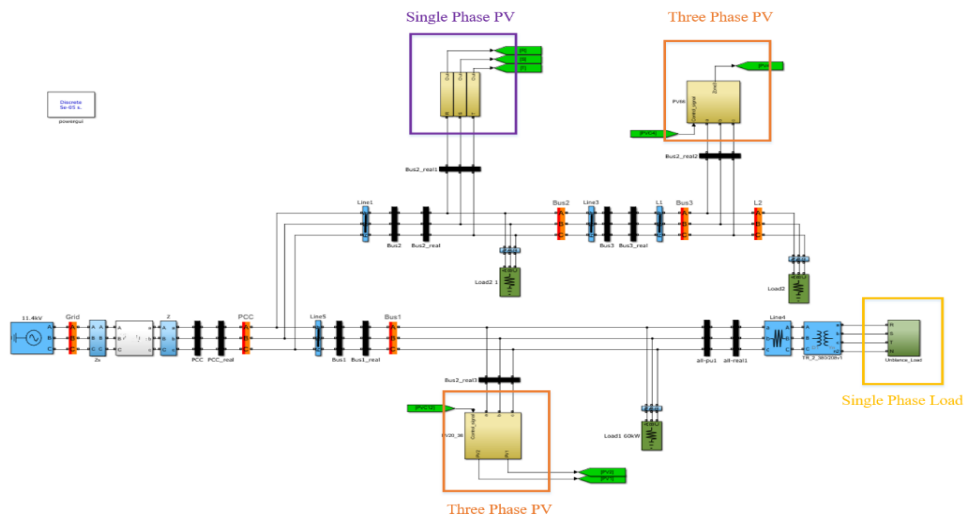


圖 57:Case1-3 三相不平衡系統分析之架構

圖 58 為 Case1-3 案例模擬所使用之模擬情境，0 至 1.5 秒與 5 秒至 6 秒時為三相平衡系統其中負載為三相平衡負載、單相太陽能未併入系統，1.5 秒至 5 秒時為三相不平衡系統其中負載為三相不平衡負載、單相太陽能併入系統，其中不平衡三相負載、不平衡太陽能發電系統使用變動負載與變動日照方式觀察對系統所造成影響。

表 6:Case 1-3 模擬案例設備容量與負載功率

Case 1-3 設備額定容量與負載需求				
能源	類別	組數	總計	
	三相太陽能	4 組	固定額定 141.6 kW	
	單相太陽能	1 組	R	0~10 kW
			S	0~15 kW
			T	0~5 kW
負載	三相負載	3 組	固定總功率 180 kW	
	單相負載	1 組	R	3~16 kW
			S	3~14 kW
			T	3~10 kW

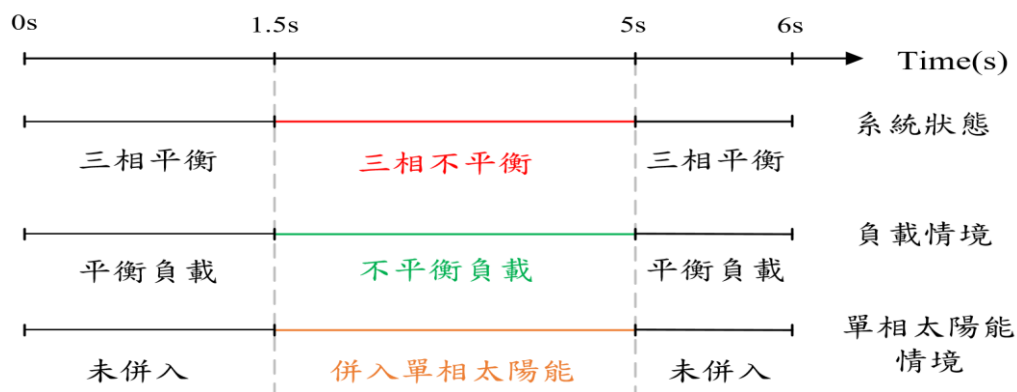


圖 58:Case1-3 模擬情境

圖 59 為 Case1-3 單相太陽能輸出功率，分別由 R、S、T 三相不功率之單相太陽能所組成，圖 60 為 PCC 點三相不平衡系統模擬結果，其中圖 60(a)PCC 點於 1.5 秒至 5 秒時不同功率單相太陽能併入系統後使系統呈現不平衡狀態，可看出中性線電流於單相太陽能

併入系統前後所造成變化，並由圖 60(b)可看出併入不同功率單相太陽能系統使 R、S、T 三相不平衡並且三相電壓標么值皆有落差。

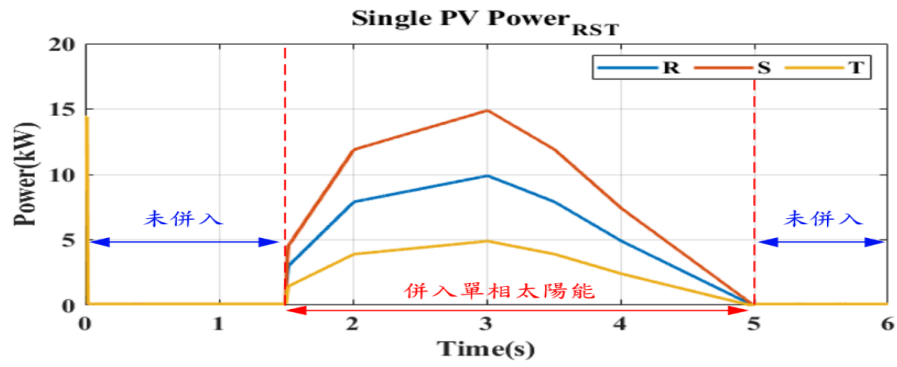
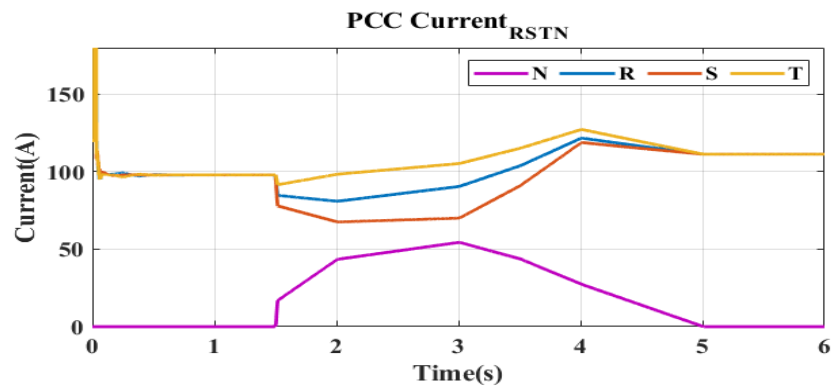
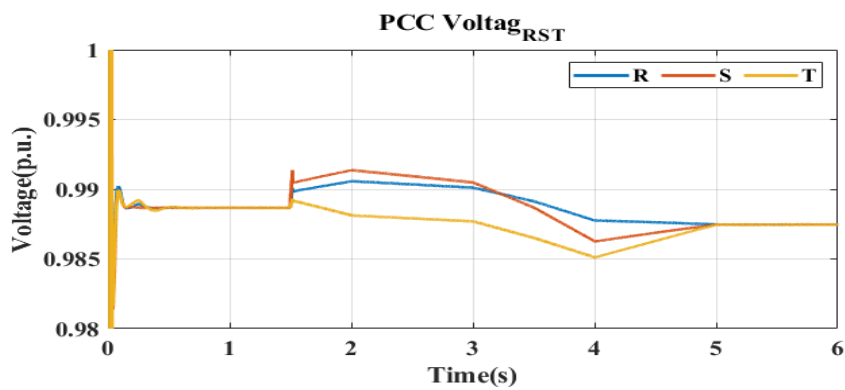


圖 59:單相太陽能輸出功率



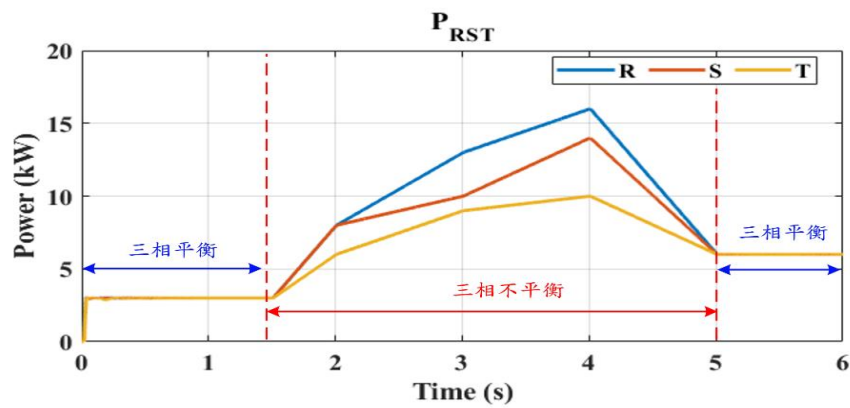
(a) PCC R、S、T、N 相電流



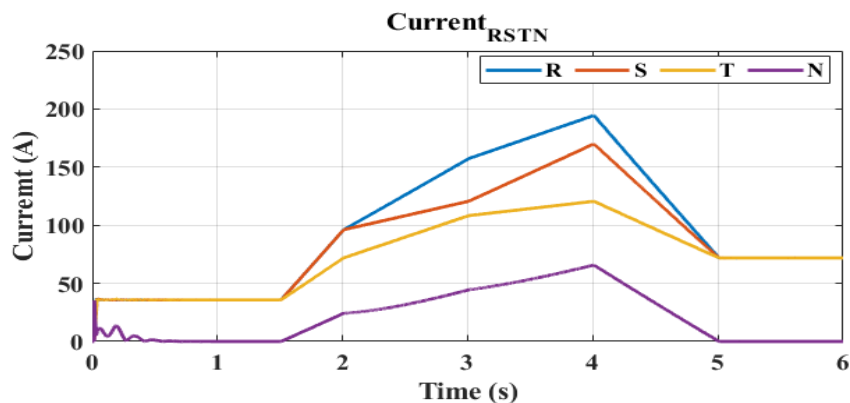
(b) PCC R、S、T 相電壓

圖 60:PCC 三相不平衡模擬結果

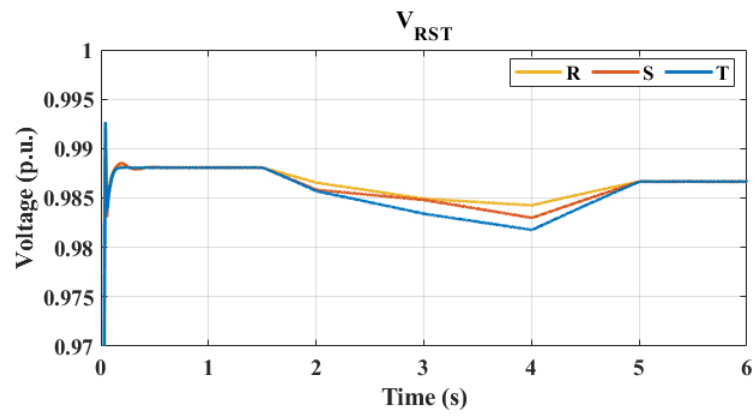
圖 61 為 Case1-3 三相不平衡系統案例模擬結果，系統中單相負載側由不同單相負載功率所組成三相不平衡負載，圖 61(a)(b)其中 0 至 1.5 秒與 5 秒至 6 秒為三相平衡負載，於 1.5 秒至 5 秒期間為三相不平衡負載，其中 4 秒時三相不平衡最為嚴重，可看出中性線電流於三相平衡與三相不平衡之間的變化，當負載為三相平衡時中性線電流輸出為零，而負載三相不平衡越嚴重時，中性線電流則越大，其中 4 秒為三相不平衡最為嚴重，中性線電流也於 4 秒時電流最大。



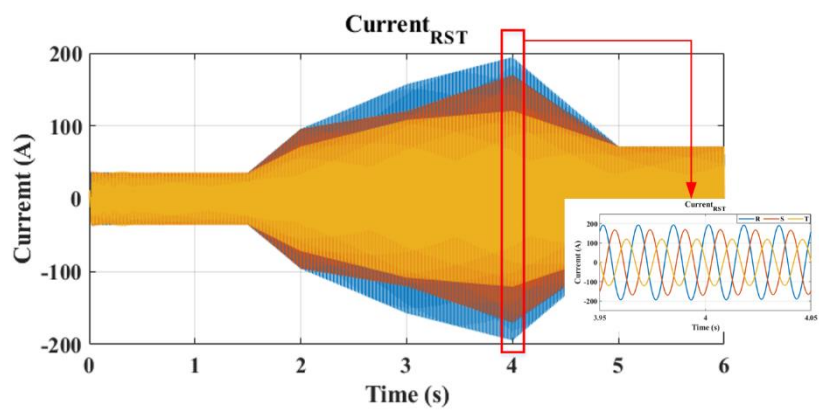
(a) 單相負載側 R、S、T 三相負載功率



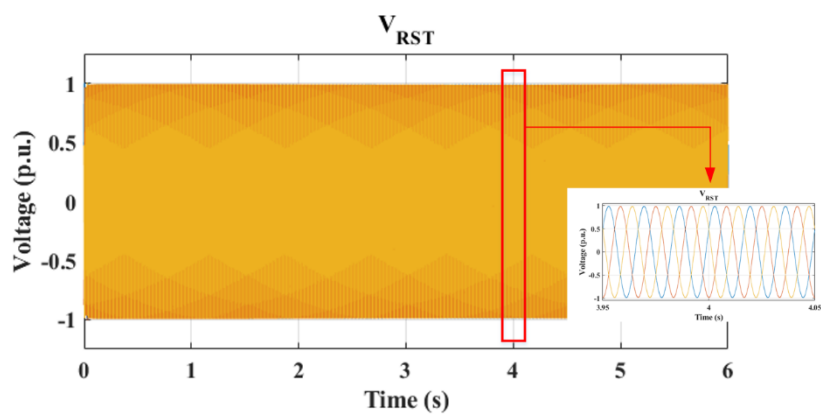
(b) 單相負載側 R、S、T、N 相電流



(c) 單相負載側 R、S、T 相電壓



(d) 單相負載側 R、S、T 相電流波形



(e) 單相負載側 R、S、T 相電壓波形

圖 61:單相負載側三相不平衡模擬案例結果

二、案例模擬 2: 電壓變化案例分析

電壓變化案例模擬中，使用圖 62 作為案例模擬之架構，其中為凸顯太陽能發電系統併入造成過電壓效果，將額定容量 300 kW 之太陽能發電系統併入於饋線末端 Bus 3，觀察當分散式能源大於負載需求時，功率逆送回電網端造成各區域以及 PCC 點電壓變化，並分別觀察經由 SI、OLTC、ESS 設備獨立、協調控制參與電壓調節情境。

電壓變化案例模擬中各設備所採用控制策略：SI 所採用控制策略為電壓/虛功控制法與定功因控制法；OLTC 控制策略採用改良式電壓準位法，OLTC 參數設定如表 8 所示，其中 OLTC 分接頭數量包含正、負各 8 個分接頭位置以及 0 分接頭位置，共由 17 個分接頭所組成，電壓不感帶區間設置為 $\pm 2\%$ 、電壓參考標么值為 1.0 p.u.、初始分接頭位置設置於 0 分接頭位置、每段分接頭間距調整量為 1.25%、延遲時間設為 0.25 秒；儲能系統採用功因調節法，其 ESS 參數設定如表 9 所示，其中儲能系統額定容量為 250 kVA、電池初始 SOC 設置為 45%，過充、過放保護功限制電池 SOC 上限、下限，分別設置 SOC 上限為 90%、下限為 10%。

電壓變化案例模擬中採用之日照曲線如圖 63 所示，使用實際日照良好資料作為太陽能發電系統照度模擬，以及模擬案例所採用負載功率變化如圖 64 所示。

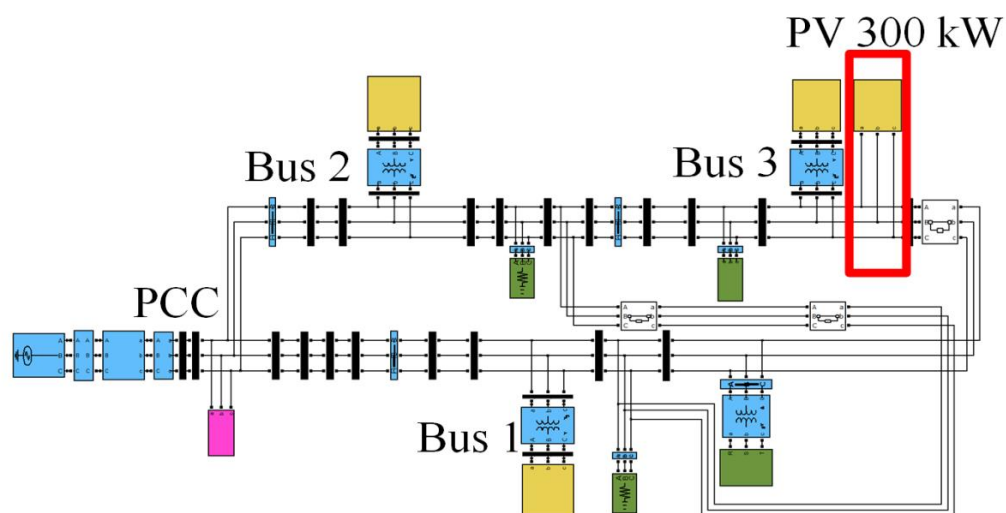


圖 62:電壓變化案例使用系統架構

表 7:電壓變化案例之設備額定容量與負載需求

設備額定容量與負載需求			
能源	類別	組數	總計
	PV	4 組	總額定 141.6 kW
	PV	3 組	總額定 300kW
	ESS	2 組	總額定 500kVA
負載	三相負載	3 組	30~80 kW (依時間變化)
	單相負載	1 組	5~18 kW (依時間變化)

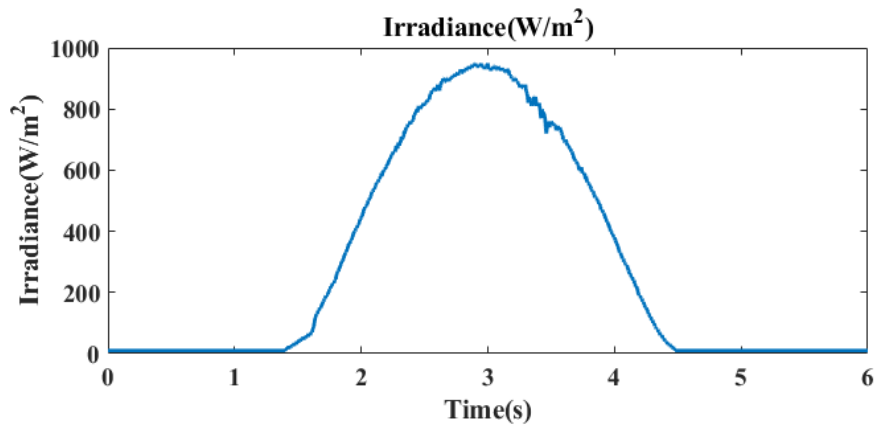


圖 63:日照變化曲線

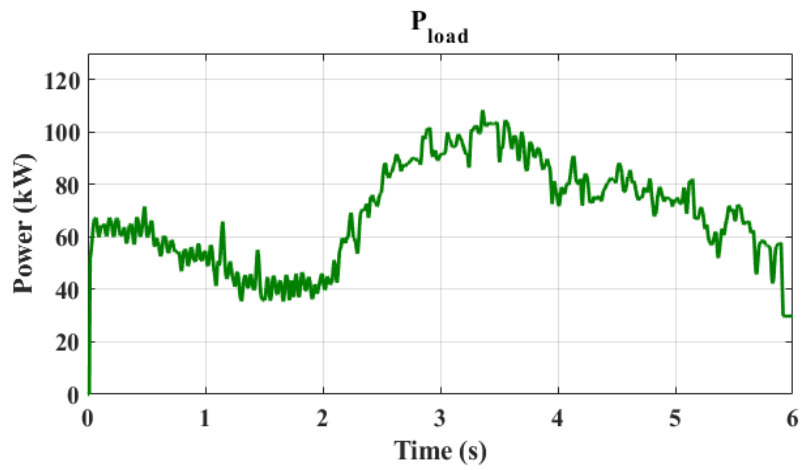


圖 64:負載功率

並於案例模擬中比較離線模擬以及連線模擬，其中離線模擬使用 Simulink 內建之求解器 ode3，而連線模擬使用 OPAL-RT 即時模擬之 ARTEMiS 求解器 art5，並且比較兩者之所需運算時間。

表 8:OLTC 變壓器參數設定

OLTC 三相變壓器	
分接頭數量	17(taps) [-8,8]
分接頭調整量	0.125(p.u.)
延遲時間	0.0125(s)
不感帶區間	± 0.02 (p.u.)
電壓參考值	1.0(p.u.)
初始分接頭位置	0

表 9:ESS 參數設定

ESS 參數設定	
總額定容量	250 kVA
初始 SOC 設定	45 %
SOC 上限設定	90 %
SOC 下限設定	10 %

(一) Case2-1 啟用 SI 與 OLTC 協調電壓控制

Case2-1 情境中採用 SI 與 OLTC 協調電壓控制策略，SI 使用電壓/虛功控制法以及定功因控制法，圖 65 為太陽能發電系統所輸出之實、虛功率。

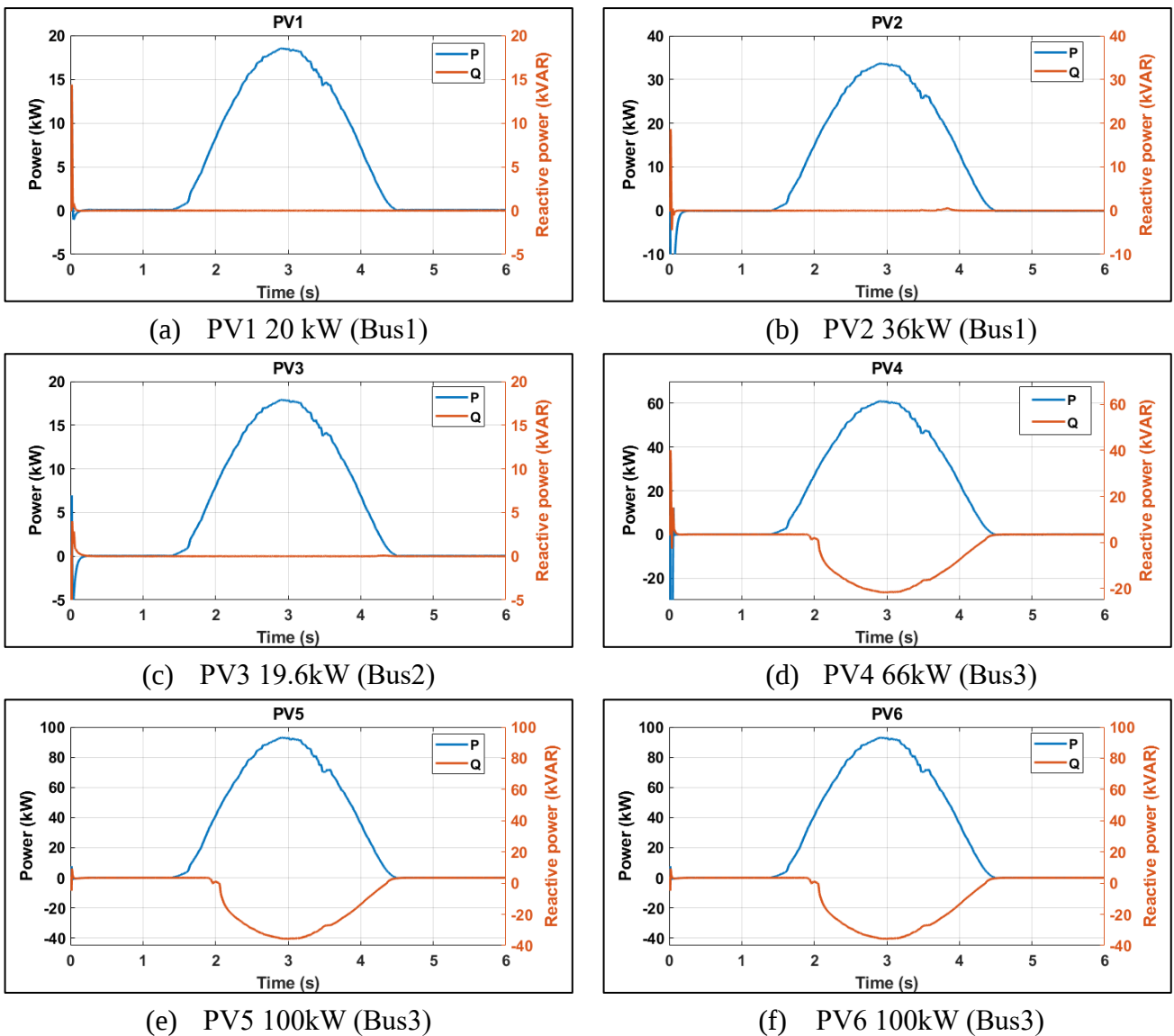
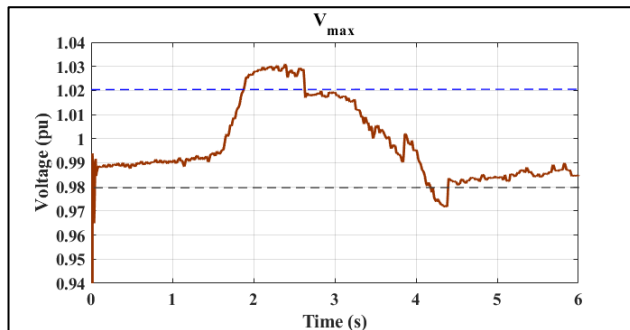
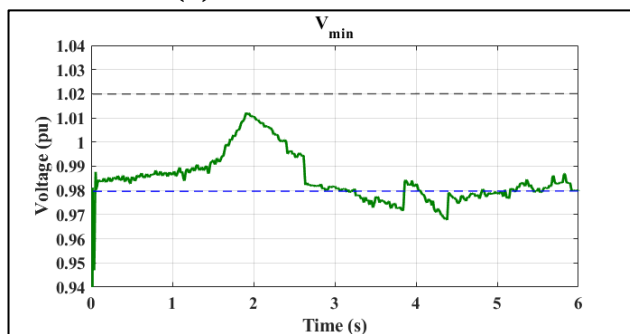


圖 65:Case 2-1 太陽能發電系統輸出實/虛功率

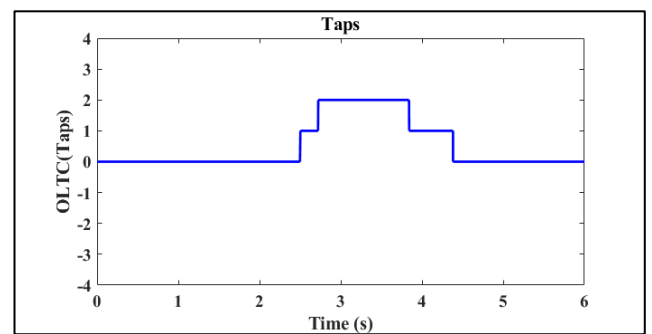
圖 66 (a)、(b)其中藍色虛線區間為 OLTC 不感帶，當所量測電壓位置超出所設定不感帶與延遲時間，即動作 OLTC 調整切換分接頭位置，圖 66(c)依據電壓變動情境所進行調整 OLTC 分接頭，於 Case2-3 情境中 OLTC 分接頭減少切換至 4 次，相比於只使用 OLTC 進行調控需要切換高達 12 次。圖 67 為饋線各位置電壓標么值，由模擬結果可得知，使用 SI 與 OLTC 進行協調電壓控制，系統中饋線電壓大部分皆於限制範圍中，僅有短暫時間於 Bus2、Bus3 超出限制範圍，其短暫時間超出電壓變動，於後續案例探討加入儲能設備參與電壓調節可避免短暫電壓變動。



(a) OLTC 量測 V_{max}

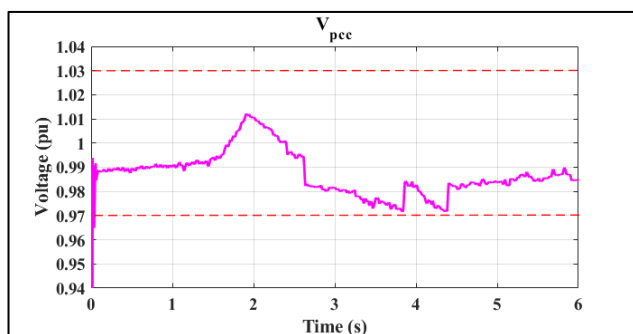


(b) OLTC 量測 V_{min}

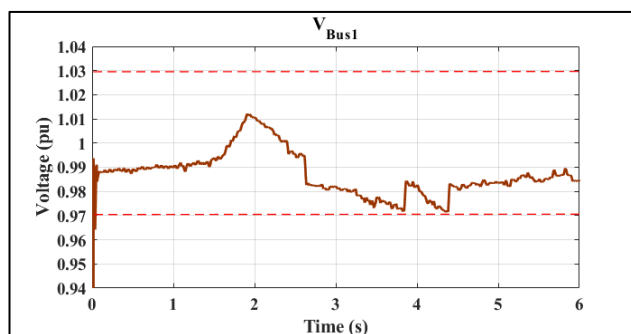


(c) OLTC(Taps)

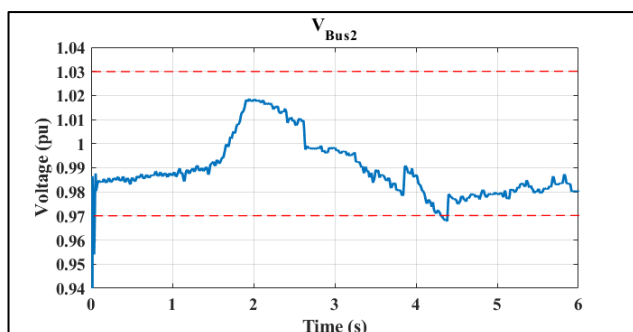
圖 66:Case 2-1 OLTC 不感帶與分接頭位置



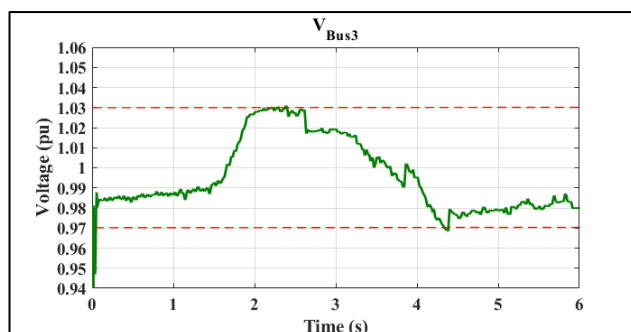
(a) PCC 電壓標么值



(b) Bus1 電壓標么值



(c) Bus2 電壓標么值



(d) Bus3 電壓標么值

圖 67:Case 2-1 系統中各位置電壓標么值

離線模擬-於主機上進行			
求解器	時間步長(μs)	模擬時間(秒)	計算時間(秒)
ode3	20	6	745
連線模擬-於 OPAL-RT 上進行			
求解器	時間步長(μs)	模擬時間(秒)	計算時間(秒)
art5	20	6	12

表 10:Case 2-1 離線模擬與連線模擬比較

離線模擬-於主機上進行			
求解器	時間步長(μ s)	模擬時間(秒)	計算時間(秒)
ode3	20	6	746
連線模擬-於 OPAL-RT 上進行			
求解器	時間步長(μ s)	模擬時間(秒)	計算時間(秒)
art5	20	6	12

(二) Case2-2 啟用 SI、OLTC 與 ESS 協調電壓控制

Case2-2 情境中使用 SI、OLTC 與 ESS 協調電壓控制策略，SI 使用電壓/虛功控制法以及定功因控制法，圖 68 為太陽能發電系統所輸出之實、虛功率。

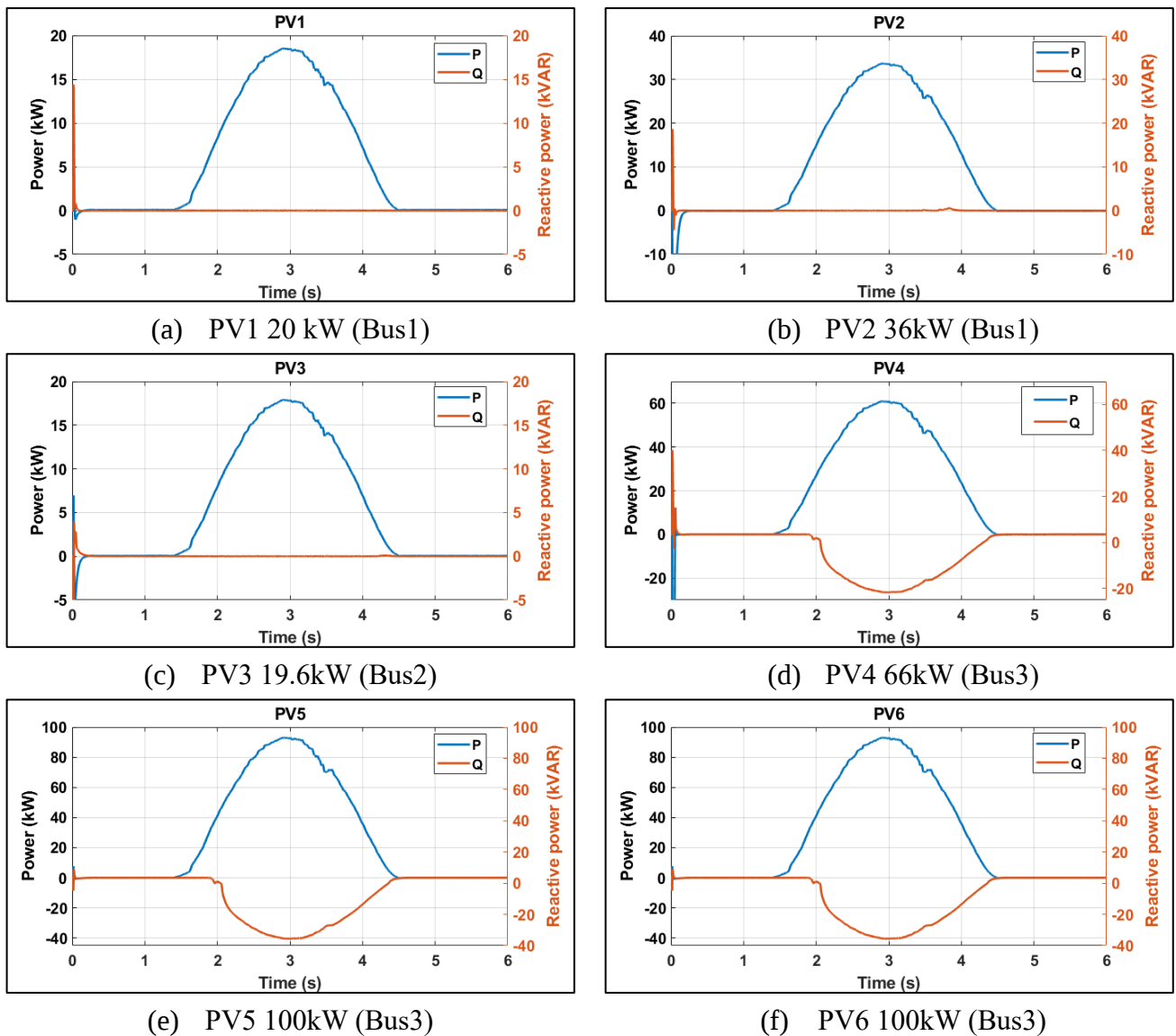
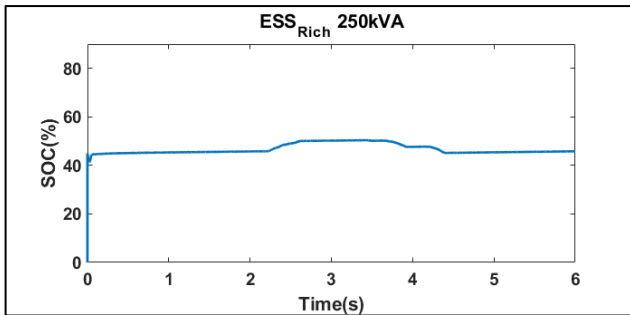
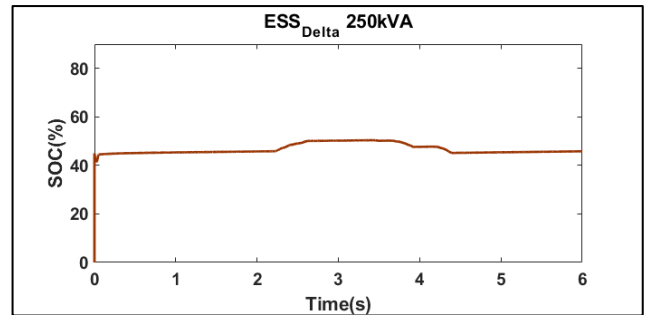


圖 68:Case 2-2 太陽能發電系統輸出實/虛功率

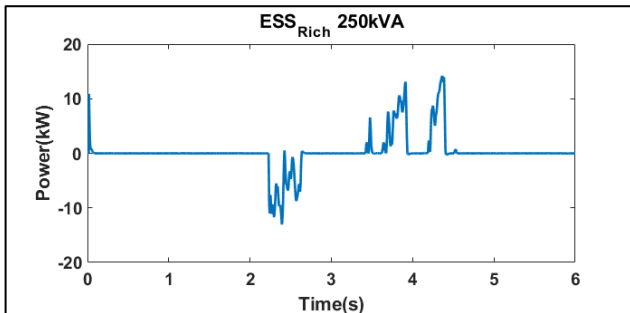
圖 69 為系統中儲能設備分別為利佳 250kVA、台達 250kVA，運作動作隨電壓變化進行充放電(短時間運轉)，其中 1.8 秒至 4.8 秒期間因電壓變化超出限制範圍，啟動儲能設備充/電控制策略與功因調節功能協助調整饋線電壓至限制範圍內。



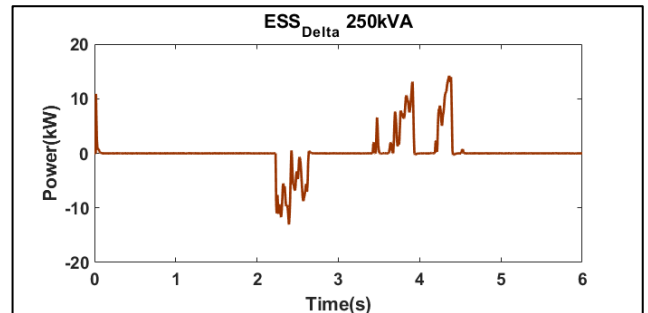
(a) Rich-SOC



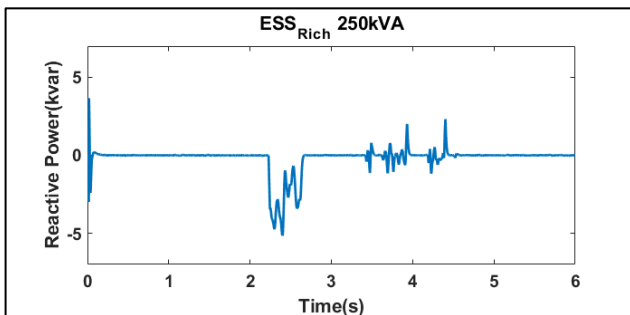
(b) Delta-SOC



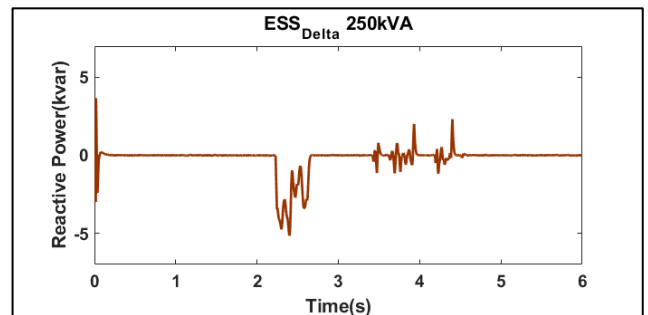
(c) Rich-實功率輸出



(d) Delta-實功率輸出



(e) Rich-虛功率補償



(f) Delta-虛功率補償

圖 69:Case2-2 儲能系統-SOC 狀態、實功率輸出、虛功率補償

圖 70 中比較三種設備分別採用獨立控制(黑色實線)與協調電壓控制，其中圖 70(a)(b)為系統中其中一組儲能系統實功率輸出以及虛功補償量，比較可看出使用協調電壓策略可大幅減少儲能系統所需輸出實、虛功率調節電壓，圖 70 (c)為 PV5 SI 使用協調控制由電壓/虛功控制法切換模式至定功因控制法，可以看出使用協調電壓控制策依然可以保持 SI 進行虛功補償，圖 70 (d) 為時間對應 OLTC 分接頭位置，依據電壓變動情境所進行調整 OLTC 分接頭位置，OLTC 分接頭可減少切換至 4 次，而未協調需切換至 12 次。

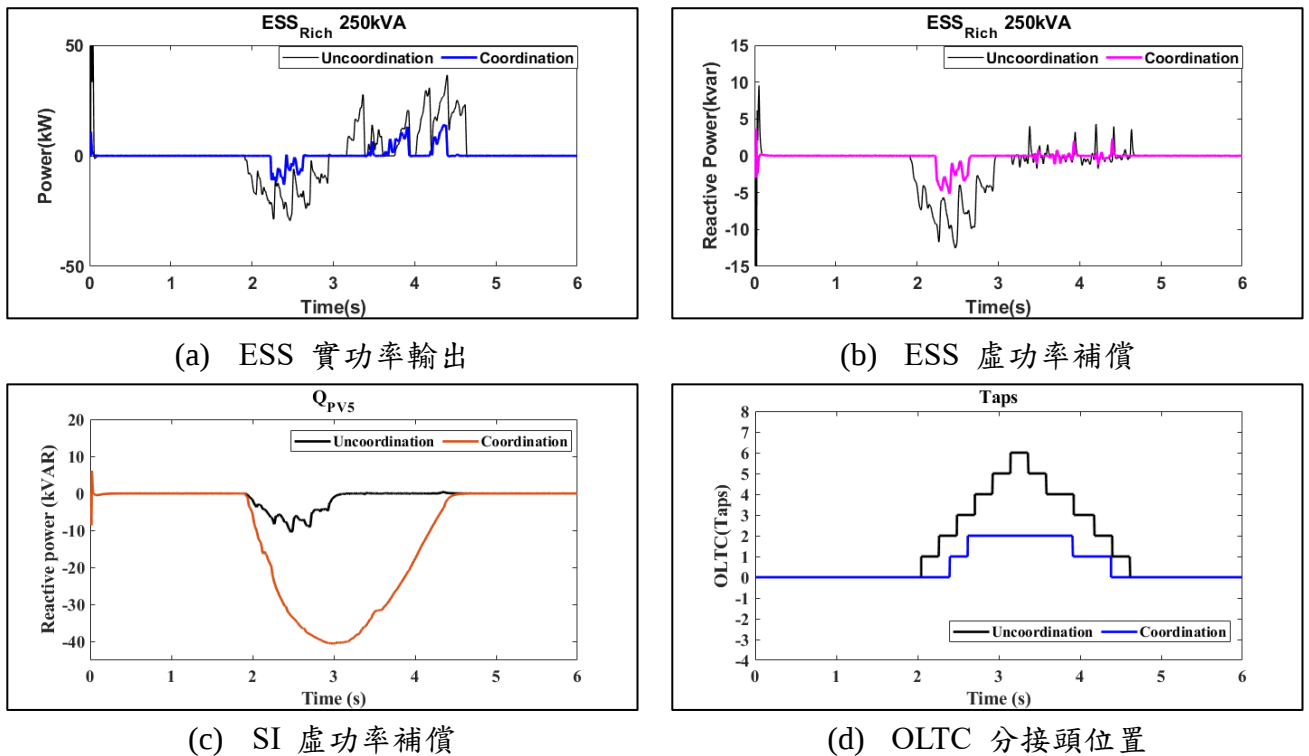


圖 70:Case2-2 系統中各設備出力補償電壓狀態

Case2-5 模擬結果中可得知當進行協調控制時，SI 可保持虛功補償功能，協調控制使系統中多項設備免於互相追逐而造成電壓震盪的情形，並且饋線電壓經由 SI、OLTC、ESS 共同進行調整，避免單一設備承擔大部分調節電壓責任。

圖 71 為饋線各位置電壓標么值，在 Case2-5 情境中使用 SI、OLTC、ESS 使用協調電壓控制，其中灰色實線為各自調控方法(未協調)，經由比較兩種方法，採用協調控制策略有效率分配設備之間出力，且更有效將各饋線電壓調整至限制範圍內。

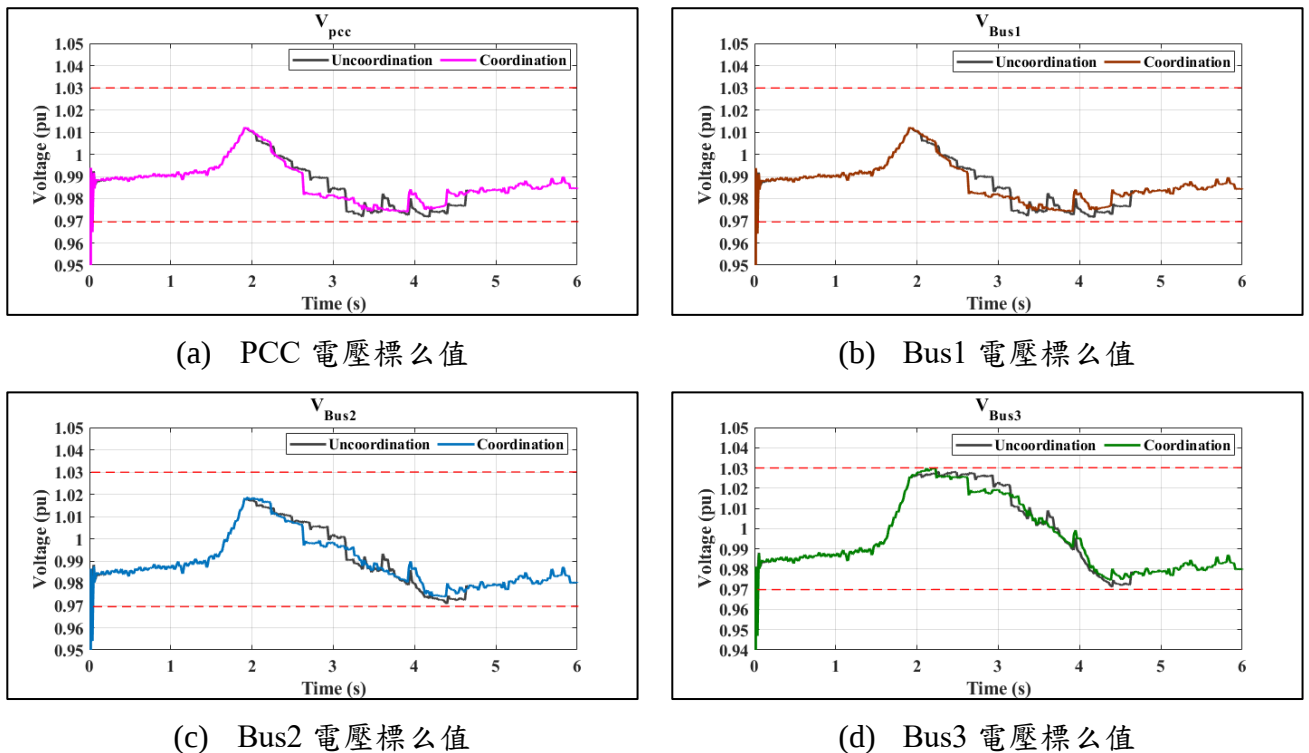


圖 71:Case 2-2 系統中各位置電壓標么值

四、結論與後續工作

本計畫「含綠能三相在線潮流分析之研究」，已完成系統中各項設備單相/三相太陽能發電系統、儲能系統、OLTC 變壓器與單相/三相變動負載等項目之建模，並透過使用 OPAL-RT 進行即時模擬，藉此驗證配電微電網之運轉狀態與特性，本計畫案例模擬中探討三相不平衡配電系統之潮流、電壓、電流(含中性線)分析，當系統中具有不平衡負載、不平衡太陽能發電系統對於整體微電網之影響，並且提出一穩定配電系統協調電壓控制策略，於電壓變化案例中如過電壓情境較輕微可使用 SI 虛功補償將電壓調整至限制範圍內，而當併網太陽能容量逐漸增加、過電壓情境越嚴重時僅使用 SI 虛功補償效果仍然有限，可搭配具有電壓調節功能之設備 OLTC 變壓器與儲能系統共同進行電壓控制，其中 OLTC 變壓器可作為長時間穩態電壓調整、儲能系統可做為短時間暫態電壓調整，可因應系統電壓狀態選擇搭配電壓調控設備，而當系統中具有多組不同電壓調節設備參與電壓調節時，如未有一協調控制策略進行各設備出力分配，則可能使設備之間互相追逐且無法有效率調整電壓，而本計畫所提出之協調電壓控制策略可較有效率分配設備出力，並且避免設備之間產生互相追逐現象。

整體計畫採用即時模擬器協助進行即時模擬與分析，可大幅度減少模擬時間，後續工作可持續嘗試將分核模型中設備分配平均亦或將系統中包含多組詳細模型進行簡化，以降低即時模擬器各核心計算負擔，達到即時模擬最大效益。

肆、參考文獻

- [1] Y. P. Agalgaonkar, B. C. Pal, R. A. Jabr, “Distributed voltage control considering the impact of PV generation on tap changers and autonomous regulator,” *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 29, no. 1, Jan. 2014, pp. 182-192.
- [2] Rule 21 Interconnection, California Public Utilities Commission, Available online: <https://www.cpuc.ca.gov/Rule21/>
- [3] IEEE P2030 Working Group, Available online: http://grouper.ieee.org/groups/scc21/2030/2030_index.html
- [4] UL 1741-SA Std., Inverters, converters, controllers and interconnection system equipment for use with distributed energy resources, 2010.
- [5] N. Vovosp, A. E. Kiprakis, and A. R. Wallace, et al., “Centralized and distributed voltage control: impact on distributed generation penetration,” *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 1, Jan. 2007, pp. 476-483.
- [6] Y. Wang, K. T. Tan, X. Y. Peng and P. L. So, “Coordinated control of distributed energy-storage systems for voltage regulation in distribution networks,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 31, no. 3, July 2015, pp. 1132-1141.
- [7] X. Liu, A. Aichhorn, L. Liu and H. Li, “Coordinated control of distributed energy storage system with tap changer transformers for voltage rise mitigation under high photovoltaic penetration,” *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, Feb. 2012, pp.897-906.
- [8] G. W. Chang, Y. J. Liu, V. Dinavahi, and H. J. Su, “On real-time simulation for harmonic and flicker assessment of an industrial system with bulk nonlinear loads,” *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 9, Sep. 2010, pp. 2998-3009.
- [9] Y. J. Liu and J. P. Hung, “On real-time simulation for power quality assessment of a power system with multi steel plants,” in *Proc. of the IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Florence, Italy, June 2016.
- [10] Y. J. Liu, S. I Chen, Y. R. Chang, and Y. D. Lee, “Development of a modelling and simulation method for residential electricity consumption analysis in a community microgrid system,” *Applied Sciences*, vol. 7, no. 733, July 2017.

- [11] N. F. Avila and C. C. Chu, "Distributed pinning droop control in isolated AC microgrids," *IEEE Trans. on Industrial Applications*, vol. 53, no. 4, April 2017, pp. 3237-3249.
- [12] Y. Y. Hong et al, "Real-time and synchronous simulation in microgrid control center," in *Proc. of IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Nagasaki, Japan, Nov. 2012.
- [13] Y. C. Wu, C. J. Wu, C. C. Chu, and M. J. Chen, "Real-time simulation implementation of protective relay systems," *Applied Mathematics & Information Sciences*, vol. 7, no. 1S, 2013, pp. 275S-280S.
- [14] 吳立成，電力系統即時模擬技術及其在數位電驛與事故分析之研究，博士論文，台灣大學，2012 年 11 月。
- [15] G. W. Chang et al, "A study of passive harmonic filter planning for an AC microgrid," in *Proc. of IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Denver, USA, July 2015.
- [16] 張永瑞、姜政綸、李奕德，微電網發展前景及技術剖析，台灣能源期刊，第 259-278 頁，2015 年。
- [17] 微電網示範系統，行政院原子能委員會核能研究所，Available online: <https://www.iner.gov.tw/articledetail/envenergy/304.html>
- [18] 李奕德、姜政綸、林世維、詹振旻，微電網電力調度與彈性恢復控制設計，台灣能源期刊，第 113-135 頁，2018 年。
- [19] M. Rahan, A. K. Ajad, "Analysis of P&O and INC MPPT Techniques for PV Array Using MATLAB," *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol.11, April 2016, pp.80-86.
- [20] M. P. Zala and M. H. Pandya, "Dual mode operation of PV system with close loop inverter voltage control," in *Proc. of International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, Chennai, India, Aug. 2017.

- [21] P. K. Pathak and A. R. Gupta, "Battery energy storage system," in Proc. of International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology (CICT), Ghaziabad India, Feb. 2018.
- [22] 動態電池數學表示式, Mathworks, Available online:
https://ww2.mathworks.cn/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html?searchHighlight=battery&s_tid=srchtitle
- [23] F. e Silva, L. A. de S. Ribeiro, and J. G. de Matos, "Bidirectional DC-AC converter for isolated microgrids with voltage unbalance reduction capabilities," in *Proc. of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Sept. 2014, pp.4985-4991.
- [24] C. Long and L. F. Ochoa, "Voltage control of PV-rich LV networks: OLTC-fitted transformer and capacitor banks," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 31, no. 5, Sept. 2016, pp. 4016-4025.
- [25] 侯均凱, 電壓閃爍對變電所有載分接頭變壓器之衝擊分析與量測, 國立中正大學電機工程學系, 碩士論文, 2010 年。
- [26] 蘇勝一, 提高分散式電源併聯容量之饋線開關及電壓整合控制, 國立中山大學電機工程學系, 碩士論文, 2009 年。
- [27] 王閔賢, 分散型發電併網運轉對配電系統常用電壓控制方法衝擊與影響研究, 國立台灣科技大學電機工程學系, 碩士論文, 2006 年。
- [28] W. Sunderman, H. Li, and J. Smith, "Smart grid inverters to support photovoltaic in distribution systems," in *Proc. of International Conference on Electricity Distribution*, Lyon France, June 2015.
- [29] Red Hat Enterprise Linux operating system, Available online:
<https://www.redhat.com/en/technologies/linux-platforms/enterprise-linux>

- [30] RT-LAB simulation platform, Opal-RT technologies, Available online: <https://www.opal-rt.com/software-rt-lab-2/>
- [31] ARTEMiS-SSN, CYBERNET SYSTEMS TAIWAN, Available online: <http://www.cybernet-ap.com.tw/zh.php?m=1062&t=95>
- [32] RT-Events Real-Time simulation tools, Opal-RT technologies, Available online: <https://www.opal-rt.com/solver-rt-events/>
- [33] S. S. Noreen, V. Roy and S. B. Bayne, “An overall study of a real-time simulator and application of RT-LAB using MATLAB simpowersystems,” in *Proc. of IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC)*, Long Beach, USA, Nov 2017.