

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

微電網智慧電能控制與管理

Intelligent electric power control and management for microgrid

計畫編號：1022001INER036

受委託機關(構)：國立中央大學

計畫主持人：林法正

聯絡電話：03-4227151 轉 34532

E-mail address：linfj@ee.ncu.edu.tw

核研所聯絡人員：劉力源

報告日期： 102 年 12 月 5 日

目 錄

目 錄.....	I
中文摘要.....	III
ABSTRACT.....	IV
壹、計畫緣起與目的.....	1
貳、研究方法與過程.....	4
一、計畫完成項目.....	4
二、市電併聯同步法.....	5
三、TSK 機率模糊類神經網路控制器.....	8
(一)TSK 機率型模糊類神經網路構.....	10
(二)線上學習法則:.....	13
(三)收斂性分析:.....	16
(四)市電併聯系統測試.....	18
四、磷酸鋰鐵電池儲能系統.....	18
(一)儲能系統架構簡介.....	19
(二)儲能系統結合 TSK 機率模糊類神經網路.....	20
(三)電池殘餘電量估測.....	24
五、太陽能發電系統.....	26
(一)系統架構簡介.....	27
(二)最大功率點追蹤法則.....	28
(三)最大功率追蹤模擬與實驗結果.....	29
(四)饋線電壓控制策略.....	31
(五)饋線電壓控制實作.....	33
六、微渦輪發電機運作原理.....	37
七、微電網系統電能控制與管理 PSIM 模擬.....	41
(一)微電網系統控制法則.....	42
(二)PSIM 模擬微電網系統.....	45

參、主要發現與結論.....	55
目前研究成果.....	56
肆、參考文獻.....	56

中文摘要

本計畫為達成微電網智慧電能控制與管理之目標與提升分散式發電系統使用效率，將設計一以工業級電腦(Industrial PC, IPC)為基礎之微電網控制器，並以 RS485 作為分散式發電系統，如風力發電機(Wind Turbine Generator, WTG)及儲能系統，與 IPC 間之資料傳輸。待電力資訊收集與處理完畢後將微電網控制器之資訊傳送至各微電網分散式發電系統作有效的能源分配與管理。同時本計畫將以數位信號處理器 TMS230F28035 發展磷酸鋰鐵電池儲能系統及採用 TSK 機率模糊類神經網路(TSK-Type Probabilistic Fuzzy Neural Network, TSKPFNN)控制器來提升充、放電性能，再者藉由取得電池的相關資料，來進行電池殘餘電量(State of Charge, SOC)估測；另外也藉由儲能系統儲存多餘電力，而當市電斷電，且分散式發電系統又無法提供足夠的電力時，利用儲能系統來提供適當的電量給負載，並且當饋線發生電壓驟降時，可提供虛功率至系統上，補償饋線所引起之電壓下降，以達到低電壓穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)的能力。此外，本計畫也將發展太陽能發電系統，在控制的部分，將加入最大功率點追蹤(Maximum Power Point Tracking, MPPT)，提升太陽能的發電效率。微電網控制部分，本計畫將完成微渦輪發電機(Micro Turbine Generation, MTG)、風力發電機、儲能系統與負載併網、最大功率追蹤及電能管理等功能之驗證，並發展整合再生能源之電能管理系統(Energy Management System, EMS)。最後將藉由 IEEE1547 及 UL1741 所提供之測試方式以測試所發展之併網型分散式發電系統，使其具備孤島運轉之相關功能，並能符合相關之併聯標準與規範。

Abstract

The objective of this project is to manage and control microgrid using intelligent technologies and to improve the efficiency of power management for the distributed generation systems (DGs). An industrial PC (IPC)-based microgrid controller will be designed and RS485 will be adopted for internal data transmission between the DGs (e.g. wind turbine generator (WTG) and storage system) and the IPC. After the power information is collected and managed completely, the data will be sent to the DGs for the efficient power management of the microgrid system. Moreover, in order to improve the charging/discharging efficiency, the LiFePO₄ storage system based on TMS320F28035 digital signal processor (DSP) adopted TSK-type probabilistic fuzzy neural network (TSKPFNN) controller will be designed. Then, the state of charge (SOC) will be developed using the collected information of the storage system. Furthermore, when the grid is disconnected and the DGs can't provide enough power, the storage system will provide electric power to the load. When voltage sag occurs in the grid, the storage system will also feed reactive power to the grid to compensate the voltage dip to achieve low voltage ride through (LVRT). In addition, in order to achieve the best efficiency of photovoltaic (PV) system, a new maximum power point tracking (MPPT) will be developed. Additionally, the energy management system (EMS) will be developed for the control of microturbine generation (MTG), WTG and storage system, and to verify the MPPT and power management functions for the microgrid system. Finally, in order to possessing the function of islanding and meeting the relevant interconnection standards, this project will verify the developed

grid-connected DGs by using the offered test methodology in IEEE1547 and UL1741.

壹、計畫緣起與目的

目前各國電力系統均屬於大型集中式的系統，其電力來源主要為火力、核能、和部份的水力與再生能源。該系統有發電機組大型化及負載集中兩大特色，無論是核能電廠、火力電廠或水力電廠所產生的電力，由於發電廠與用戶端距離遙遠，都必須藉助輸變電系統提高電壓、透過電力線輸送、最終變壓供給用戶使用，造成大量的能量耗損。且都會區及工業區的負載集中、電力需求急速成長，但變電所尋址及興建困難，時常遭遇民眾抗爭，集中式電源無法輸送到電力需求端，造成地區性供電瓶頸。此外，最重要的問題在於，遠距離輸電與大電網互連使得系統難以快速追蹤負荷變化，故障問題容易透過電網擴散進一步造成電力系統癱瘓，且龐大的電網和過於集中的發電廠極易遭到攻擊而造成國安問題。因此，電力供應「不患寡而患不均」，且為考慮國家安全及能源問題，導入分散式發電(Distributed Generation, DG) [1]及提高電網效率便成為我國的既定政策及發展方向。

眾所皆知，若採用再生能源將可有效減緩全球溫室效應的惡化與地球上有限石化能源的枯竭。以再生能源為主的分散式發電具有模組化、建造時程短與接近負載端的特性等優點。分散式發電以分散的發電機組提供用戶端所需用電。雖然分散式發電擁有許多優點，但隨著分散式電源不斷擴增，越來越多的分散式電源與市電併聯運轉產生諸多問題，例如分散式電源單機併入系統的成本高、電源設備控制與相容性問題等。不僅如此，分散式電源對於大電網而言較不易控制，因此 IEEE1547 對於分散型電源併網制定了相關規範，減少對大電網的衝擊，但同時限制了分散式電

源的效能。為了協調分散式電源對大電網的影響與增加分散式電源為用戶端的價值，學者提出了一種新的概念：微電網(Microgrid)架構[2,3]。微電網是將分散式電源與鄰近負載端組成新的微型電網，其中包含兩種運轉模式，一是正常情況下，微電網與市電併聯運轉，稱為併網模式；另一是當檢測出微電網外部發生故障或電力品質不滿足要求時，微電網將及時與市電解聯並獨立運轉，稱為孤島運轉模式。微電網是由靜態切換開關、分散式發電系統、電力設備及自動監控系統所組成，可將一系列的負載與分散式發電系統整合而成的單一可控系統。微電網主要併聯於用戶端與大電網間之饋線上以提供穩定之電源；在與大電網併聯運轉時，由大電網平衡微電網內之電力供需；當在大電網發生故障時，微電網亦可獨立運轉。此外為了提高微電網的可靠度，微電網中的組件皆使用對等(Peer-to-Peer)[4]。所謂對等概念即是微電網與用戶端或大電網存在著對等概念，其隱含著微電網在喪失大電網提供穩定電壓與頻率或用戶端不需要經由大電網提供電力的同時，微電網仍然可以正常運作，因此，本計畫將依上述特性完成微電網之電能管理與控制。

圖 1 為本計畫微電網系統架構圖，由圖 1 所示本計畫將設計一以工業級電腦(IPC)為基礎之微電網控制器，並 RS485 作為分散式發電系統內部和 IPC 間之資料傳輸。待電力資訊收集完畢後將微電網控制器之資訊傳送至各分散式發電系統作有效的能源分配與管理；另外本計畫將建置磷酸鋰鐵電池儲能系統與太陽能發電系統。在電池方面，將針對殘電量(SOC)進行估測及利用儲能系統，於饋線發生電壓驟降時，提供虛功率至系統上，補償饋線所

引起之電壓下降。在太陽能發電系統控制部分，本計畫加入最大功率點追蹤，以達到太陽能最有效的利用。

最後本計畫將完成微電網控制法則，將利用儲能系統當作主要功率調配之分散式發電系統(Master)，而風力發電機與微渦輪發電機則作為從屬之分散式發電系統(Slave)，當與市電併聯時，Master 及 Slave 分散式發電系統皆輸出固定功率，當微電網脫離市電獨立運轉時，Slave 分散式發電系統依然輸出固定功率，而此時 Master 發電系統則依負載變化調整輸出功率，並穩定微電網的電壓及頻率。最後所發展之微電網系統藉由微電網控制與靜態開關，使併聯於市電之微電網系統，於市電故障時，能無縫切離市電形成獨立運轉型微電網系統；當市電復電後，能自主與市電併聯同步。

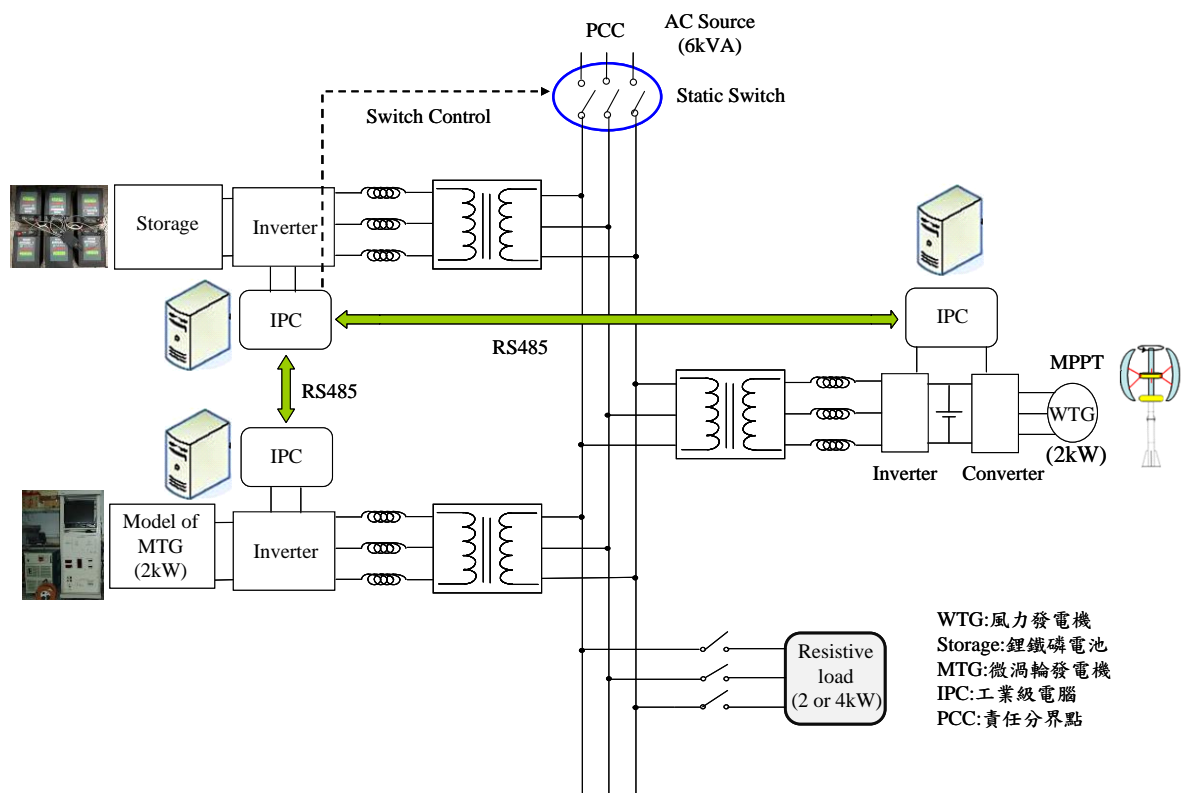


圖 1.微電網系統架構圖

貳、研究方法與過程

為達成微電網智慧電能控制與管理之目的與提升分散式發電系統使用效率，本計畫設計一以工業級電腦為基礎之微電網控制器，並以 RS485 作為分散式發電系統，如風力發電機及儲能系統與 IPC 間之資料傳輸。待電力資訊收集與處理完畢後將微電網控制器之資訊傳送至各微電網分散式發電系統作有效的能源分配與管理。同時本計畫以數位信號處理器 TMS230F28035 發展磷酸鋰鐵電池儲能系統及採用 TSKPFNN 控制器來提升充、放電性能，再者藉由取得電池的相關資料，來進行電池殘餘電量估測；另外也藉由儲能系統儲存多餘電力，而當市電斷電，且分散式發電系統又無法提供足夠的電力時，利用儲能系統來提供適當的電量給負載，並且當饋線發生電壓驟降時，可提供虛功率至系統上，補償饋線所引起之電壓下降，以達到低電壓穿越的能力。此外，本計畫也發展太陽能發電系統，在控制的部分，將加入最大功率點追蹤，提升太陽能的發電效率。微電網控制部分，本計畫完成微渦輪發電機、風力發電機、儲能系統與負載併網、最大功率追蹤及電能管理等功能之驗證，並發展整合再生能源之電能管理系統。

一、計畫完成項目

本計畫已完成市電併聯同步法、磷酸鋰鐵電池儲能系統及太陽能發電系統等。在儲能系統部分，以數位信號處理器 TMS230F28035 發展磷酸鋰鐵電池儲能系統及結合 TSKPFNN 控制器來提升充、放電性能，再者藉由取得電池的相關資料，來進行電池殘餘電量估測。太陽能發電系統部分則利用擾動觀

察法達到最大功率追蹤，以有效利用太陽能發電，另外，並完成具有低電壓穿越能力之太陽能系統，當系統發生電壓故障時，依據低壓穿越規範所規範的虛功率補償參考值，調整注入市電之虛功率，並能使太陽能系統所產生的功率與注入市電的功率維持平衡。

微電網控制部分，本計畫完成 PSIM 軟體驗證微電網系統電能管理與控制之可行性，其中以儲能系統當作微電網控制主機，而風力發電機及微渦輪發電機等分散式電源則定位為從屬部分，當在併網模式運作時，各分散式電源皆控制實、虛功率之輸出，而在進入孤島運轉時，風力發電機及微渦輪發電機依然輸出固定功率，而儲能系統即微電網控制主機則負責穩定微電網的電壓及頻率，並依據負載所需調整輸出功率[5]。

二、市電併聯同步法

本計畫為發展市電併聯同步法則，首先以 PC-based SIMULINK 直流/交流功率轉換器系統來執行市電併聯同步，功率轉換器如圖 2 所示。而為達成與市電併聯，因此需偵測市電相角及電壓，故發展鎖相迴路法(PLL)達到與市電併聯同步，其輸出功率命令 P_o^* 與 P_o 比較後經過 PI 控制器產生功率轉換器之 q 軸電流分量 i_q^* ，同理 Q_o^* 與 Q_o 比較後經過 PI 控制器產生功率轉換器之 d 軸電流分量 i_d^* ，接著與鎖相迴路法產生之電氣角度 θ_e ，經由軸座標轉換產生三相命令電流 i_u^* 、 i_v^* 、 i_w^* ，再經由控制達成與市電併聯同步。其中 v_u 、 v_v 、 v_w 表示功率轉換器之三相

電壓； i_u 、 i_v 、 i_w 表示功率轉換器之三相電流； T_a 、 T_b 、 T_c 表示功率轉換器之三相控制訊號。

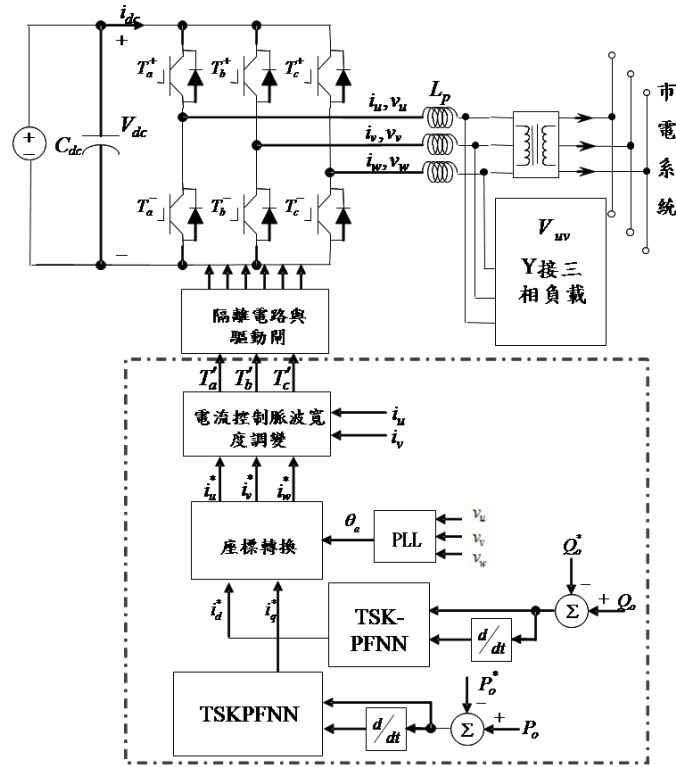


圖 2. 三相市電併聯控制架構圖

本計畫採用鎖相迴路法產生之 θ_e 達到三相電壓同步[6-8]，其公式推導如下：

假設三相電壓為：

$$v_u = V_m \sin \theta_e \quad (1)$$

$$v_v = V_m \sin(\theta_e - 120^\circ) \quad (2)$$

$$v_w = V_m \sin(\theta_e + 120^\circ) \quad (3)$$

其中 $V_m = |v_u| = |v_v| = |v_w|$ 。在此定義鎖相迴路法的軸座標轉換公式：

$$v_\alpha = \frac{2}{3}v_u - \frac{1}{3}v_v - \frac{1}{3}v_w \quad (4)$$

$$v_\beta = -\frac{\sqrt{3}}{3}v_v + \frac{\sqrt{3}}{3}v_w \quad (5)$$

將(1)至(3)式代入至(4)與(5)式，可以推得：

$$v_\alpha = V_m \sin \theta_e \quad (6)$$

$$v_\beta = V_m \cos \theta_e \quad (7)$$

假設同步旋轉座標軸轉換公式：

$$\begin{bmatrix} v_q \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \hat{\theta}_e & -\sin \hat{\theta}_e \\ \sin \hat{\theta}_e & \cos \hat{\theta}_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

將(6)與(7)代入(8)式，可以得到(9)式：

$$\begin{bmatrix} v_q \\ v_d \end{bmatrix} = V_m \begin{bmatrix} \sin(\theta_e - \hat{\theta}_e) \\ \cos(\theta_e - \hat{\theta}_e) \end{bmatrix} = V_m \begin{bmatrix} \sin \delta \\ \cos \delta \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中 $\delta = \theta - \hat{\theta}$ ，當 $\delta = 0$ ，即三相電源之電壓角位置與鎖相迴路之角位置完全一樣，達到鎖相之目的，此時 $v_q = 0$ ， $v_d = V_m$ 。如圖 3 三相鎖相迴路控制架構圖所示，首先將三相電壓源 v_u 、 v_v 與 v_w 經由同步旋轉座標軸轉換得到非時變物理量 v_q 與 v_d ，其中 v_d 代表三相電壓源相電壓之峰值， v_q 代表三相電壓角度 θ 與鎖相迴路輸出角度 $\hat{\theta}$ 之間的誤差量，將 v_q^* 設為零，再利用 PI 控制器 $K_f(s)$ 去調節 v_q^* 與 v_q 的誤差量。其誤差量經過比例積分控制器獲得角頻率 $\hat{\omega}_e$ 再經過積分器，即可輸出角度 $\hat{\theta}_e$ ，此角度再輸入至軸轉換方程式，形成一閉迴路控制，進而

達成鎖相之目的。

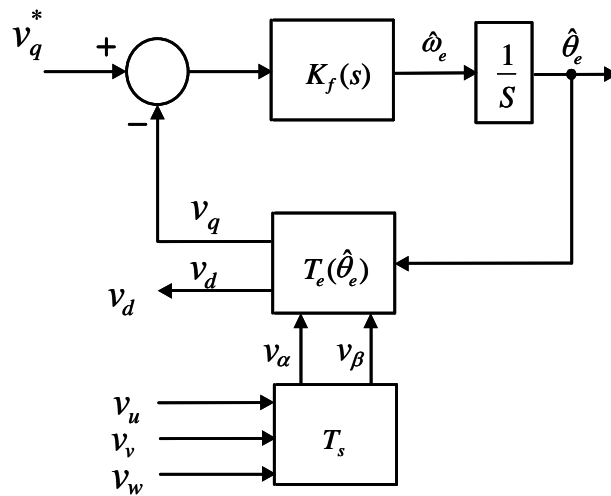


圖 3. 鎖相迴路法同步控制架構

三、TSK 機率模糊類神經網路控制器

傳統之比例積分控制器有著結構簡單且容易實行之優點，因此比例積分控制器為傳統工業最普遍使用之控制器，然而在實際上系統為非線性系統，系統包含了許多不確定項，使用傳統控制器會發生拙劣之動態響應甚至系統不穩定。然而模糊邏輯與類神經網路在解決複雜且實用的問題越來越受到重視，其具備了可近似任何非線性連續函數之能力，且可達到所期望之響應。雖然模糊邏輯與類神經網路均為通用之函數近似器 (Function Approximator)，但是彼此之間仍有不同，前者為具有語法化之資訊 (Linguistic Information) 與邏輯控制特色，後者只要小心設計網路之學習方式，其擁有錯誤容忍 (Fault-Tolerance)、並行處理與線上學習之特點，模糊邏輯與類神經網路有互補之特色，因此，同時具有模糊邏輯與類神經網路之特色之模糊類神經網路控制器 (Fuzzy Neural Network, FNN)

近來發展快速。故本計畫提出一 TSK 機率模糊類神經網路 (TSK-Type Probabilistic Fuzzy Neural Network, TSKPFNN) 取代傳統的比例積分控制器。TSK 型模糊類神經網路為片段線性模式，可將非線性系統分解成局部線性之組合，將輸入與輸出變數以線性方式組合，使其與受控體之數學資訊有相結合之能力。機率型模糊類神經網路 (Probabilistic Fuzzy Neural Network, PFNN) 結合了模糊類神經網路與機率類神經網路 (Probabilistic Neural Network, PNN) 一種為前饋型之神經網路，建立了模糊與機率之間之連結，等於具有三維之歸屬函數層。機率型模糊類神經網路結合了機率型類神經網路與模糊類神經網路的優點，可強化網路學習能力與增快網路收斂時間，適合應用於複雜的受控系統建模或是建構高階的智慧型控制器。本計畫結合了上述之優點形成 TSK 機率模糊類神經網路。圖 4 為本計畫推導之 TSK 機率型模糊類神經網路的架構，第一層為輸入層，第二層為歸屬函數層，第三層為機率層，第四層為規則層與 TSK 型模糊推論機制，第五層為後件部層，最後第六層為輸出層，共兩個輸入以及一個輸出。此外，網路架構、學習法則和收斂性分析描述如下：

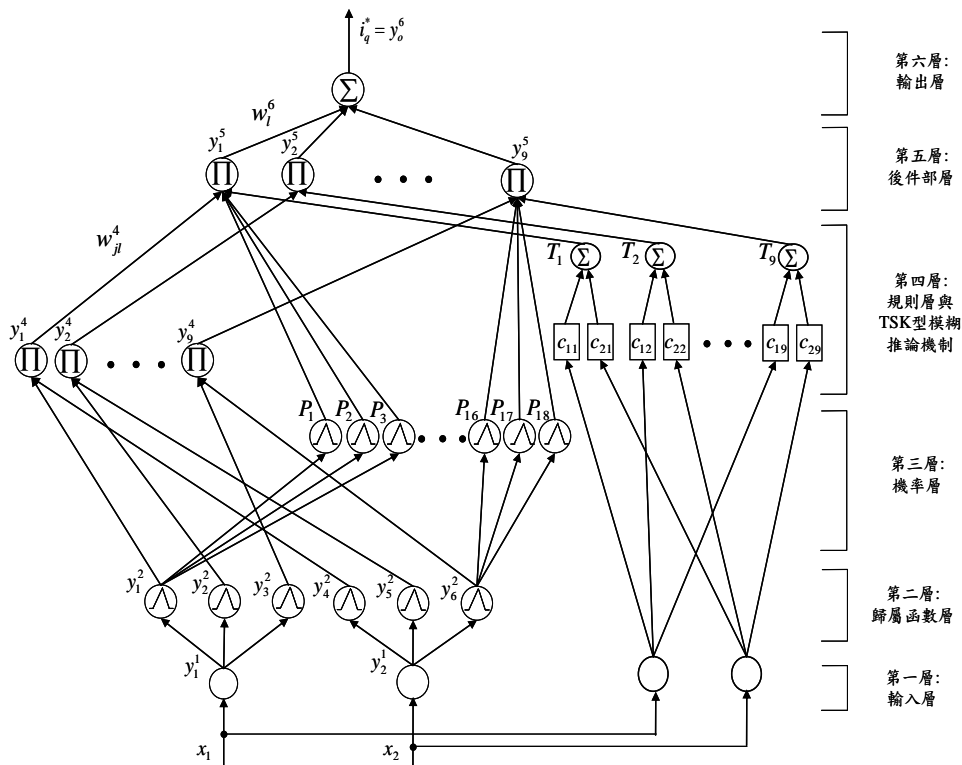


圖 4. TSK 機率模糊類神經網路架構圖

(一) TSK 機率型模糊類神經網路構

➤ 第一層(輸入層)：

在輸入層中，輸入的節點與輸出節點可以下式描述：

$$x_i(N) = y_i^1(N), \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

其中 x_i 代表第 i 個輸入到輸入層； N 表示第 N 次網路訓練次數。TSK 機率型模糊類神經網路的輸入為 $x_1(N) = e$ 、 $x_2(N) = \dot{e}$ ，分別表示追隨實功與虛功命令的誤差與追隨誤差的微分。

➤ 第二層(歸屬函數層)：

在歸屬函數層中，一般的歸屬函數是採用高斯函數，為了數位訊號處理器的運算量，採用三角形函數 $f_m(y_i^1(N))$ 來近似高斯函數如圖 5 所示， $f_m(y_i^1(N))$ 可表示成：

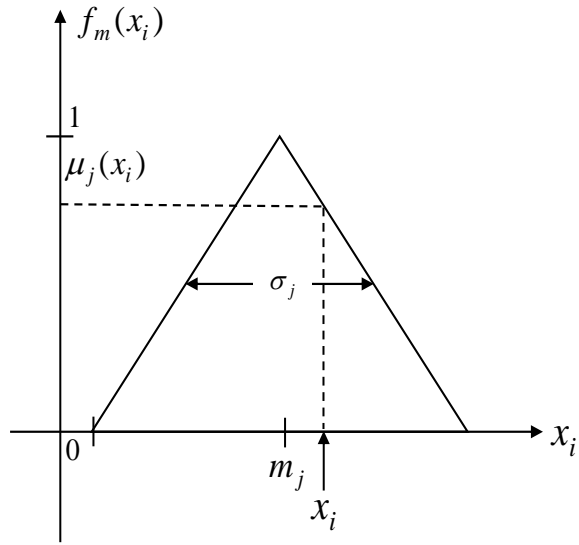


圖 5. TSK 機率模糊類神經網路架構圖

$$\begin{aligned}
 y_j^2(N) &= f_m(y_i^1(N)) \\
 &= \begin{cases} 0 & \text{if } y_i^1(N) \geq m_j + \sigma_j, y_i^1(N) \leq m_j - \sigma_j \\ \frac{y_i^1(N) - m_j + \sigma_j}{\sigma_j} & \text{if } m_j - \sigma_j < y_i^1(N) \leq m_j \\ \frac{-y_i^1(N) + m_j + \sigma_j}{\sigma_j} & \text{if } m_j < y_i^1(N) \leq m_j + \sigma_j \end{cases} \quad (11) \\
 & \quad \quad \quad j = 1, 2, \dots, 6
 \end{aligned}$$

其中 $y_j^2(N)$ 為第 i 個節點變數中第 j 個節點的輸出； m_j 為三角形函數的中間值； σ_j 為三角形至中間值的寬度。

► 第三層(機率層)：

在機率中，考慮到模糊分類必須為獨立的變數，因此機率的資料利用 Bayes 理論[9]去處理。一般的機率函數是採用高斯函數，同樣地為了減少數位訊號處理器的運算量，本論文採用三角形函數 $f_p(y_j^2(N))$ 來近似高斯函數如圖 6 所示， $f_p(y_j^2(N))$ 可表示成：

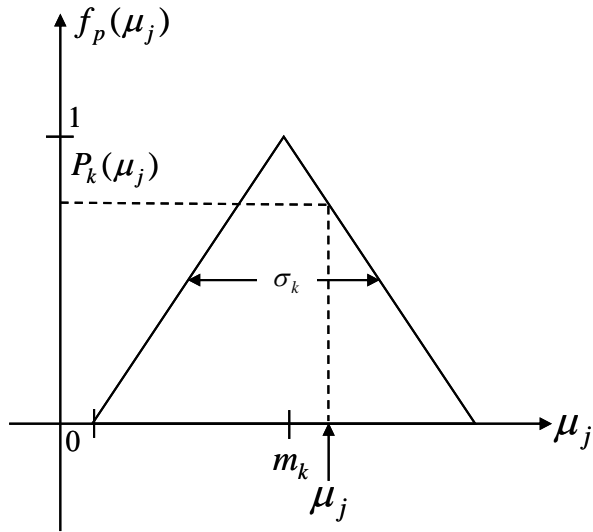


圖 6. 機率層之三角函數

$$\begin{aligned}
 P_k(N) &= f_p(y_j^2(N)) \\
 &= \begin{cases} 0 & \text{if } y_j^2(N) \geq m_k + \sigma_k, y_j^2(N) \leq m_k - \sigma_k \\ \frac{y_j^2(N) - m_k + \sigma_k}{\sigma_k} & \text{if } m_k - \sigma_k < y_j^2(N) \leq m_k \\ \frac{-y_j^2(N) + m_k + \sigma_k}{\sigma_k} & \text{if } m_k < y_j^2(N) \leq m_k + \sigma_k \end{cases} \quad (12) \\
 & \quad k = 1, 2, \dots, 18
 \end{aligned}$$

其中 $P_k(N)$ 為第 j 個節點變數中第 k 個節點的輸出； m_k 為三角形函數的中間值； σ_k 為三角形至中間值的寬度。

➤ 第四層(規則層與 TSK 型模糊推論機制)：

這層包含了規則層及 TSK 型模糊推論機制，在規則層中每個神經元代表一條模糊邏輯規則的前件部，此外，節點是以 Π 來表示，將來自第二層的輸出訊號作相乘，則第 1 個規則的節點可表示如下：

$$y_l^4(N) = \prod_j w_{jl}^4 y_j^2(N), \quad l = 1, 2, \dots, 9 \quad (13)$$

其中 $y_i^4(N)$ 為規則層的輸出， w_{ji}^4 為連結歸屬函數層及規則層之間的權重值，在此設定為 1。此外，在 TSK 模糊推論的節點為一線性組合，對每一個節點 l 的數學函數表示如下：

$$T_l(N) = \sum_i c_{il}(N)x_i(N) \quad (14)$$

其中 $c_{il}(N)$ 為調整權重值， $T_l(N)$ 為 TSK 模糊推論層的輸出。

► 第五層(後件部層)：

在後件部層中，節點會將進來訊號做相乘， $y_i^4(N)$ 為規則層的輸出， $P_k(N)$ 為機率層的輸出， $T_l(N)$ 為 TSK 模糊推論層的輸出，因此節點的輸入及輸出的關係可表示如下：

$$y_l^5(N) = \prod_l y_l^4(N)T_l(N)P_k(N) \quad (15)$$

其中 $y_l^5(N)$ 為後件部層的輸出。

► 第六層(輸出層)：

在輸出層中，輸出節點可表示成：

$$y_o^6(N) = \sum_l w_l^6(N)y_l^5(N) \quad (16)$$

其中 $i_q^* = y_o^6(N)$ 或 $i_u^* = y_o^6(N)$ 為個別的控制實功與控制虛功之 TSK 機率模糊類神經網路輸出， $w_l^6(N)$ 為連結後件部層和輸出層的權重值。

(二)線上學習法則：

TSK 機率模糊類神經網路的學習訓練核心為藉由誤差能量函數遞迴式地獲得學習訓練參數中的負梯度向量。此方法必須藉由連鎖律與參考倒傳遞學習演算法。為了描述 TSK 機率型模糊類神經網路的監督式線上學習法則，首先定義能量

函數如下：

$$E = \frac{1}{2}(P^* - P)^2 = \frac{1}{2}e^2 \quad (17)$$

學習演算法則描述如下：

➤ 第六層：

倒傳遞的誤差項如下：

$$\delta_o^6 = -\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} = -\frac{\partial E}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial y_o^6(N)} \quad (18)$$

而連結權重值的更新疊代如下：

$$\Delta w_l^6 = -\eta_1 \frac{\partial E}{\partial w_l^6} = -\eta_1 \frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial w_l^6} = \eta_1 \delta_o^6 y_l^5 \quad (19)$$

其中 η_1 為學習速率，連結權重值 w_l^6 的更新疊代如下式：

➤ 第五層：

在此層只有誤差項需要計算及倒傳遞：

$$\delta_l^5 = -\frac{\partial E}{\partial y_l^5(N)} = -\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_l^5(N)} = \delta_o^6 w_l^6 \quad (20)$$

➤ 第四層：

在此層中，倒傳遞的誤差項如下：

$$\delta_l^4 = -\frac{\partial E}{\partial y_l^4(N)} = -\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_l^5(N)} \frac{\partial y_l^5(N)}{\partial y_l^4(N)} = \delta_l^5 T_l P_k \quad (21)$$

權重值的更新疊代如下：

$$\Delta c_{il} = -\eta_2 \frac{\partial E}{\partial c_{il}} = -\eta_2 \frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_l^5(N)} \frac{\partial y_l^5(N)}{\partial T_l(N)} \frac{\partial T_l(N)}{\partial c_{il}(N)} = \eta_2 \delta_l^5 y_l^4 P_k x_i \quad (22)$$

其中 η_2 為學習速率。連結權重值 c_{il} 可根據下式來調整：

$$c_{il}(N+1) = c_{il}(N) + \Delta c_{il} \quad (23)$$

➤ 第二層：

倒傳遞的誤差項如下

$$\delta_j^2 = -\frac{\partial E}{\partial y_j^2(N)} = -\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_l^5(N)} \frac{\partial y_l^5(N)}{\partial y_l^4(N)} \frac{\partial y_l^4(N)}{\partial y_j^2(N)} = \delta_l^4 w_{jl}^4 \quad (24)$$

藉由連鎖律，三角形函數的中心值和中心值寬度的更新疊代如下式

$$\begin{aligned} \Delta m_j &= -\eta_3 \frac{\partial E}{\partial m_j(N)} = -\eta_3 \frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_l^5(N)} \frac{\partial y_l^5(N)}{\partial y_l^4(N)} \frac{\partial y_l^4(N)}{\partial y_j^2(N)} \frac{\partial y_j^2(N)}{\partial m_j(N)} \\ &= \begin{cases} -\eta_3 \delta_j^2 \frac{1}{\sigma_j^2} & \text{if } m_j - \sigma_j < y_l^1 \leq m_j \\ \eta_3 \delta_j^2 \frac{1}{\sigma_j^2} & \text{if } m_j < y_l^1 \leq m_j + \sigma_j \end{cases} \quad (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_j &= -\eta_4 \frac{\partial E}{\partial \sigma_j} = -\eta_4 \frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_l^5(N)} \frac{\partial y_l^5(N)}{\partial y_l^4(N)} \frac{\partial y_l^4(N)}{\partial y_j^2(N)} \frac{\partial y_j^2(N)}{\partial \sigma_j(N)} \\ &= \begin{cases} \eta_4 \delta_j \frac{m_j - x_n}{(\sigma_j)^2} & \text{if } m_j - \sigma_j < y_l^1 \leq m_j \\ \eta_4 \delta_j \frac{x_n - m_j}{(\sigma_j)^2} & \text{if } m_j < y_l^1 \leq m_j + \sigma_j \end{cases} \quad (26) \end{aligned}$$

其中 η_3 與 η_4 為學習速率，三角形函數的中心值 m_j 與中心值的寬度 σ_j 可根據下式來更新調整：

$$m_j(N+1) = m_j(N) + \Delta m_j \quad (27)$$

$$\sigma_j(N+1) = \sigma_j(N) + \Delta \sigma_j \quad (28)$$

為了減少數位訊號處理器的運算量，第三層的中心點 m_k 和中心點寬度 σ_k 皆是常數，當 $k=1、4、7、10、13、16$ 時三角函數的中心值為 0.4，當 $k=2、5、8、11、14、17$ 時三角函數的中心值為 0.5，當 $k=3、6、9、12、15、18$ 時三角函數的中心值為 0.6；而 σ_k 設為 1。此外，由於三相交流-直流轉換器的非動態特性，使得精確的 Jacobian， $\partial P / \partial y_o^6(N)$ ，難以獲得。為了克服這個缺點，採用

一個如下述的適應法則：

$$\delta_o^6 \cong (P^* - P) + (\dot{P}^* - \dot{P}) = e + \dot{e} \quad (29)$$

其中 \dot{P}^* 和 \dot{P} 分別為實功命令之一次微分及電池儲能系統實功之一次微分。此外，TSK 機率型模糊類神經網路追隨虛功命令的監督式線上學習法則也如上述。

(三)收斂性分析：

在 TSK 機率型模糊類神經網路中，學習速率的選擇，對網路的效能有重大的影響，因此為了有效率的訓練 TSK 機率型模糊類神經網路裡不同的學習速率，接下來將推導以遞減型 Lyapunov 函數證明追隨誤差的收斂。然而追隨誤差的收斂將確保功率有完美的追隨功率命令。首先，將式(17)的能量函數當作一個遞減型 Lyapunov 函數，則 Lyapunov 函數中的變化可表示為：

$$\Delta E(N) = E(N+1) - E(N) \quad (30)$$

而誤差方程式的線性化模組可經由式(19)、式(22)、式(25)以及式(26)表示為：

$$E(N+1) = E(N) + \Delta E(N) \quad (31)$$

$$\begin{aligned} &\approx E(N) + \sum_{l=1}^9 \left[\frac{\partial E(N)}{\partial w_l^6} \Delta w_l^6 \right] + \sum_{i=1}^2 \sum_{l=1}^9 \left[\frac{\partial E(N)}{\partial c_{il}} \Delta c_{il} \right] \\ &+ \sum_{j=1}^6 \left[\frac{\partial E(N)}{\partial m_j} \Delta m_j + \frac{\partial E(N)}{\partial \sigma_j} \Delta \sigma_j \right] \\ &= \frac{1}{4} E(N) - \eta_1 \sum_{l=1}^9 \left[\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial w_l^6} \right]^2 \\ &+ \frac{1}{4} E(N) - \eta_2 \sum_{i=1}^2 \sum_{l=1}^9 \left[\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial T_l(N)} \frac{\partial T_l(N)}{\partial c_{il}(N)} \right]^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{4} E(N) - \eta_3 \sum_{j=1}^6 \left[\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_j^2(N)} \frac{\partial y_j^2(N)}{\partial m_j(N)} \right]^2 \\
& + \frac{1}{4} E(N) - \eta_4 \sum_{j=1}^6 \left[\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_j^2(N)} \frac{\partial y_j^2(N)}{\partial \sigma_j(N)} \right]^2
\end{aligned}$$

其中 Δw_l^6 , Δc_{il} , Δm_j 及 $\Delta \sigma_j$ 分別為輸出層中權重的變化量，TSK 型模糊推論機制中權重的變化量，歸屬函數層中三角形函數中心值的變化量，以及三角形中心值寬度的變化量。假設 TSK 機率型模糊類神經網路的學習速率參數可以設計如下：

$$\eta_1 = \frac{E(N)}{4 \left[\sum_{l=1}^9 \left(\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial w_l^6} \right)^2 + \varepsilon \right]} \quad (32)$$

$$\eta_2 = \frac{E(N)}{4 \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{l=1}^9 \left[\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial T_l(N)} \frac{\partial T_l(N)}{\partial c_{il}(N)} \right]^2 + \varepsilon \right]} \quad (33)$$

$$\eta_3 = \frac{E(N)}{4 \left[\sum_{j=1}^6 \left(\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_j^2(N)} \frac{\partial y_j^2(N)}{\partial m_j(N)} \right)^2 + \varepsilon \right]} \quad (34)$$

$$\eta_4 = \frac{E(N)}{4 \left[\sum_{j=1}^6 \left(\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_j^2(N)} \frac{\partial y_j^2(N)}{\partial \sigma_j(N)} \right)^2 + \varepsilon \right]} \quad (35)$$

其中 ε 為一個正值常數，則式(31)可改寫為：

$$\begin{aligned}
E(N+1) & \approx \varepsilon(\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4) \quad (36) \\
& = \frac{E(N)\varepsilon}{4 \left[\sum_{l=1}^9 \left(\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial w_l^6} \right)^2 + \varepsilon \right]} + \frac{E(N)\varepsilon}{4 \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{l=1}^9 \left[\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial T_l(N)} \frac{\partial T_l(N)}{\partial c_{il}(N)} \right]^2 + \varepsilon \right]} \\
& + \frac{E(N)\varepsilon}{4 \left[\sum_{j=1}^6 \left(\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_j^2(N)} \frac{\partial y_j^2(N)}{\partial m_j(N)} \right)^2 + \varepsilon \right]} + \frac{E(N)\varepsilon}{4 \left[\sum_{j=1}^6 \left(\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_j^2(N)} \frac{\partial y_j^2(N)}{\partial \sigma_j(N)} \right)^2 + \varepsilon \right]}
\end{aligned}$$

$$< \frac{E(N)}{4} + \frac{E(N)}{4} + \frac{E(N)}{4} + \frac{E(N)}{4} = E(N)$$

根據式(17)及式(36)，證明了 TSK 機率型模糊類神經網路控制的收斂。因此，TSK 機率型模糊類神經網路控制系統的追隨誤差可逐漸收斂至零。

(四)市電併聯系統測試

為測試市電併聯，本計畫以 TSK 機率型模糊類神經網路控制器做 PSIM 模擬測試，由於 PSIM 之方塊程式無法將 TSK 機率模糊類神經網路組合而成，因此需藉由動態連結檔(Dynamic Logic Link, DLL)來執行，此動態連結檔具有編寫 C 語言程式之功能，因此本文之 TSK 機率模糊類神經網路之程式皆在此動態連結檔中編寫。圖 7 為從 0 至 2kW 將電能饋至電網之模擬，由圖可知所推導 TSK 機率模糊類神經網路可有效併網控制。

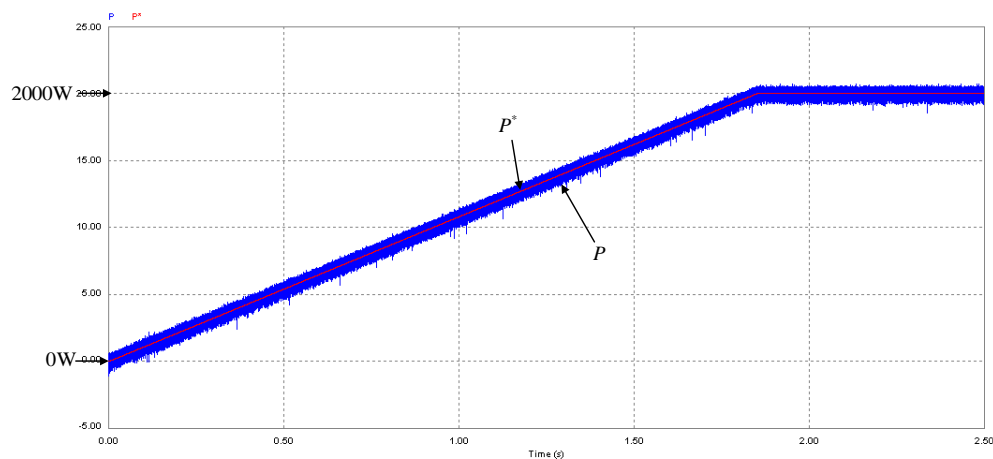


圖 7. 從 0 至 2kW 將電能饋至電網之模擬圖

四、磷酸鋰鐵電池儲能系統

本計畫為發展微電網系統，建置磷酸鋰鐵電池儲能系統，

磷酸鋰鐵電池組和具雙向功率流動之三相交流-直流轉換器所組成，最後經過濾波電感和隔離變壓器連接至電網。其主要目的以控制實功及虛功來滿足電網之需求。

(一)儲能系統架構簡介

儲能系統架構圖如圖 8 所示。圖中 i_a 、 i_b 和 i_c 為三相交流-直流轉換器之三相交流電流， V_a 、 V_b 和 V_c 為三相相電壓，將三相相電壓訊號經由鎖相迴路控制得到電網相位之估測角度 $\hat{\theta}$ ，三相電壓與相電流訊號分別經由 $a-b-c$ 軸至 $d-q$ 軸座標轉換，分別得到 $d-q$ 軸電壓 V_q 和 V_d 以及 $d-q$ 軸電流 i_q 和 i_d ，所得之電壓與電流訊號經由功率運算即可獲得實功 P 以及虛功 Q [10, 11]。而 P^* 和 Q^* 分別為實功以及虛功命令，然而實功命令要送入之前將先判斷電池電壓 V_{dc} 是否在可運作之範圍內，範圍為 223V 至 250V，電池殘電量約為 20% 至 80%。當實功命令 P^* 在與實際功率 P 比較之前有個限制器，為三相交流-直流轉換器之限制，其限制範圍為 -2kW 至 2kW，本計畫之儲能系統以供應實功為主，因此虛功命令設定為零，讓所供應之功率皆為實功，其中實功為正值時，功率流動方向為從直流至交流；實功為負值時，功率流動方向為從交流至直流。 i_q^* 與 i_d^* 為實功與虛功之電流控制力，而 $-\omega L i_d$ 和 $\omega L i_q$ 分別為直軸 q 軸及 d 軸之解耦合項。最後經由反座標軸轉換 $d-q$ 軸至 $a-b-c$ 軸與三角波比較，送出 PWM 訊號。

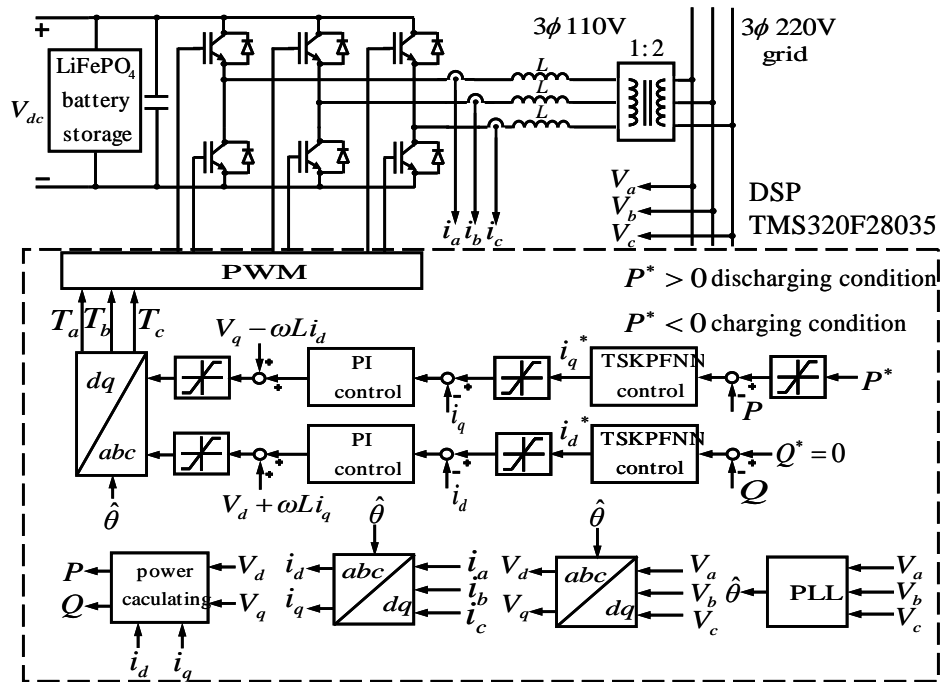


圖 8. 磷酸鋰鐵電池儲能系統控制方塊圖

(二) 儲能系統結合 TSK 機率模糊類神經網路

本計畫以數位訊號處理器 TMS230F28035 為基礎並結合 TSK 機率模糊類神經網路控制器以控制儲能系統，本儲能系統可對電網以實、虛功率控制法則進行併網及充、放電功能。系統規格如表 1，而隔離變壓器規格為 1:2，最後連接至三相 220V 交流電，儲能系統之實體圖如圖 9 所示。首先，本計畫利用 PI 控制器控制儲能系統之充、放電工能，圖 10 為使用 PI 控制器控制功率以對市電進行放電，其中實功命令以步階從 2kW 至 1.5kW 再至 1kW 後，再步階至 1.5kW 以及 2kW，相電壓與相電流之波形圖。圖 11 為使用 PI 控制器控制功率市電對電池充電，實功命令以步階從 -2kW 至 -1.5kW 再至 -1kW 後，再步階至 -1.5kW 以及 -2kW，相電壓與相電流之波形圖。最後，利用 TSK 機率模糊類神經網路控制器取代 PI 控制器進行電池充、放電功能實作，圖

12 為實功命令以步階從 2kW 至 1.5kW 再至 1kW 後，再步階至 1.5kW 以及 2kW，相電壓與相電流之波形圖，由實作可知電池之電能將可饋回市電端，圖 13 為實功命令以步階從 -2kW 至 -1.5kW 再至 -1kW 後，再步階至 -1.5kW 以及 -2kW，相電壓與相電流之波形圖，能將市電端之電能吸入儲存至電池。由圖 10、11、12、13 比較可知使用 TSK 機率模糊類神經網路控制器會比使用比例積分控制器有較佳的暫態響應。

表 1. 儲能系統規格表

實功命令 P^*	-2kW~2kW
虛功命令 Q^*	0VAR
磷酸鋰鐵電池容量	30Ah
磷酸鋰鐵電池組工作電壓範圍	223V~250V
磷酸鋰鐵電池組總能量	7kWh



圖 9. 磷酸鋰鐵電池儲能系統控制方塊圖

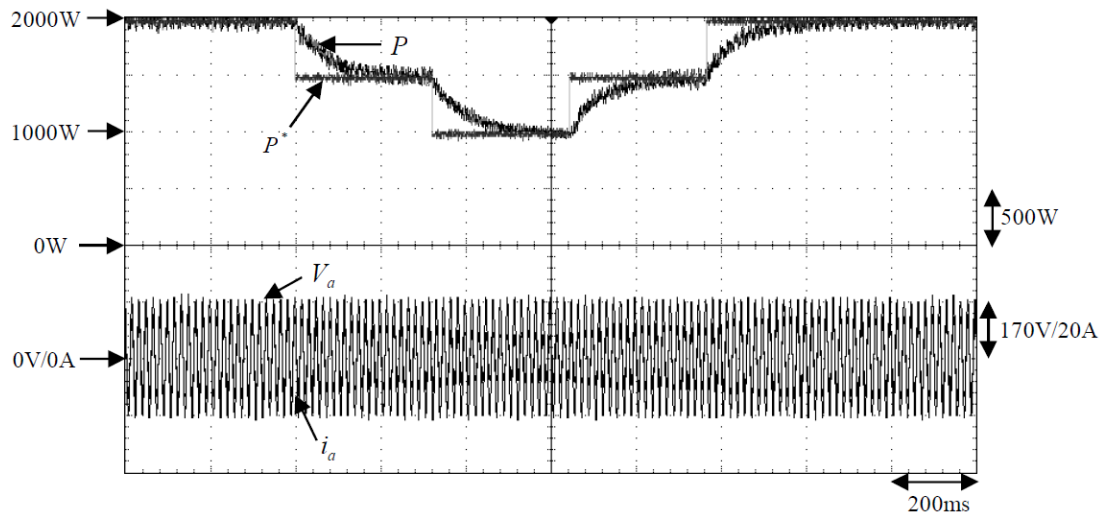


圖 10. 以 PI 控制器控制電池放電波形圖

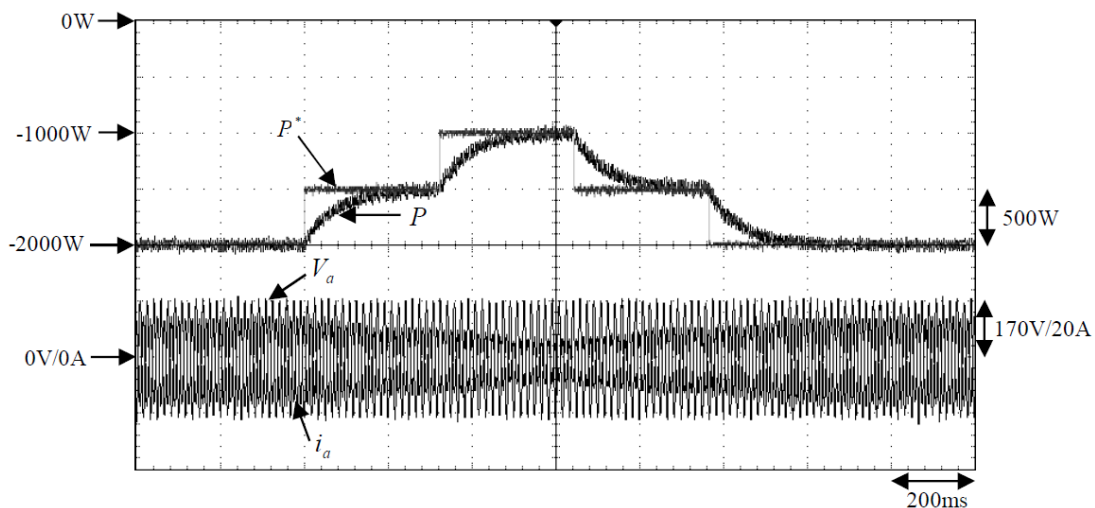


圖 11. 以 PI 控制器控制電池充電波形圖

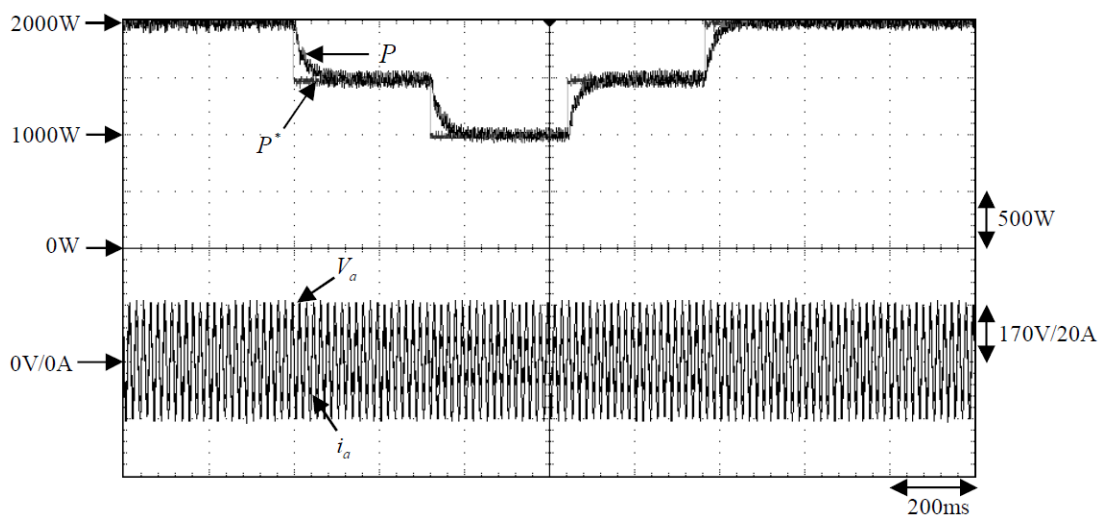


圖 12. 以 TSK 機率模糊類神經網路控制器控制電池放電波形圖

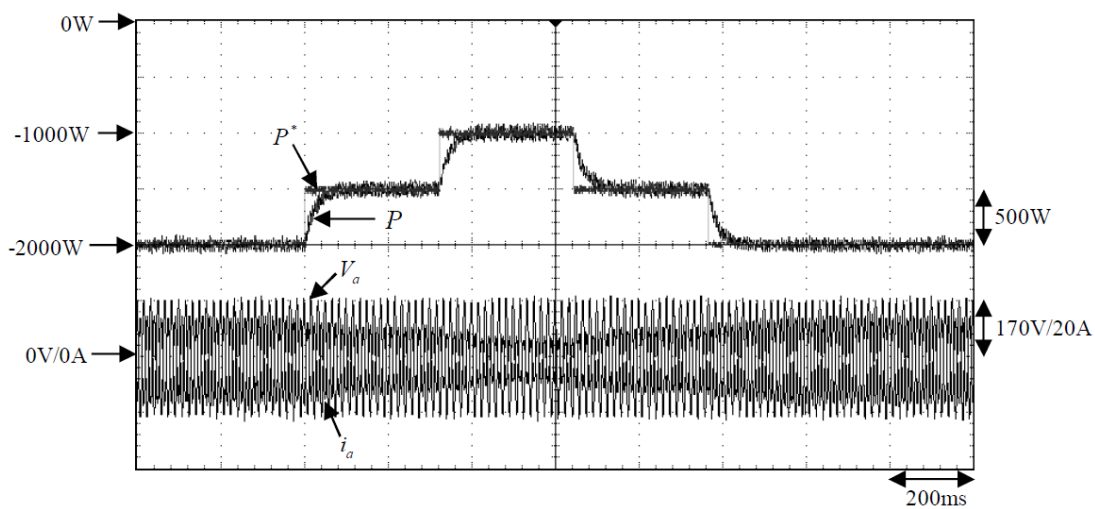


圖 13. 以 TSK 機率模糊類神經網路控制器控制電池充電波形圖

(三)電池殘餘電量估測

殘電量是電池狀態的重要依據，偵測的目的是避免電池過度放電或是過度充電的情況發生，而在文獻中估測方法較普遍的有：(1)開路電壓法(Open Circuit Voltage, OCV)；(2)放電測試法(Discharge Test)；(3)電解液濃度量測法(Electrolyte Concentration Measuring)；(4)內阻量測法(Internal Resistance)；(5)庫倫法(Coulomb Counting)，由能量不減定理所產生，為實際應用上常見的方法，也是本計畫所採用的估測法。其原理是在已知初始電量的情況下，偵測電池流出或流入的電流以及充放電的時間，再以電流對時間做積分，可得知充入或放出之電量，即可估測電池當前的殘電量值，如式(37)：

$$SOC(t) = SOC(t_0) \pm \frac{\int_{t_0}^t I(t) dt}{Q_r} \quad (37)$$

其中 $I(t)$ 為電池充電或放電電流， $SOC(t_0)$ 為電池初始電量， $SOC(t)$ 為電池當前電量， Q_r 為電池額定容量，+ 為充電狀態，- 為放電狀態。由於使用庫倫法必須知道電池初始電量，因此庫倫法常與開路電壓法搭配使用，其方法簡單且不需等待時間，為用來估測殘電量較常見的方法。

本計畫在估測電池殘電量使用德州儀器之電池狀態監控 IC bq27210，此 IC 也會將電池當下的殘電量數值儲存起來，以供下次殘電量估測時使用。要讀殘電量數值時，經由電腦端使用 Matlab & Simulink Real-Time Control package 軟體對監控 IC 下命令，如圖 14、15 所示，監控 IC 就會將包含殘電量

的一串數值回傳至電腦端，再將代表殘電量的數值擷取出來即可得知目前磷酸鋰鐵電池組中各個電池的殘電量，如圖 16 所示，各電池之殘電量分別為 95%、96%、95%、96%、96% 和 96%。

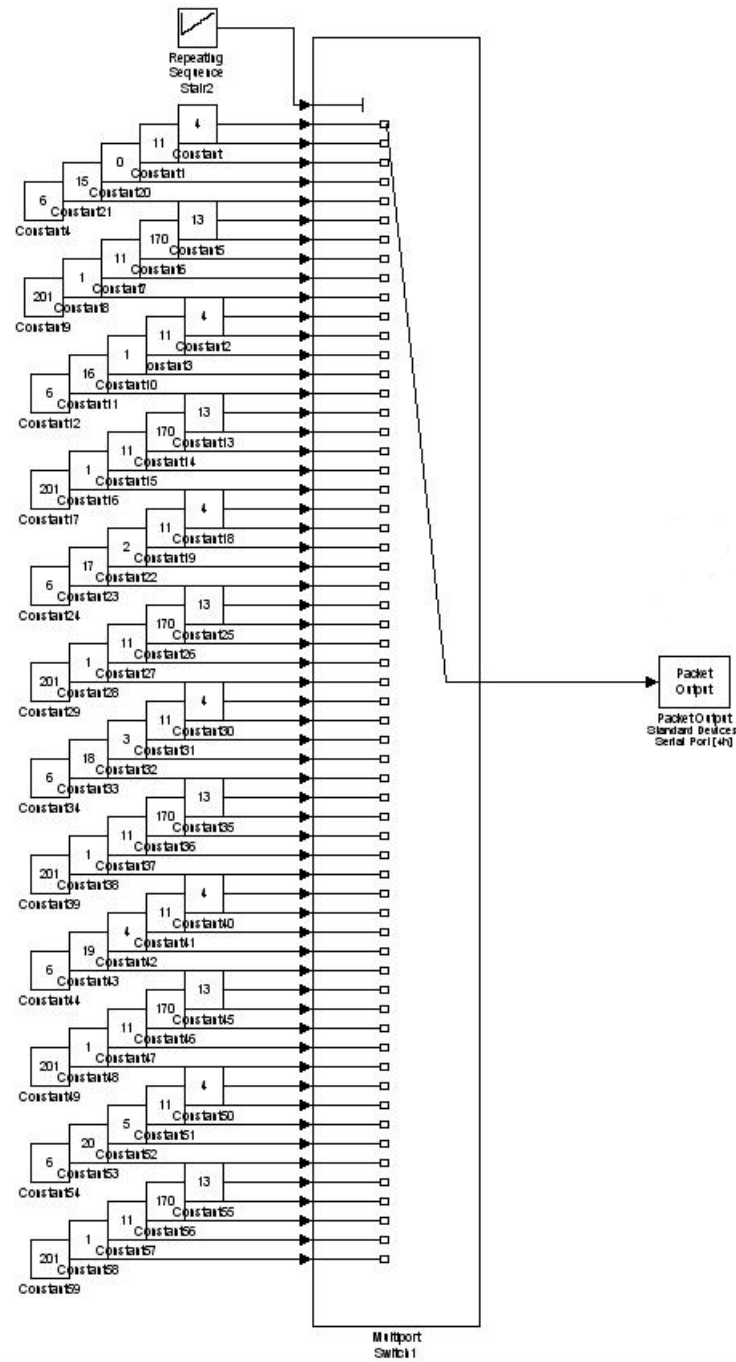


圖 14.利用 Matlab 軟體對監控 IC 下命令方塊圖

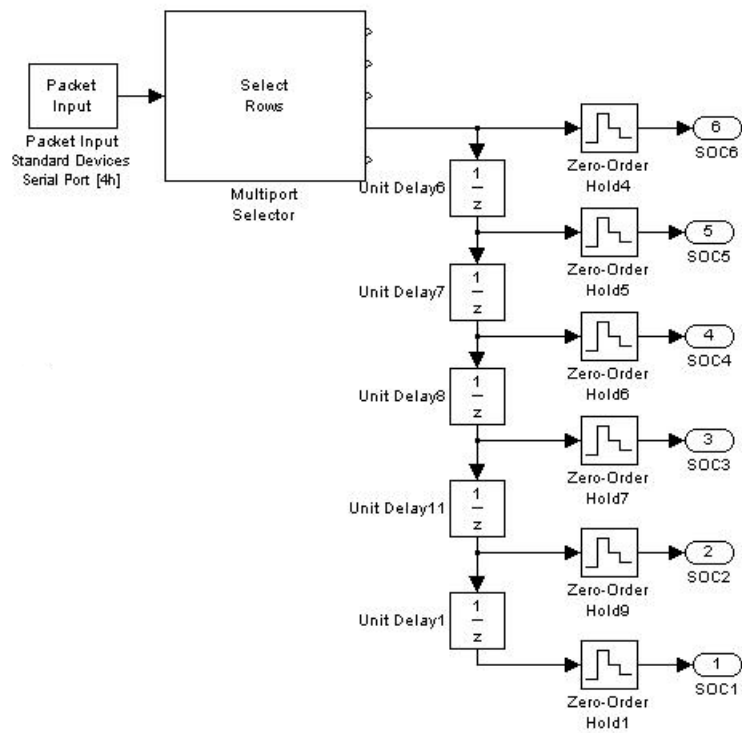


圖 15.利用 Matlab 軟體對監控 IC 下命令方塊圖

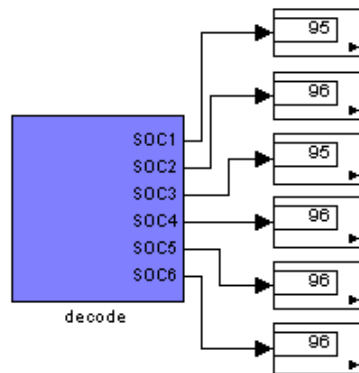


圖 16. 電腦對電池狀態監控 IC 下命令來得到電池殘電量

五、太陽能發電系統

由於分散式電源包含儲能系統及太陽能發電系統等各式分

散式電源，是以本計畫發展太陽能發電系統，將太陽光能利用直流/交流(DC/AC)換流器，轉換至三相定電壓及定頻率之交流電源，再與市電併聯，相關系統架構及最大功率點追蹤法詳述如下。

(一)系統架構簡介

圖錯誤! 找不到參照來源。17 為本計畫發展之太陽光電系統架構圖，包含了升壓轉換器、變流器、三相隔離變壓器。一般情況下，升壓轉換器提升太陽能電池電壓至直流鏈電壓，並且實現太陽能電池之最大功率點追蹤。最大功率點追蹤採用觀察與擾動法，產生太陽能電池電壓命令 V_{pv}^* ，與回授之 V_{pv} 產生控制命令電壓 v_{con} ，經過脈波寬度調變電路產生脈波寬度調變訊號控制升壓轉換器。升壓轉換器與變流器之間並聯一個直流鏈電容，且透過變流器之控制器維持直流鏈電壓穩定。變流器之實功控制迴路利用回授之直流鏈電壓 V_{dc} 與直流鏈電壓命令 $V_{dc}^* = 200V$ 產生 q 軸命令電流 i_q^* ，虛功控制迴路利用計算之虛功率 Q 與虛功命令 $Q^* = 0$ 產生 d 軸命令電流 i_d^* 、 i_q^* 與 i_d^* 經過坐標軸轉換由 dq 軸轉至 abc 軸產生三相命令電流 i_a^* 、 i_b^* 與 i_c^* ，其中座標軸旋轉角度是由鎖相迴路計算市電角度 θ_e 。三相命令電流再經過三相電流控制電路形成三相控制命令電壓 v_{conA} 、 v_{conB} 與 v_{conC} ，經過正弦脈波寬度調變電路產生脈波寬度調變訊號控制變流器。

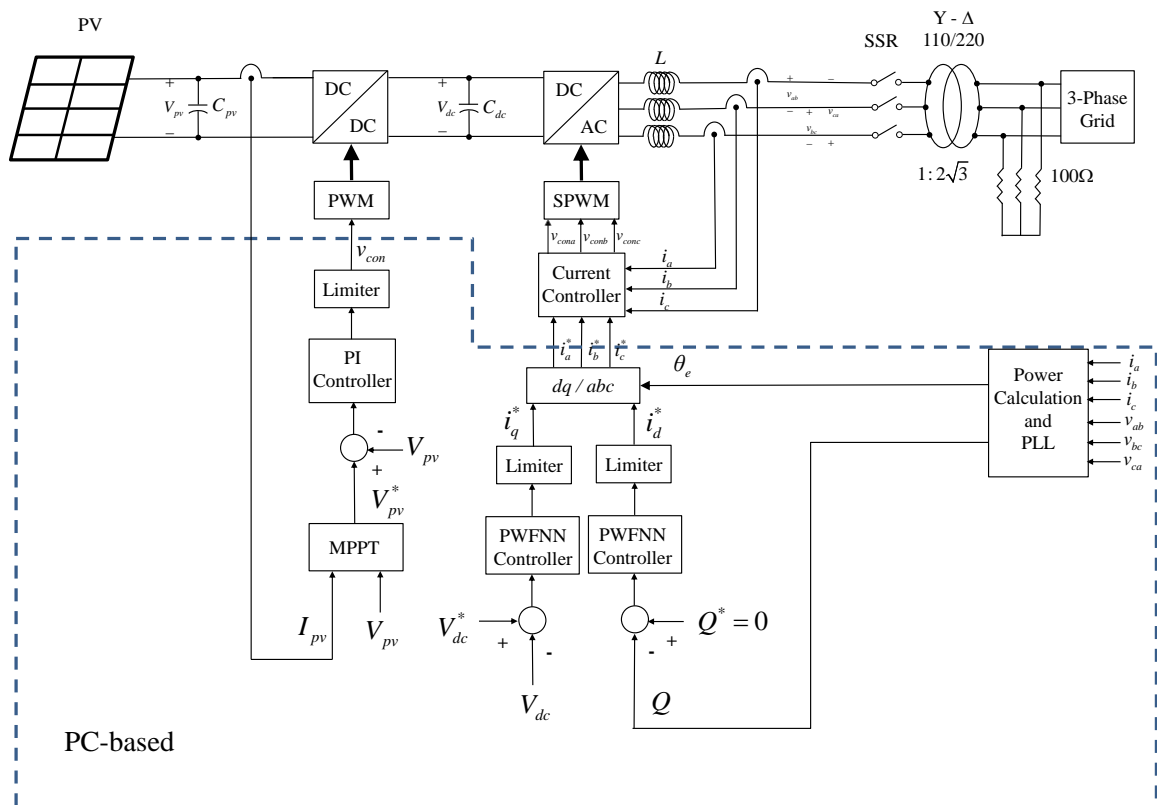


圖 17. 併網型太陽能發電系統架構圖

(二) 最大功率點追蹤法則

由於太陽能電池系統的電壓電流曲線是非線性關係。在不同的工作環境之下，溫度和日照強度的不同，會產生不同的工作曲線。每條曲線都有一個峰值，代表此時工作點位於最大功率點 (P_{max})。為了提高太陽能電池的工作效率，需要一種演算法來控制太陽能電池的電壓與電流，使其輸出最大功率。而根據文獻得知，可區分擾動觀察法與爬山法，而此兩者雖然是不同方法，但原理相同，主要差別只在擾動觀察法是改變太陽能電池的輸出電壓或電流，而爬山法則是改變升壓轉換器開關的責任週期。

擾動觀察法因為控制簡單，需要量測參數較少，易於實

施，所以本文的最大功率追蹤法採用此方法，如圖 18 所示。此方法藉由不斷擾動輸出電壓，並觀察其對輸出功率的影響。假設輸出功率較擾動前大 ($\Delta P > 0$)，則表示電壓變化朝同一方向移動；反之，輸出功率較擾動前小 ($\Delta P < 0$)，則下個週期改變電壓變化方向。然而，此方法在達到最大功率點附近之後，仍然會繼續擾動不會停止，持續在最大功率點左右震盪，造成能量損失並降低發電效率。改變擾動變化大小可以使得震盪損失降低，但是當天氣變化，溫度及日照強度有大幅改變時，追蹤速度變慢，造成能量浪費。因此擾動變化控制上必須在追蹤速度與震盪損失中做出取捨。

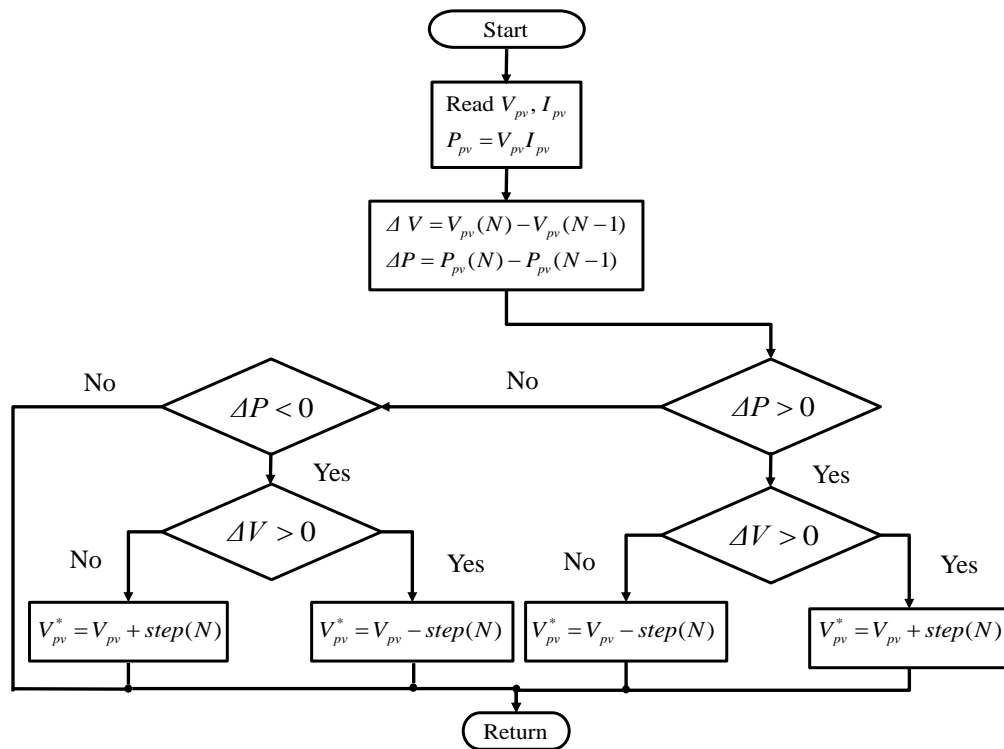


圖 18. 擾動觀察法流程圖

(三) 最大功率追蹤模擬與實驗結果

本計畫使用可控直流電源供應器仿真太陽能電池陣

列，採用的是 Chroma 62100H-600S 與系統實體圖如圖 19 所示，根據研究需求，使得太陽能模擬曲線參數為開路電壓 $V_{oc}=177.6V$ 、短路電流 $I_{sc}=3.4085A$ 、最大功率點電壓 $V_{mp}=154V$ 、最大功率點電流 $I_{mp}=6.49A$ 、最大功率輸出 1000W。圖 20 為最大功率追蹤法模擬結果圖，其模擬為正常晴天無遮蔽時的功率保持輸出 1000W，圖 21 為當太陽能電池在遭遇遮蔽時的功率輸出由 1000W 下降至 500W 之模擬，圖 22 為正常晴天最大功率追蹤法實作圖，圖 23 為當太陽能電池在遭遇遮蔽時的功率輸出實作圖。



圖 19. 可程控直流電源供應器與系統實體圖

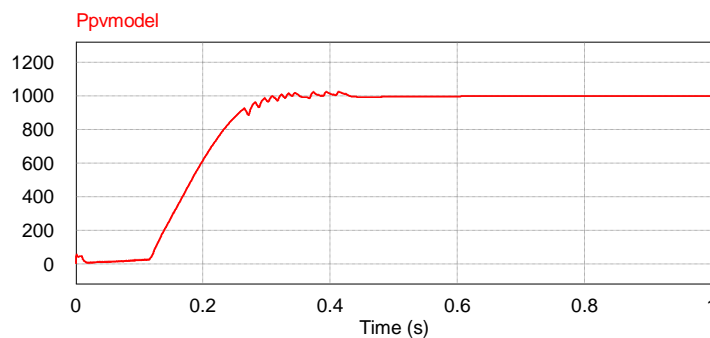


圖 20. 晴天無遮蔽下太陽能最大功率追蹤模擬，功率保持 1000W

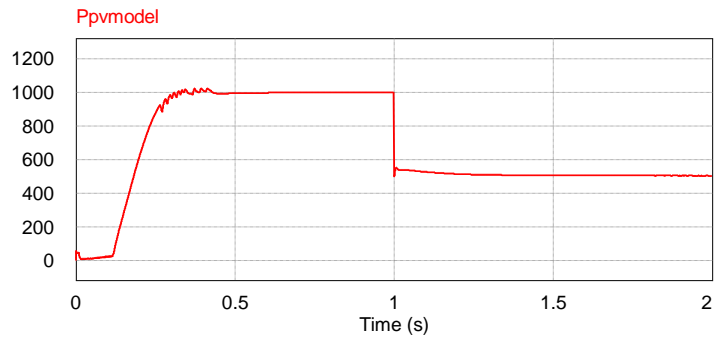


圖 21. 當遭遇遮蔽時的太陽能最大功率追蹤模擬，功率由 1000W 降至 500W

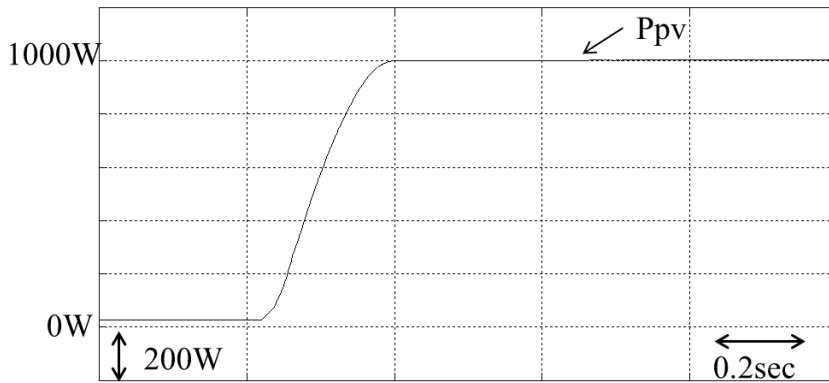


圖 22. 晴天無遮蔽下太陽能最大功率追蹤實作，功率保持 1000W

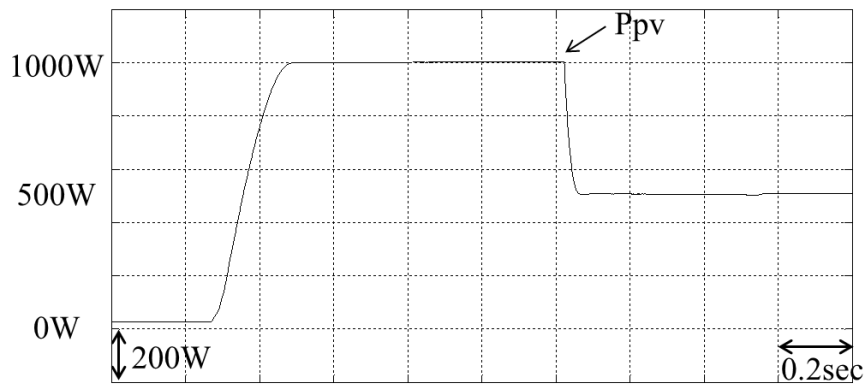


圖 23. 當遭遇遮蔽時的太陽能最大功率追蹤實作，功率由 1000W 降至 500W

(四)饋線電壓控制策略

圖 24 為本計畫太陽能系統之饋線電壓控制策略，其中包含升壓轉換器、變流器、Y- Δ 三相變壓器以及 Y 接 100 Ω 負載電阻。其中可控直流電源供應器仿真 1000W 之太陽能電池陣列，交流電源供應器仿真三相三線 220V 之市電系統，還可降低電壓輸出仿真共同耦合點之故障電壓。在正常情況下，升壓轉換器提升太陽能電池電壓至直流鏈電壓，並且實現太陽能電池之最大功率點追蹤。最大功率點追蹤採用擾動觀察法，其原理如前節所示，產生太陽能電池電壓命令 V_{pv}^* ，與回授之 V_{pv} 產生控制命令電壓 v_{con} ，經過脈波寬度調變電路產生脈波寬度調變訊號控制升壓轉換器。升壓轉換器與變流器之間並聯一個直流鏈電容，且透過變流器之控制器維持直流鏈電壓穩定。變流器之實功控制迴路利用回授之直流鏈電壓 V_{dc} 與直流鏈電壓命令 $V_{dc}^* = 200V$ 產生 q 軸命令電流 i_q^* ，虛功控制迴路利用計算之虛功率 Q 與虛功命令 $Q^* = 0$ 產生 d 軸命令電流 i_d^* 、 i_q^* 與 i_d^* 經過座標軸轉換由 dq 軸轉至 abc 軸產生三相命令電流 i_a^* 、 i_b^* 與 i_c^* ，其中座標軸旋轉角度是由鎖相迴路計算市電角度 θ_e 。三相命令電流再經過三相電流控制電路形成三相控制命令電壓 v_{conA} 、 v_{conB} 與 v_{conC} ，經過脈波寬度調變電路產生脈波寬度調變訊號控制變流器。

當配電系統發生故障時，零序電壓被 Y- Δ 三相變壓器隔離，且在變流器端看到之故障型態異於共同耦合點。透過雙模式控制策略決定 SW1 與 SW2 操作在 Mode I(最大功率點追蹤)或 Mode II，並且變流器虛功控制迴路命令之 SW3 由 0 切至 Q^* ，控制變流器注入額外的虛功電流以提升電網電壓。

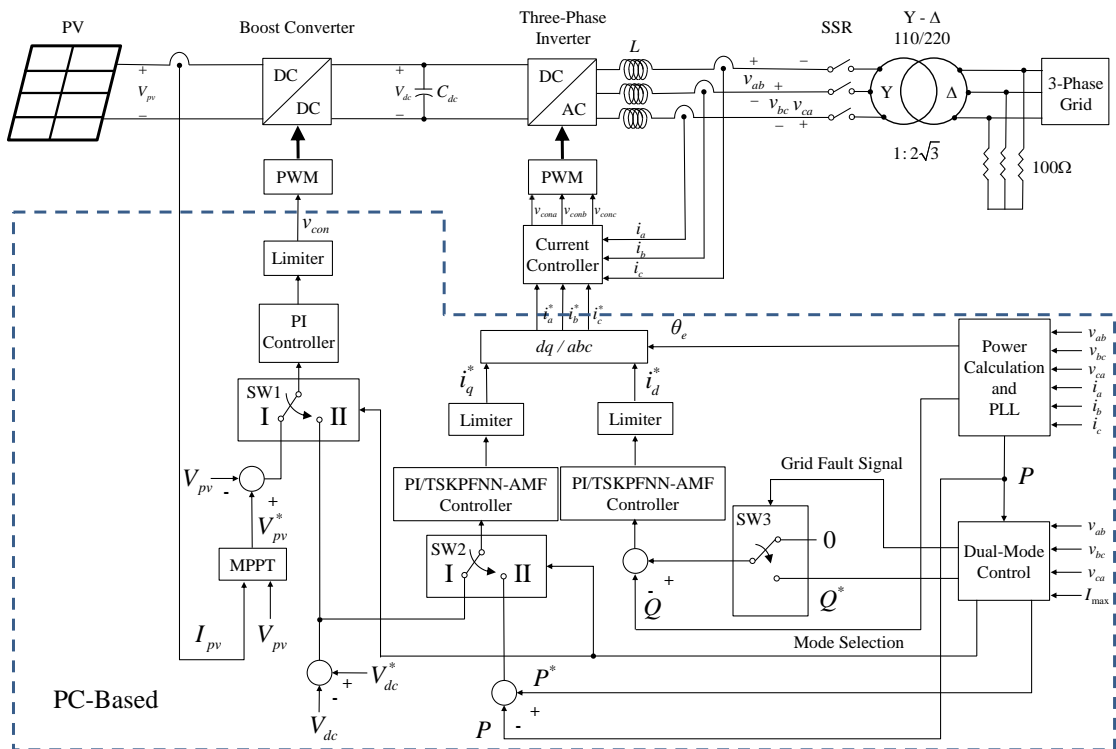


圖 24. 太陽能系統饋線電壓控制架構圖

(五) 饋線電壓控制實作

本節將討論以下故障情形，分別以交流電源供應器仿真配電系統兩相對地故障(type E)，並深入討論太陽光電系統在兩種模式的反應。在實驗一開始，配電系統為三相平衡電壓，過了 0.2 秒之後，配電系統發生故障，系統之故障相關策略將被啟動。以下設計三種故障情況：1) 兩相對地故障，電壓下降 0.3pu，因為太陽能電池陣列產生的功率不足而操作在 Mode I。2) 兩相對地故障，電壓下降 0.3pu，操作在 Mode II。3) 兩相對地故障，電壓劇烈下降 0.7pu，操作在 Mode II。在配電系統兩相對地故障(Mode I)情境下之實作如圖 25 所示，實驗一開始，太陽能電池陣列提供 600W 之實功，經過損耗後輸出 528W 至電網，此時輸出電流峰值約 4A。0.2 秒後，配電系統發生兩相對地故障，故障型態為 type E，經過

Y- Δ 變壓器後，在變流器偵測之三相相電壓為 0.7pu、0.87pu 和 0.87pu，此時 1pu=63.5Vrms，故障型態為 type F。因為升壓轉換器操作在 Mode I，所以實功輸出不變，並且注入 455VAR 之虛功至電網，電流峰值因此上升至 6.6A。

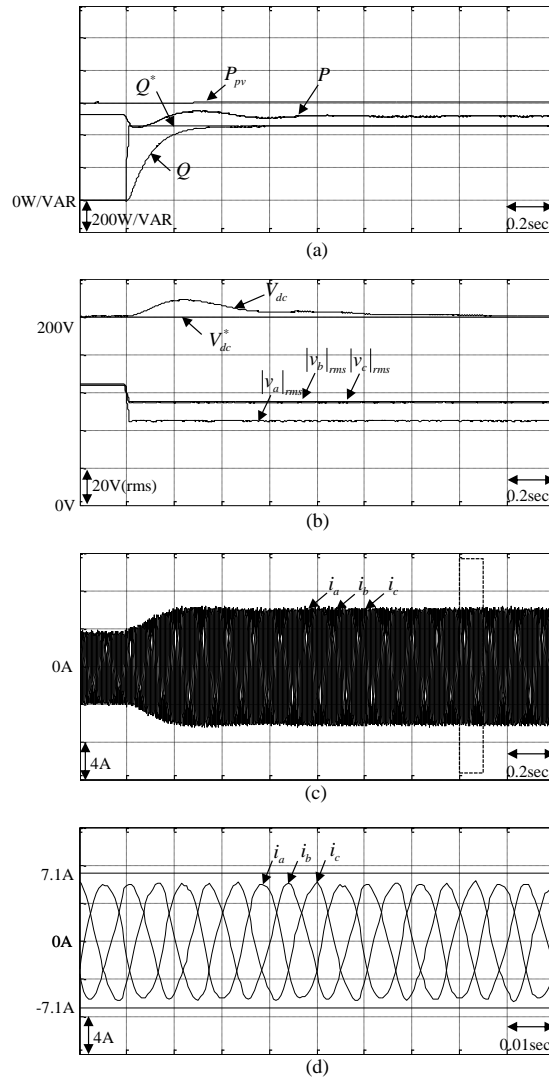


圖 25. 測試一配電系統兩相對地故障(Mode I)：(a)功率響應；(b)電壓響應；(c)電流響應；(d)電流波形放大

在配電系統兩相對地故障(Mode II)情境下之實作如圖 26 所示，實驗一開始，太陽能電池陣列提供 1000W 之實功，經過損耗後輸出 880W 至電網。0.2 秒後，配電系統發生兩相對

地故障，故障型態為 type E，經過 Y- Δ 變壓器後，在變流器偵測之三相相電壓為 0.7pu、0.87pu 和 0.86pu，此時 $1\text{pu}=63.5\text{Vrms}$ ，故障型態為 type F。因為升壓轉換器操作在 Mode II，所以太陽能電池陣列實功由 1000W 降低至 721W，變流器輸出實功由 880W 下降至 627W，並且注入 457VAR 之虛功至電網，電流峰值因此上升至最大限制電流 7.1A。

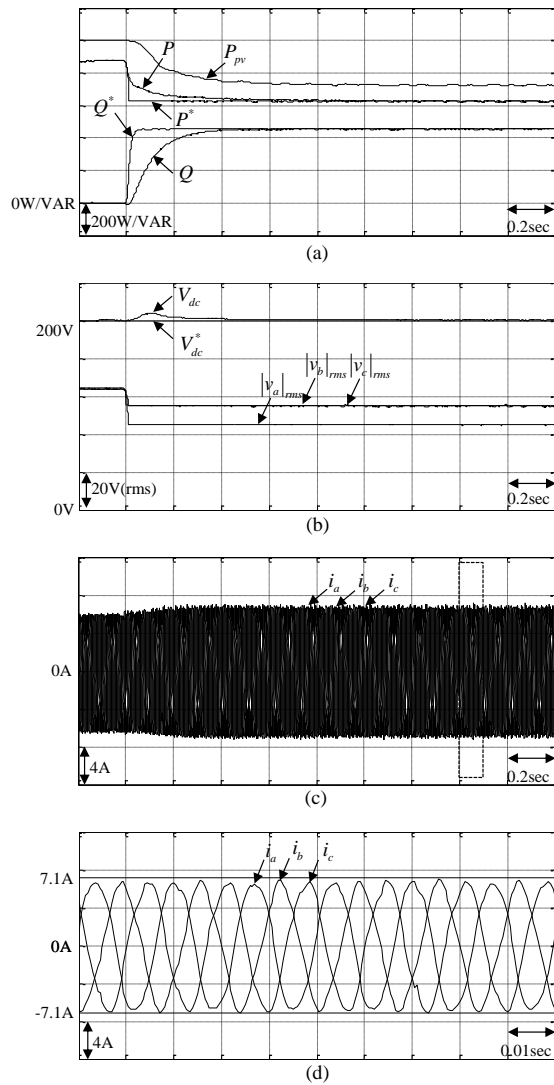


圖 26. 測試二配電系統兩相對地故障(Mode II)：(a)功率響應；

(b)電壓響應；(c)電流響應；(d)電流波形放大

接著，在兩相對地故障，電壓劇烈下降 0.7pu，操作在

Mode II 之實驗如圖 27 所示。一開始，太陽能電池陣列提供 1000W 之實功，經過損耗後輸出 880W 至電網。0.2 秒後，配電系統發生兩相對地故障，故障型態為 type E，經過 Y- Δ 變壓器後，在變流器偵測之三相相電壓為 0.3pu、0.68pu 和 0.67pu，此時 1pu=63.5Vrms，故障型態為 type F。因為升壓轉換器操作在 Mode II，且電壓下降超過 50%，所以太陽能電池陣列實功由 1000W 降低至 80W，變流器輸出實功由 880W 下降至 0W，並且注入 525VAR 之虛功至電網，電流峰值因此上升至最大限制電流 7.1A。

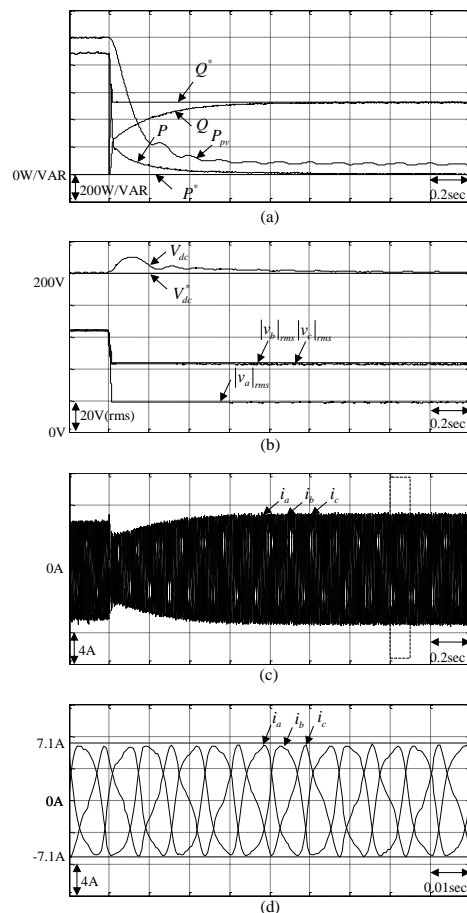


圖 27. 測試三配電系統兩相對地故障(Mode II)：(a)功率響應；(b)電壓響應；(c)電流響應；(d)電流波形放大

六、微渦輪發電機運作原理

微渦輪發電機是由一渦輪機驅動永磁同步發電機，其可視一小型天然氣渦輪發電機，可燃燒液態或氣態燃料以產生電能。由於微渦輪發電機具有快速啟動、較佳動態特性、高可靠性、電壓調節及尖峰負載時可提供功率等優點，因此微渦輪發電機在併網時不僅可當成分散式電源提供功率給市電，在市電脫離時，更可將功率提給予關鍵負載。而微渦輪發電機可區分高速單軸渦輪機與分軸渦輪機兩大類，單軸渦輪機是將壓縮機與發電機固定在同一轉軸，故操作在高轉速、高頻率之下（1500Hz 至 4000Hz）最後可藉由換流器轉換至 60Hz 交流電源與市電併網。分軸渦輪機則是藉由齒輪箱與傳統發電機連結，因此可直接產生 60Hz 交流電源[12-14]，而目前較為採用者為高速單軸渦輪機，故本文以單軸渦輪機為主並介紹其運作原理。

微渦輪機模組主要參照 Rowen 所提之架構如圖 28[14]所示，而微渦輪機主要由速度與加速度控制、溫度控制及燃料系統三種模組構成。圖 29 為微渦輪機之控制方塊圖，速度控制主要操作在正常負載情況下，而溫度控制主要做為最大輸出功率之限制，加速度控制主要做為微渦輪機啟動時之加速控制，當達到操作速度時，加速控制隨即停止，此三個控制參數最後將輸入至最低值選擇器，將選擇三個控制參數中最低值輸出至燃料系統，此微渦輪機模組之次系統將分別敘述如下：

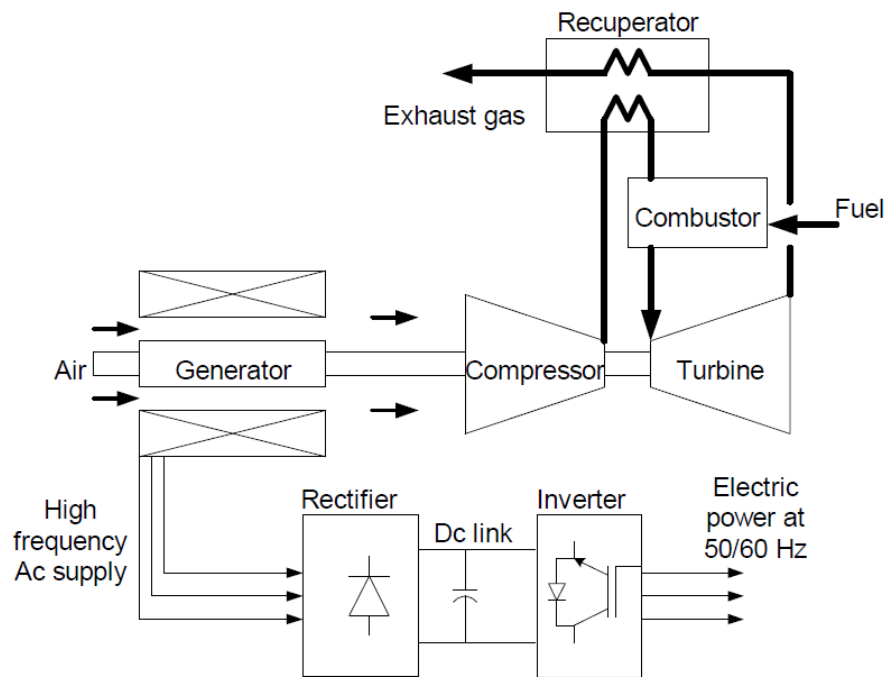


圖 28. 單軸微渦輪機架構圖

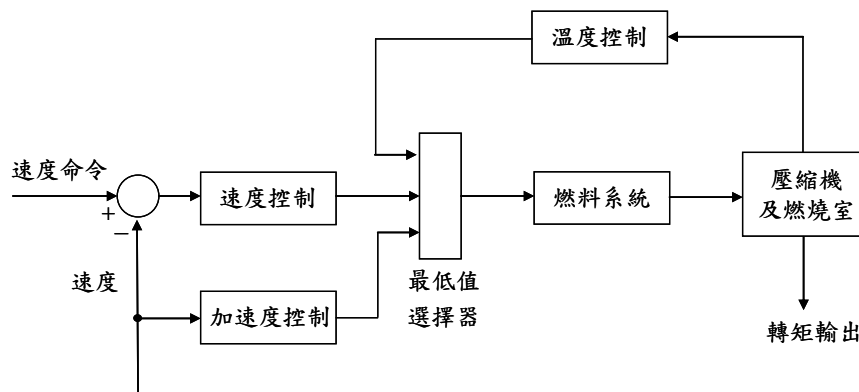


圖 29. 微渦輪機控制方塊圖

➤速度及加速控制：

速度控制的輸入主要由速度命令與微渦輪機轉子轉速的差值構成，此為微渦輪機在正常負載情況下之主要控制方法，速度控制通常以超前、滯後轉移函數或是利用 PID 控制器來模組，而在文獻探討中均以超

前、滯後轉移函數來控制速度，如圖 30 所示， K 為控制器增益、 T_1 、 T_2 分別為超前、滯後之時間常數，而 Z 代表調節器模組常數。加速控制主要做為微渦輪機啟動時之加速控制，當達到操作速度時，加速控制隨即停止。

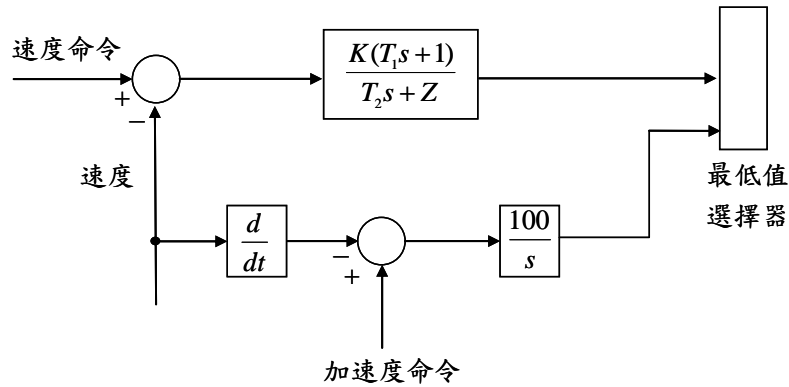


圖 30. 微渦輪機速度與加速度控制方塊圖

► 燃料系統：

燃料系統包含燃料閥及促動器，其控制方塊圖如圖 31 所示，燃料閥轉移函數及促動器轉移函數可表示如下：

$$E_l = \frac{K_v}{T_v s + c} F_d \quad (38)$$

$$W_f = \frac{K_f}{T_f s + c} E_l \quad (39)$$

其中 K_v 、 K_f 為燃料閥位置及促動器之增益； T_v 、 T_f 為燃料閥位置及促動器之時間常數； c 為時間常數； F_d 、 E_l 分別為燃料閥位置之輸出輸入； W_f 為燃料需求。 V_{ce} 為最低值選擇器之輸出，代表在某操作運轉下最低之燃料需求，另一個燃料系統之輸入為微渦輪機轉速 N （由加速控制限制）， V_{ce} 值通常

由一衰減倍率 K_1 衰減 $K_1=(1-K_2)$ ， K_2 為在無負載情況下之基本燃料需求。

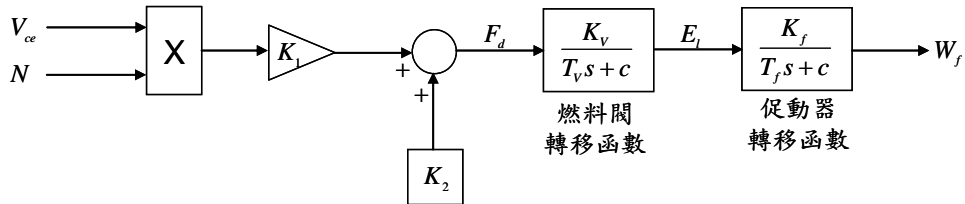


圖 31. 微渦輪機速度與加速度控制方塊圖

► 壓縮機與渦輪機：

壓縮機與渦輪機為微渦輪機之心臟，如圖 32 所示，其本質為一線性非動態設備，其中 T_{CR} 相對於燃燒反應時間、 T_{CD} 相對於時間延遲、 T_{TD} 相對於傳輸延遲。在此系統中，轉矩 T 及排氣溫度 T_x 特性將可表示如下：

$$T = K_{HHV}(W_{f2} - 0.23) + 0.5(1 - N)(Nm) \quad (40)$$

$$T_x = T_R - 700(1 - W_{f1}) + 550(1 - N)(^{\circ}F) \quad (41)$$

其中 T_R 為溫度命令； $K_{HHV} = 1.3$ 為取決於燃燒室氣體流之係數。

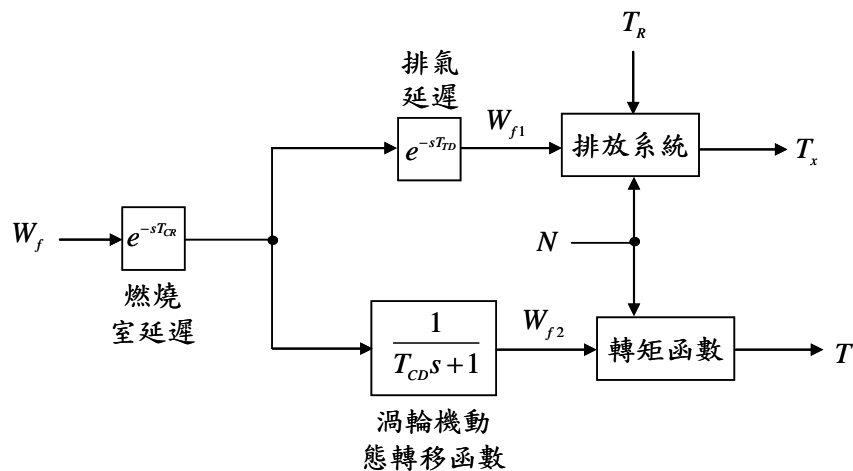


圖 32. 壓縮機與渦輪機控制方塊圖

► 溫度控制：

溫度控制為微渦輪機輸出功率限制在一預設之操作溫度，其與外在環境溫度及燃料特性無關，溫度控制方塊圖如圖 33 所示。燃料在燃燒過程將產生排氣溫度與轉矩，產生排氣溫度可藉由一連串熱電偶量測出。圖 33 中， T_i 為溫度控制器之積分率； T_3 、 T_4 、 T_5 為時間常數； K_3 、 K_4 為常數。熱電偶之輸出將與溫度命令比較，當溫度命令大於熱電偶之輸出，則將可保證微渦輪機操作在速度控制之情況，但當溫度命令小於熱電偶之輸出，此代表溫度控制之輸出將逐漸減少，因此溫度控制之輸出將低於速度控制之輸出，因而在最低值選擇器將選擇溫度控制之輸出，故可達到限制微渦輪機之功率輸出。

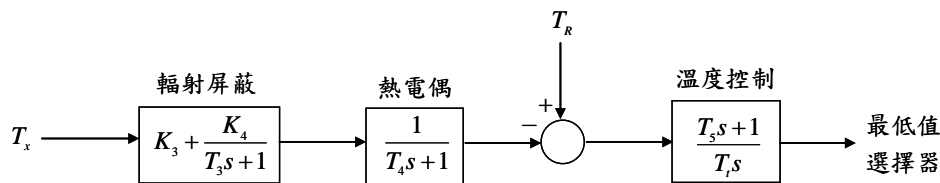


圖 33. 溫度控制方塊圖

七、微電網系統電能控制與管理 PSIM 模擬

微電網是將分散式電源與鄰近負載端組成新的微型電網，其中包含兩種運轉模式，一是正常情況下，微電網與市電併聯運轉，稱為併網模式；另一是當檢測出微電網外部發生故障或電力品質不符要求時，微電網將即時與市電解聯並獨立運轉，稱為孤島運轉模式。在微電網系統中最重要的議題為功率分配亦即電能管理，在併網模式運作時，市電與微電網內各分散式

電源將一起負責負載所需功率並達到供需平衡，而當在孤島運轉模式時，由於微電網已與市電脫離，微電網內分散式電源將適時改變輸出功率或者利用負載卸除，以符合負載供需平衡。

(一)微電網系統控制法則

微電網系統在併網模式運作時，微電網系統的電壓與頻率皆完全由市電所箝制，而當市電發生異常脫離進入孤島運轉模式時，由於供需的不平衡，將導致微電網系統的電壓與頻率造成波動，嚴重的話將導致微電網系統無法運作而崩潰。因此，目前在微電網系統分散式電源控制部分，已經發展出各種控制法則，其中最為常見的控制法則區分如下[15]：(1)定功率控制法(*PQ* Control) (2)電壓、頻率控制法(*V/f* Control)(3)下降控制法(*Droop* Control)。定功率控制法為各分散式電源依已預先設定之實、虛功率命令來輸出功率；電壓、頻率控制法主要是控制及穩定系統電壓與頻率，而忽略分散式電源功率之改變輸出；下降控制法亦即實功率-頻率下降法(*P-f Droop*)、虛功率-電壓下降法(*Q-V droop*)。然而，下降控制法卻有電壓控制性能較差、高電壓失真及市電恢復重新同步之問題。另外，以系統層級亦可區分為下列控制模式：(1)主、從控制(*Master-Slaver Control*) (2)分級控制(*Hierarchical Control*)。主、從控制模式最主要是當微電網孤島運轉時，將其中一個分散式電源由原先定功率控制法轉換成電壓、頻率控制法，而其他分散式電源則仍然維持定功率控制；分級控制模式通常會有一個中央控制器負責收集各分散式電源電壓、電流、頻率及負載需求等相關訊息，並且依據現況預測及調節各分散式電源之輸出與負載卸除

等。因此，本文在微電網系統控制部分，因微電網在併網與孤島運轉間轉換時，其動態響應需即時反應，故採用主、從控制法，並利用所設計之微電網系統架構如圖 1，以 PSIM 軟體模擬分散式電源功率分配，其中以儲能系統當作微電網控制主機(Master)，而風力發電機及微渦輪發電機等分散式電源則定位為從屬(Slaver)部分，當在併網模式運作時，各分散式電源皆控制實、虛功率之輸出，而在進入孤島運轉時，風力發電機及微渦輪發電機依然輸出固定功率，而儲能系統即微電網控制主機則負責穩定微電網的電壓及頻率，並依據負載所需調整輸出功率。

在控制部份，因儲能系統其控制方式依操作模式而有所不同，故僅以儲能系統控制法則做說明，當儲能系統操作於併網時，其主要控制實、虛功率之輸出，控制方塊圖如圖 34 所示，其實、虛功率依據微電網內各分散式電源與負載間關係，預設一實、虛功率之輸出，實功率命令 P^* 與實功率 P 比較及虛功率命令 Q^* 與虛功率 Q 比較後，經過 PI 控制器產生實功率命令電流 i_q^* 與虛功率命令電流 i_d^* ， i_q^* 與 i_d^* 利用鎖相迴路偵測市電網路所得相角 θ_e 經由二相同步旋轉座標軸對三相固定座標由轉換後，產生與市電網路同步之三相命令電流 i_u^* 、 i_v^* 、 i_w^* ，再利用電流控制 PWM 產生功率換流器之三相觸發信號 T_a 、 T_b 、 T_c 。圖中 i_{dc} 為直流鏈電流； V_{dc} 為直流鏈電壓； v_u 、 v_v 、 v_w 為三相電壓； i_u 、 i_v 、 i_w 為三相電流； L_f 為電感。最後儲能系統經由三相變壓器 110V/220V 與市電及其他分散式電源併聯。

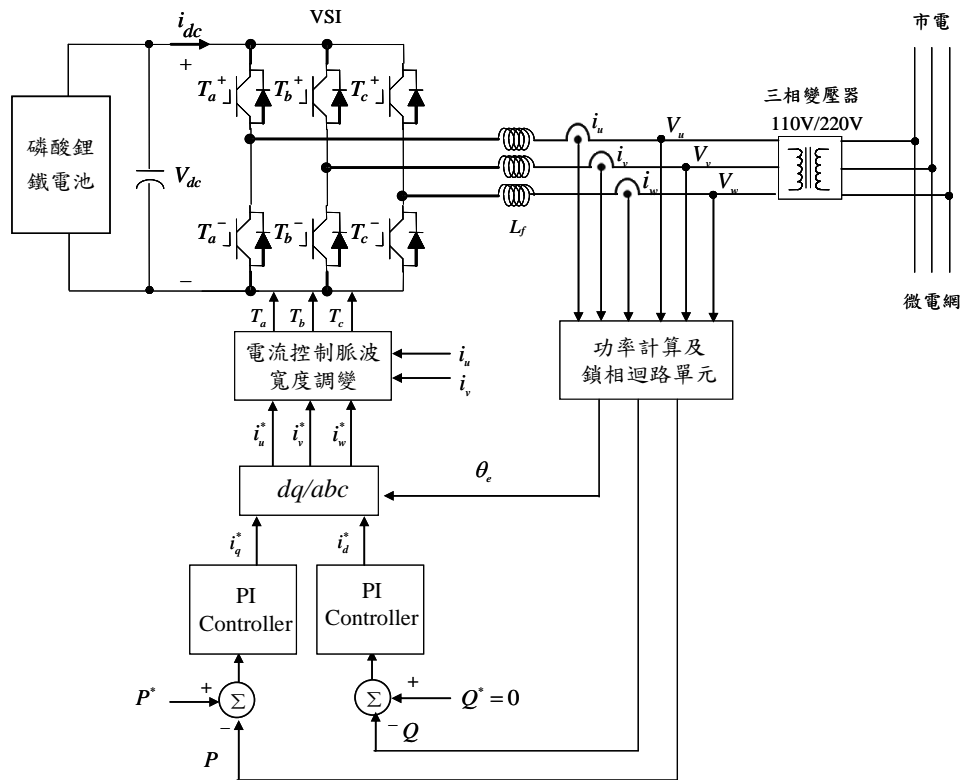


圖 34. 儲能系統於微電網併網時控制方塊圖

當市電發生異常，儲能系統將依據文獻主動式孤島偵測法，偵測市電異常之情況，並利用靜態開關與市電脫離，形成孤島運轉模式，當微電網進入孤島運轉時，儲能系統原先控制實、虛功率，此時將立即切換至電壓與頻率控制，以負責維持微電網系統的電壓及頻率，而本文所發展之電壓與頻率控制法如圖 35 所示，其中原先 θ_e 為偵測市電網路產生之相角，因微電網系統已進入孤島運轉，故此新相角 θ'_e 將由頻率命令 f^* 轉換而成之相角取代，電壓命令 V_u^* 與輸出電壓 V_u 比較後，經過 PI 控制器產生命令電流 i_d^* ，而頻率命令 f^* 與鎖相迴路計算之頻率 f 比較後，經過 PI 控制器產生命令電流 i_q^* ，再由二相同步旋轉座標軸對三相固定座標軸轉換後，產生

三相命令電流 i_u^* 、 i_v^* 、 i_w^* ，再利用電流控制 PWM 產生三相觸發信號 T'_a 、 T'_b 、 T'_c 。

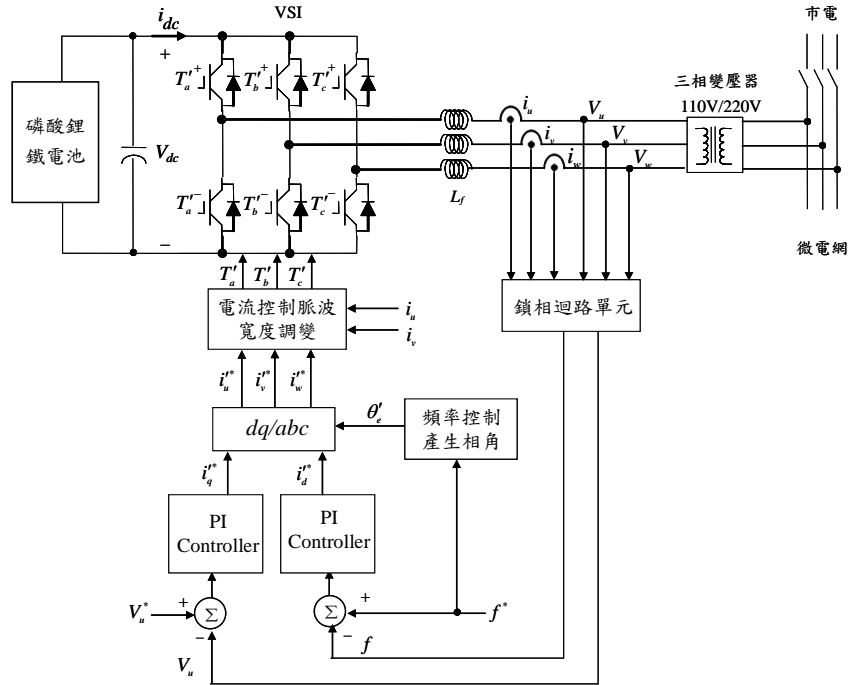


圖 35. 儲能系統於微電網孤島運轉時控制方塊圖

(二) PSIM 模擬微電網系統

為驗證微電網控制法則及電能管理，本文以 PSIM 軟體模擬微電網系統併網與孤島運轉之情況，其中以儲能系統當作微電網控制主機，而風力發電機及微渦輪發電機等分散式電源則定位為從屬部分；另外本文假設儲能系統額定功率足以滿足整體微電網系統所需，而微渦輪發電機因其動態響應較為複雜且緩慢，故以理想電壓源當作微渦輪發電機輸出。圖 36 為微電網系統 PSIM 模擬圖，市電為 220V，負載則設為 2kW 或 4kW。儲能系統模擬模組如圖 37 所示，當微電網操作在併網時，儲能系統則控制實、虛功率輸出，當市電

發生異常時，將利用孤島偵測模組，偵測市電異常之情況，並與市電脫離，此時儲能系統將立即切換至電壓與頻率控制，以負責維持微電網系統的電壓及頻率。圖 38 為 PSIM 風力發電機模組，圖 39 為 PSIM 渦輪發電機模組，此兩分散式電源不論在併網或孤島操作時，其控制方式均為實、虛功率控制。上述模擬模組最後再經三相變壓器 110V/220V 與市電及其他分散式電源併聯。

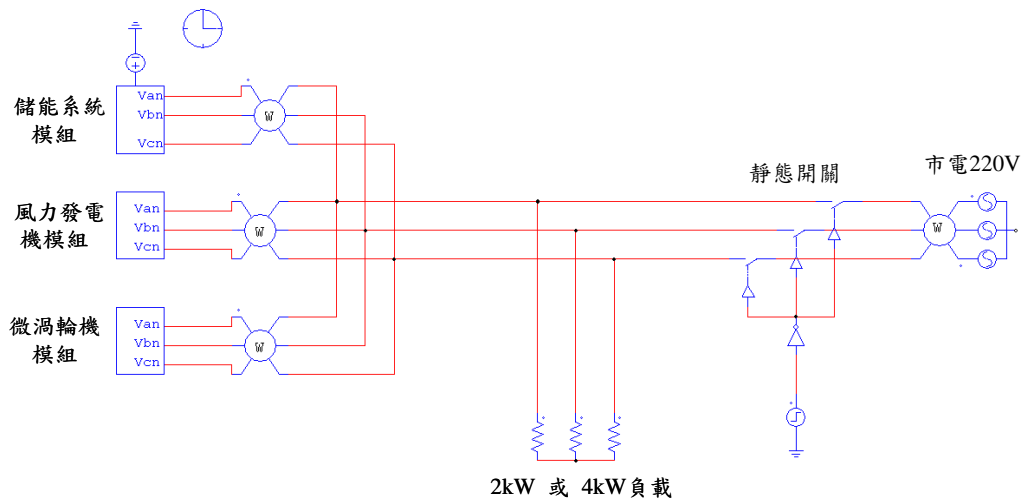


圖 36. 微電網系統PSIM模擬圖

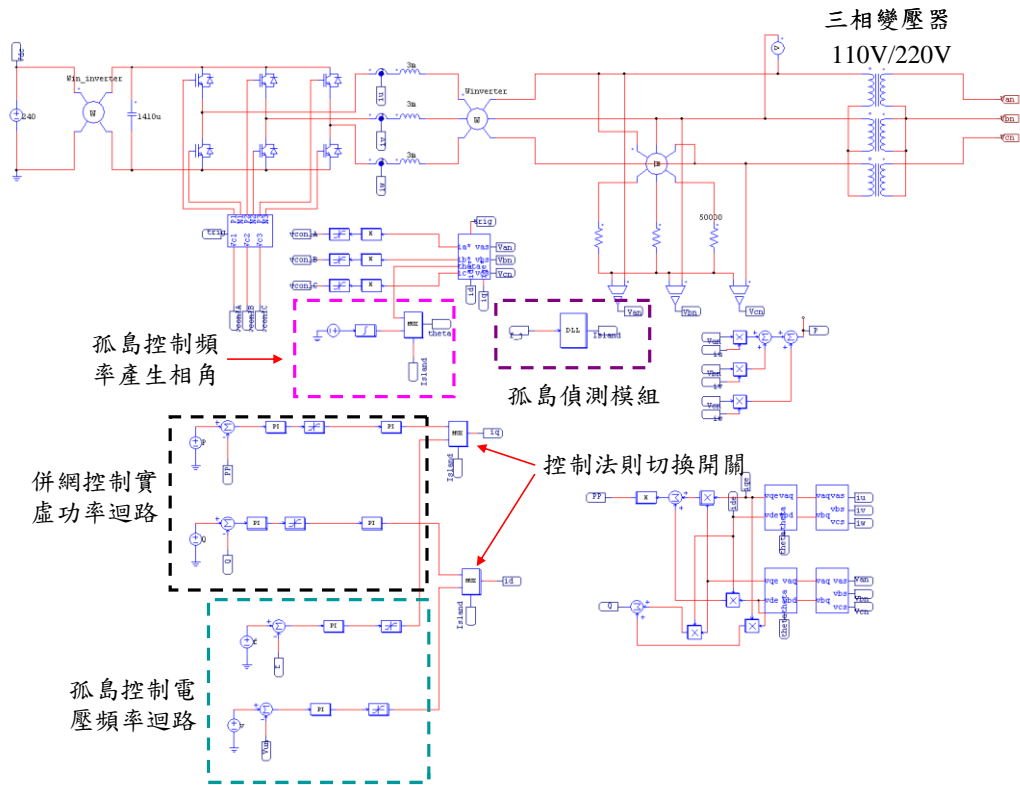


圖 37. PSIM儲能系統模組

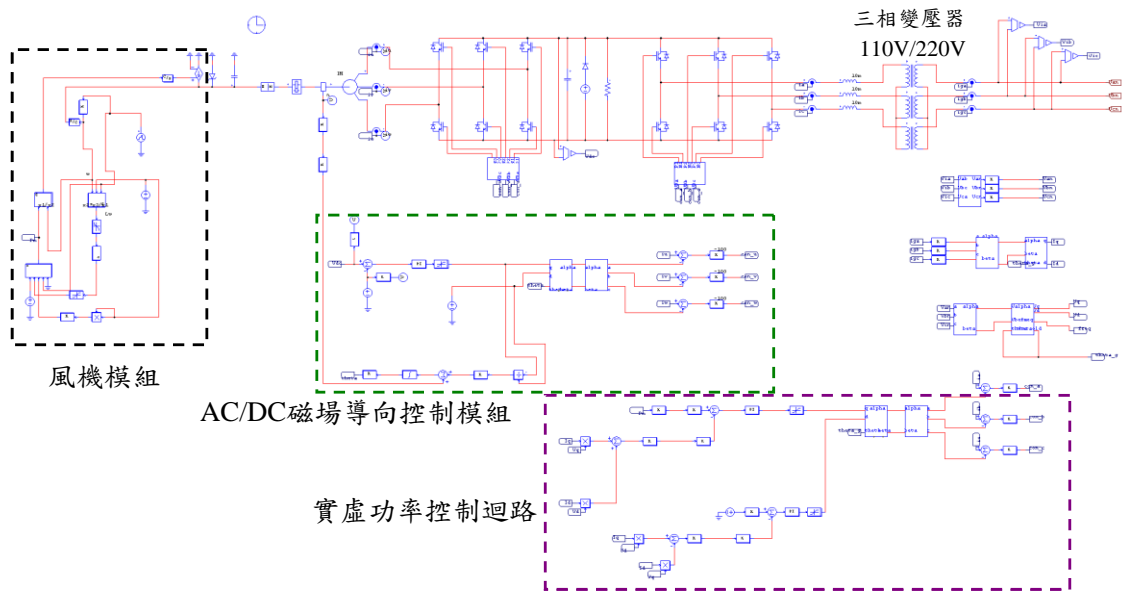


圖 38. PSIM風力發電機模組

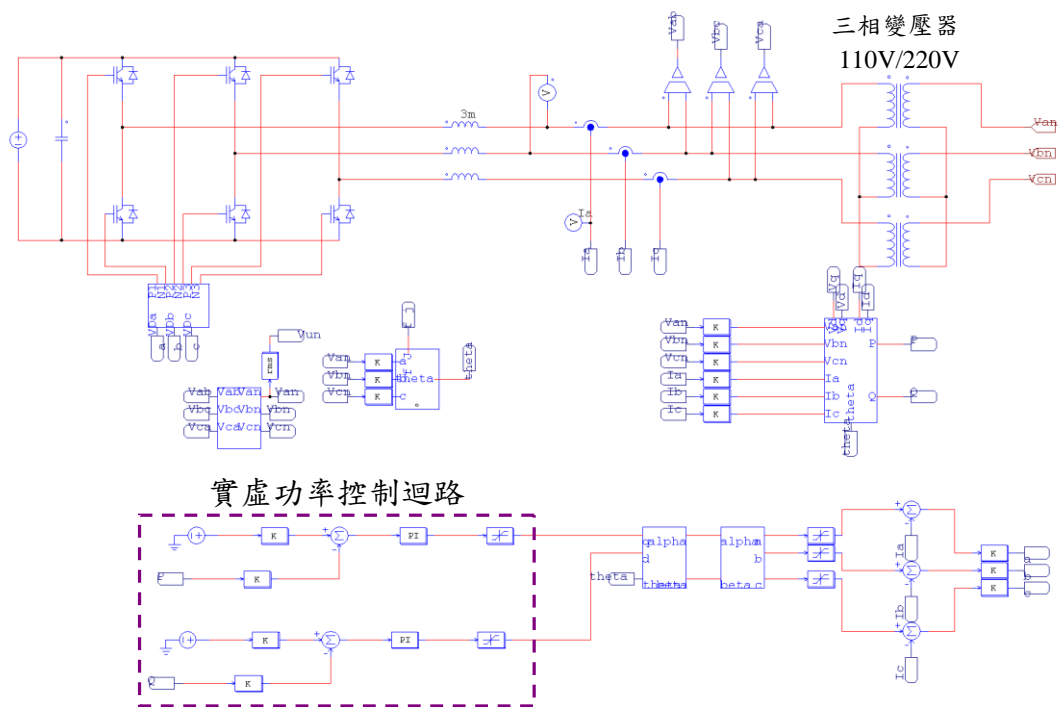
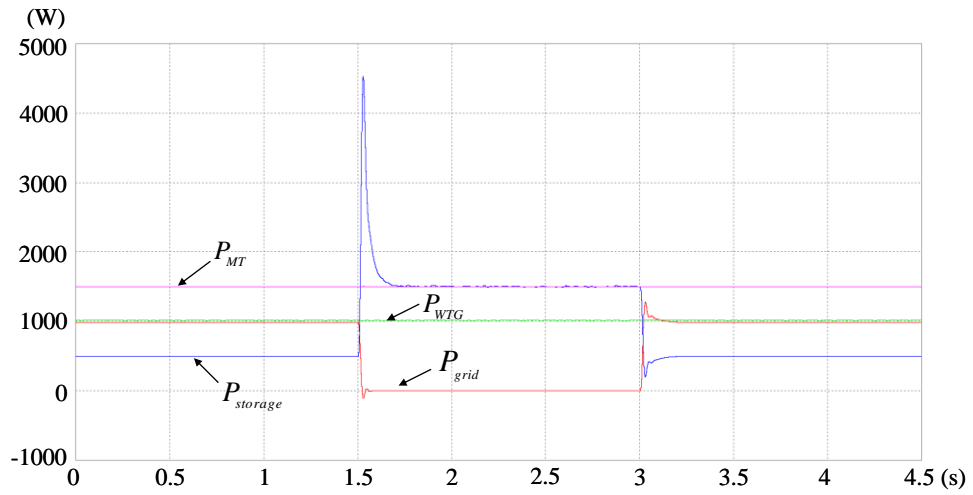


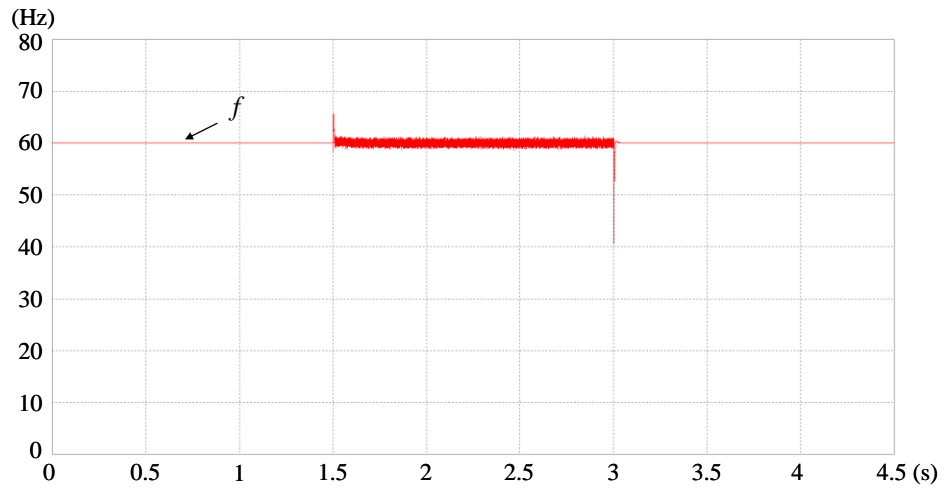
圖 39. PSIM微渦輪發電機模組

在負載 4kW 下，模擬儲能系統於孤島運轉時切換至電壓與頻率控制之情形，另外當市電恢復正常後，儲能系統再切換至實、虛功率控制，亦即微電網系統經過併網操作、孤島運轉及偵測市電恢復正常後，隨即切換回併網運作之情形，在負載 4kW 時，微電網系統功率、頻率與各分散式電源電壓模擬結果如圖 40(a)-(e)所示。首先併網時，儲能系統設定輸出功率 P_{sto} 0.5kW，風力發電機設定輸出功率 P_{WTG} 約 1kW（風速 9.6m/s），微渦輪發電機設定輸出功率 P_{MT} 1.5kW，此時市電將提供功率 P_{grid} 約 1kW，並且箝制微電網系統之電壓與頻率。當市電於 1.5 秒發生異常時，儲能系統經由孤島偵測模組偵測出異常後，隨即與市電脫離進入孤島

運轉，此時儲能系統也將由原先實、虛功率控制立即切換至電壓與頻率控制，其中電壓命令 110V、頻率命令 60Hz，以穩定微電網系統的電壓與頻率，並且依據負載所需輸出功率以達供需平衡，由於風力發電機設定輸出功率 P_{WT} 1kW，微渦輪發電機設定輸出功率 P_{MT} 1.5kW，因此，儲能系統在此模式下將輸出功率 P_{stor} 1.5kW，各分散式電源功率響應模擬結果如圖 40(a)所示；另外，由圖 40(b)-(e)微電網系統頻率與各分散式電源電壓響應圖所示，微電網系統在併網時其頻率與電壓由市電所箝制，當市電於 1.5 秒脫離瞬間，其頻率與電壓會有所波動，然而由於儲能系統切換至頻率與電壓控制，因此系統頻率與電壓最後仍穩定在操作範圍，故微電網系統能夠穩定運轉。最後，當市電於 3 秒恢復正常時，儲能系統偵測到市電恢復後，隨即利用鎖相迴路與市電進行同步進入併網操作，此時儲能系統也將由電壓與頻率控制切換回實、虛功率控制，此時，因市電已恢復正常，因此原先微電網系統之電壓與頻率再次由市電所箝制，並且依據負載所需由市電提供輸出功率約 1kW 以達供需平衡。



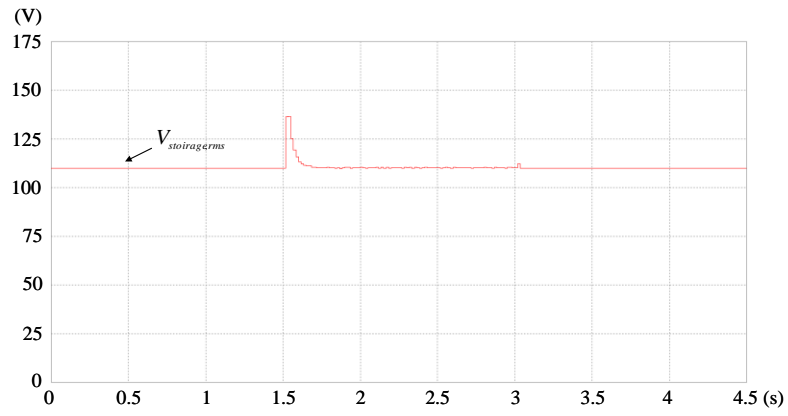
(a)



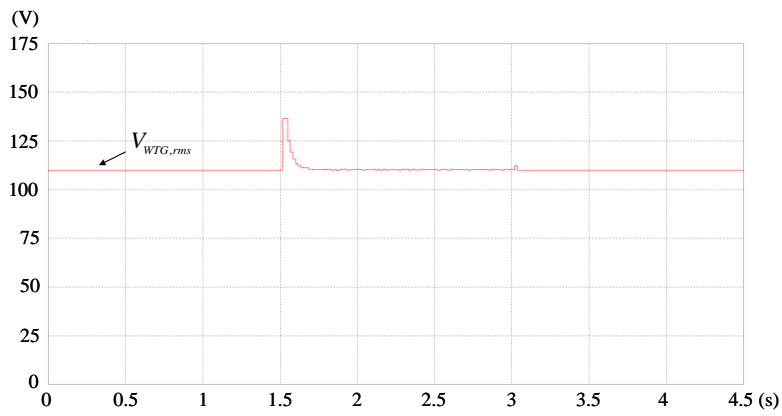
(b)

圖 40. 負載4kW微電網系統併網、孤島及重併網響應圖：(a)

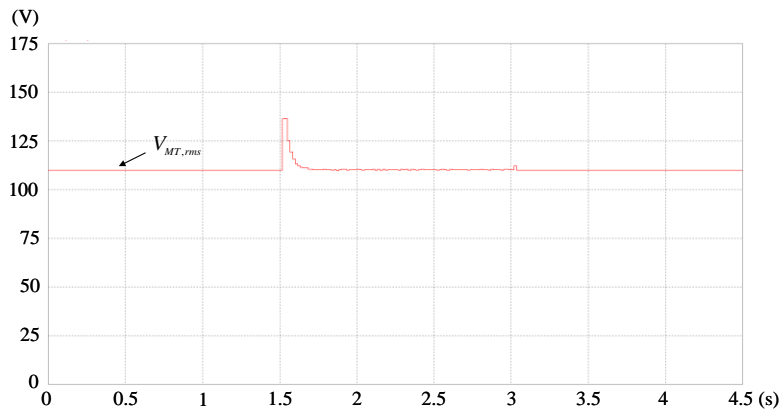
各分散式電源功率響應；(b)頻率響應



(c)



(d)



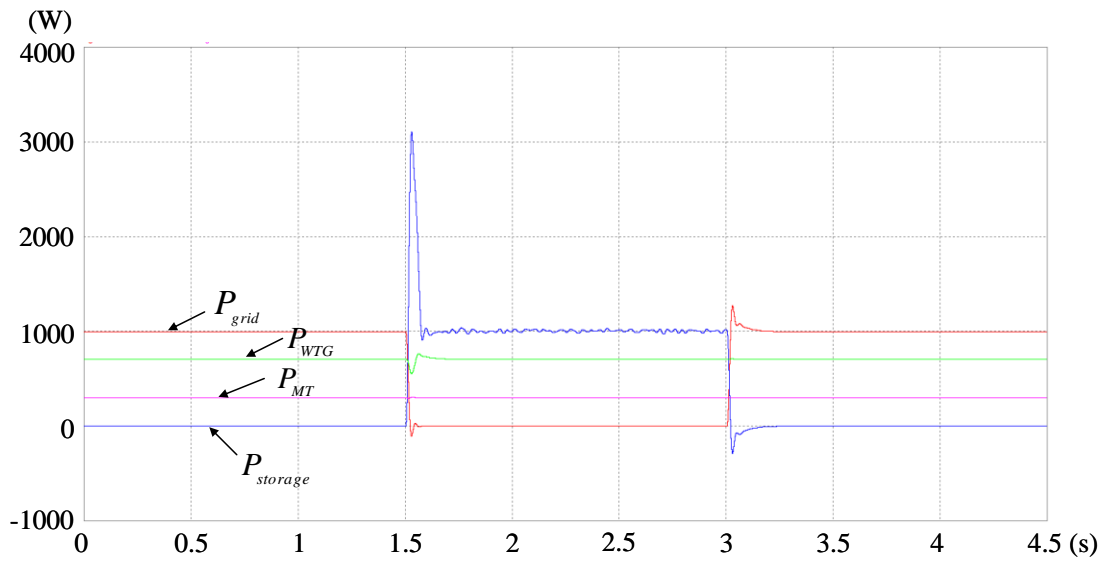
(e)

圖 40. (續) 負載4kW微電網系統併網、孤島及重併網響應

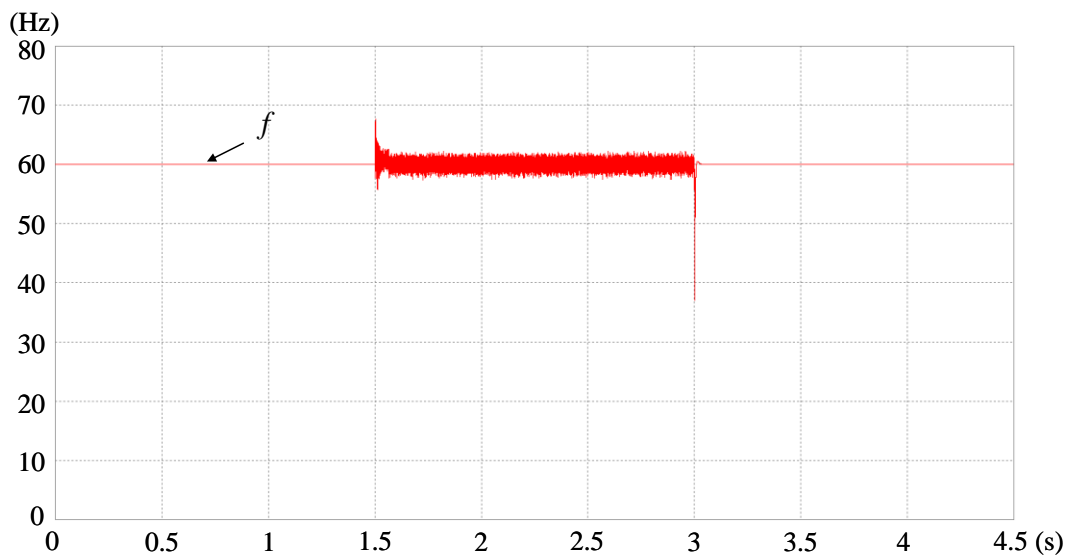
圖：(c)儲能系統電壓響應；(d)風力發電機電壓響應；

(e)微渦輪發電機電壓響應

最後，本文模擬負載 2kW 時，微電網系統經過併網操作、孤島運轉及重新併網運作之情形，在負載 2kW 時，微電網系統功率、頻率與各分散式電源電壓模擬結果如圖 41(a)-(e)所示。當併網時，儲能系統設定輸出功率 $P_{storage}$ 0kW，風力發電機設定輸出功率 P_{WTG} 約 0.7kW（風速 8.5m/s），微渦輪發電機設定輸出功率 P_{MT} 0.3kW，市電提供功率 P_{grid} 約 1kW，當市電於 1.5 秒發生異常脫離時，儲能系統由實、虛功率控制切換至電壓與頻率控制，其中電壓命令 110V、頻率命令 60Hz，以穩定系電壓與頻率，並依據負載所需輸出功率 $P_{storage}$ 1kW 以達供需平衡。當市電於 3 秒恢復正常時，儲能系統偵測到市電恢復後，隨即與市電同步進入併網操作，此時儲能系統也將由電壓與頻率控制切換回實、虛功率控制。由上述模擬結果可知，本文所提之微電網控制法則將可有效於併網、孤島運轉及重新再併網間穩定操作。另外，在圖 40(a)及 41(a)各分散式電源功率響應圖中，當進入孤島運轉模式時，儲能系統在 1.5 秒，會有瞬間大功率輸出，此應為控制系統 PI 控制器之 k_p 與 k_i 未調至最佳值所致，因此未來將研究新智慧型控制器取代傳統 PI 控制器，在微電網模擬中，微渦輪發電機因其動態響應較為複雜且緩慢，故以理想電壓源當作微渦輪發電機輸出。



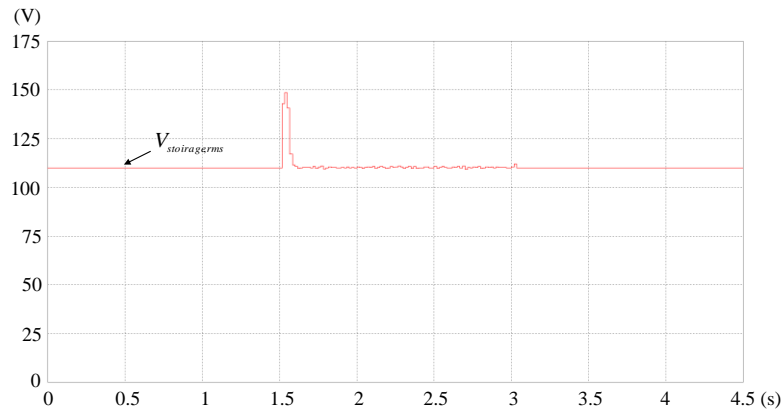
(a)



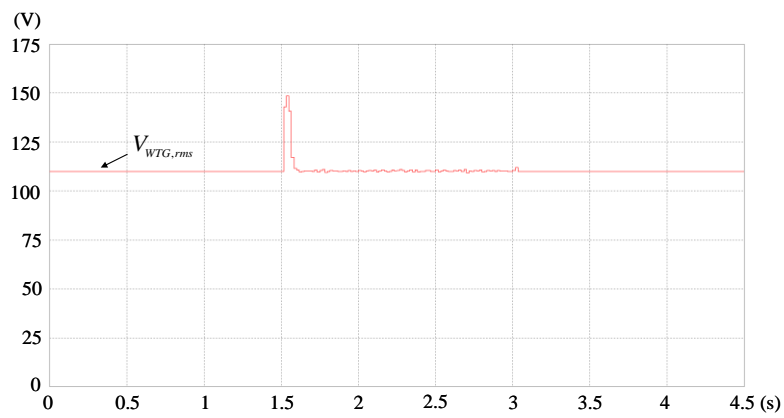
(b)

圖 41. 負載2kW微電網系統併網、孤島及重併網響應圖：(a)

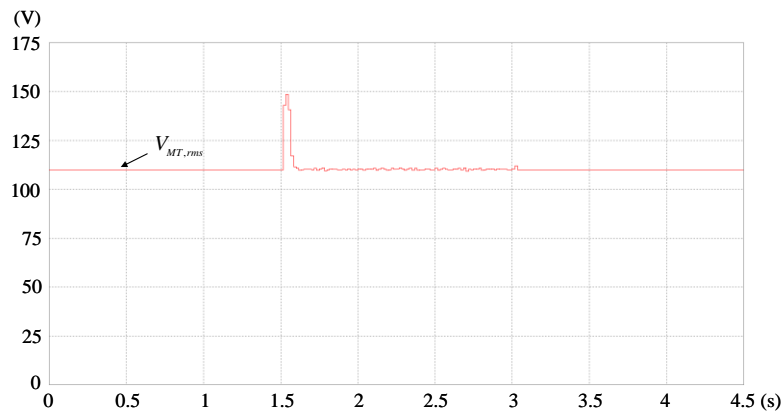
各分散式電源功率響應；(b)頻率響應



(c)



(d)



(e)

圖 41. (續) 負載2kW微電網系統併網、孤島及重併網響應圖：(c) 儲能系統電壓響應；(d)風力發電機電壓響應；(e)微渦輪發電機電壓響應

參、主要發現與結論

本計畫已完成發展鎖相迴路法達成與市電併聯同步實驗，由控制架構圖中，其輸出功率誤差藉由產生 i_{ds}^* 後，與鎖相迴路法產生之 θ 經由控制而達成與市電併聯同步。

在測試市電併聯部分，本計畫以 TSK 機率型模糊類神經網路控制器做 PSIM 模擬測試，其中系統額定輸出實功率設為 2kW、虛功率為 0VAR。因 TSK 機率型模糊類神經網路控制器，其功用能提升換流器暫態響應能力，並具有快速學習與強健性之特性，因此於市電併聯下之功率較不易受外在因素擾動而有不良現象產生，由模擬結果可知，以 TSK 機率型模糊類神經網路控制器之暫態響應能夠緊緊追隨緩起動之控制命令。

在儲能系統方面，本計畫建置磷酸鋰鐵電池儲能系統，磷酸鋰鐵電池組和具雙向功率流動之三相交流-直流轉換器所組成，最後經過濾波電感和隔離變壓器連接至電網。其主要目的以控制實功及虛功來滿足電網之需求。此外，本計畫結合 TSK 機率模糊類神經網路控制器以控制儲能系統，儲能系統可對電網以實、虛功率控制法則進行併網及充、放電功能。最後，在估測電池殘電量，本計畫使用德州儀器之電池狀態監控 IC bq27210，此 IC 也會將電池當下的殘電量數值儲存起來，以供下次殘電量估測時使用。

太陽光電系統部分，本計畫發展採用觀察與擾動法以達到太陽光電最大功率點追蹤，在饋線電壓控制方面，當配電系統發生故障時，零序電壓被 Y- Δ 三相變壓器隔離，且在變流器端看到之故障型態異於共同耦合點。透過雙模式控制策略決定 SW1 與 SW2 操作在 Mode I(最大功率點追蹤)或 Mode II，並且變流器虛功控制

迴路命令之 SW3 由 0 切至 Q^* ，控制變流器注入額外的虛功電流以提升電網電壓，進而達到饋線電壓控制目的。

在微電網系統電能控制方面，本計畫完成 PSIM 軟體驗證微電網系統電能管理與控制之可行性，其中以儲能系統當作微電網控制主機，而風力發電機及微渦輪發電機等分散式電源則定位為從屬部分，當在併網模式運作時，各分散式電源皆控制實、虛功率之輸出，而在進入孤島運轉時，風力發電機及微渦輪發電機依然輸出固定功率，而儲能系統即微電網控制主機則負責穩定微電網的電壓及頻率，並依據負載所需調整輸出功率。

目前研究成果

1. 本計畫研究成果 "Intelligent Reactive Power Control of Three-Phase PV System During Grid Faults" 已投稿 IEEE Transactions on Power Electronics 期刊。
2. 本計畫研究成果 "Reactive Power Control of Three-Phase Grid-Connected PV System during Grid Faults Using TSKPFNN-AMF Intelligent Control" 已投稿 IEEE Transactions on Industrial Electronics 期刊

肆、參考文獻

1. D. J. Cox, and T. Davis, "Distributed generation and sensing for intelligent distributed microgrids," *IEEE/SMC International Conference on System of Systems Engineering*, Los Angeles, pp. 5, 2006.

2. R. H. Lasseter, "Microgrids," *Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 1, pp. 305-308, 2002.
3. P. Paigi and R. H. Lasseter, "Autonomous control of microgrids," *Power Engineering Society General Meeting*, 2006.
4. P. H. Lasseter and P. Paigi, "Microgrid: a conceptual solution," *IEEE Power Electronics Conference*, pp. 4285-4290, 2004.
5. J. Y. Kim, J. H. Jeon, S. K. Kim, C. Cho, J. H. Park, H. M. Kim and Nam, K. Y, "Cooperative control strategy of energy storage system and microsources for stabilizing the microgrid during islanded operation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 12, pp. 3037-3028, 2010.
6. F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre and A. V. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1398-1409, 2006.
7. J. Youngseok, C. Jaeho, Y. Byunggyu and Y. Gwonjong, "Optimal Design of Active Anti-islanding Method Using Digital PLL for Grid-connected Inverters," *IEEE Power Electronics Conference*, pp. 1-6, 2006.
8. S.-K Chung, "Phase-locked loop for grid-connected three-phase power conversion systems," *IEE Proceedings -Electric Power Applications*, vol. 147, no. 3, pp. 213-219, 2000.
9. S. Li and B. Ke, "Study of battery modeling using mathematical and circuit oriented approaches," in *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-8, 2011.
10. T. Kinjo, T. Senjyu, N. Urasaki, and H. Fujita, "Output levelling of renewable energy by electric double-layer capacitor applied for energy storage system," *IEEE Transactions on Energy Conversion.*,

- vol. 21, no. 1, pp. 221-227, Mar. 2006.
- 11.C. Shen, L. Zhang, M. L. Crow, and S. Atcitty, "Integration of a statcom and battery energy storage," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 12, pp.254-260, May 2001.
 - 12.Guda, S. R., Wang, C., and Nehrir, M. H., "A Simulink-Based Microturbine Model for Distributed Generation Studies," Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium, Starkville, USA, pp. 269-274, 2005.
 - 13.Wei, H., Jianhua, Z., Ziping, W., and Ming, N., "Dynamic Modeling and Simulation of a Micro-Turbine Generation System in the Microgrid," Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore, pp. 345-350, 2008.
 - 14.Patel, G. J. and Bohra, H. H., "Modeling and Analysis of MTG Based Isolated and Grid Connected System," Proceedings of the 2011 Nirma University International Conference on Engineering, Ahmedabad, Gujarat, pp. 1-6, 2011.
 - 15.Zhao, B., Zhang, X., and Chen, J., "Integrated Microgrid Laboratory System," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 27, No. 4, pp. 2175-2185, 2012.