



Advanced topic of Microgrid Systems

結合虛擬慣量併網型微電網 之智慧型控制

Intelligent Control of Grid-Connected Microgrid with Virtual Inertia

Chair Prof. Faa-Jeng Lin
PhD, Fellow IEEE/IET
linfj@ee.ncu.edu.tw

Dec. 3, 2019



目錄

一、緒論

二、微電網規範與控制策略介紹

三、系統架構與控制策略

四、遞迴式機率小波模糊類神經網路

五、模擬結果

六、硬體與實驗結果

七、結論與未來展望

• 研究背景與動機

1. 大多數國家在固定區域建設大型發電廠如火力發電廠、核能發電廠以及水力發電廠等，所採用的發電型式稱為集中式發電。
2. 大型發電廠一旦發生故障，勢必將造成整體電網的穩定度降低；另外隨著都會區及工業區的負載集中、電力需求急速成長，其中以分散式電源(Distributed Generation, DG)系統最能解決集中式發電所產生的問題[1], [2]。
3. 為了協調分散式電源對市電的影響與增加分散式電源為用戶端帶來的價值，近年來學者已提出了一種新的概念：微電網(Microgrid)架構[5], [6]。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[7], [9]:併網模式與孤島運轉模式。

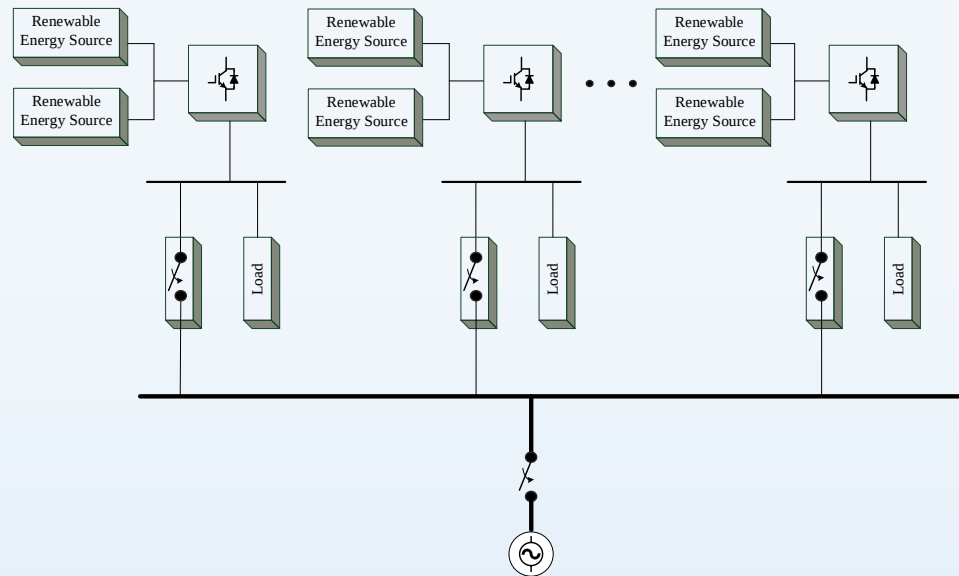


圖1.1 微電網示意圖[8]

1. 變流器常見的控制法則可分為[10], [11]：(1)下降控制法(Droop-Based Method)與(2)主從控制法(Master-Slave Method)，以系統層級來看，微電網大多數採用分級控制，通常會有一個中央或本地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。
2. 分散式電源需要透過電力電子設備與電網相連，因此沒有傳統同步機的慣量特性，也不參與電網內電壓和頻率的調節，隨著分散式電源併入電網的比例增加，同步發電機裝機比例減小，電力系統中的旋轉備用容量和轉動慣量相對減小，這對電網的整體安全與穩定性將造成嚴重的威脅。
3. 近年來，有許多關於虛擬同步發電機技術模擬出虛擬慣量的文獻，但是多數採用虛擬同步發電機的微電網控制策略都建構於下降控制，幾乎很少有文獻是探討虛擬慣量建構於主從控制。
4. 本文提出一新式遞迴式機率小波模糊類神經網路(Recurrent Probabilistic Wavlet Fuzzy Neural Networks, RPWFNNs)，應用於微電網系統在併網時的虛功率控制以及孤島運轉時的電壓控制。



目錄

一、緒論

二、微電網規範與控制策略介紹

三、系統架構與控制策略

四、遞迴式機率小波模糊類神經網路

五、模擬結果

六、硬體與實驗結果

七、結論與未來展望



• 微電網規範

- 美國IEEE 929-2000[3]規範為IEEE 1547-2003[4]未訂定之前針對10kW以下之小容量太陽能發電系統併網所做的規範分為兩部分，第一為電力品質，第二為安全與保護裝置。

(1) 電力品質：

- a. 電壓正常操作範圍為市電電壓的88% ~ 110%。
- b. 頻率正常操作範圍為59.3Hz ~ 60.5Hz。

(2) 安全與保護規範：

- a. 不正常市電狀況之影響：以責任分界點PCC為量測點，當電壓與頻率超過正常電壓與頻率的正常操作範圍限制時，即判斷市電端發生異常故障，並立即啟用電壓或頻率保護電驛將分散式電源與市電端解聯。
- b. 孤島運轉保護：由於孤島運轉之情形必須靠併聯市電之變流器偵測。當變流器偵測到孤島運轉條件時，變流器將會適時的中斷系統與負載之供電。藉由上述之電壓與頻率限制範圍之偵測裝置來降低孤島運轉的發生。
- c. 市電重新連結：當市電發生異常故障，欲重新恢復連結供電時，分散式電源需於5分鐘後始可恢復供電。



- 美國IEEE 1547-2003規範[4]是針對容量在10MVA以下之分散式發電系統併聯市電做相關規範的制定，亦可分電壓與頻率測試條件，概述如下：

(1) 電壓測試條件：

當電壓於表2.1所制定之範圍時，系統需於所對應之電壓情況在所制定之最大偵測時間內停止輸出功率，其中所制定之最大偵測時間為當市電端發生異常故障起至系統停止輸出功率之時間，而電壓百分比即相較於正常操作值之電壓值。

表2.1 IEEE 1547電壓偵測規範表[4]

PCC電壓範圍(%)	最大偵測時間(s)
$V < 50$	0.16
$50 \leq V < 88$	2
$88 < V < 110$	正常操作範圍
$110 < V < 120$	1
$V \geq 120$	0.16

(2) 頻率測試條件：

IEEE 1547頻率偵測詳細規範範圍如表2.2所示，當系統頻率於表2.2所制定之範圍時，系統需於所對應之頻率情況在所制定之最大偵測時間內需停止輸出功率，當市電發生異常故障時，變流器必須於2秒內偵測到孤島運轉，並立即中斷系統供電予負載[2]。。

表2.2 IEEE 1547頻率偵測規範表[4]

功率大小	PCC頻率範圍(Hz)	最大偵測時間(s)
$\leq 30\text{kW}$	$f > 60.5$	0.16
	$f < 59.3$	0.16
$> 30\text{kW}$	$f > 60.5$	0.16
	$f < \{59.8 \sim 57\}$	0.16~300
	$f < 57$	0.16

• 微電網控制策略

➤ 定功率控制

採用定功率控制的主要目的是使分散式電源在併網時，輸出指定的實功率與虛功率，控制方塊圖如圖2.1所示，按照預先設定的實虛功命令做輸出。

➤ 電壓頻率控制

當微電網進入孤島運轉時，分散式電源由原先實、虛功率控制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，控制架構如圖2.2所示。

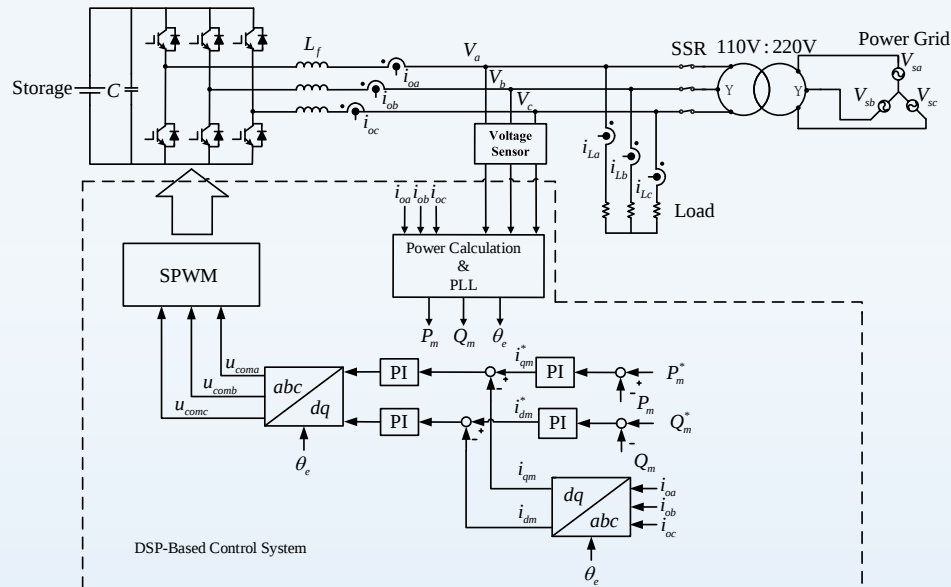


圖2.1 PQ控制架構圖

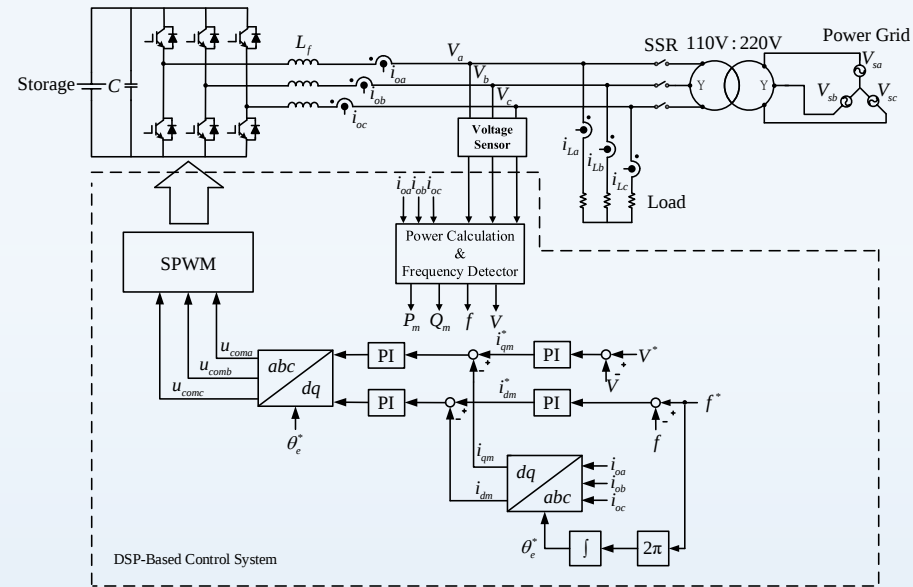


圖2.2 VF控制架構圖



➤ 下降控制

下降控制主要是藉由模擬電力系統中，同步發電機的下降特性曲線對轉換器進行控制的一種方法，其下降特性可表示如下[9], [14], [15]，：

$$f_{\min} - f_0 = -k_P(P_{\max} - P_0) \quad (2.1)$$

$$V_{\min} - V_0 = -k_Q(Q_{\max} - Q_0) \quad (2.2)$$

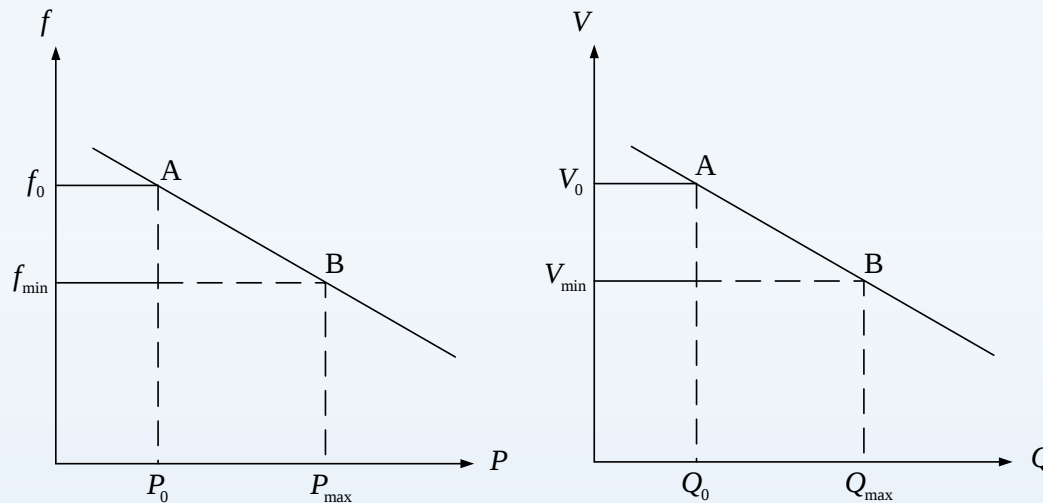


圖2.3電壓頻率下降特性曲線圖

• 微電網控制策略

➤ 虛擬同步發電機

採用下降控制的變流器可以模擬出同步機藉由電壓、頻率變動調整其輸出功率，但是依然沒有慣量可以提供給系統，因此虛擬同步發電機的控制方法被提了出來，為了模擬同步機的慣量特性，加入同步機的擺動方程式[19], [21], [29]如式(2.3)

$$2H \frac{d\omega_m}{dt} = P_m - P_e - D(\omega_m - \omega_0) \quad (2.3)$$

利用式(2.4) [21]的等效式子，可以計算出傳統發電機與虛擬同步發電機所能提供的能量

$$E = \frac{1}{2} J \omega_m^2 \quad (2.4)$$

485MW的電力系統

500kW的變流器

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2$$

$$= 3286.8 \text{ MJ}$$

$$E = \frac{1}{2} C V^2 * \frac{485 \text{ MW}}{500 \text{ kW}}$$

$$= \frac{1}{2} * 18.36 \text{ m} * 1000^2 * \frac{485 \text{ MW}}{500 \text{ kW}}$$

$$= 9180 * 970$$

$$= 8.9046 \text{ MJ}$$

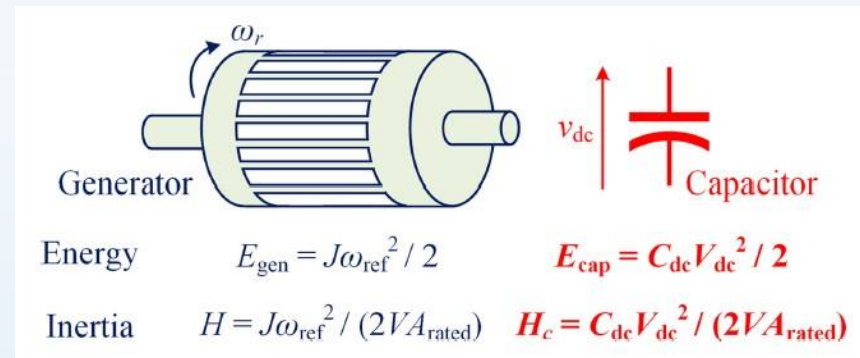


圖2.4同步機與直流鏈電容對比[21]



- 微電網控制策略

➤ 主從控制

主從控制一般被採用在整合式的微電網中，在微電網內有很多種分散式電源(DG)，而採用V/F控制的分散式電源被視為是主(Master)控制單元，提供標準的電壓跟頻率給其他的分散式電源。

(1) 併網模式：

不需要調整電壓及頻率，微電網內部的分散式電源都將採用PQ控制。

(2) 孤島模式：

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。

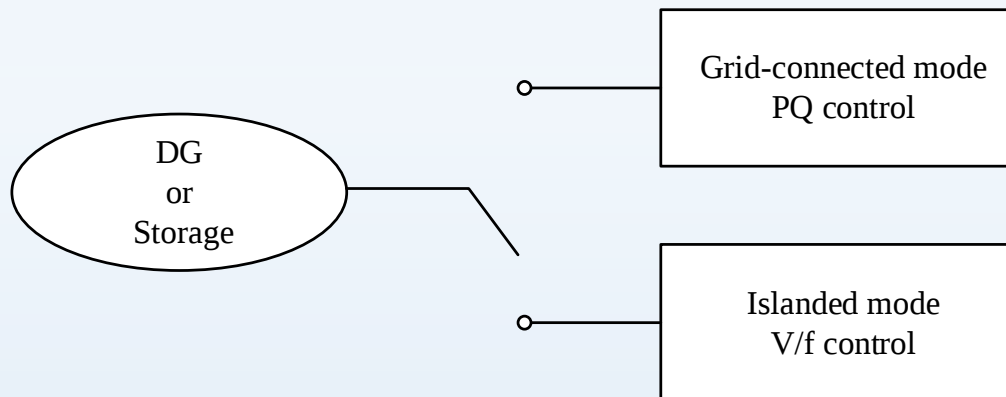


圖2.5主控制法則



➤ 分級控制

分級控制分為第一級控制(Primary Control)、第二級控制(Secondary Control)與第三級控制(Tertiary Control)

(1) 第一級控制：

稱為本地控制(Local Control)或內部控制(Internal Control)，是分級控制的第一層，僅需要透過感測器量測不需要通訊，主要負責孤島偵測、功率平衡、輸出控制 [16]-[18]。

(2) 第二級控制：

稱為微電網能量管理系統(Energy Managemet System, EMS)，負責微電網的可靠、安全和經濟運作在併網模式與孤島模式，其功用為補償在微電網中由第一級控制所造成的電壓與頻率浮動。

(3) 第三級控制：

協調微電網與微電網之間的運作，當微電網與操作在併網模式時，功率流向藉由在穩態時調整相位與微電網內部之振幅。

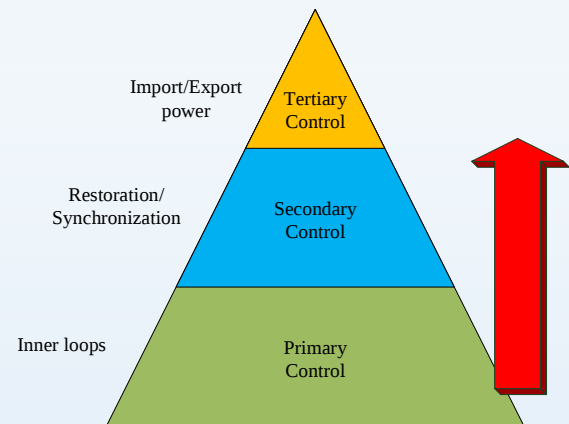


圖2.7分級控制層級功能示意圖[15]11



目錄

- 一、緒論
- 二、微電網規範與控制策略介紹
- 三、系統架構與控制策略
- 四、遞迴式機率小波模糊類神經網路
- 五、模擬結果
- 六、硬體與實驗結果
- 七、結論與未來展望



- 在三相系統中所建立的分散式電源，因電壓、電流和開關函數具有非線性時變且相互耦合的關係，故在分析上相當複雜、困難且耗時。為便於電路分析與控制，若藉由座標軸之轉換，將原本相位相差 120° 的三相固定座標軸轉換成互呈 90° 的d-q-0同步旋轉座標軸，即可使系統更易於分析與控制。

座標軸轉換公式：

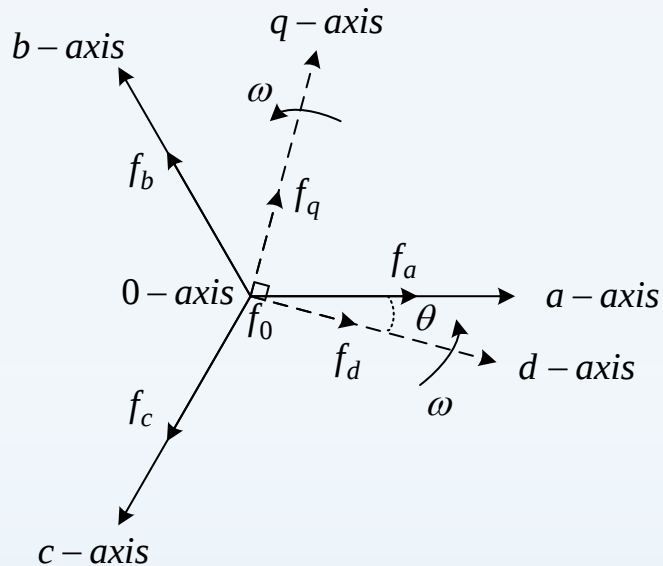


圖3.1 a-b-c軸與d-q-0軸之幾何關係圖

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$



➤ 市電角度估測-鎖相迴路

由於分散式電源需併聯於市電，故須注意如何與市電電壓相角同步。

假設市電的三相電壓為：

$$\begin{aligned} V_{sa} &= V_m \sin \theta_e \\ V_{sb} &= V_m \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{sc} &= V_m \sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

經由座標軸轉換後，整理歸納可得：

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{s0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \sin(\theta_e - \hat{\theta}_e) \\ V_m \cos(\theta_e - \hat{\theta}_e) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

將 V_{sd} 送入比例積分器再通過積分器，可獲得估測角度 $\hat{\theta}_e$ ，把估測角度代回同步旋轉座標軸可形成閉迴路控制，而當 $V_{sd} = 0$ 時即達到相位同步。

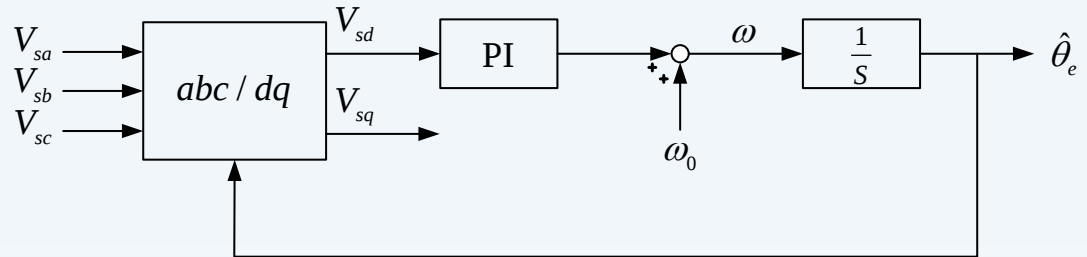


圖 3.2 鎖相迴路架構圖

- 主從控制加入虛擬慣量之架構與控制策略

➤ 本文微電網系統架構由一儲能系統、太陽能光電系統與三相可變電阻負載組成，經由一個固態繼電器(Static Switch Relay, SSR)併聯於低壓側線間電壓110Vrms之市電

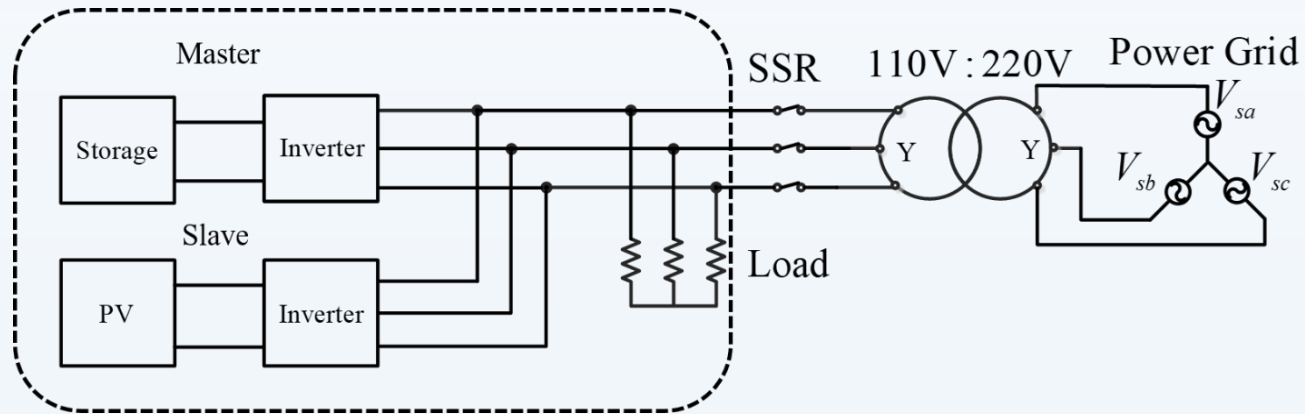


圖3.3微電網架構圖

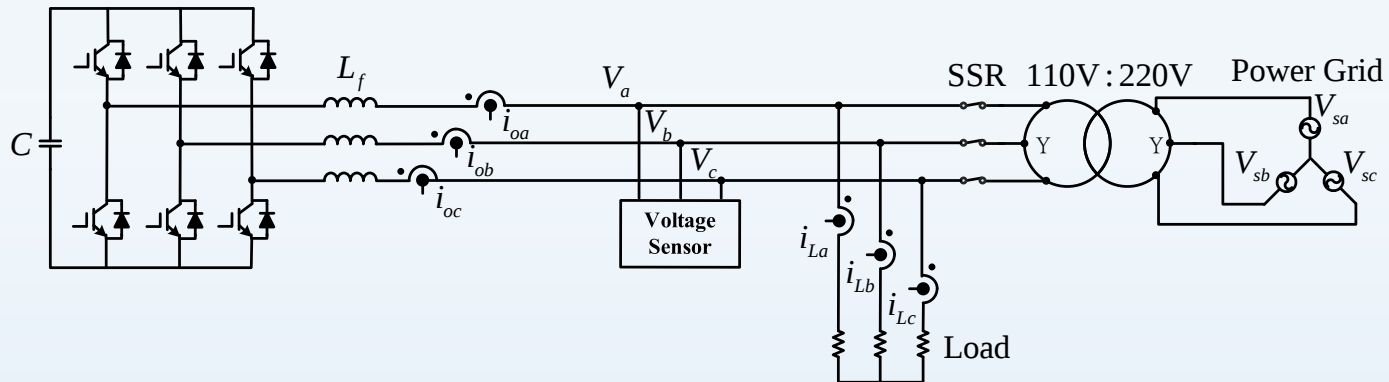


圖3.4三相變流器電路架構



- 為了使變流器能夠確切的輸出電網與負載所需之電量，因此本論文採用實、虛率功控制，能夠即時且穩定的供應電量至電網及負載。利用座標軸轉換之方式，將三相相電壓及電流轉換至同步旋轉座標軸上，並且套入實、虛功之計算公式可以得到：

$$P_m = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) \quad (3.9)$$

$$Q_m = \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d i_q) \quad (3.10)$$

結合鎖相迴路，與電網相位同步時，實功率與虛功率則可分別表示如下：

$$P_m = \frac{3}{2}V_m i_q \quad (3.11)$$

$$Q_m = \frac{3}{2}V_m i_d \quad (3.12)$$

實功率對應 q 軸，其控制力為 i_q^* ，虛功率對應 d 軸，其控制力為 i_d^* 。

- 此外，為了模擬微電網中的旋轉慣量，在儲能系統中加入了同步機的擺動方程式[18], [20], [28]:

$$2H \frac{d\Delta\omega_m}{dt} = P_m^* - P_m - D\Delta\omega_m \quad (3.13)$$

$$\Delta\omega_m = \frac{P_m^* - P_m}{2Hs + D} \quad (3.14)$$

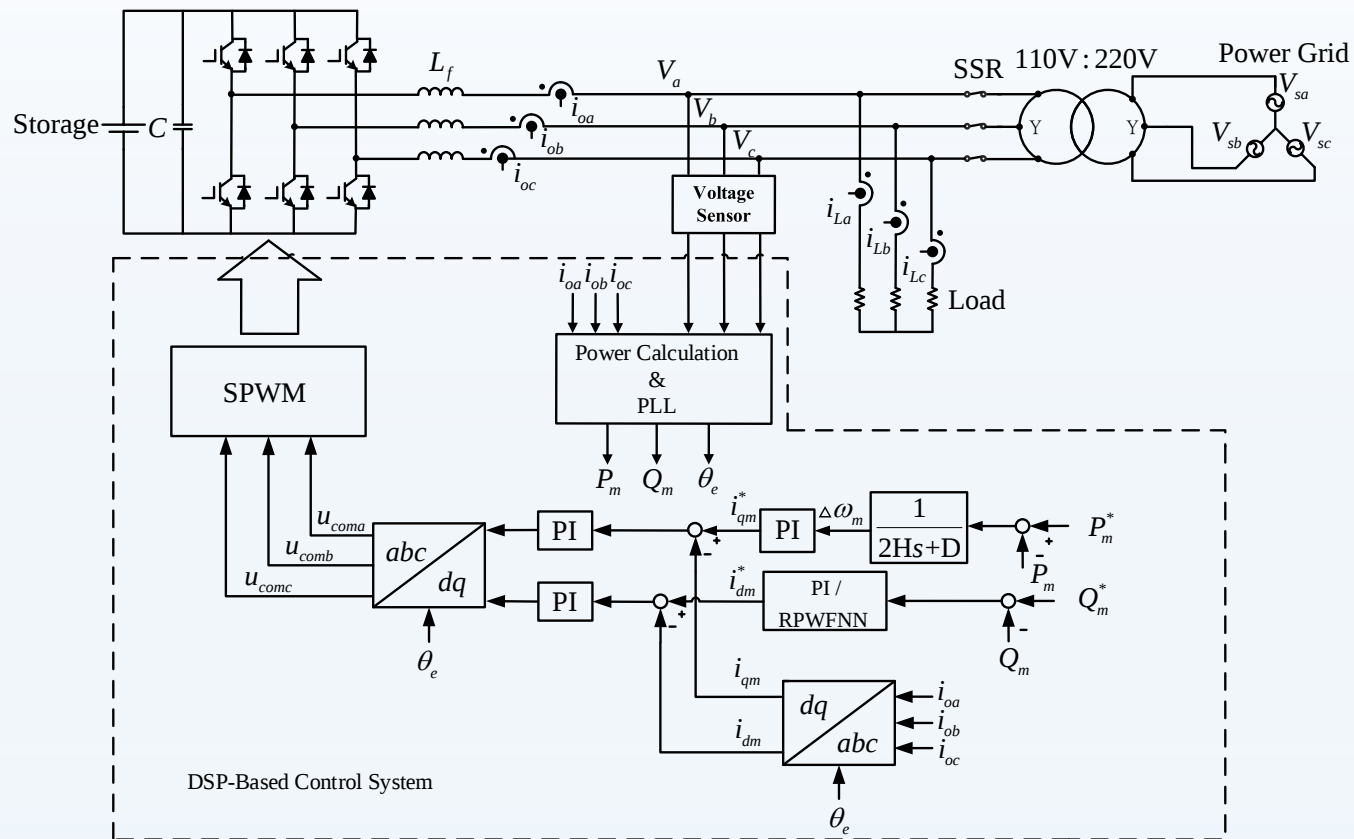
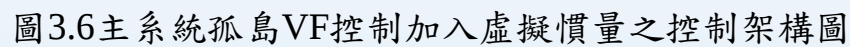


圖3.5主系統併網PQ控制加入虛擬慣量之控制架構圖



- 從控制策略

本論文中太陽能光電系統為從系統，不管是在併網或孤島模式下皆視為電流源
採用實、虛功率控制，其控制架構如圖3.7所示

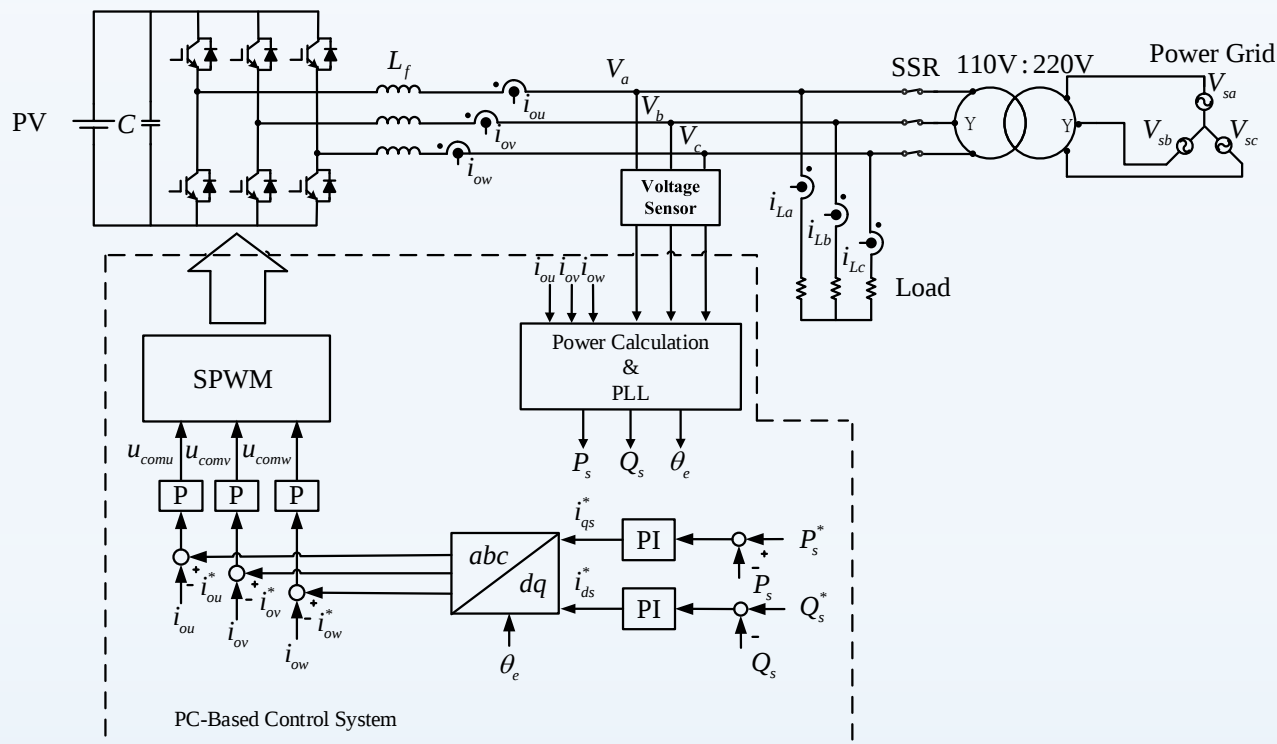
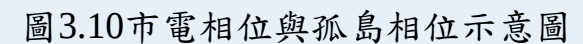
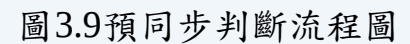
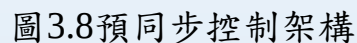


圖3.7從系統併網PQ控制架構圖

$$\sin(2 * \pi i * f * (1/16k) * n), n = 0 \sim 267 \quad (3.15)$$




目錄

- 一、緒論
- 二、微電網規範與控制策略介紹
- 三、系統架構與控制策略
- 四、遞迴式機率小波模糊類神經網路
- 五、模擬結果
- 六、硬體與實驗結果
- 七、結論與未來展望



➤ 第一層：輸入層(Input Layer)

$$net_i^1(N) = x_i^1 \quad (4.1)$$

$$y_i^1(N) = f_i^1(net_i^1(N)) = net_i^1(N) \quad i = 1, 2 \quad (4.2)$$

➤ 第二層：歸屬函數層(Membership Layer)

$$net_j^2(N) = -\frac{(y_i^1 - m_{ij}^2)^2}{(\sigma_{ij}^2)^2} \quad (4.3)$$

$$y_j^2(N) = f_j^2(net_j^2(N)) = \exp(net_j^2(N)), \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (4.4)$$

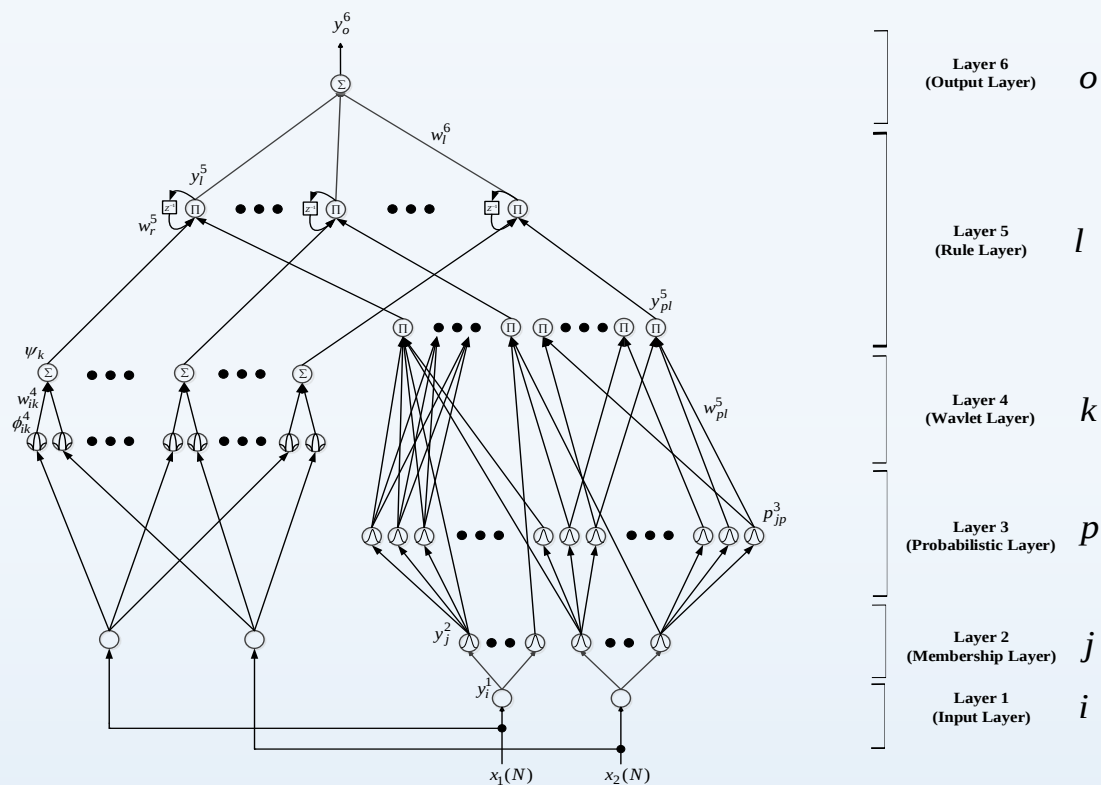


圖4.1遞迴式機率小波模糊類神經網路架構

➤ 第三層：機率層(Probabilistic Layer)

$$net_{jp}^3(N) = -\frac{(y_j^2(N) - m_{jp}^3)^2}{(\sigma_{jp}^3)^2} \quad (4.5)$$

$$p_{jp}^3(N) = f_{jp}^3(net_{jp}^3(N)) = \exp(net_{jp}^3(N)), \quad p = 1, 2, 3 \quad (4.6)$$

➤ 第四層：小波函數層(Wavelet Layer)

$$\phi_{ik}^4(N) = \frac{1}{\sqrt{|\sigma_{ik}^4|}} \left[1 - \frac{(x_i^1(N) - m_{ik}^4)^2}{(\sigma_{ik}^4)^2} \right] \exp \left[-\frac{(x_i^1(N) - m_{ik}^4)^2}{2(\sigma_{ik}^4)^2} \right], \quad i = 1, 2; k = 1, 2, \dots, 9 \quad (4.7)$$

$$\psi_k(N) = \sum w_{ik}^4 \phi_{ik}^4(N) \quad (4.8)$$

➤ 第五層：規則層(Rule Layer)

$$y_{pl}^5(N) = \prod_{j,p} w_{pl}^5 y_j^2 p_{jp}^3, \quad j = 1, 2, \dots, 6; \quad p = 1, 2, 3 \quad (4.9)$$

$$net_l^5(N) = y_{pl}^5 \psi_k w_r^5 y_l^5(N-1) \quad (4.10)$$

$$y_l^5(N) = f_l^5(net_l^5(N)), \quad l = 1, 2, \dots, 9 \quad (4.11)$$

➤ 第六層：輸出層(Output Layer)

$$net_o^6(N) = \sum_{l=1}^9 w_l^6 y_l^5(N), \quad o = 1 \quad (4.12)$$

$$y_o^6(N) = f_o^6(net_o^6(N)) \quad (4.13)$$

網路參數調整方面，利用監督式梯度陡降法做為倒傳遞線上調整的方式使網路在外在干擾與不確定性的影響下，仍然具有強健而穩定的即時控制能力，定義能量函數E如下：

$$E(N) = \frac{1}{2} (Q_m^* - Q_m)^2 = \frac{1}{2} e^2 \quad (4.14)$$

➤ 第六層：輸出層(Output Layer)

$$\delta_o^6 = -\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} = -\frac{\partial E}{\partial Q_m} \frac{\partial Q_m}{\partial y_o^6(N)} \quad (4.15)$$

$$\Delta w_l^6 = -\eta_1 \frac{\partial E}{\partial w_l^6} = -\eta_1 \frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial w_l^6} = \eta_1 \delta_o^6 x_l^6 \quad (4.16)$$

$$w_l^6(N+1) = w_l^6(N) + \Delta w_l^6 \quad (4.17)$$

➤ 第五層：規則層(Rule Layer)

$$\delta_l^5 = -\frac{\partial E}{\partial y_l^5(N)} = -\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_l^5} = \delta_o^6 w_l^6 \quad (4.18)$$

$$\delta_{pl}^5 = -\frac{\partial E}{\partial y_{pl}^5(N)} = -\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_l^5(N)} \frac{\partial y_l^5(N)}{\partial y_{pl}^5(N)} = \delta_l^5 \psi_k w_r^5 y_l^5(N-1) \quad (4.19)$$

$$\Delta w_r^5 = -\eta_2 \frac{\partial E}{\partial w_r^5} = -\eta_2 \frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_l^5(N)} \frac{\partial y_l^5(N)}{\partial w_r^5(N)} = \eta_2 \delta_l^5 \psi_k y_{pl}^5 y_l^5(N-1) \quad (4.20)$$

$$w_r^5(N+1) = w_r^5(N) + \Delta w_r^5 \quad (4.21)$$

➤ 第四層：小波層(Output Layer)

$$\delta_{ik}^4 = -\frac{\partial E}{\partial \psi_k} = -\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_l^5(N)} \frac{\partial y_l^5(N)}{\partial \psi_k(N)} = \delta_l^5 y_{pl}^5 w_r^5 y_l^5 (N-1) \quad (4.22)$$

$$\Delta w_{ik}^4 = -\eta_3 \frac{\partial E}{\partial w_{ik}^4} = -\eta_3 \frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_l^5(N)} \frac{\partial y_l^5(N)}{\partial \psi_k(N)} \frac{\partial \psi_k(N)}{\partial w_{ik}^4(N)} = \eta_3 \delta_{ik}^4 \phi_{ik}^4 \quad (4.23)$$

$$w_{ik}^4(N+1) = w_{ik}^4(N) + \Delta w_{ik}^4 \quad (4.24)$$

➤ 第二層：歸屬函數層(Rule Layer)

$$\delta_j^2 = -\frac{\partial E}{\partial net_j^2} = -\frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_l^5(N)} \frac{\partial y_l^5(N)}{\partial y_{pl}^5(N)} \frac{\partial y_{pl}^5(N)}{\partial y_j^2(N)} \frac{\partial y_j^2(N)}{\partial net_j^2(N)} = \sum_p \delta_{pl}^5 y_{pl}^5 \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} \Delta m_{ij}^2 &= -\eta_4 \frac{\partial E}{\partial m_{ij}^2} = -\eta_4 \frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_l^5(N)} \frac{\partial y_l^5(N)}{\partial y_{pl}^5(N)} \frac{\partial y_{pl}^5(N)}{\partial y_p^3(N)} \frac{\partial y_p^3(N)}{\partial y_j^2(N)} \frac{\partial y_j^2(N)}{\partial net_j^2(N)} \frac{\partial net_j^2(N)}{\partial m_{ij}^2(N)} \\ &= \eta_4 \delta_j^2 \frac{2(y_i^1 - m_{ij}^2)}{(\sigma_{ij}^2)^2} \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_{ij}^2 &= -\eta_5 \frac{\partial E}{\partial \sigma_{ij}^2} = -\eta_5 \frac{\partial E}{\partial y_o^6(N)} \frac{\partial y_o^6(N)}{\partial y_l^5(N)} \frac{\partial y_l^5(N)}{\partial y_{pl}^5(N)} \frac{\partial y_{pl}^5(N)}{\partial y_p^3(N)} \frac{\partial y_p^3(N)}{\partial y_j^2(N)} \frac{\partial y_j^2(N)}{\partial net_j^2(N)} \frac{\partial net_j^2(N)}{\partial \sigma_{ij}^2(N)} \\ &= \eta_5 \delta_j^2 \frac{2(y_i^1 - m_{ij}^2)^2}{(\sigma_{ij}^2)^3} \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$m_{ij}^2(N+1) = m_{ij}^2(N) + \Delta m_{ij}^2 \quad (4.28)$$

$$\sigma_{ij}^2(N+1) = \sigma_{ij}^2(N) + \Delta \sigma_{ij}^2 \quad (4.29)$$



目錄

- 一、緒論
- 二、微電網規範與控制策略介紹
- 三、系統架構與控制策略
- 四、遞迴式機率小波模糊類神經網路
- 五、模擬結果
- 六、硬體與實驗結果
- 七、結論與未來展望

- 本章節利用PSIM模擬軟體來建立電力系統之環境架構，使用PI、RPWFNN之2種不同控制器來進行模擬，並驗證本論文所提出的控制架構的正確性。總共模擬四種情況，分別是併網模式、併網轉孤島模式、孤島模式與孤島轉併網模式。

(1)併網模式:

儲能系統實功率命令為0.5kW-1.5kW-1kW，虛功率命令為500VAR，太陽能光電系統則是維持定功率輸出1.5kW，虛功率為0VAR，負載為1kW。

(2)併網轉孤島模式:

儲能系統的實功率命令為0.5kW，虛功率命令為0VAR，相電壓峰值命令為89V，頻率命令為60Hz，太陽能光電系統則是維持定功率輸出0.5kW，虛功率為0VAR，負載為2kW。

(3)孤島模式:

儲能系統的相電壓峰值命令為89V，頻率命令為60Hz，太陽能光電系統則是維持定功率輸出1kW，虛功率為0VAR，負載為1kW-3kW-2kW。

(4)孤島轉併網模式:

儲能系統的相電壓峰值命令為89V，頻率命令為60Hz，實功率命令為0.5kW，虛功率命令為0VAR，太陽能光電系統則是維持定功率輸出0.5kW，虛功率為0VAR，負載為1kW。



• 併網模式模擬結果

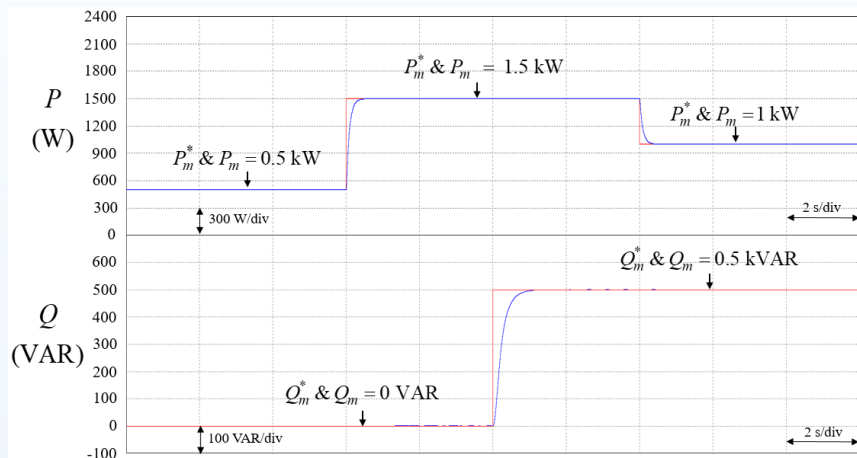


圖5.1 儲能系統實虛功率響應模擬結果：

(a) 利用PI控制器之虛功率與實功率無虛擬慣量

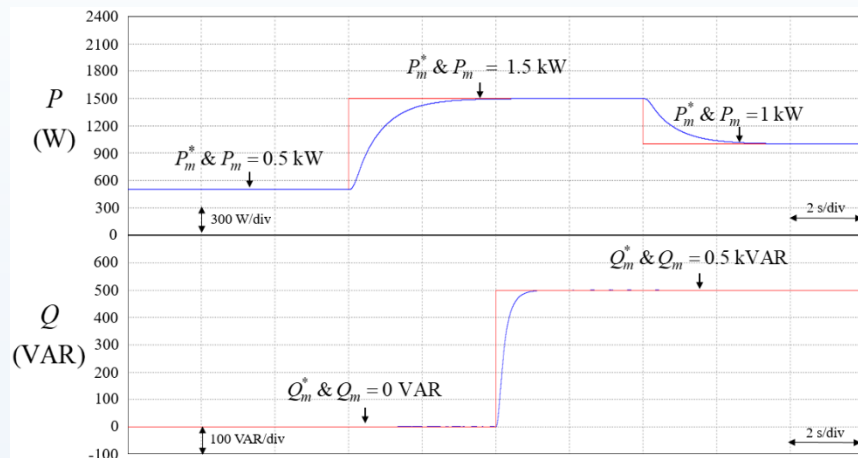


圖5.1 儲能系統實虛功率響應模擬結果：

(b) 利用PI控制器之虛功率與實功率有虛擬慣量

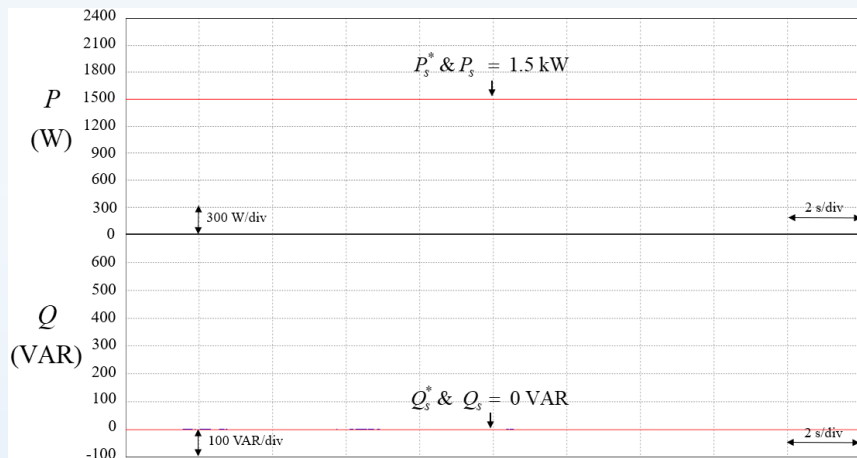


圖5.1 太陽能光電系統與市電實、虛功率響應模擬結果：

(c) 太陽能光電系統利用PI控制器之實功率與虛功率

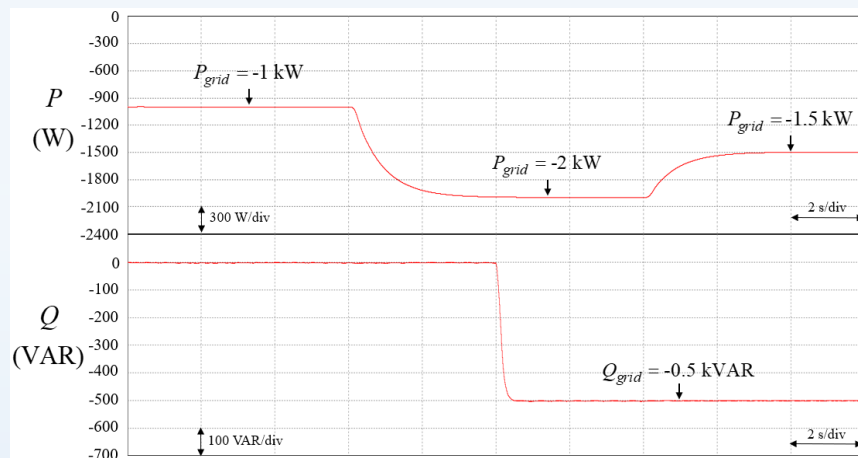


圖5.1 太陽能光電系統與市電實、虛功率響應模擬結果：

(d) 市電之實功率與虛功率



• 併網模式模擬結果

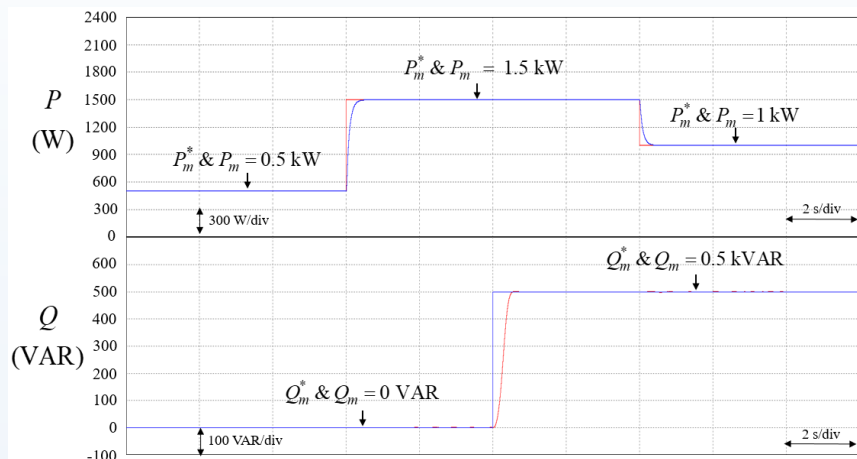
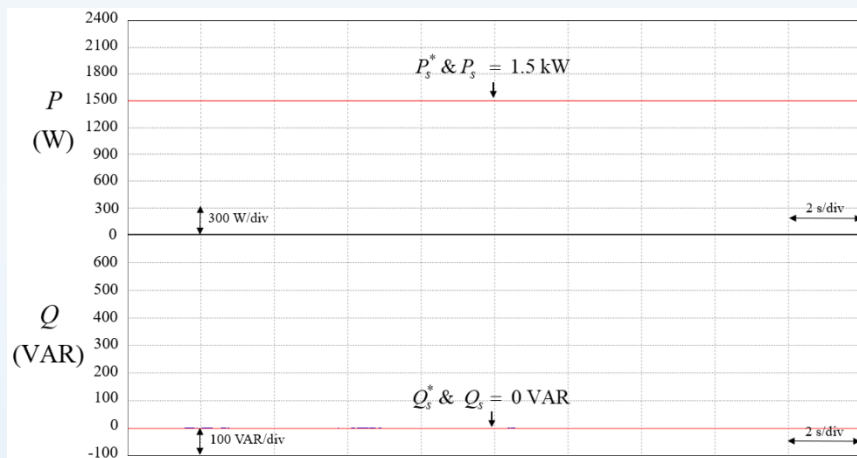


圖5.2 儲能系統實虛功率響應模擬結果：

(a) 利用RPWFNN控制器之虛功率與實功率
無虛擬慣量圖5.2 太陽能光電系統與市電實、虛功率響應
模擬結果：

(c) 太陽能光電系統利用PI控制器之實功率與虛功率

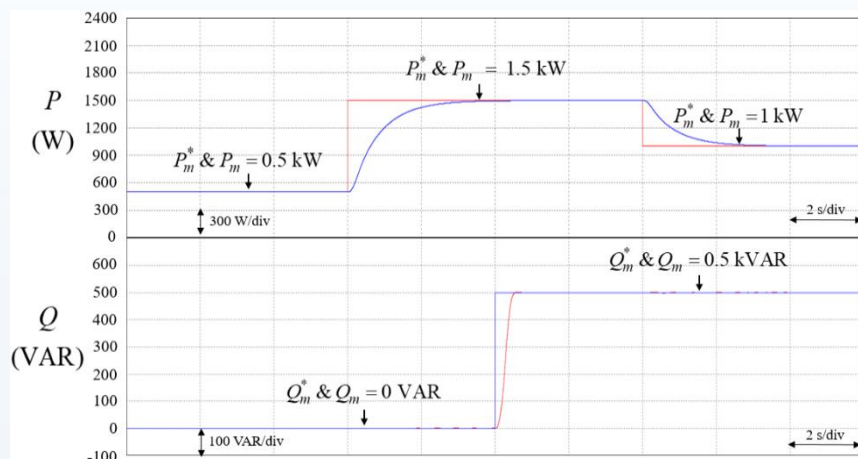
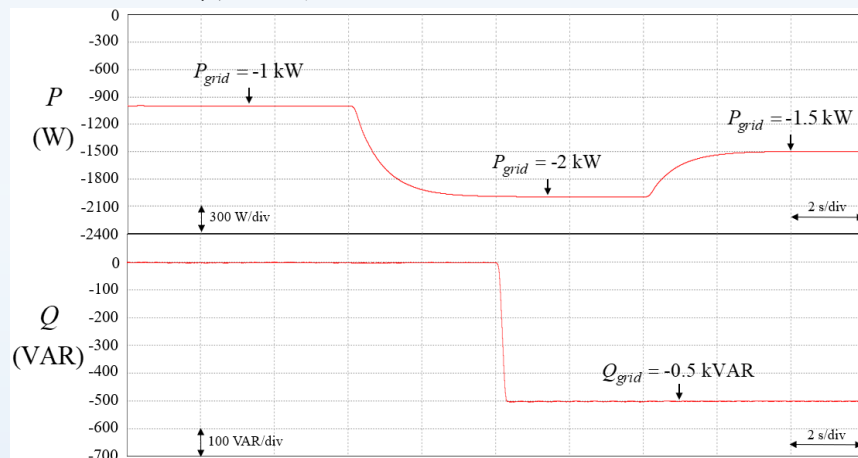


圖5.2 儲能系統實虛功率響應模擬結果：

(b) 利用RPWFNN控制器之虛功率與實功率
有虛擬慣量圖5.2 太陽能光電系統與市電實、虛功率響應
模擬結果：

(d) 市電之實功率與虛功率

• 併網轉孤島模式模擬結果

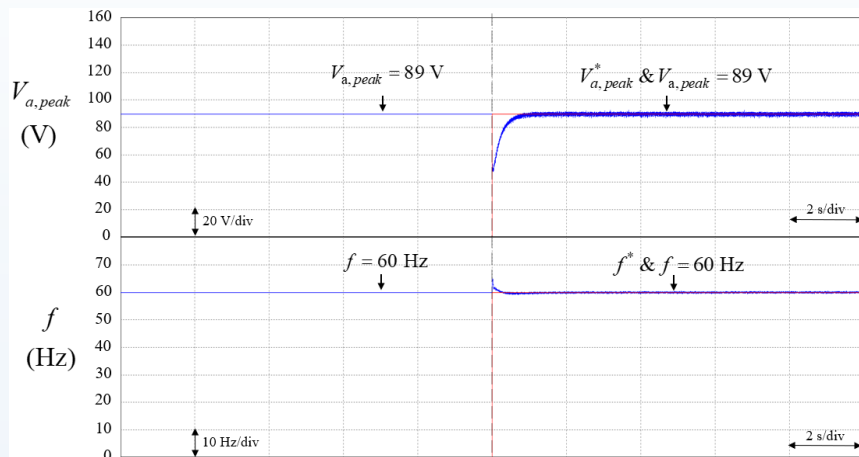


圖5.3 儲能系統響應模擬結果：
(a) 利用PI控制器之電壓與頻率

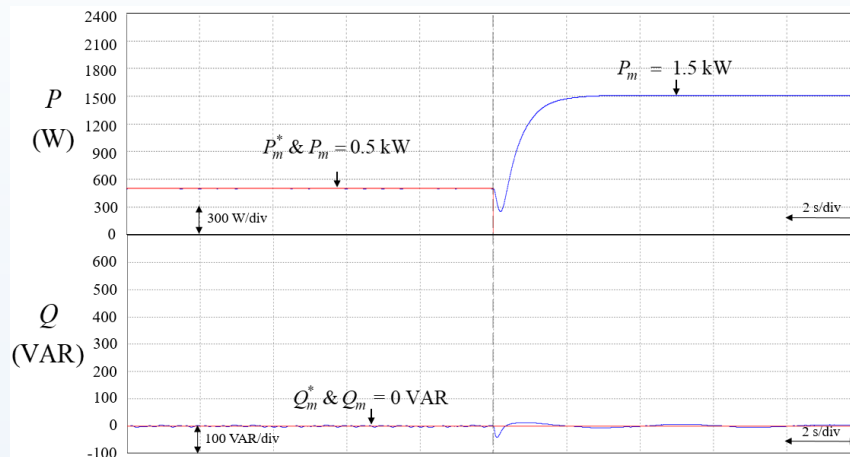


圖5.3 儲能系統響應模擬結果：
(b) 儲能系統實功率與虛功率

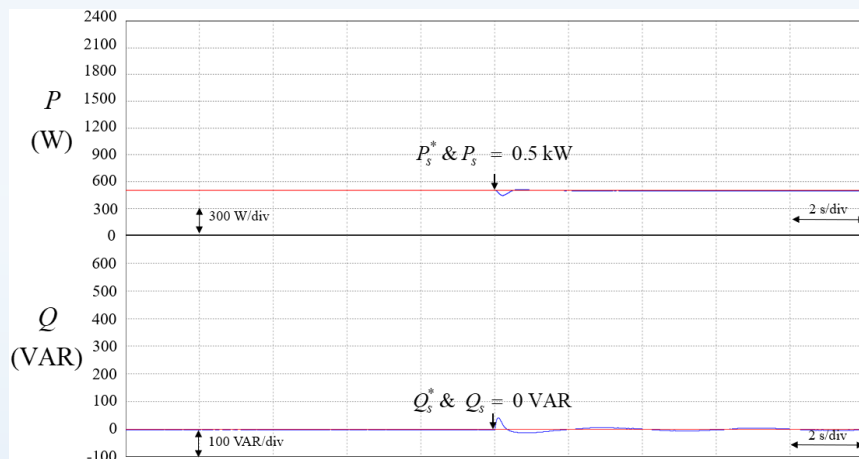


圖5.3 太陽能光電系統與市電實、虛功率響應模擬結果：
(c) 太陽能光電系統利用PI控制器之實功率與虛功率

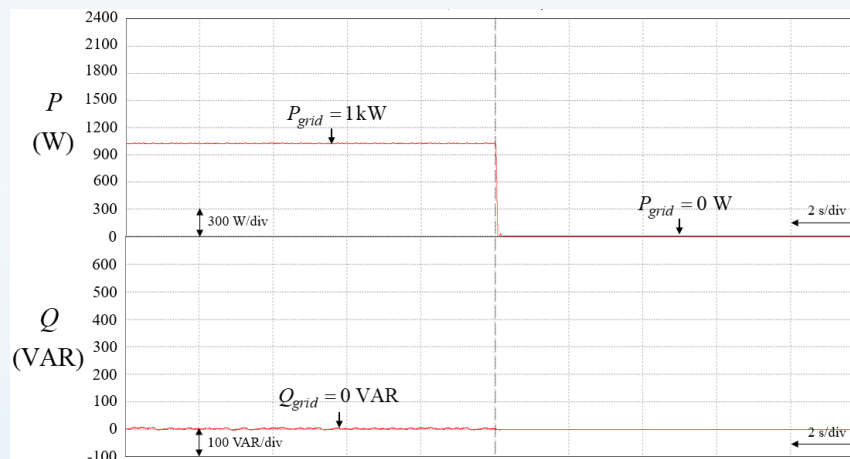


圖5.3 太陽能光電系統與市電實、虛功率響應模擬結果：
(d) 市電之實功率與虛功率

• 併網轉孤島模式模擬結果

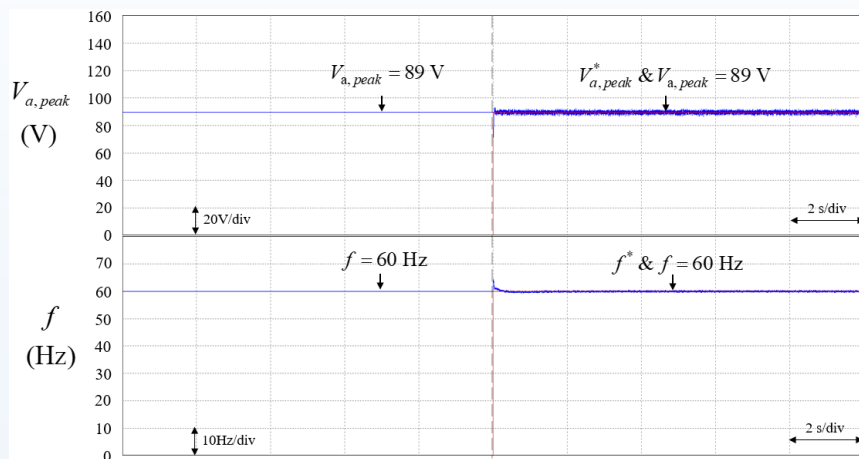


圖5.4 儲能系統響應模擬結果：
(a) 利用RPWFNN控制器之電壓與頻率

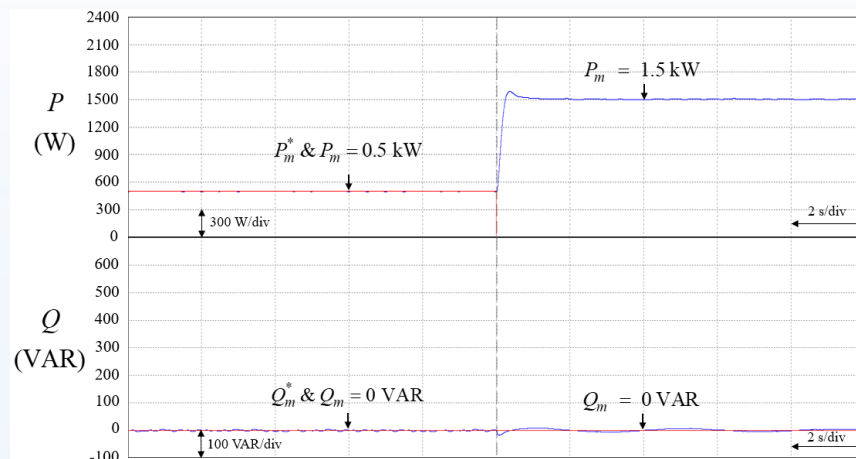


圖5.4 儲能系統響應模擬結果：
(b) 儲能系統實功率與虛功率

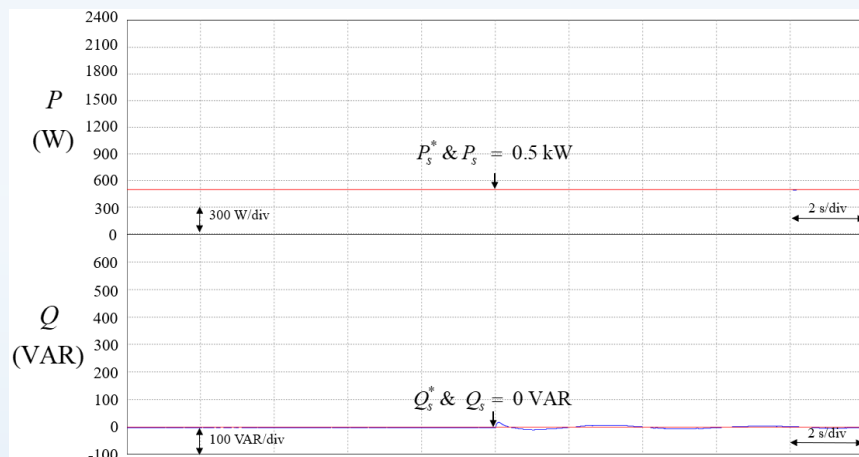


圖5.4 太陽能光電系統與市電實、虛功率響應
模擬結果：
(c) 太陽能光電系統利用PI控制器之實功率與虛功率

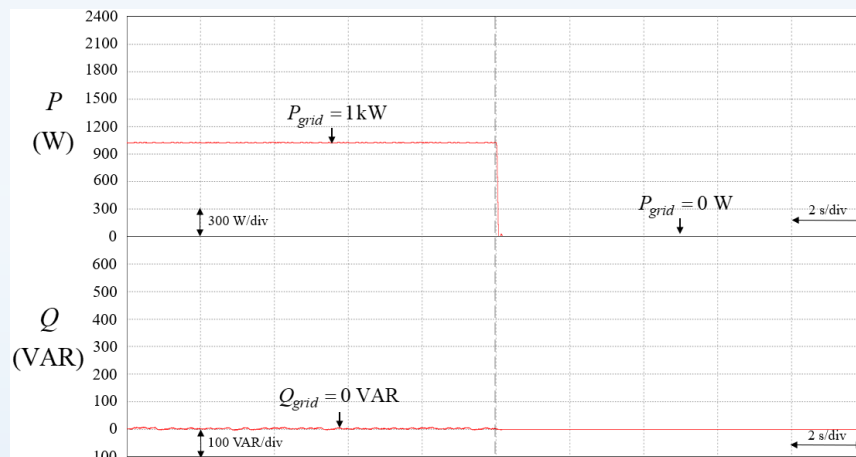


圖5.4 太陽能光電系統與市電實、虛功率響應
模擬結果：
(d) 市電之實功率與虛功率



• 孤島模式模擬結果

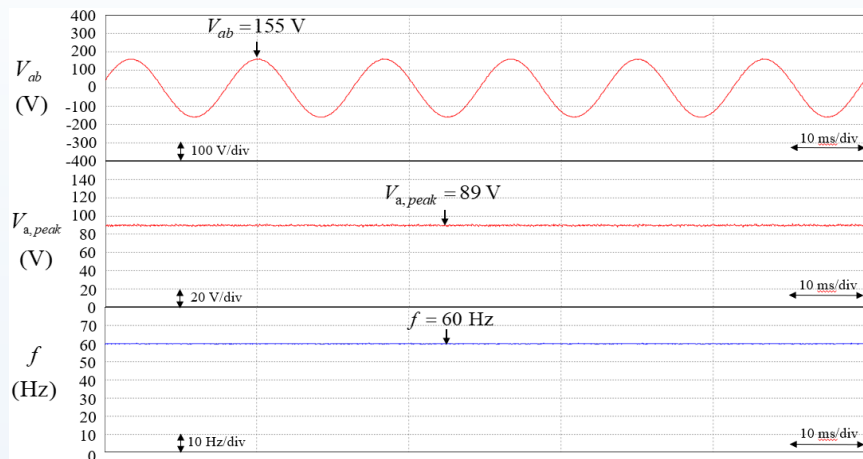


圖5.5 PI控制之微電網穩態電壓與頻率

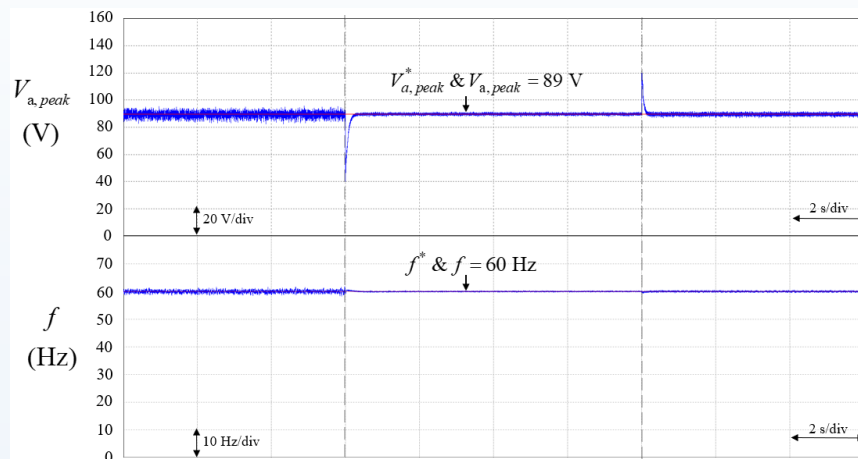
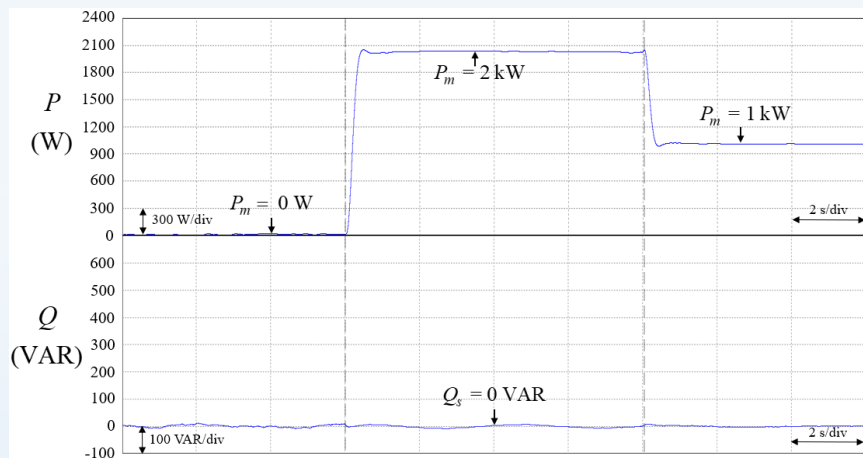
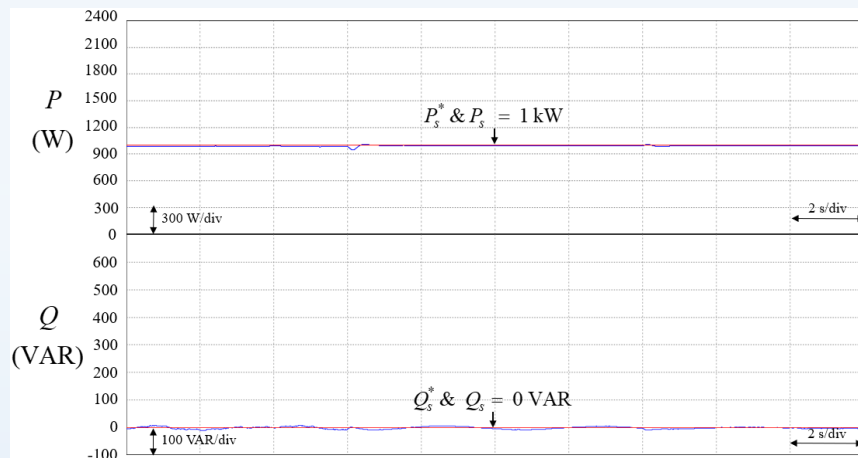
圖5.6 儲能系統響應模擬結果：
(a)利用PI控制器之電壓與頻率圖5.6 儲能系統響應模擬結果：
(b)儲能系統之實功率與虛功率

圖5.7 太陽能光電系統之實功率與虛功率



• 孤島模式模擬結果

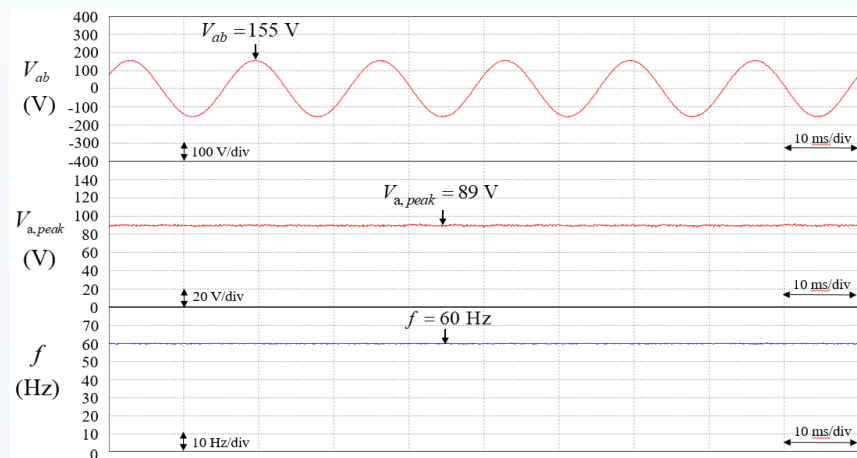


圖5.8 RPWFNN控制之微電網穩態電壓與頻率

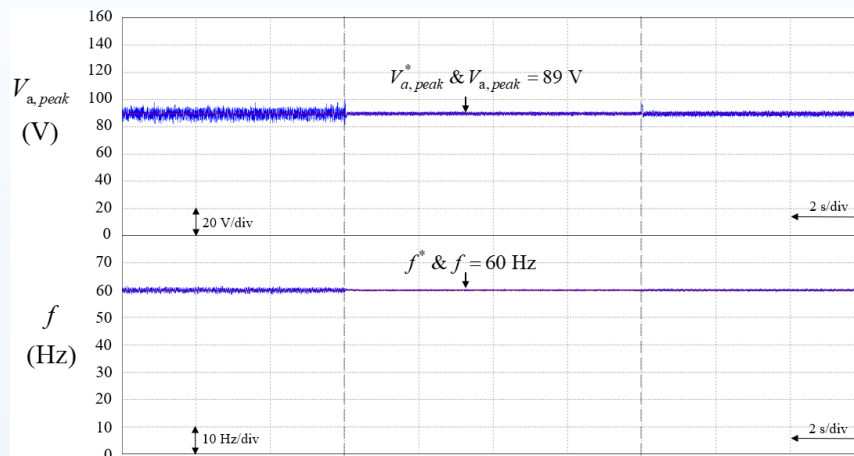


圖5.9 儲能系統響應模擬結果：

(a)利用RPWFNN控制器之電壓與頻率

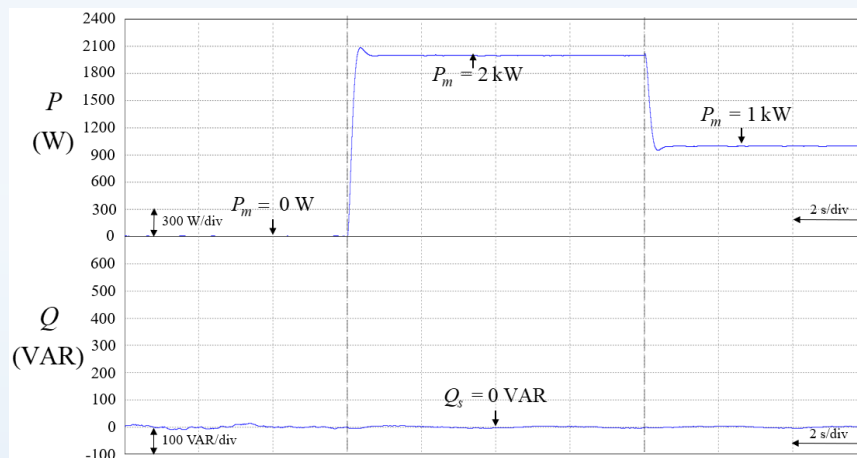


圖5.9 儲能系統響應模擬結果：

(b)儲能系統之實功率與虛功率

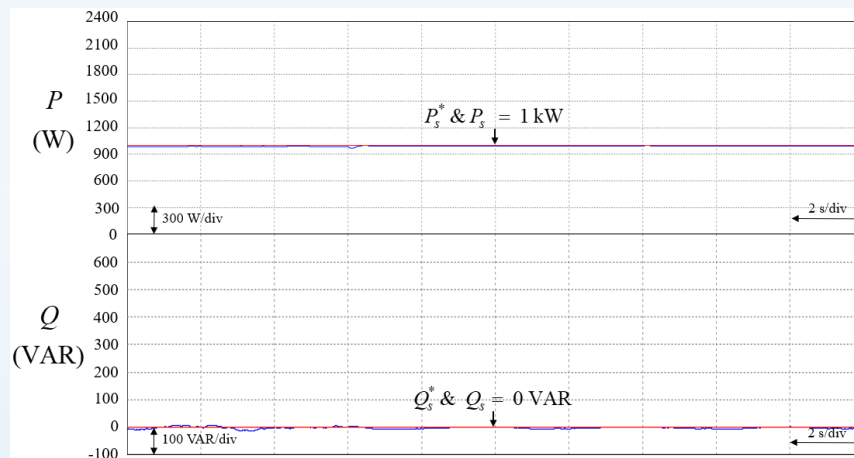


圖5.10 太陽能光電系統之實功率與虛功率

• 孤島轉併網模式模擬結果

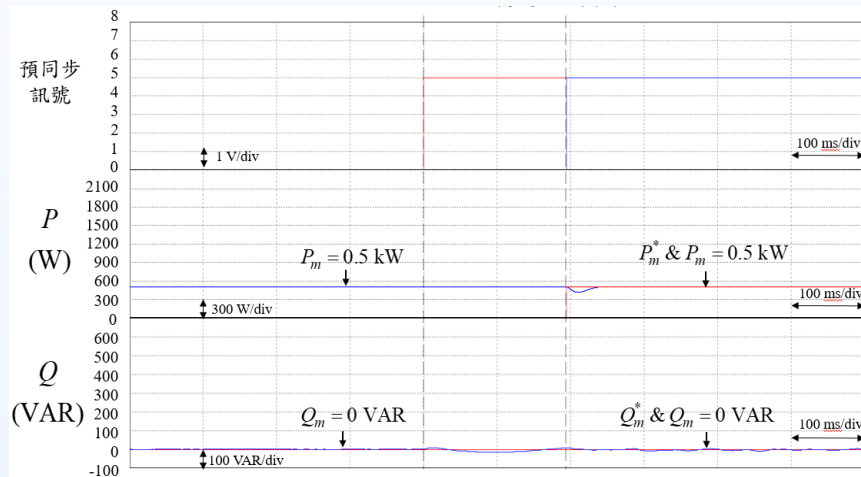


圖5.11 儲能系統預同步併網訊號、實功率與虛功率

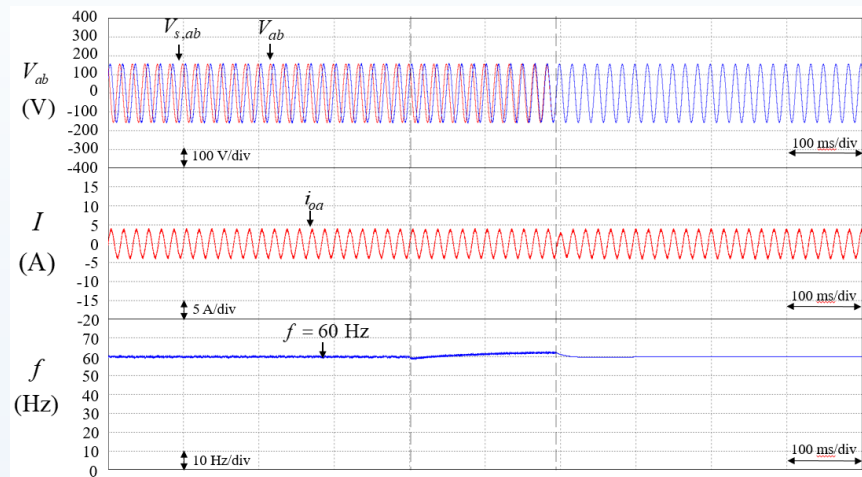


圖5.12 儲能系統線間電壓、電流與頻率

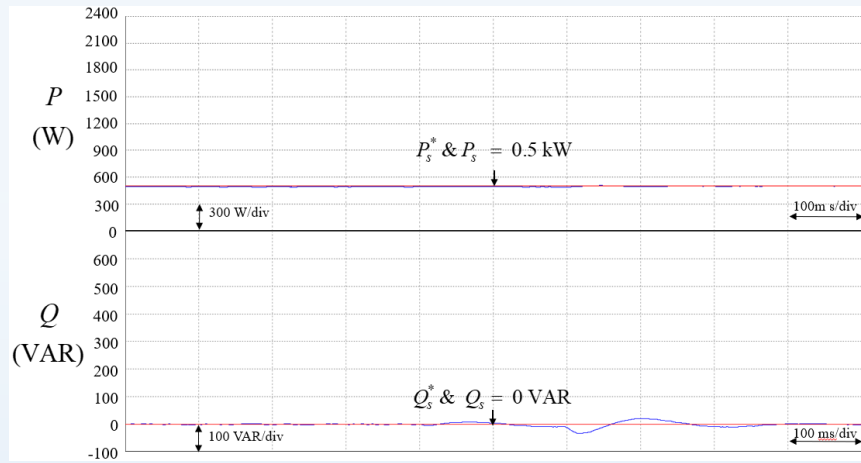


圖5.13 太陽能光電系統之實功率與虛功率



目錄

- 一、緒論
- 二、微電網規範與控制策略介紹
- 三、系統架構與控制策略
- 四、遞迴式機率小波模糊類神經網路
- 五、模擬結果
- 六、硬體與實驗結果
- 七、結論與未來展望

- 系統實體架構如圖6.1所示，棕色部分為儲能系統由磷酸鋰鐵電池為主；
藍色部分為利用Chroma的可程控直流電源供應器的單級式太陽能光電系統。

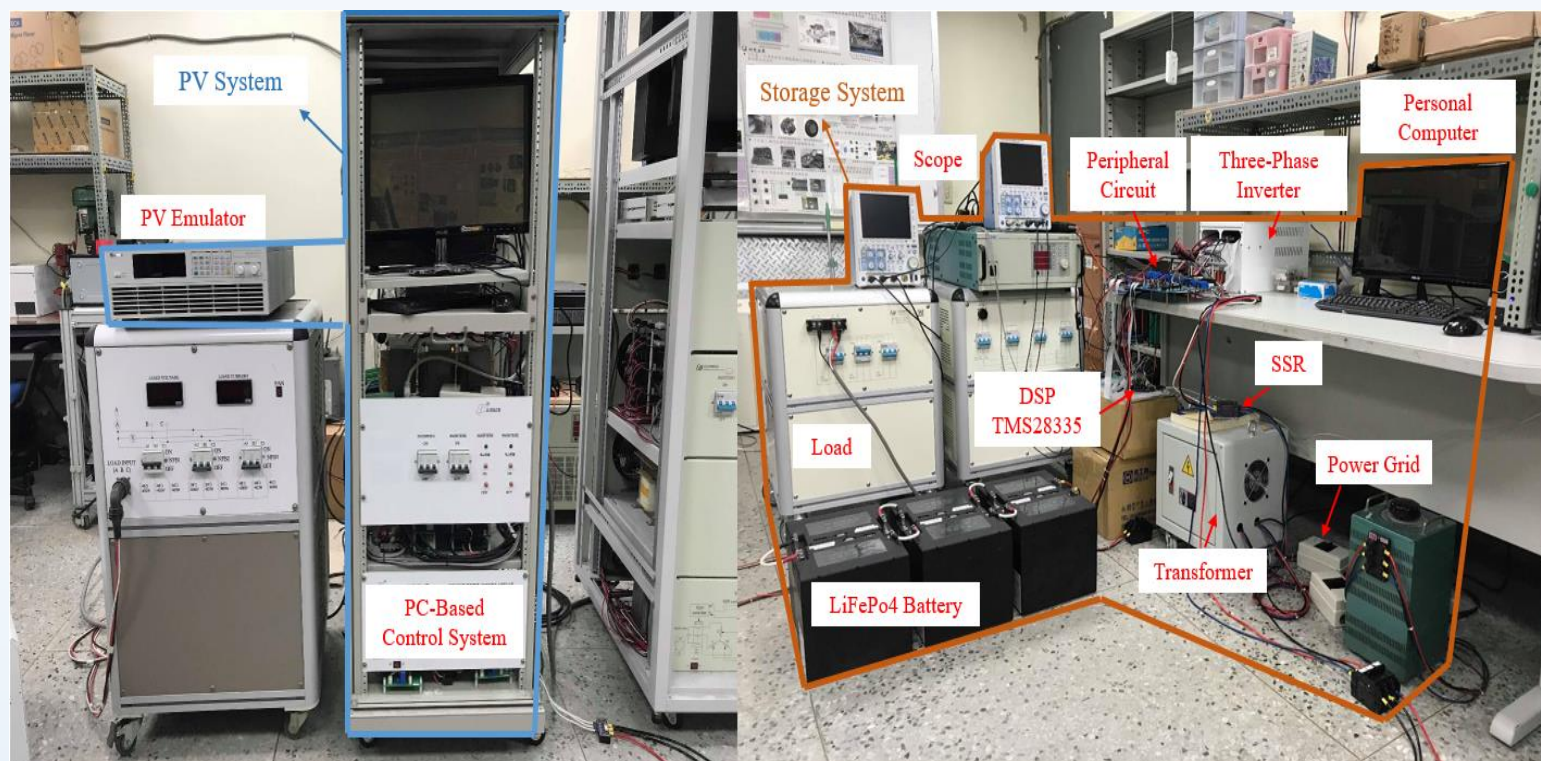


圖6.1 微電網系統實體圖

• 磷酸鋰鐵電池

- 圖6.2為本論文儲能系統所使用之磷酸鋰鐵電池，其電池組由24個電芯以12串2並所組成。



圖6.2 磷酸鋰鐵電池實體圖

表6.1 單個磷酸鋰鐵電芯之規格

標準電壓	3.3V
充電電壓	3.5V
截止電壓	2.8V
容量	15Ah

表6.2 單個磷酸鋰鐵電池組之規格

標準電壓	39.6V
充電電壓	42V
截止電壓	30V
容量	30Ah

- 在鋰離子電池裡，電池管理系統(Battery Management System, BMS)是非常關鍵的一部分。一般，電池管理系統皆具備了保護裝置、電壓量測、電流量測、殘電量(State of Charge)偵測、通訊功能及電池平衡裝置[54]。

(1) 過高電壓保護(Over Voltage Protection)：

為了防止電池過充導致電池損毀或發生危險，保護電路將會讓電池開路，斷開其充電迴路，以確保其安全性。

(2) 過低電壓保護(Over Voltage Protection)：

為了防止電池過度放電造成電壓過低以致電池損壞，保護電路將會讓電池開路，斷開其放電迴路，以確保其安全性。

(3) 過電流保護(Over Voltage Protection)：

為了防止電池短路，當電流過大時，保護電路將會讓電池開路，與外部短路隔離，以確保其安全性。

(4) 過溫度保護(Over Voltage Protection)：

為了防止電池因高溫導致運作特性不正常，當溫度過高時，保護電路將會讓電池與外部斷開，以確保其安全性。

- 電池平衡(Cell Balancing)在電池管理系統中扮演相當重要的角色。其中又分為主動式平衡(Active Cell Balancing)與被動式平衡(Passive Cell Balancing)。
- 本論文之磷酸鋰鐵電池組採用被動式平衡如圖6.3所示，其電池管理系統測量每組電池電壓、電流、溫度與殘電量，最後電池之資料藉由RS232傳輸至電腦從螢幕顯示，如圖6.4所示。

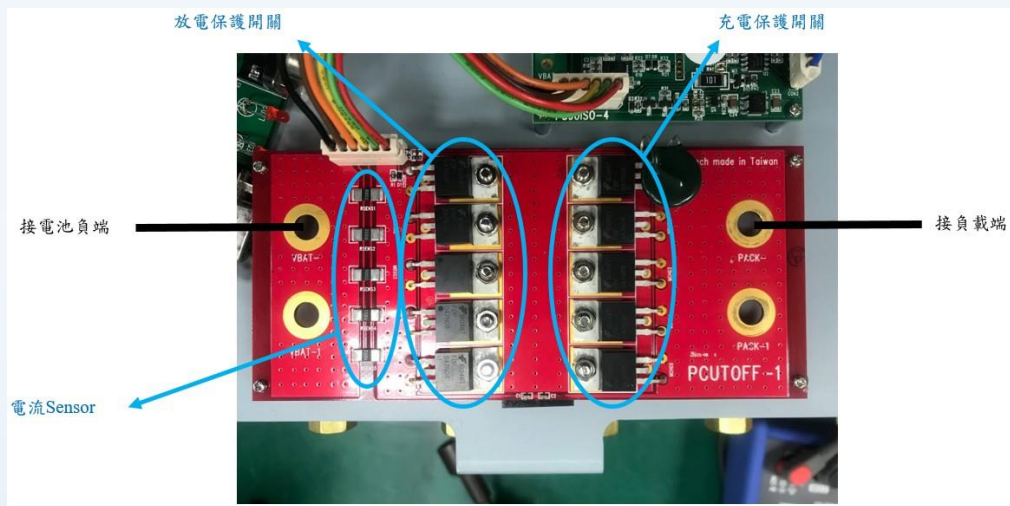


圖6.3 被動式平衡

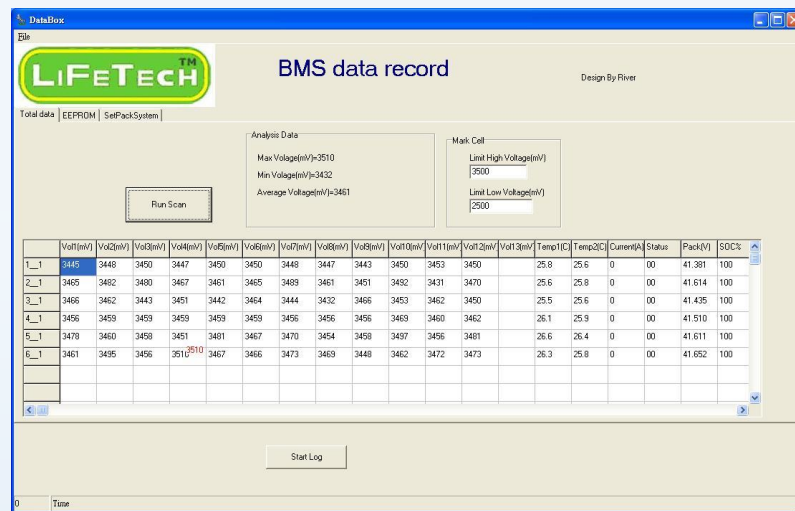


圖6.4 電池管理系統軟體

表6.3 主動式與被動式平衡之比較[54]

	主動式平衡	被動式平衡
優點	具能量轉移之功能，能夠把電量較高之電池將電能轉移至電量較低之電池，其達到平衡之速度較快。	架構簡單，技術較成熟，成本較低，無高頻切換雜訊。
缺點	因能量轉移之電路為藉由開關切換將電能儲存至電感及電容，故成本較高，體積較大，其開關有切換雜訊，控制較複雜之缺點	因將多餘之電能消耗至電阻，其浪費之電能較多，且達到電池平衡之速度較慢。

- 圖6.5為本文之儲能系統架構圖，本節將介紹儲能系統架構上的硬體設備：變流器與平衡負載。

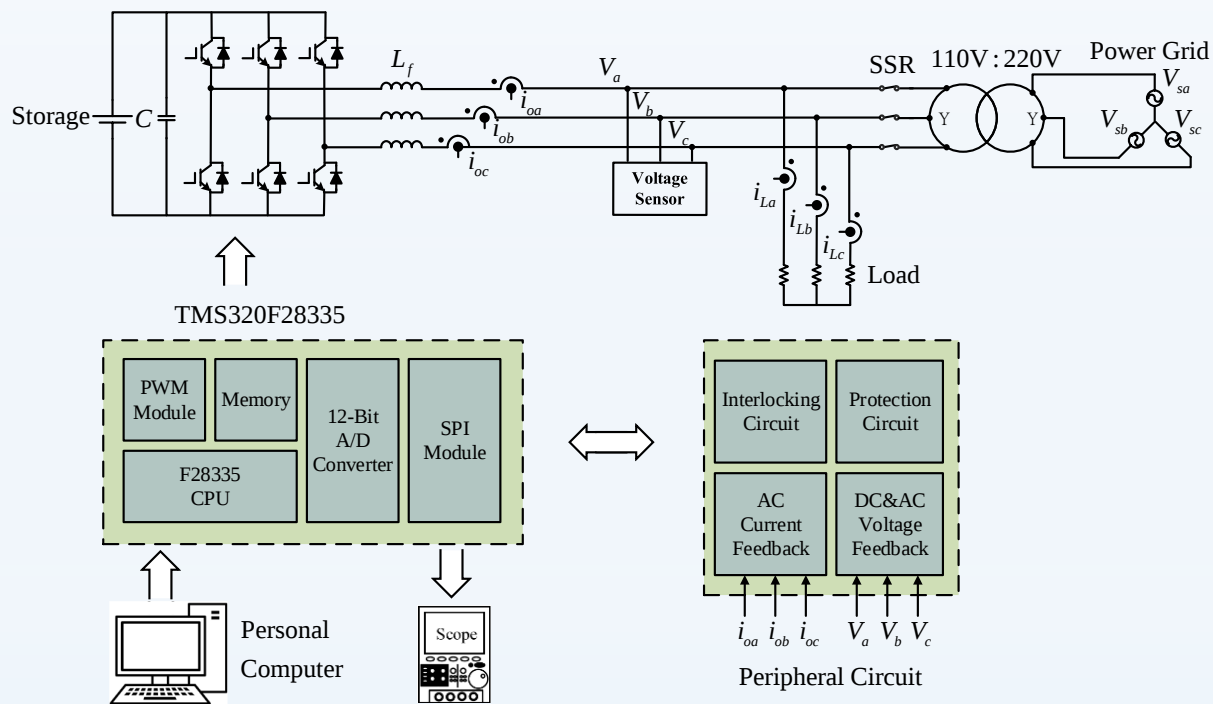


圖6.5 儲能系統架構圖

- 本節將介紹儲能系統之變流器如圖6.6所示。變流器內含有一組2200 μ F的濾波電容，三組Fuji Electric二合一的IGBT模組如圖6.7所示。



圖6.6 儲能系統變流器



圖6.7 Fuji Electric IGBT模組

表6.4 IGBT之規格

廠牌	Fuji Electric
型號	2MBI100U4A-120-50
最大集極連續電流	100A
最大集極-射極電壓	1200V
最大功率損失	540W



➤ 因實驗上需使三相平衡負載為可變動的平衡負載，故在此設計了三組負載阻值：

(1) Resistive Loads 1 : $R1 = 12.1 \Omega$, $R2 = 12.1 \Omega$, $R3 = 12.1 \Omega$

(2) Resistive Loads 2 : $R1 = 6.05 \Omega$, $R2 = 6.05 \Omega$, $R3 = 6.05 \Omega$

(3) Resistive Loads 3 : $R1 = 12.1 \Omega$, $R2 = 12.1 \Omega$, $R3 = 12.1 \Omega$



圖6.8 三相平衡負載實體圖

• 儲能系統周邊電路

- 本節將介紹儲能系統所使用到的周邊硬體電路[55]如圖6.9所示，其中包含交流電流回授電路、交流電壓回授電路、直流電壓回授電路、保護電路與開關互鎖電路。

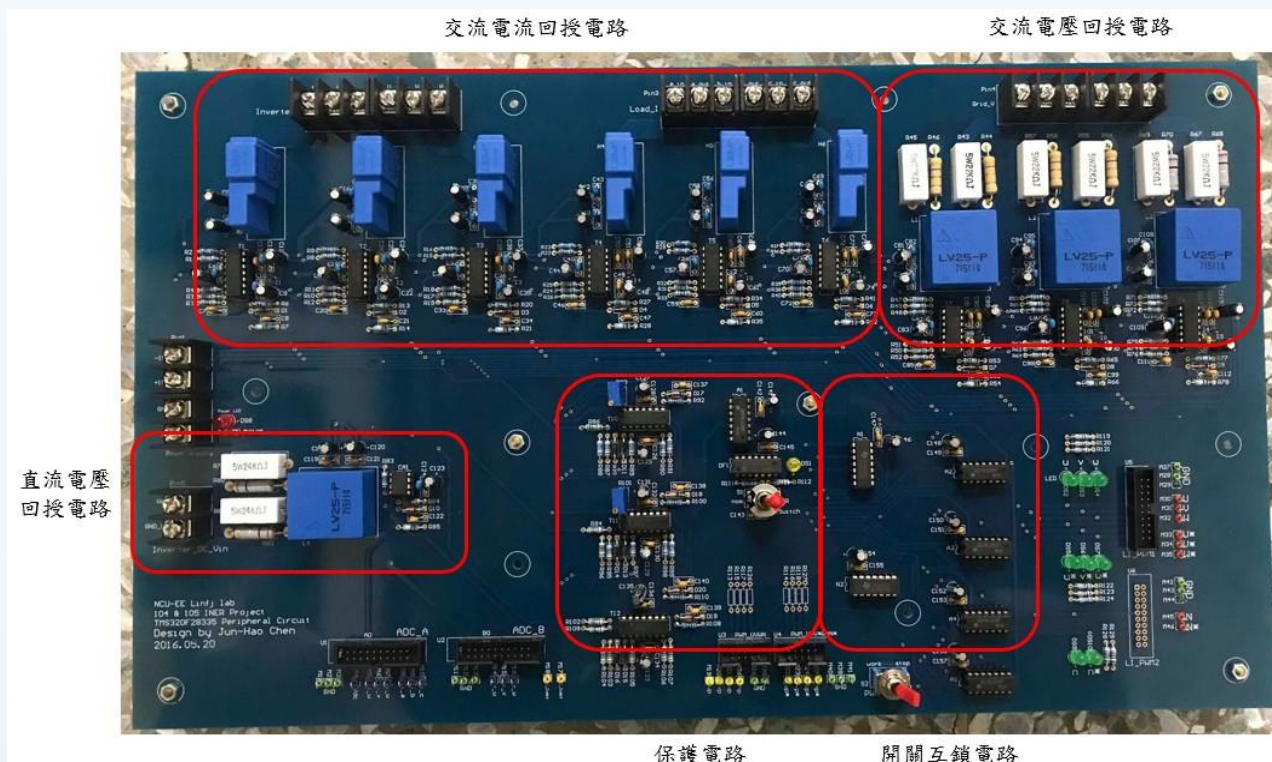


圖6.9 周邊電路板



• 儲能系統周邊電路

- 圖6.10為交流電流回授電路，此電路所採用的電流感測器為HY 50-P。回授之電流透過電流感測器轉換成電壓訊號輸出後，經由差動放大器搭配ISL21080做電壓準位之提升後，輸入至TMS320F28335的ADC模塊，而稽納二極體(Zener Diode)為將輸入至ADC模組之信號箝制在3V以內，避免模塊受損。

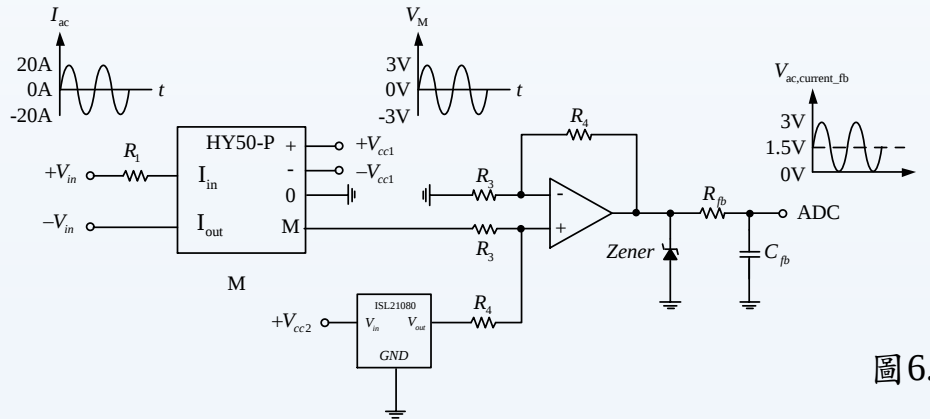


圖6.10 交流電流回授電路

- 圖6.11為交流電壓回授電路，此電路所採用的電壓傳感器為LV 25-P。回授之電壓透過電壓傳感器轉換成電壓訊號輸出後，經由差動放大器搭配ISL21080做電壓準位之提升後，輸入至TMS320F28335的ADC模塊，而稽納二極體(Zener Diode)為將輸入至ADC模組之信號箝制在3V以內，避免模塊受損。

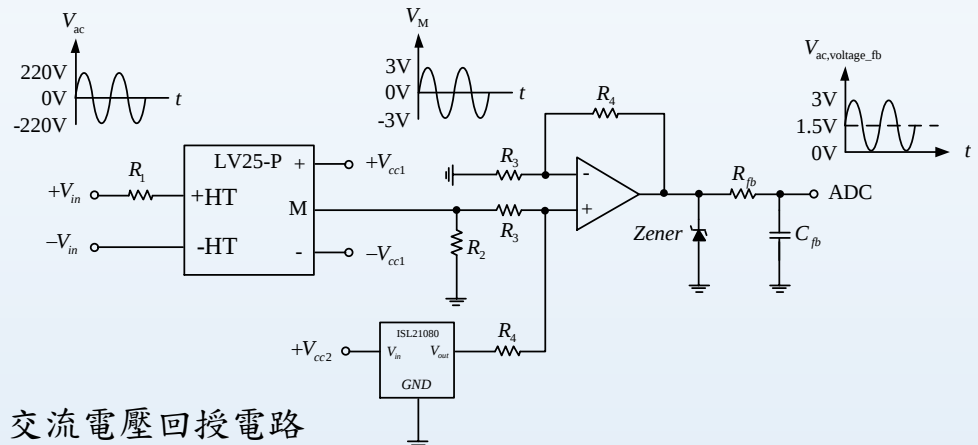


圖6.11 交流電壓回授電路

- 圖6.12為直流電壓回授電路，此電路所採用的電壓傳感器為LV 25-P。回授之電壓透過電壓傳感器轉換成電壓訊號輸出後，經由一級電壓隨偶器後，輸入至TMS320F28335的ADC模塊，而稽納二極體(Zener Diode)為將輸入至ADC模組之信號箝制在3V以內，避免模塊受損。

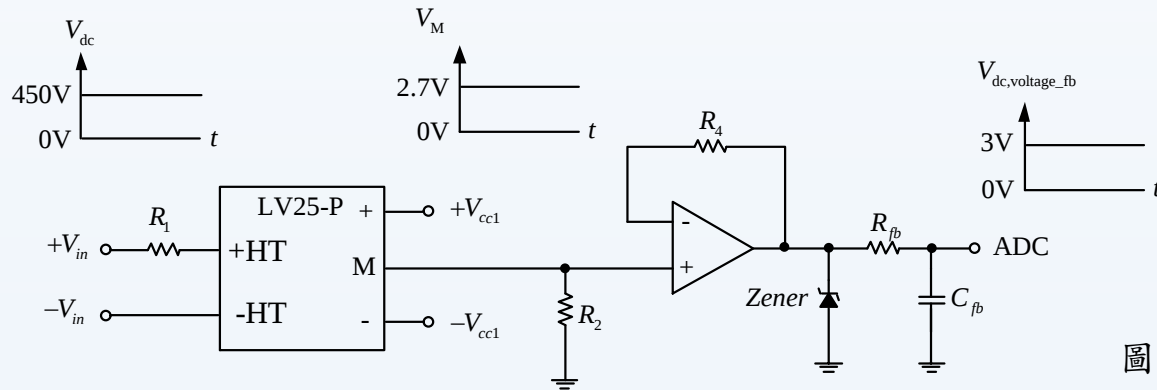


圖6.12 直流電壓回授電路

- 由於在做實驗的過程中，有可能會因為程式撰寫問題或是突發事件造成過電壓或過電流的情況發生，因此利用如圖6.13所示之保護電路，來保護設備。

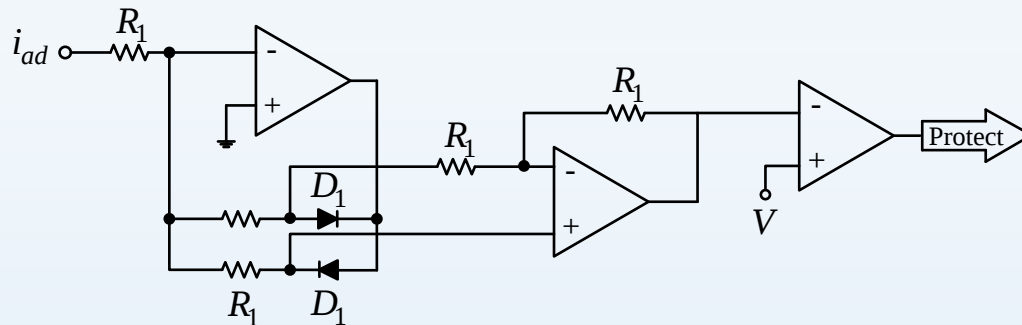


圖6.13 保護電路

- 為了保護開關元件不會因為不當的開關邏輯訊號設定，導致某一臂之開關元件同時導通，進而發生短路情形造成開關元件燒毀，因此使用如圖6.14所示的開關互鎖電路來保護功率開關元件。

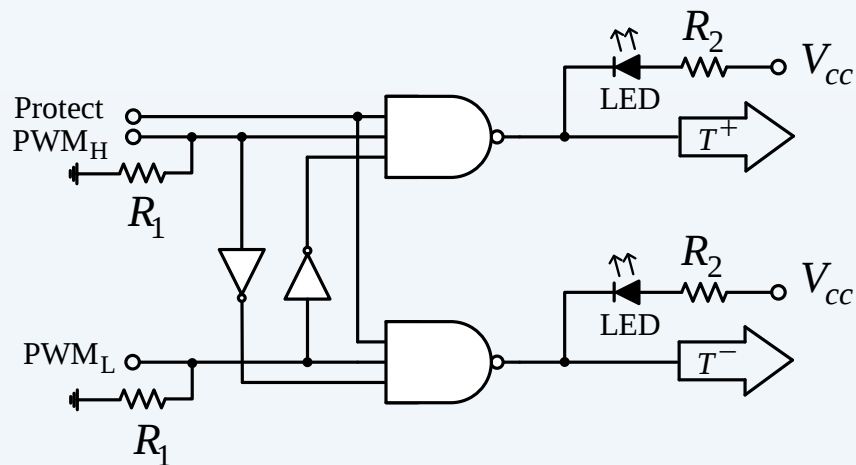


圖6.14 開關互鎖電路

- 本文微電網的儲能系統控制核心採用Texas Instrument所開發的TMS320F28335 數位訊號處理器，其為32位元浮點格式的控制晶片，支援C/C++程式語言開發複雜的控制演算法，圖6.15為數位訊號處理器TMS320F28335 晶片[56]。

TMS320F28335之主要特色為：

- 工作時脈達150MHz
- 32位元浮點數運算
- 可產生96組中斷服務程式，其中周邊中斷服務程式有58組
- 12位元16通道之類比/數位轉換器
- 外部通訊包含三組SPI、三組SCI、兩組CAN以及一組I2C
- 兩組增強型正交編碼器脈衝電路(eQEP)、六組增強型輸入捕捉模組(eCAP)、六組增強型脈波寬度調變 模組(ePWM)

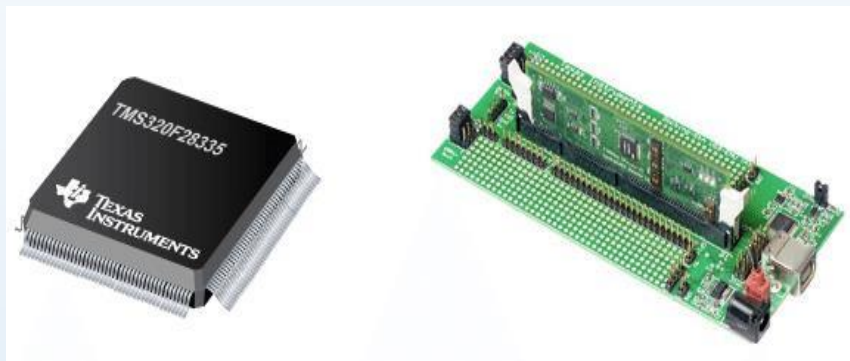


圖6.15 TMS320F28335晶片與Kit板

- 圖6.17為本論文之太陽能光電系統架構圖，本節將介紹此架構上的硬體設備：變流器與資料擷取卡。

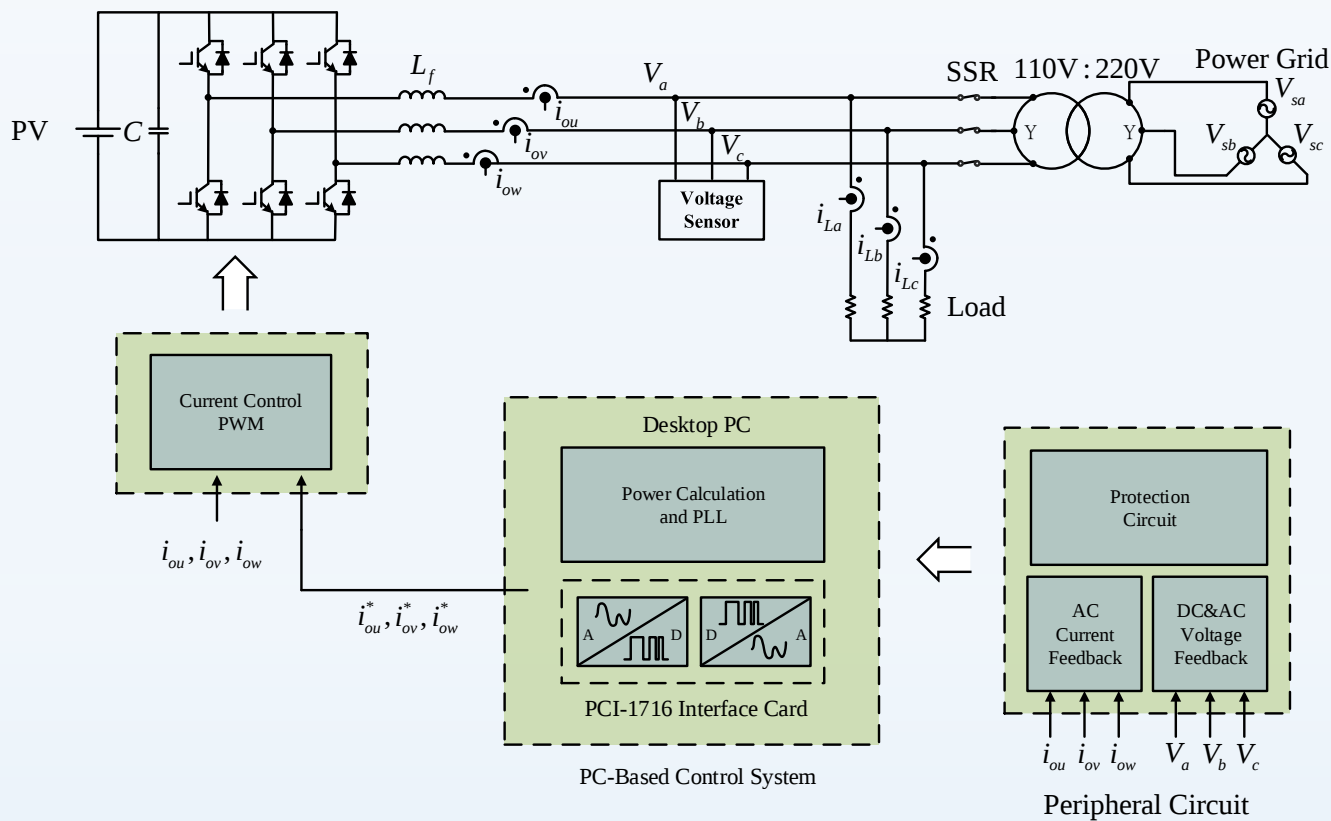


圖6.17 太陽能光電系統架構圖

• 可控直流電源供應器(具太陽能電池陣列模擬功能)

- 本論文的太陽能光電系統使用Chroma 62150H-600S可控直流電源供應器具有模擬太陽能電池陣列之功能，如圖6.18。輸出電壓範圍0~600V；輸出電流範圍0~25A；最大功率15kW。

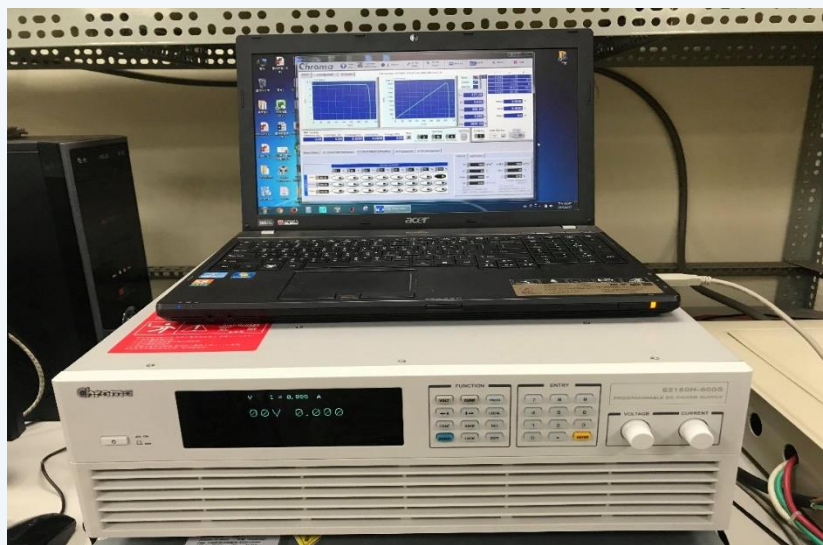


圖6.18可控直流電源供應器與控制電腦



圖6.19 Solar Array Simulation Soft Panel編輯介面

表6.5太陽能模擬曲線參數

開路電壓	377.4V
短路電流	5.632A
最大功率點電壓	360V
最大功率點電流	5.556A
最大功率點輸出功率	2000W

- 圖6.20為太陽能光電系統所使用之變流器，其電流控制迴路與脈波寬度調變是由硬體電路實現，如圖6.21所示。



圖6.20變流器與控制電腦

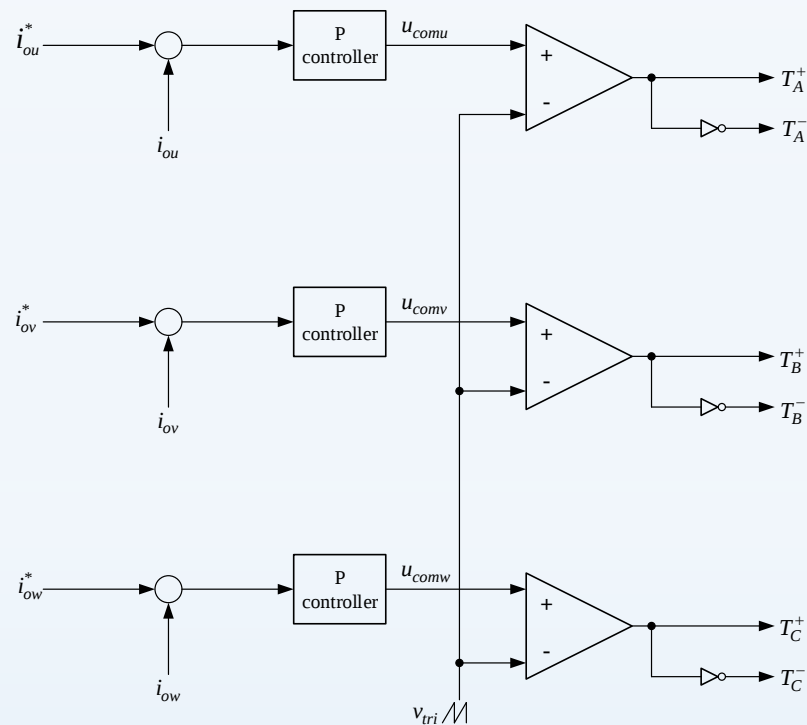


圖6.21電流控制迴路與脈波寬度調變架構

• 資料擷取卡

- 太陽能光電系統使用之AD/DA資料擷取卡為兩張PCI-1716，如圖6.22所示。PCI-1716包含十六組十六位元的類比/數位轉換器其輸入範圍為+5 V至-5 V、兩組十六位元的數位/類比轉換器其輸出範圍為+10 V至-10 V、十六組數位輸入、兩組數位輸出以及一組高速計數器。



圖6.22 資料擷取卡PCI-1716

(1)併網模式:

儲能系統實功率命令為0.5kW-1.5kW-1kW，虛功率命令為500VAR，太陽能光電系統則是維持定功率輸出1.5kW，虛功率為0VAR，負載為1kW。

(2)併網轉孤島模式:

儲能系統的實功率命令為0.5kW，虛功率命令為0VAR，相電壓峰值命令為89V，頻率命令為60Hz，太陽能光電系統則是維持定功率輸出0.5kW，虛功率為0VAR，負載為2kW。

(3)孤島模式:

儲能系統的相電壓峰值命令為89V，頻率命令為60Hz，太陽能光電系統則是維持定功率輸出1kW，虛功率為0VAR，負載為1kW-3kW-2kW。

(4)孤島轉併網模式:

儲能系統的相電壓峰值命令為89V，頻率命令為60Hz，實功率命令為0.5kW，虛功率命令為0VAR，太陽能光電系統則是維持定功率輸出0.5kW，虛功率為0VAR，負載為1kW。

• 併網模式實驗結果

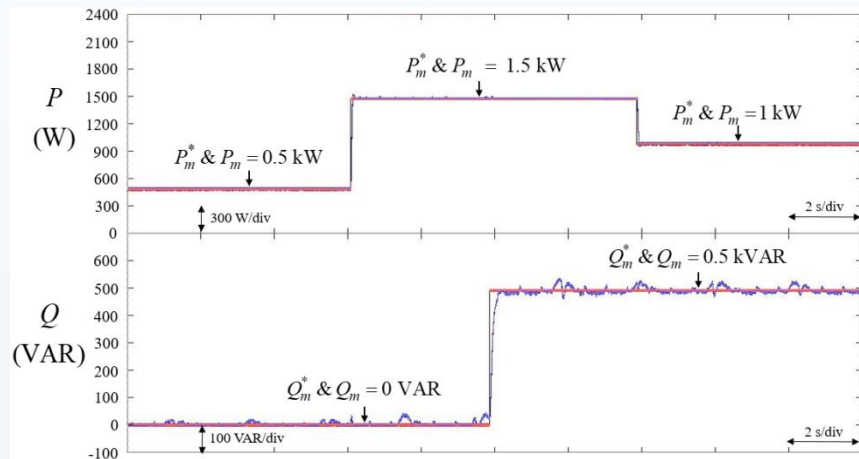


圖6.23 儲能系統實虛功率響應模擬結果：

(a) 利用PI控制器之虛功率與實功率無虛擬慣量

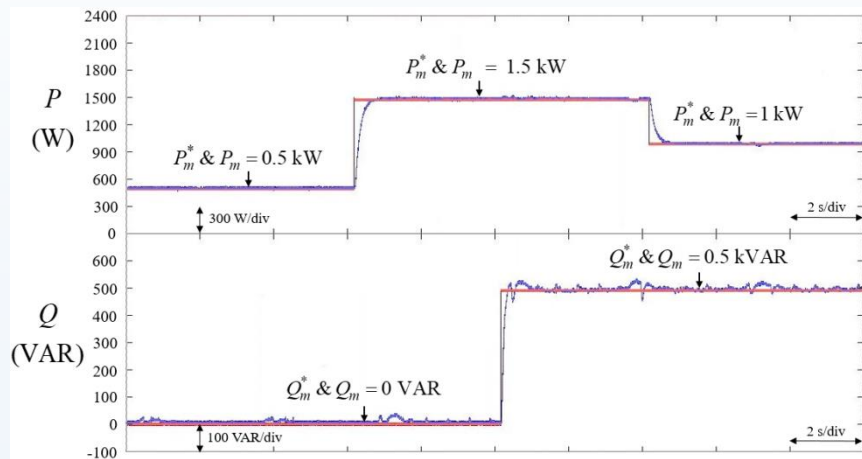


圖6.23 儲能系統實虛功率響應模擬結果：

(b) 利用PI控制器之虛功率與實功率有虛擬慣量

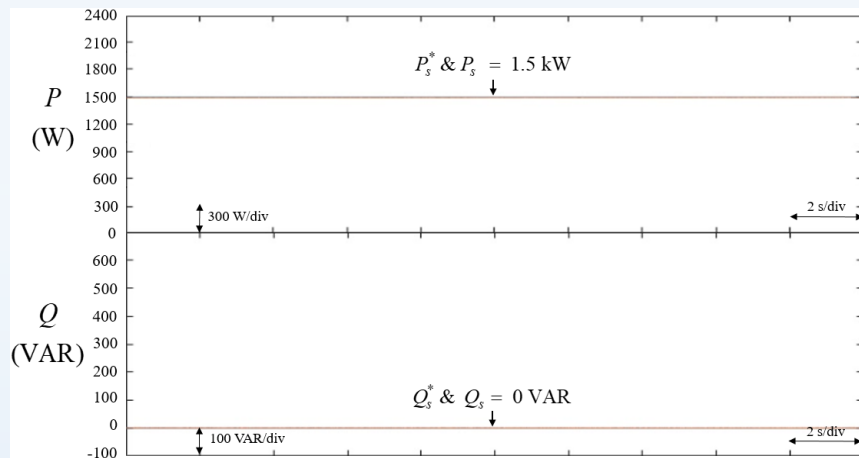


圖6.23(續) 太陽能光電系統與市電實、虛功率響應模擬結果：

(c) 太陽能光電系統利用PI控制器之實功率與虛功率

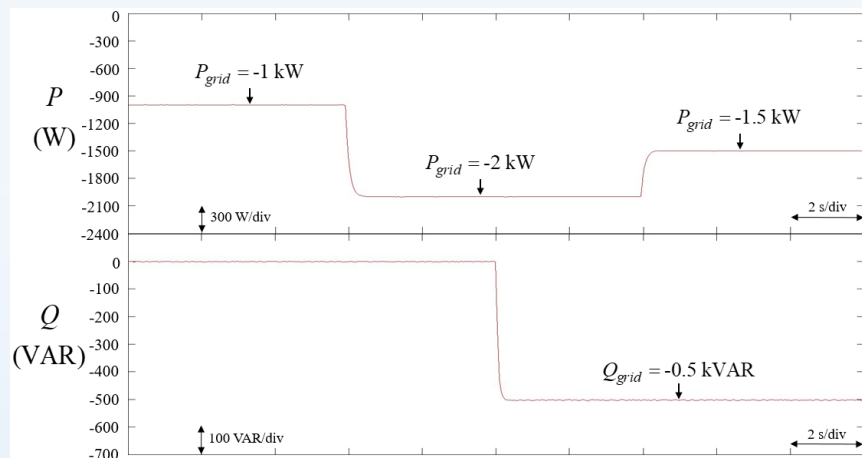


圖6.23(續) 太陽能光電系統與市電實、虛功率響應模擬結果：

(d) 市電之實功率與虛功率



• 併網模式實驗結果

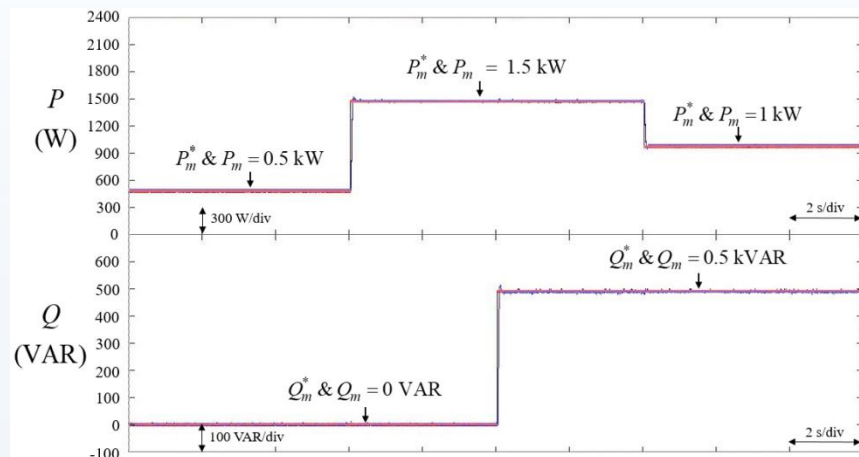
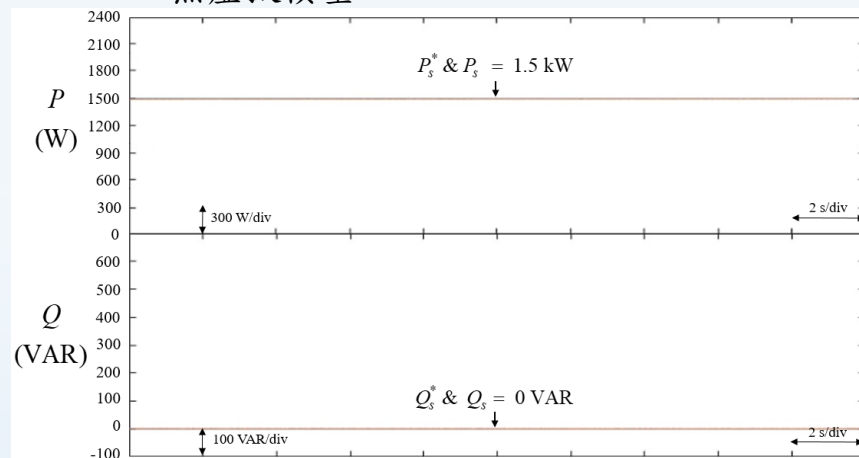


圖6.24 儲能系統實虛功率響應模擬結果：

(a) 利用RPWFNN控制器之虛功率與實功率
無虛擬慣量圖6.24(續) 太陽能光電系統與市電實、虛功率響應
模擬結果：

(c) 太陽能光電系統利用PI控制器之實功率與虛功率

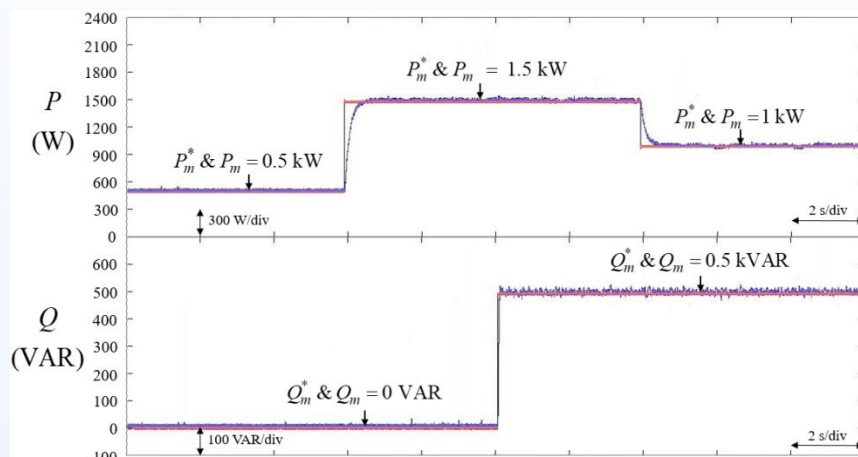
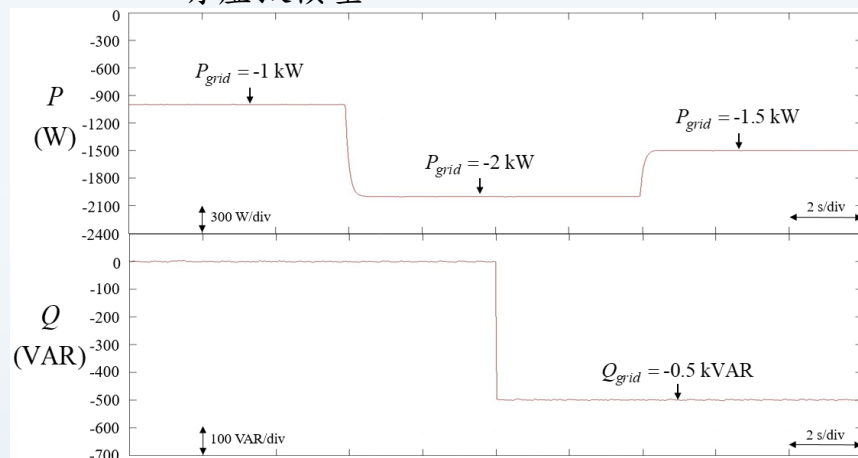


圖6.24 儲能系統實虛功率響應模擬結果：

(b) 利用RPWFNN控制器之虛功率與實功率
有虛擬慣量圖6.24(續) 太陽能光電系統與市電實、虛功率響應
模擬結果：

(d) 市電之實功率與虛功率

• 併網轉孤島模式實驗結果

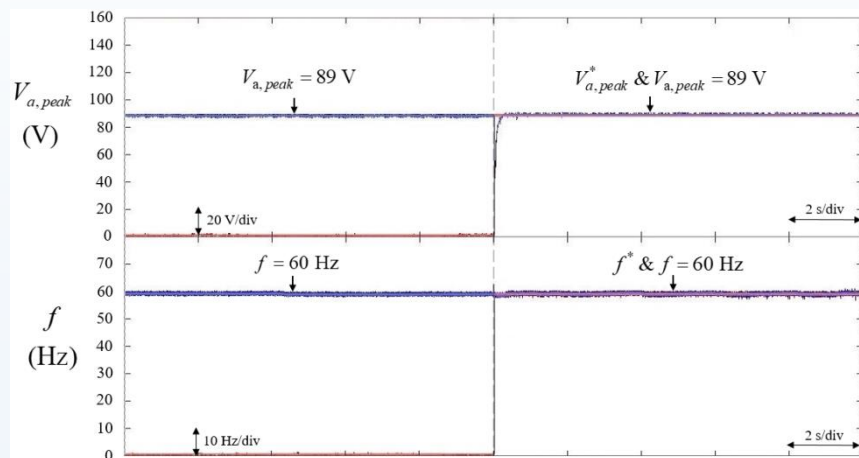


圖6.25 儲能系統響應模擬結果：

(a) 利用PI控制器之電壓與頻率

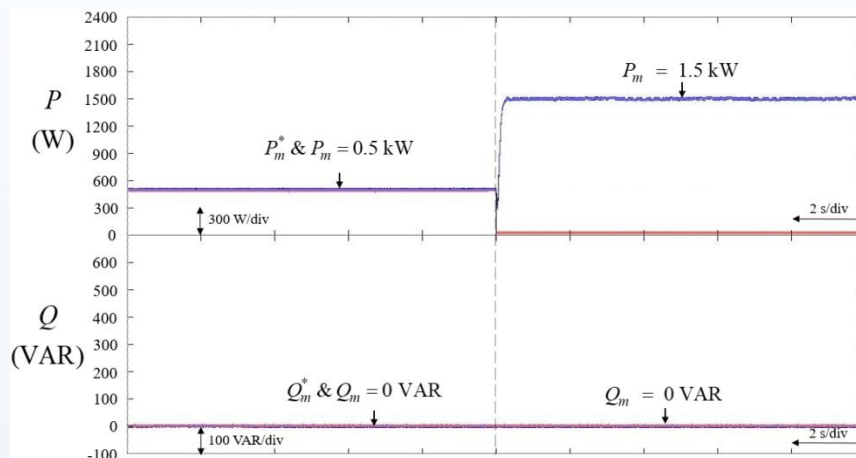


圖6.25 儲能系統響應模擬結果：

(b) 儲能系統實功率與虛功率

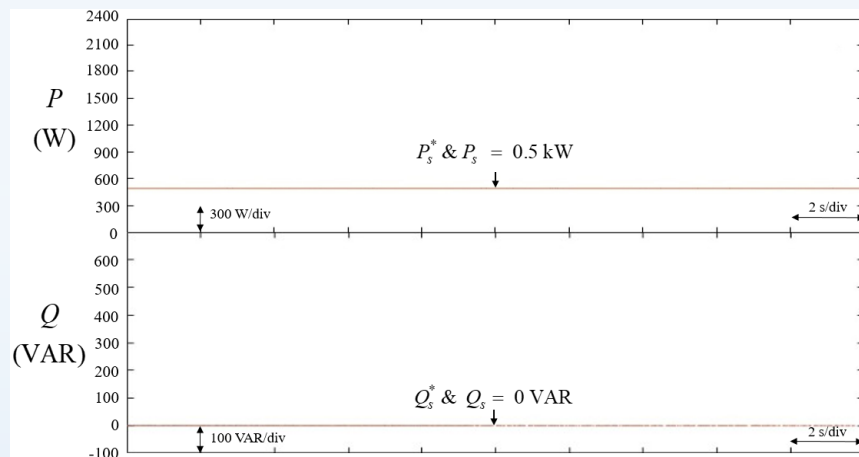


圖6.25(續) 太陽能光電系統與市電實、虛功率響應模擬結果：

(c) 太陽能光電系統利用PI控制器之實功率與虛功率

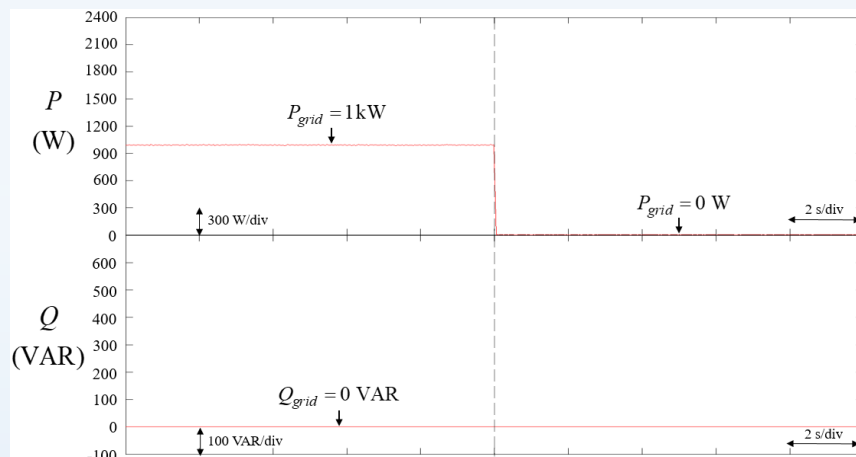


圖6.25(續) 太陽能光電系統與市電實、虛功率響應模擬結果：

(d) 市電之實功率與虛功率

• 併網轉孤島模式實驗結果

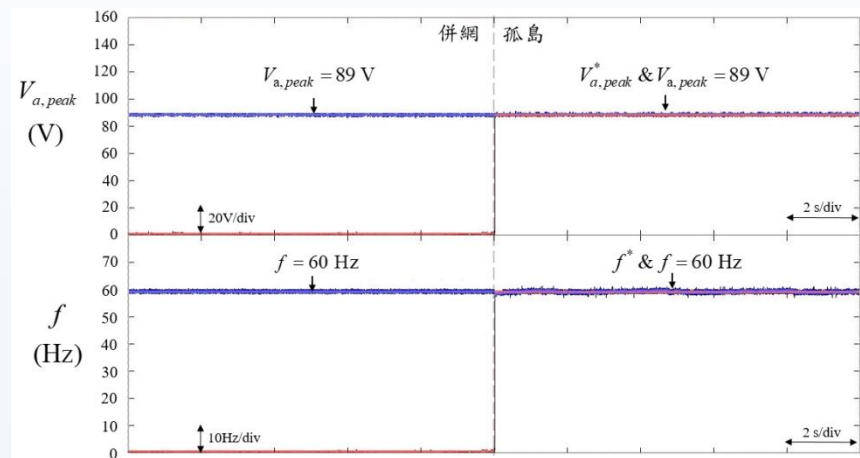


圖6.26 儲能系統響應模擬結果：

(a) 利用RPWFNN控制器之電壓與頻率

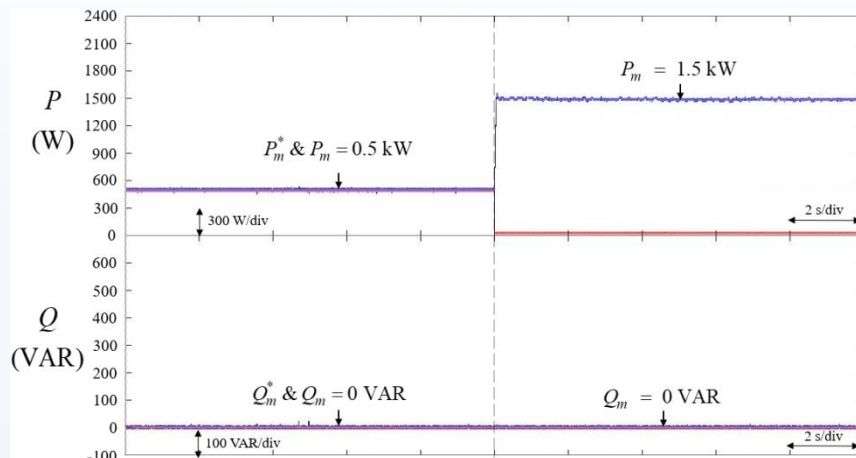


圖6.26 儲能系統響應模擬結果：

(b) 儲能系統實功率與虛功率

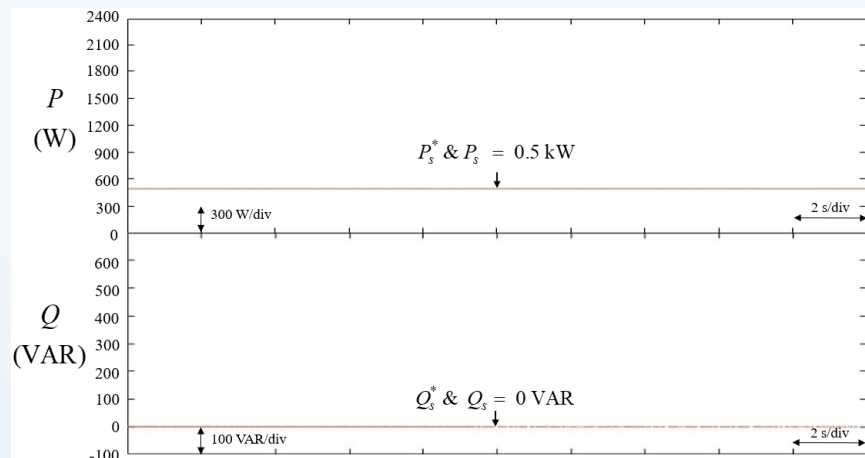


圖6.26(續) 太陽能光電系統與市電實、虛功率響應模擬結果：

(c) 太陽能光電系統利用PI控制器之實功率與虛功率

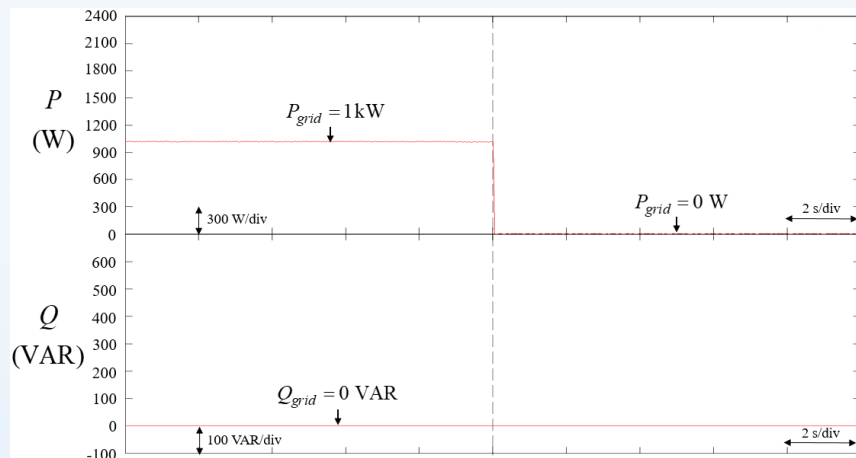


圖6.26(續) 太陽能光電系統與市電實、虛功率響應模擬結果：

(d) 市電之實功率與虛功率



- 孤島模式實驗結果

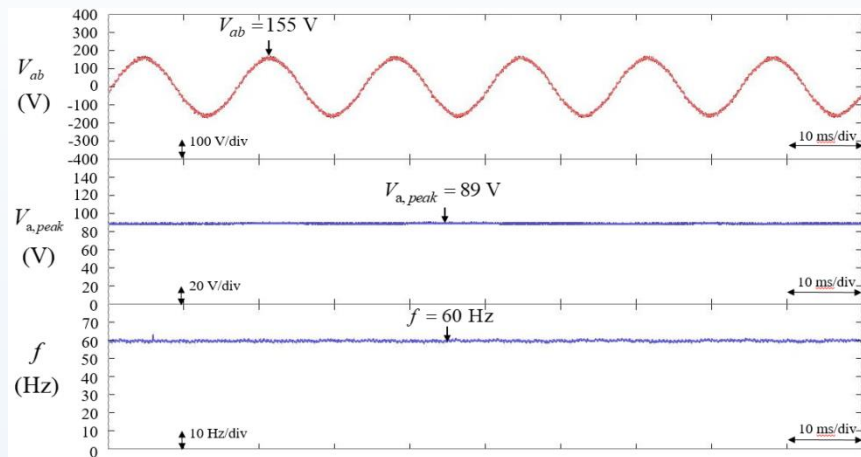


圖6.27 PI控制之微電網穩態電壓與頻率

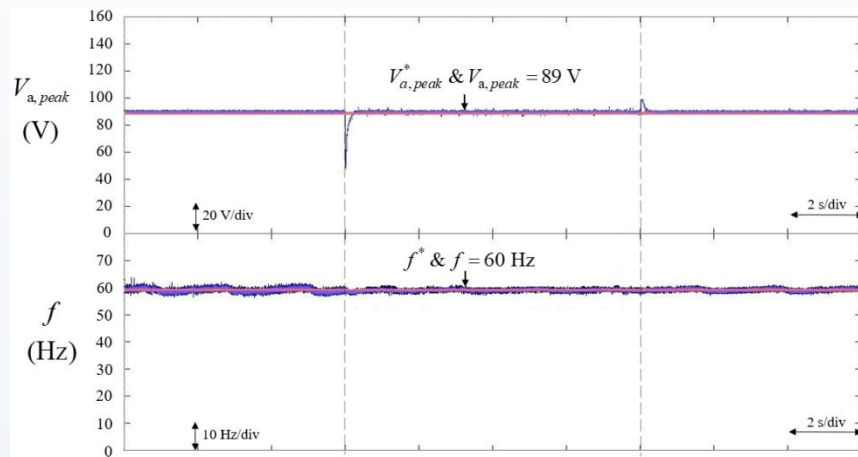


圖6.28 儲能系統響應模擬結果：
(a)利用PI控制器之電壓與頻率

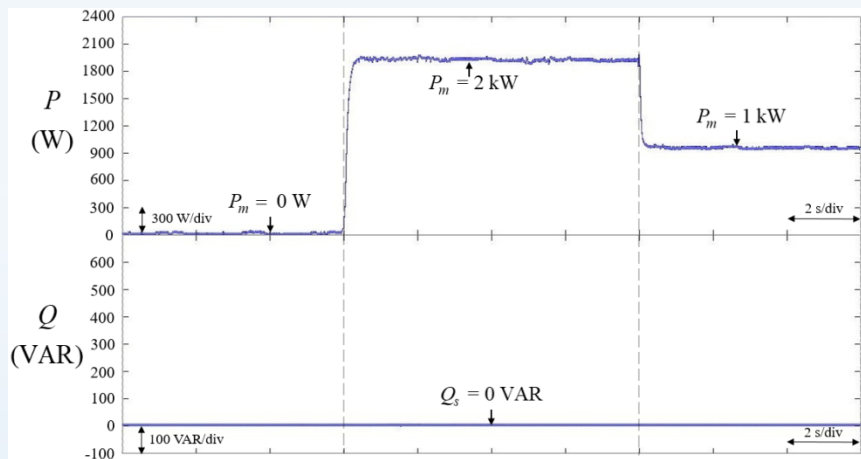


圖6.28 儲能系統響應模擬結果：
(b)儲能系統之實功率與虛功率

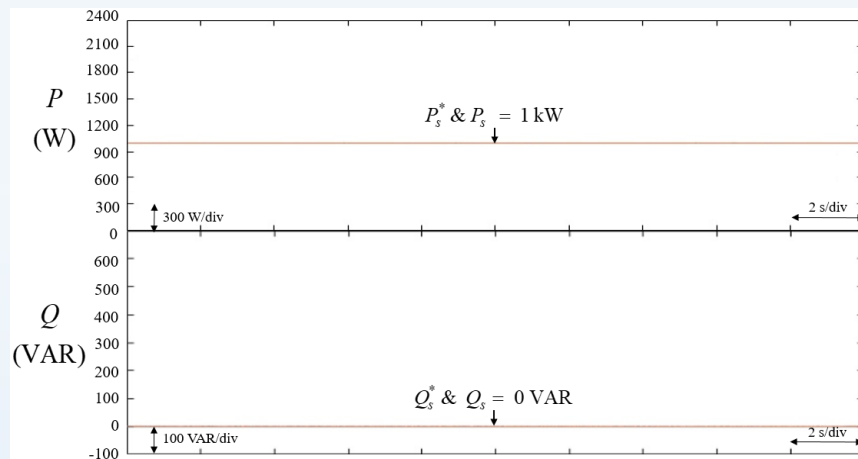


圖6.29 太陽能光電系統之實功率與虛功率

• 孤島模式實驗結果

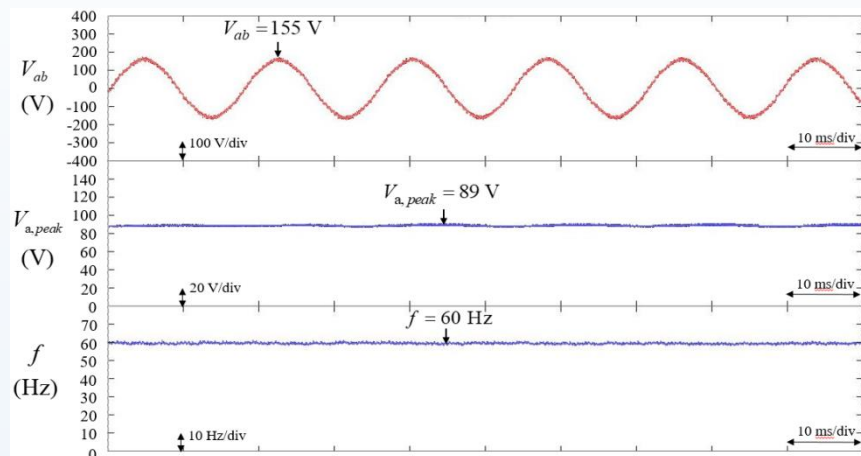


圖6.30 RPWFNN控制之微電網穩態電壓與頻率

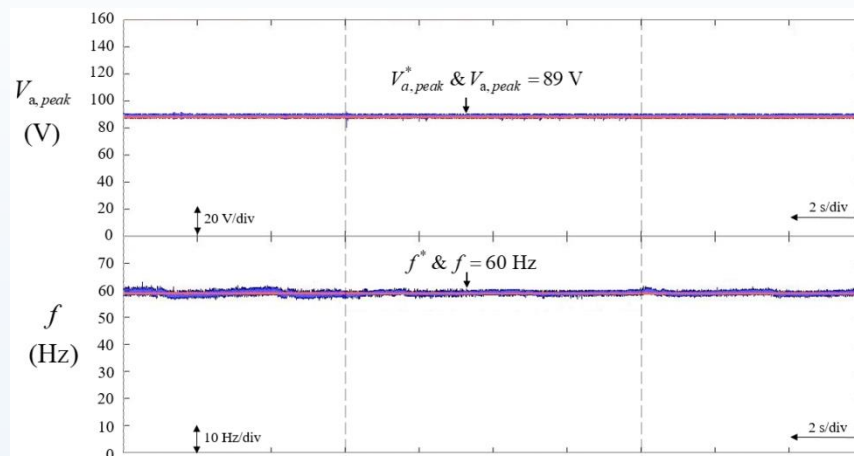


圖6.31 儲能系統響應模擬結果：

(a)利用RPWFNN控制器之電壓與頻率

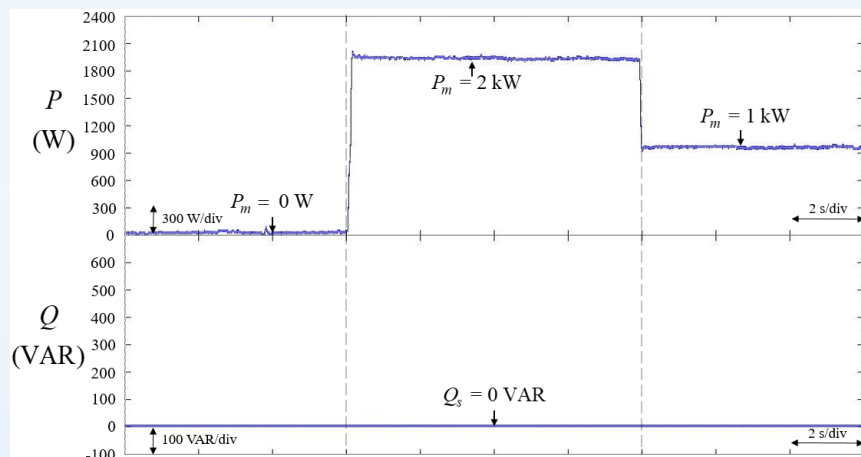


圖6.31 儲能系統響應模擬結果：

(b)儲能系統之實功率與虛功率

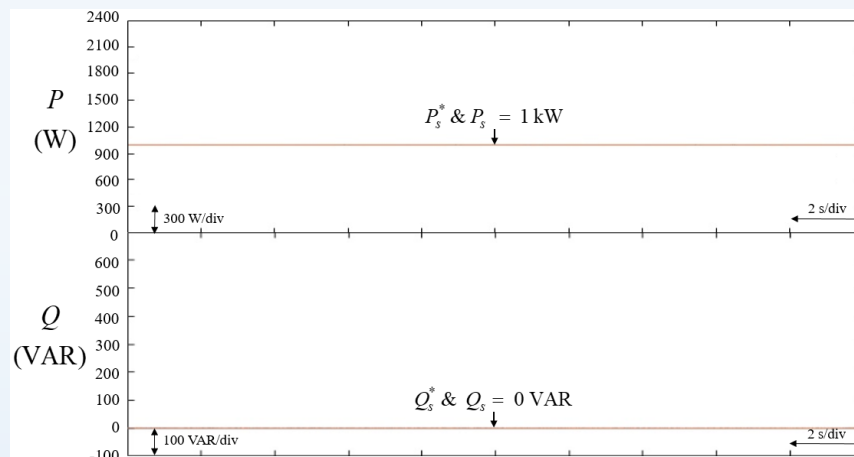


圖6.32 太陽能光電系統之實功率與虛功率

六、硬體與實驗結果

- 孤島轉併網模式實驗結果

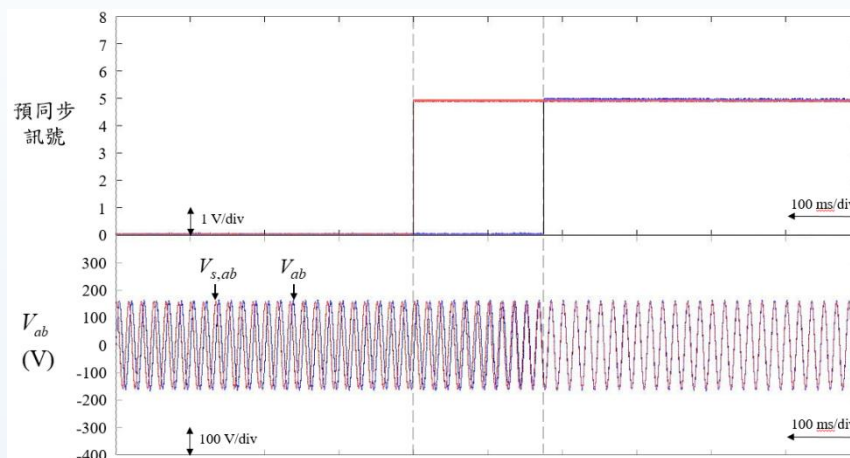


圖6.33 儲能系統與市電相差90度之預同步與併網訊號

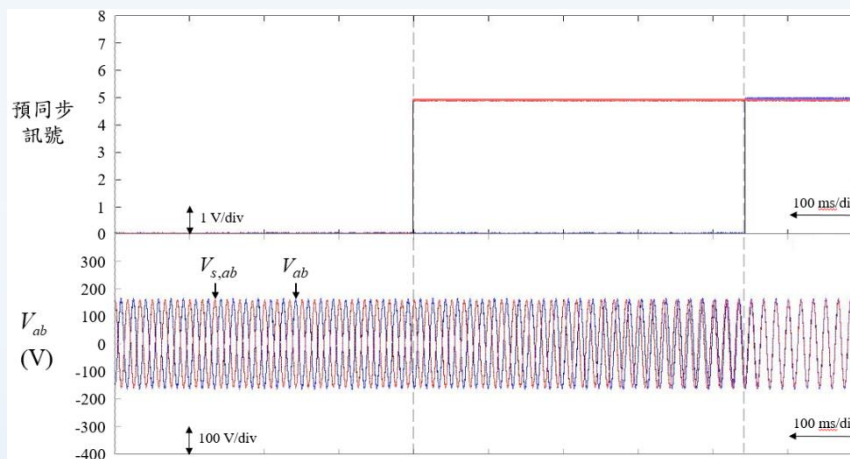


圖6.34 儲能系統與市電相差180度之預同步與併網訊號

• 孤島轉併網模式實驗結果

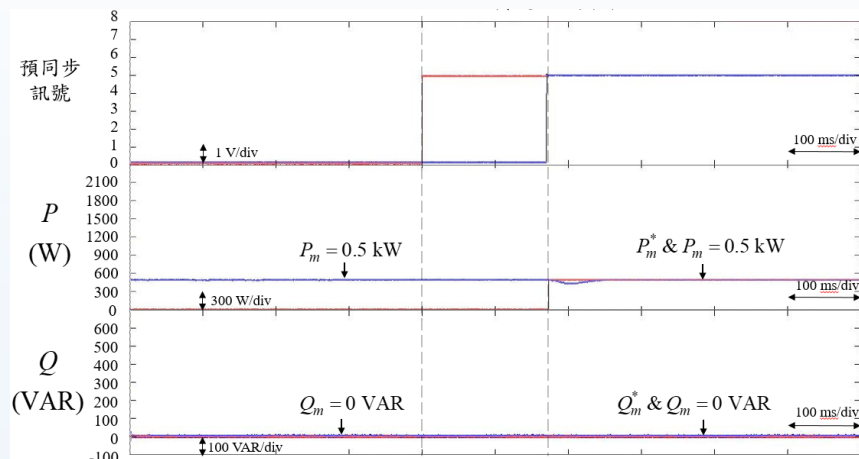


圖6.35 儲能系統預同步與併網訊號、實功率與虛功率

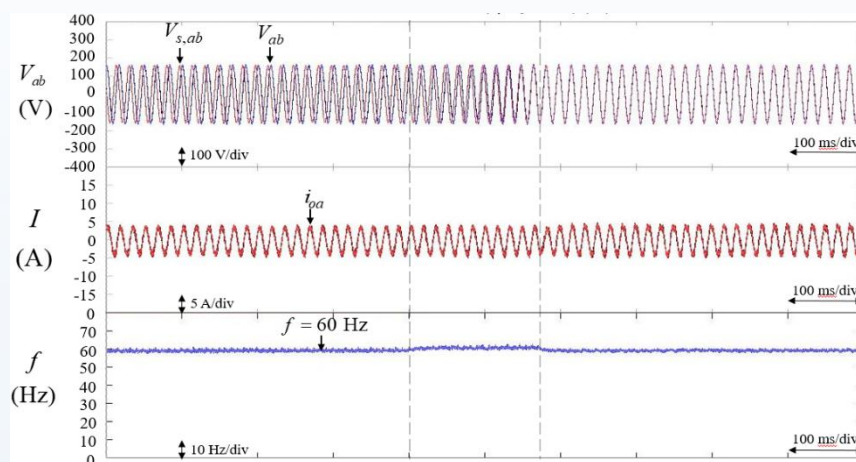


圖6.36 儲能系統線間電壓、電流與頻率

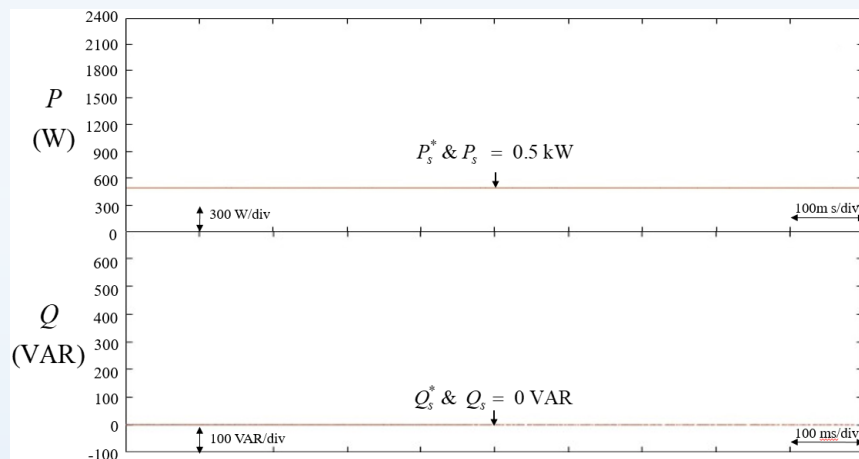


圖6.37 太陽能光電系統之實功率與虛功率



目錄

- 一、緒論
- 二、微電網規範與控制策略介紹
- 三、系統架構與控制策略
- 四、遞迴式機率小波模糊類神經網路
- 五、模擬結果
- 六、硬體與實驗結果
- 七、結論與未來展望

- 結論

1. 本論文以TI數位訊號處理器TMS320F28335做為微電網內儲能系統的核心，並且在主控制內結合虛擬慣量，以及利用個人電腦與Matlab/Simulink做為太陽能光電系統。
2. 應用PSIM模擬軟體對所提出的控制方法進行相關的模擬，驗證所提出之控制方法的成效；之後利用兩台三相三線變流器的儲能系統與太陽能光電系統進行實驗。
3. 本論文所提出的遞迴式機率小波模糊類神經控制器成功的運用在併網模式時的虛功控制與孤島模式時的微電網電壓控制，並且能夠在各個模式之間順利的切換控制法則，其相較於傳統的比例積分控制器均有較佳的成效。

- 未來展望

1. 本文的從控制系統是以個人電腦做為建構基礎，利用Matlab/Simulink Real-Time 發展演算法與控制架構的建模，未來可改為以數位訊號處理器做為其驅動核心，以減少硬體成本與體積大小，在變流器部分，本實驗是使用傳統的脈波寬度調變(SPWM)，未來可以改為空間向量脈波寬度調變(SVPWM)來提升電壓利用率。
2. 礙於市電無法真的發生故障，因次沒有實現孤島偵測，未來可以利用交流電源供應器模擬當市電發生故障時，加入孤島偵測做模式之間的切換。



*Thank You for Your
Attention!*