

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

微型電網智慧監視與控制
**Smart monitoring and control plan for
microgrid**

計畫編號：1012001INER046

受委託機關(構)：國立中央大學

計畫主持人：林法正

核研所聯絡人員：劉力源

聯絡電話：03-4227151 轉 6385

E-mail address：linfj@ee.ncu.edu.tw

報告日期：101.12.5

目 錄

目 錄	I
中文摘要	1
英文摘要	2
壹、計畫緣起與目的	4
貳、研究方法與過程	8
一、計畫完成項目	8
二、直流/交流功率轉換器設計	10
三、市電併聯同步法	12
四、ENN 類神經網路	15
(一)ENN 網路架構	15
(二)ENN 類神經網路線上學習法則	18
(三)市電併聯系統測試	19
五、新型主動式孤島偵測法	21
(一)電流注入擾動訊號法	22
(二)ENN 控制器結合孤島偵測	25
(三)新型主動式孤島偵測法實作	28
六、風力驅動鼠籠式感應發電機系統	32
(一)風機模擬系統	32
(二)併網型風力驅動鼠籠式感應發電機設計與實作	37
(三)低電壓穿越(LVRT)	42
七、磷酸鋰鐵電池儲能系統	43
(一)儲能系統架構簡介	43
(二)儲能系統實驗結果	45
八、微電網模擬	46
參、主要發現與結論	50
目前研究成果	51

肆、參考文獻.....52

中文摘要

本計畫為達成微電網智慧監視與控制之目的及有效的電能管理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 CAN Bus 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。待電力資訊收集完畢後使用微電網控制器之 IEC60807-5-104 通訊協定將微電網控制器之資訊傳送至市電端之區域調度中心，以利區域調度中心對各微電網系統作有效的能源分配與管理。另一方面，為使併網型轉換器能順利與市電併聯，將發展新型主動式孤島偵測法，並採用遞迴式類神經網路 (Elman Neural Network, ENN) 控制器來提升偵測性能。在風力發電機控制的部分，加入最大功率點追蹤 (Maximum Power Point Tracking, MPPT)，以達到風能最有效的利用，另外也增加了低電壓穿越 (Low Voltage Ride Through, LVRT) 的能力，使風機在市電電壓下降時，能送虛功支持電壓，並在故障排除後幫助電壓恢復。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，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。微電網控制部分，本計畫將利用 PSIM 軟體模擬分散式發電系統功率分配，並完成風力發電機併網、最大功率追蹤及低電壓穿越性能等功能之驗證。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，使其具備孤島運轉與低電壓穿越之相關功能，並能符合相關之併聯標準與規範。

Abstract

The objective of this project is to monitor 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 CAN Bus 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 completely, the data will be sent to the local dispatched control center (LDCC) of the power grid utilizing IEC60807-5-104 protocol module installed in the microgrid controller for the efficient power management of the microgrid system. Moreover, in order to connect the grid-connected converter with the grid smoothly, a novel method of active islanding detection algorithm adopted Elman neural network (ENN) controller will also be designed. In order to achieve the best efficiency of WTG, a new maximum power point tracking (MPPT) will be developed. Furthermore, when the grid voltage drops, a new low voltage ride through (LVRT) using reactive power will also be developed to feed reactive power to maintain the voltage and help to recover voltage after troubleshooting. In addition, this project will develop LiFePO₄ storage system based on TMS320F28035 digital signal processor (DSP) to store electric power; when the grid is disconnected and DGs can't provide enough power, the storage system will provide electric power to the load. Additionally, the project will use the PSIM simulation software to simulate the power dispatch and control of the microgrid system, and verify the MPPT and LVRT functions of the grid-connected WTG. Finally, in order to possessing the functions of

islanding and LVRT 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

我國電力系統屬於大型集中式的系統，其電力來源主要為火力（包含燃油、燃煤和燃氣）、核能（占總發電量之 96.5%）、和部份的水力與再生能源（占總發電量之 3.5%）。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。

分散式發電若採用再生能源，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。再生能源包含：太陽能、風能、水力、地熱、波浪能、生質能與潮汐能等。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。儘管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

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，近年來相關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、微型電源、電力設備及自動監控系統所組成，可將一系列的負載與微型電源整合而成的單一可控系統，其中微型電源除包含再生能源外，亦包含微型渦輪發電機與小型柴油發電機等。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)與隨插即用(Plug-and-Play)的概念設計[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。微電網設計提供設備隨插即用的功能，目的在於負載與搭配的電源(或稱供需模組)能夠整組從微電網移除或併入，甚至兩個不同模組能予以對調，而不需調整任何監控參數及保護設定，也不需考慮工程上的設計問題。

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 CAN Bus 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使用微電網控制器之 IEC60807-5-104 通訊協定將微電網控制器之資訊傳送至市電端之區域調度中心，以利區域調度中心對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儲能系統、風力發電機與太陽能光電板等分散式電源以發展微電網系統。

風力發電機控制部分，本計畫加入最大功率點追蹤，以達到風能最有效的利用，另外藉由建置磷酸鋰鐵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。

最後本計畫將完成微電網控制法，而為了減少實際裝設時的問題，將利用 PSIM 模擬軟體進行微電網控制模擬，模擬條件利用簡化柴油發電機模式[5]當作主要功率調配之分散式發電系統(Master)，而風力發電機與太陽能光電板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。另外欲使分散式發電系統順利與市電併聯，將設計同步併網與新主動式孤島偵測技術，使系統能安全與有效地操作於市電併聯或孤島運轉模式，另外孤島偵測技術，本計畫將採用 ENN 類神經網路控制器來提升暫態及孤島偵測性能。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。

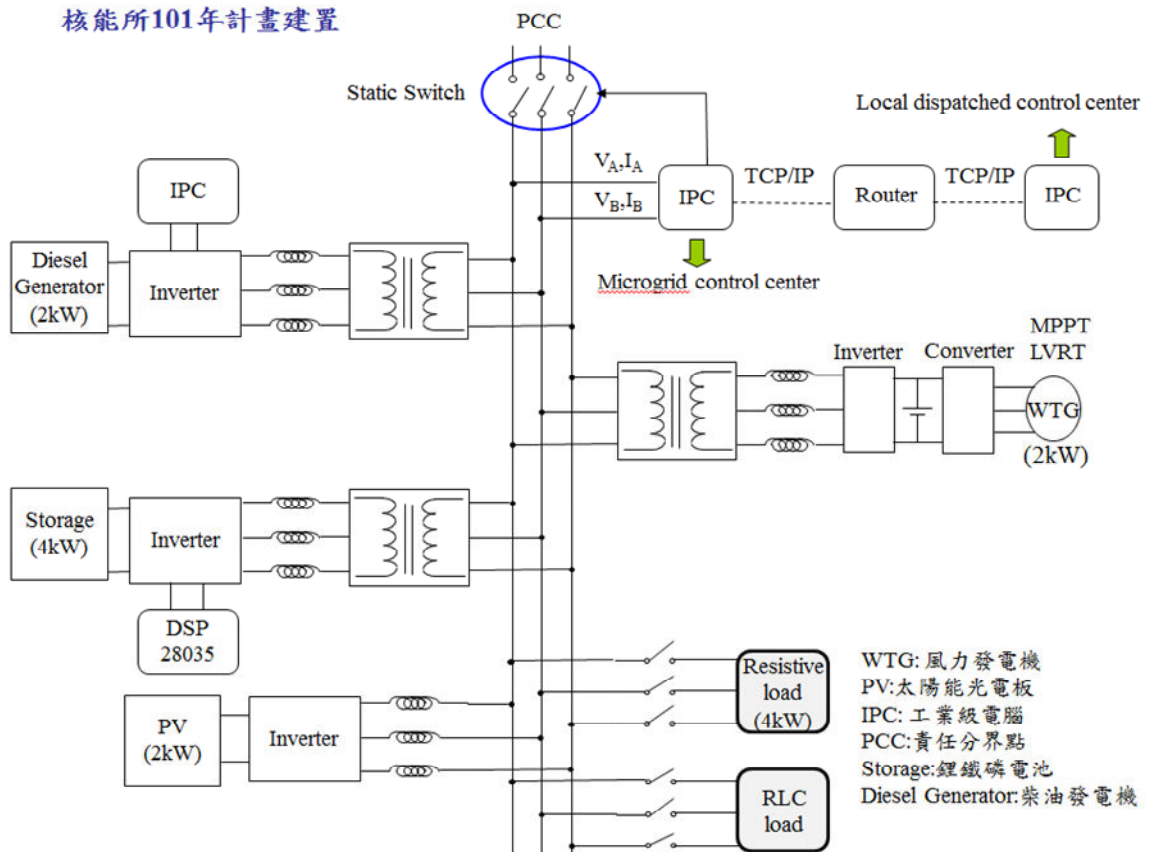


圖 1.本計畫微電網系統架構圖

貳、研究方法與過程

本計畫主要目的係設計一以工業級電腦(IPC)為基礎之微電網控制器，並 CAN Bus 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使用微電網控制器之 IEC 60807-5-104 通訊協定將微電網控制器之資訊傳送至市電端之區域調度中心，以利區域調度中心對各分散式發電系統作有效的能源分配與管理；另外欲使分散式發電系統順利與市電併聯，本計畫已設計同步併網與發展新型主動式孤島偵測技術，使系統能安全與有效地操作於市電併聯或孤島運轉模式，而為提升孤島偵測響應速度，本計畫結合遞迴式類神經網路 ENN，以取代傳統 PI 控制器。此外，本計畫建置磷酸鋰鐵儲能系統與風力發電機等分散式電源以發展微電網系統，儲能系統主要在電網負載離峰時可從電網獲取電能來進行充電，而在電網負載尖峰時刻改為發電方式運轉，向電網傳送電能，避免高成本的尖峰發電，在風力發電機控制部分，則加入最大功率點追蹤，以達到風能最有效的利用，同時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。

一、計畫完成項目

本計畫已發展之直流/交流功率轉換器設計與 PC-based SIMULINK 孤島偵測系統如圖 2 所示，所使用之系統為一電壓源輸出電流的換流器，輸入端為直流電源供應器，輸出端經由一隔離變壓器後與市電併聯，而 Y 接三相本地負載為模擬反孤島測試系統之 RLC 共振負載，其共振頻率設計在 60Hz。圖 3

為系統實體圖，左起為電源供應器，中間部分為換流器轉換系統以及個人電腦，輸出端為一比二的隔離變壓器，最後經過靜態開關與手動斷路器後與市電端併聯，最右側為本計畫所設計之 RLC 共振負載槽，全系統實體以裝箱形式呈現。另本計畫並完成市電併聯同步法、新型主動式孤島偵測法、及 ENN 結合新型主動式孤島偵測法等。而為使分散式發電系統能夠在孤島運轉模式與併聯運轉模式之間平穩的轉換，本計畫參照 IEEE1547 及 UL1741 之測試項目，使孤島偵測系統滿足 IEEE1547 及 UL1741 之相關標準。

在發展微電網部分，本計畫完成建置風力發電機與磷酸鋰鐵儲能系統等分散式電源，在風力發電機部分，完成併網型風力驅動鼠籠式感應發電系統，利用交流/直流(AC/DC)轉換器將感應發電機所產生變動電壓及變動頻率之三相交流電源轉換成固定電壓之直流電源，再利用直流/交流(DC/AC)換流器，轉換至三相定電壓及定頻率之交流電源，最後再與市電併聯，並且加入最大功率點追蹤，以達到風能最有效的利用。儲能系統主要以數位信號處理器 TMS230F28035 來發展，在電網負載離峰時可從電網獲取電能來進行充電，而在電網負載尖峰時刻改為發電方式運轉，向電網傳送電能，避免高成本的尖峰發電。

微電網控制部分，本計畫完成 PSIM 模擬軟體進行微電網控制模擬，模擬條件利用直流發電機替代簡化柴油發電機模式當作主要功率調配之分散式發電系統(Master)，而風力發電機與太陽能光電板則作為從屬之分散式發電系統(Slave)。

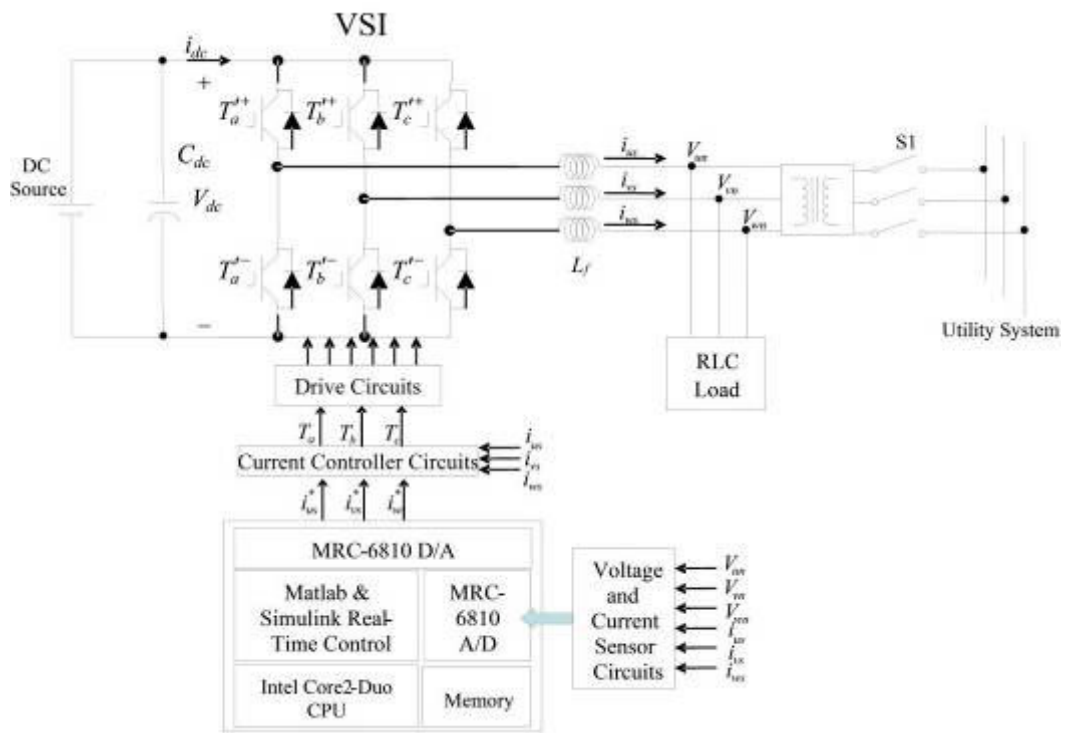


圖 2.孤島偵測系統架構圖



圖 3.PC-based SIMULINK 孤島偵測系統實體圖

二、直流/交流功率轉換器設計

如圖 4 所示，當功率轉換器併聯於市電系統時，輸出功率命令 P_o^* 與 P_o 比較後經過 ENN 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 ENN 控制器產生功率轉換器之 d 軸電流分量 $i_d^* = 0$ ， i_d^* 與 i_q^* 利用偵測市電系統 v_u 及 PLL 所獲得之相角 θ_e 經由二相同步旋轉座標軸對三相固定座標由轉換後，產生與市電系統同步之三相命令電流，再利用電流控制 PWM 產生功率轉換器之三相觸發信號。 i_d^* 表示功率轉換器之虛功率命令電流； i_q^* 表示功率轉換器之實功率命令電流； θ_e 表示功率轉換器之電氣角度； i_u^* 、 i_v^* 、 i_w^* 表示功率轉換器之三相命令電流； 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。 P_o 表示功率轉換器端輸出功率； P_o^* 表示功率轉換器端輸出功率命令。

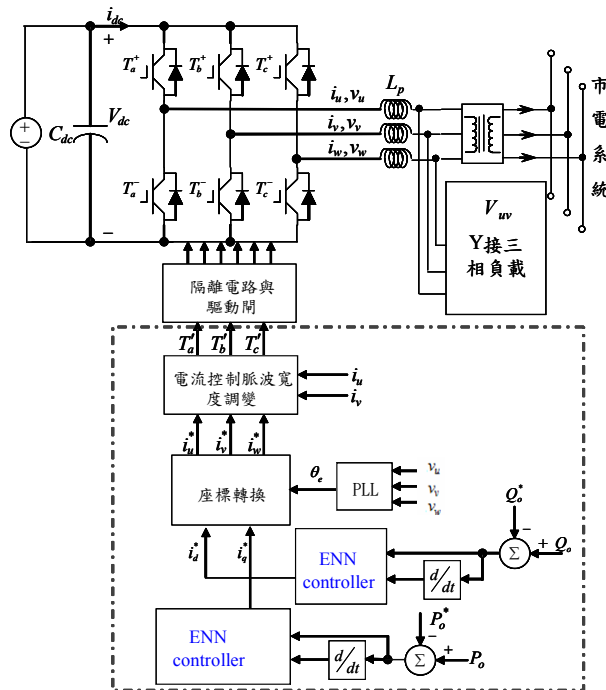


圖 4. 直流/交流功率轉換器設計方塊圖

三、市電併聯同步法

本計畫針對市電併聯同步與孤島偵測部分，以 PC-based SIMULINK 孤島偵測系統來執行完成市電併聯同步。而為達成與市電併聯，因此需偵測市電相角及電壓，故本計畫發展鎖相迴路法(PLL)達到與市電併聯同步，控制架構如圖 4 所示，其輸出功率誤差藉由 ENN 控制架構產生 i_d^* 後，與鎖相迴路法產生之 θ_e ，經由軸座標轉換產生 i_u^* 、 i_v^* 、 i_w^* ，再經由控制達成與市電併聯同步。

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 5 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，再利用比例積分控制器 $K_f(s)$ 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，進而達成三相鎖相之目的。實作波形如圖 6 及圖 7 所示，由實作可知，利用鎖相迴路法可達到市電併聯同步。

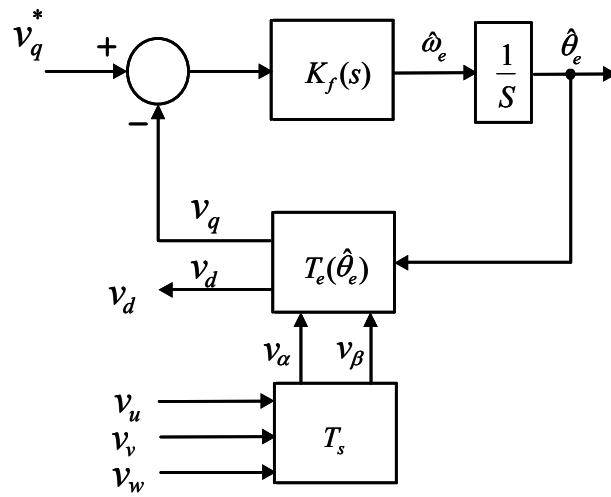


圖 5. 鎖相迴路法控制架構圖

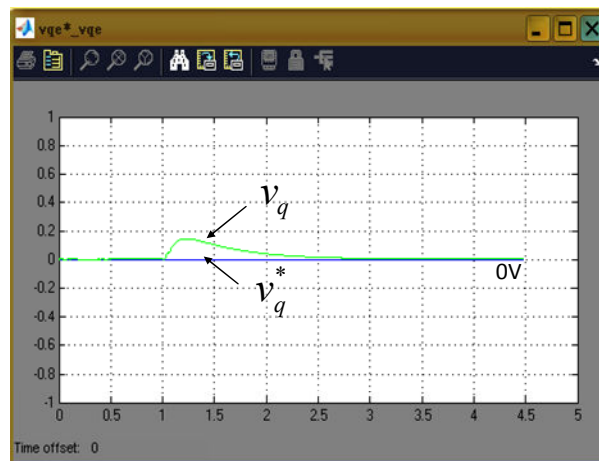


圖 6. 鎖相迴路法三相電壓角度

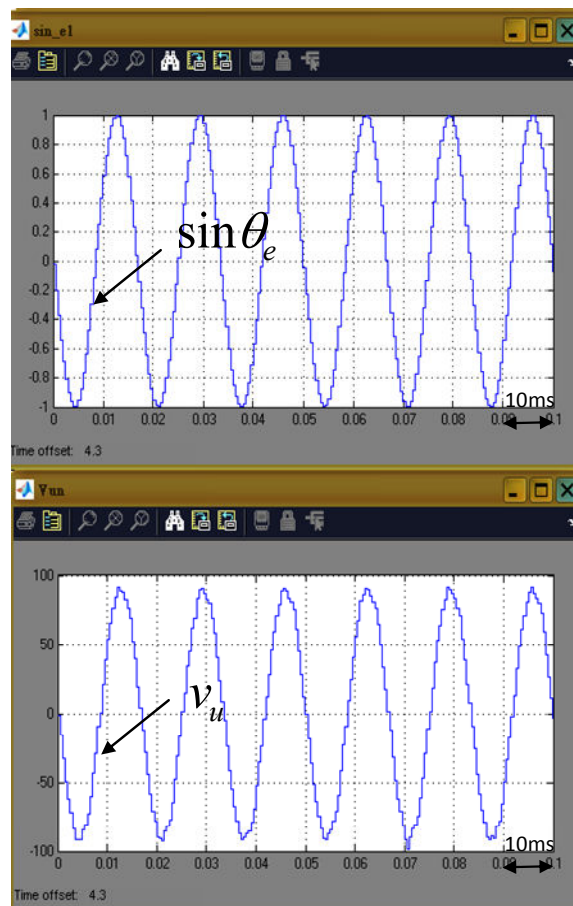


圖 7. 鎖相迴路法實作波形

四、ENN 類神經網路

ENN 類神經網路為單一隱藏層之類神經網路，其遞迴項係由隱藏層神經元輸出至承接層，承接層提供 ENN 擁有動態記憶之特性，其可將隱藏層輸出資料回饋到額外具記憶功能的承接層神經元，記憶先前隱藏層神經元資料，並在時間延遲下輸入至所有隱藏神經元，本計畫將使用 ENN 控制器取代傳統 PI 控制器，主要是用來改善暫態響應速度並且能夠快速達成孤島偵測之目的。詳細網路架構與學習法則描述如下：

(一)ENN 網路架構

圖 8 為 ENN 類神經網路的架構圖，其中包含輸入層(Input Layer)、隱藏層(Hidden Layer)、承接層(Context Layer)和輸出層(Output Layer)，以下介紹每層的函數：

➤ 第一層(輸入層)：

在輸入層，其輸入和輸出由(10)式表示：

$$e_i(k) = f_i(net_i) = net_i, \quad i = 1, 2. \quad (10)$$

其中 net_i 為第 i 個輸入、 k 為第 k 次疊帶，在本計畫中，ENN 的輸入為 $e_1(k) = e$ 和 $e_2(k) = \dot{e}$ ，分別為實虛功追隨誤差及追隨誤差的一次微分。

➤ 第二層(隱藏層)：

在隱藏層中，ENN 類神經網路通常利用雙曲線函數當作區域函數，為了減少運算量，採用一片段連續函數，如圖 9 所示，分段連續函數如下所示：

$$x_j(k) = \begin{cases} 1 & \text{if } net_j > 0.5/a \\ 0 & \text{if } net_j < -0.5/a \\ a \times net_j + 0.5 & \text{otherwise} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, 9. \quad (11)$$

$$net_j = \sum_r x_r^c(k) + \sum_i W_{ij}^1 \times net_i(k), \quad r = 1, 2, \dots, 9. \quad (12)$$

其中 net_j 和 $x_j(k)$ 分別為隱藏層的輸入與輸出， $x_r^c(k)$ 為承接層輸出， W_{ij}^1 為輸入層和隱藏層之間的連結權重值，其值設定為 1， a 為分段連續函數的斜率。

➤ 第三層(承接層)：

在承接層中，其輸入和輸出由(13)式表示：

$$x_r^c(k) = x_j(k-1) \quad (13)$$

➤ 第四層(輸出層)：

在輸出層中，輸入和輸出間的表示如下：

$$y_o(k) = f(\text{net}_o(k)) = \text{net}_o(k) \quad (14)$$

$$\text{net}_o(k) = \sum_j W_{jo}^2 \times x_j(k) \quad (15)$$

其中 W_{jo}^2 為隱藏層和輸出層之間的連結權重值， $y_o(k)$ 為輸出層的輸出。

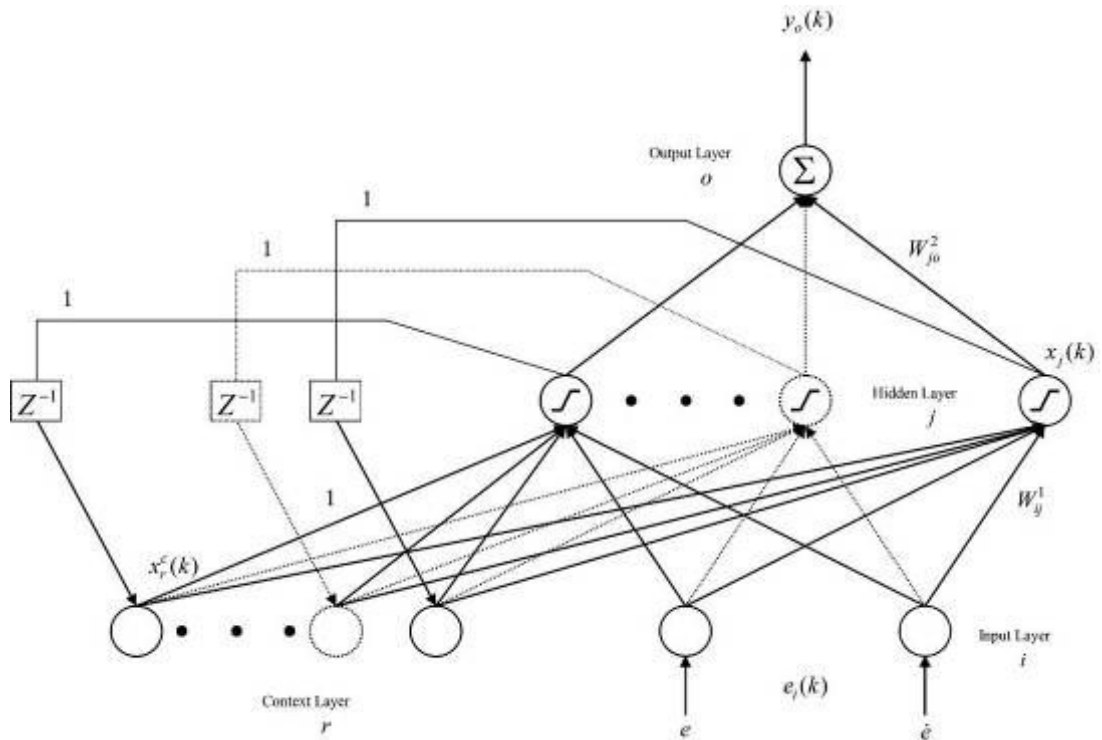


圖 8. ENN 類神經網路架構圖

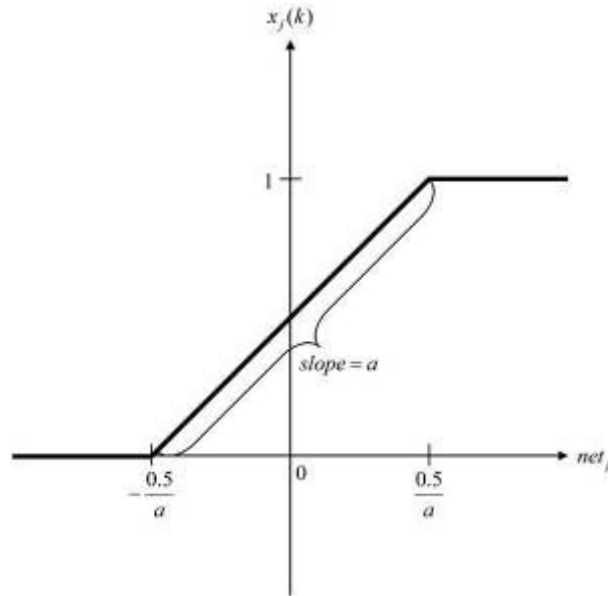


圖 9.分段連續函數

(二)ENN 類神經網路線上學習法則

ENN 類神經網路的學習法則的重點是在學習過程中如何遞迴地得到一個梯度向量，此梯度向量的每一元素定義為針對網路的參數使用連鎖律之能量函數的導數，此方法就是所謂的倒傳遞學習法則，為了描述使用監督式梯度陡降法的 ENN 類神經網路的線上學習法則，首先定義一能量函數如下式：

$$V = \frac{1}{2}(P^* - P_{inv})^2 = \frac{1}{2}e^2 \quad (16)$$

因此線上學習法則描述如下：

► 第四層(輸出層)：

倒傳遞的誤差項如下：

$$\delta_o = -\frac{\partial V}{\partial y_o(k)} = -\frac{\partial V}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y_o(k)} = -\frac{\partial V}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial P_{inv}} \frac{\partial P_{inv}}{\partial y_o(k)} \quad (17)$$

其連結權重值的更新如下：

$$\Delta W_{jo}^2 = -\eta_1 \frac{\partial V}{\partial W_{jo}^2} = -\eta_1 \frac{\partial V}{\partial y_o(k)} \frac{\partial y_o(k)}{\partial net_o(k)} \frac{\partial net_o(k)}{\partial W_{jo}^2} = \eta_1 \delta_o x_j(k) \quad (18)$$

其中 η_1 為學習速率。且連結權重值的疊代如下：

$$W_{jo}^2(k+1) = W_{jo}^2(k) + \Delta W_{jo}^2 \quad (19)$$

➤ 第二層(隱藏層)：

在此層，利用連鎖律其連結權重值的更新如下所示：

$$\begin{aligned} \Delta W_{ij}^1 &= -\eta_2 \frac{\partial V}{\partial W_{ij}^1} = -\eta_2 \frac{\partial V}{\partial y_o(k)} \frac{\partial y_o(k)}{\partial net_o(k)} \frac{\partial net_o(k)}{\partial x_j(k)} \frac{\partial x_j(k)}{\partial W_{ij}^1} \\ &= \eta_2 \delta_o W_{jo}^2 a e_i(k) \end{aligned} \quad (20)$$

其中 η_2 為學習速率。且連結權重值的疊代如下：

$$W_{ij}^1(k+1) = W_{ij}^1(k) + \Delta W_{ij}^1 \quad (21)$$

由於分散式發電系統存在不確定項和外部干擾，故 $\partial P_{inv} / \partial y_o(k)$ 不能夠精確求出，為了克服此問題及線上學習速度，提出誤差適應法則如下來取代：

$$\delta_o \cong e + \dot{e} \quad (22)$$

(三)市電併聯系統測試

為測試市電併聯，本計畫先以 PI 控制器做模擬測試，其中系統額定輸出實功率設為 0 至 1kW 再由 1kW 至 2kW、虛功率為 0VAR，利用 PI 控制器實功率追隨響應及虛功率追隨響應，如圖 10、11 所示。另外本計畫所提 ENN 控制器，其功用除了能提升換流器之暫態響應能力外，因 ENN 控制器具有快速學習與強健性之特性，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，因此以 ENN 取代 PI 控制器，圖 12、13 分別為以 ENN 智慧型控制器之實功率追隨響應及虛功率追隨響應圖，圖中之暫態響應能夠緊緊跟隨緩起動之控制命令，相較於圖 10、11 利用 PI 控制器之暫態響應能力，其響

應能力獲得大幅度改善。而 ENN 智慧型控制器之另一優勢為提升孤島偵測之偵測速度，於次章節會加以說明。

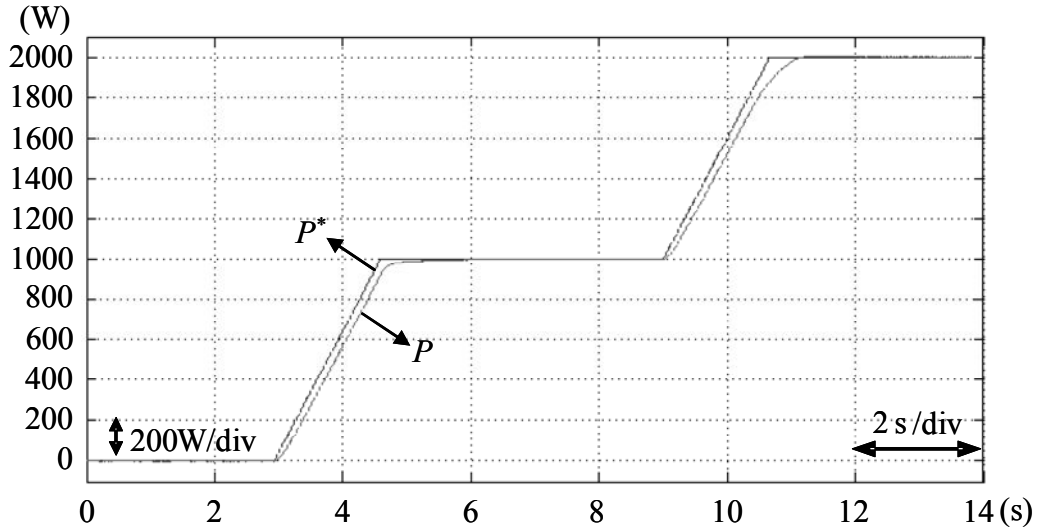


圖 10.利用 PI 控制器之實功率命令及回授實作結果圖

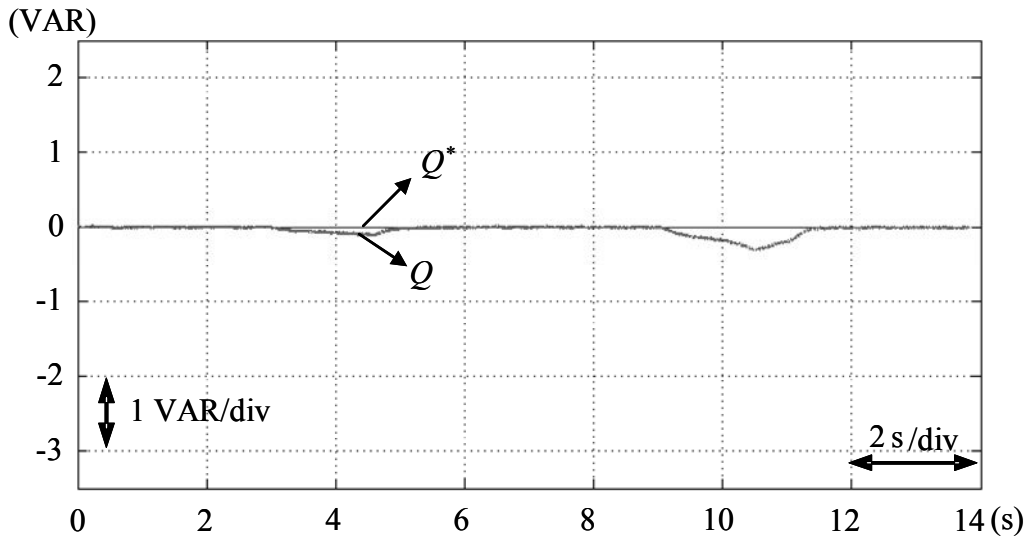


圖 11.利用 PI 控制器之虛功率命令及回授實作結果圖

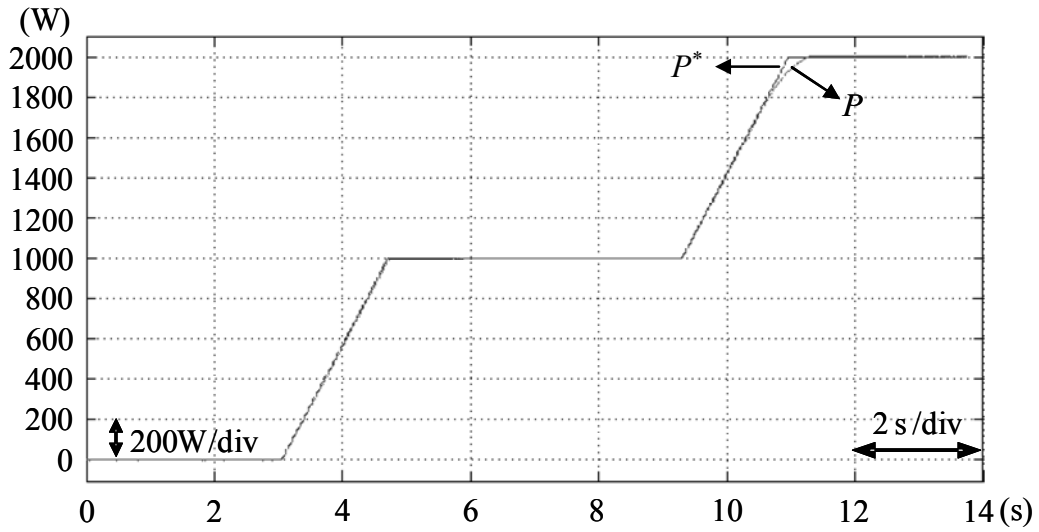


圖 12.利用 ENN 控制器之實功率命令及回授實作結果圖

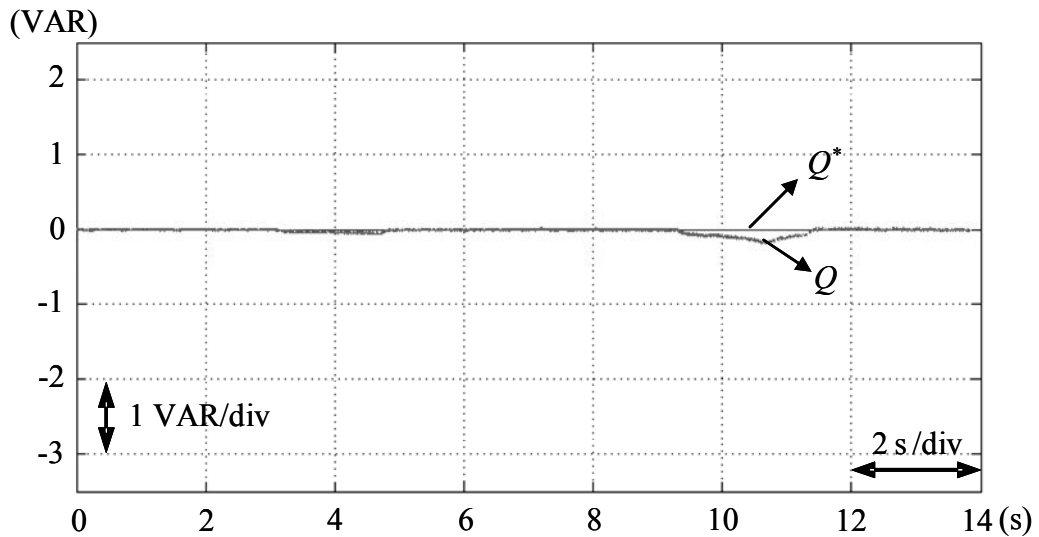


圖 13.利用 ENN 控制器之虛功率命令及回授實作結果圖

五、新型主動式孤島偵測法

本計畫已發展新型主動式孤島偵測法，其主要係在 d 軸(虛功軸)注入擾動訊號，藉由注入擾動訊號至虛功率軸，於市電正常運作時，擾動訊號差值將趨近於零，對市電併聯型變流器而言將無任何正回授訊號影響，因此能夠減低擾動之諧波失真電流的影響。當市電異常或中斷時，此時擾動訊號將逐量增大，

使 d 軸之擾動訊號成分增加並加速頻率偏移至孤島安全規範之外，因此達到孤島偵測目的。

(一) 電流注入擾動訊號法

本計畫所提之電流注入擾動訊號法之目的在於藉由加入一擾動訊號，使市電脫離時能快速擾動頻率至無法偵測之範圍外，以達成孤島偵測之效果，圖 14 為本計畫所提電流注入擾動訊號法控制架構圖。

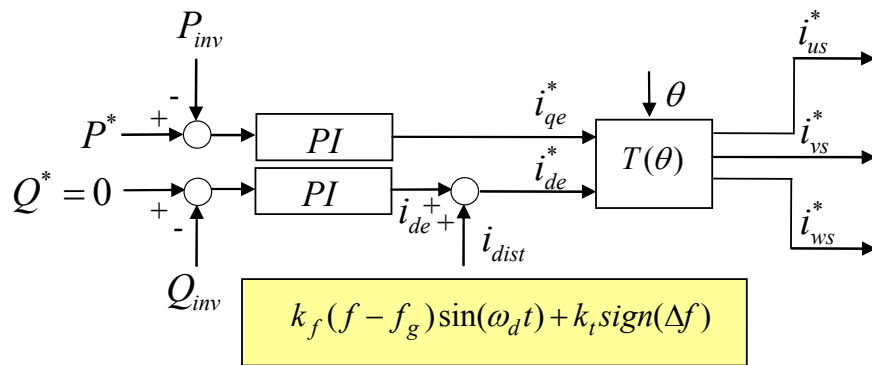


圖 14. 電流注入擾動訊號法控制架構圖

其中 P^* 為實功率控制命令、 Q^* 為虛功率控制命令、 θ 為利用鎖相偵測迴路所求得之市電同步角度、 i_{us}^* 、 i_{vs}^* 、 i_{ws}^* 為三相電流控制命令、 i_{qe}^* 、 i_{de}^* 為 d - q 軸輸出電流控制命令，其實功率與虛功率之誤差訊號經由 PI 控制器調整後可得 d - q 軸電流命令，而 i_{de}^* 為一般虛功軸控制力經由三相座標軸轉換後可產生三相電流控制命令，其主要由 i_{de}^* 與注入之擾動訊號 i_{dist} 組成， i_{de}^* 之表示式如(23)式， i_{dist} 為加入虛功軸之擾動訊號如(24)式、 k_f 與 k_t 為擾動訊號之比例增益、 k_p 與 k_i 則為 PI 控制器之增益值、 ω_d 為注入擾動之頻率、 f 為負載

端頻率、 f_g 為一般市電標準頻率 60Hz， $sign(\Delta f)$ 值為 $-1 \sim 1$ 由所偵測到負載端頻率與市電頻率差值決定。

$$i_{de} = k_p(Q^* - Q_{inv}) + k_I \int (Q^* - Q_{inv}) dt \quad (23)$$

$$i_{dist} = k_f(f - f_g) \sin(\omega_d t) + k_t sign(\Delta f)$$

$$; sign(\Delta f) = \begin{cases} 1, & f[k] > f[k-1] \\ 0, & f[k] = f[k-1] \\ -1, & f[k] < f[k-1] \end{cases} \quad (24)$$

虛功軸之控制命令可由(23)式與(24)式加總得：

$$i_{de}^*(t) = k_p(Q^* - Q_{inv}(t)) + k_I \int (Q^* - Q_{inv}(t)) dt + k_f(f - f_g) \sin(\omega_d t) + k_t sign(\Delta f) \quad (25)$$

將(25)式做拉式轉換並將虛功率為零 $Q^* = 0$ 代入整理得：

$$I_{de}^*(s) = -k_p Q_{inv}(s) - k_I \frac{Q_{inv}(s)}{s} + k_f(f - f_g) \frac{\omega_d}{s^2 + \omega_d^2} + \frac{k_t sign(\Delta f)}{s} \quad (26)$$

因此 Q_{inv} 可表示成下式：

$$Q_{inv}(s) = -\frac{I_{de}^*(s)}{k_p} + \frac{k_f(f - f_g)\omega_d}{k_p} \frac{s}{s^2 + \omega_d^2} \frac{1}{s + \frac{k_I}{k_p}} + \frac{k_t sign(\Delta f)}{k_p} \frac{1}{s + \frac{k_I}{k_p}} + k_I \frac{I_{de}^*(s)}{k_p^2} \frac{1}{s + \frac{k_I}{k_p}} \quad (27)$$

再者，將(27)式取反拉式轉換：

$$Q_{inv}(t) = -\frac{i_{de}^*(t)}{k_p} + \frac{k_f(f - f_g)\omega_d}{k_p} \left[\frac{\frac{k_I}{k_p}}{\omega_d^2 + (\frac{k_I}{k_p})^2} \cos(\omega_d t) + \frac{\omega_d}{\omega_d^2 + (\frac{k_I}{k_p})^2} \sin(\omega_d t) + \frac{-\frac{k_I}{k_p}}{\omega_d^2 + (\frac{k_I}{k_p})^2} e^{-\frac{k_I}{k_p} t} \right] + \frac{k_t sign(\Delta f)}{k_p} e^{-\frac{k_I}{k_p} t} + k_I \frac{i_{de}^*(t)}{k_p^2} e^{-\frac{k_I}{k_p} t} \quad (28)$$

在無擾動訊號加入之情況下脫離市電時，由於

RLC 負載操作於共振頻率，可視為一電阻性負載，因此換流器輸出虛功率 $Q_{inv} \approx 0$ ，將 $Q_{inv} \approx 0$ 代入 IEEE1547 所規範之無法偵測區 (Non-Detection Zone, NDZ) 範圍表示式(29)式，可得(30)式：

$$Q_f \left(\frac{f_{\min}}{f_g} - \frac{f_g}{f_{\min}} \right) \leq \frac{Q_{inv}}{P_{load}} \leq Q_f \left(\frac{f_{\max}}{f_g} - \frac{f_g}{f_{\max}} \right) \quad (29)$$

$$Q_f \left(\frac{f_{\min}}{f_g} - \frac{f_g}{f_{\min}} \right) \leq 0 \leq Q_f \left(\frac{f_{\max}}{f_g} - \frac{f_g}{f_{\max}} \right) \quad (30)$$

由(30)式可知於此情況下將操作在盲點區，因此會有孤島運轉之現象產生。當擾動訊號加入之情況下並脫離市電時，由於 $i_{de}^*(t)$ 、 $f - f_g$ 、 $\cos(\omega_d t)$ 、 $\sin(\omega_d t)$ 與 $\text{sign}(\Delta f)$ 之瞬間改變使得 Q_{inv} 不再趨近於零，接著將(28)式帶入(29)式後，可得直軸注入訊號加速擾動至 NDZ 上下限範圍之外，如(31)式所示：

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{i_{de}^*(t)}{k_p P_{load}} + \frac{k_f(f - f_g)\omega_d}{k_p P_{load}} \left[\frac{\frac{k_l}{k_p} \cos(\omega_d t) + \frac{\omega_d}{\omega_d^2 + (\frac{k_l}{k_p})^2} \sin(\omega_d t) + \frac{-\frac{k_l}{k_p}}{\omega_d^2 + (\frac{k_l}{k_p})^2} e^{-\frac{k_l t}{k_p}}}{\omega_d^2 + (\frac{k_l}{k_p})^2} \right] \\ \quad + \frac{k_t \text{sign}(\Delta f)}{k_p P_{load}} e^{-\frac{k_l t}{k_p}} + k_l \frac{i_{de}^*(t)}{k_p^2 P_{load}} e^{-\frac{k_l t}{k_p}} \leq Q_f \left(\frac{f_{\min}}{f_g} - \frac{f_g}{f_{\min}} \right) \\ -\frac{i_{de}^*(t)}{k_p P_{load}} + \frac{k_f(f - f_g)\omega_d}{k_p P_{load}} \left[\frac{\frac{k_l}{k_p} \cos(\omega_d t) + \frac{\omega_d}{\omega_d^2 + (\frac{k_l}{k_p})^2} \sin(\omega_d t) + \frac{-\frac{k_l}{k_p}}{\omega_d^2 + (\frac{k_l}{k_p})^2} e^{-\frac{k_l t}{k_p}}}{\omega_d^2 + (\frac{k_l}{k_p})^2} \right] \\ \quad + \frac{k_t \text{sign}(\Delta f)}{k_p P_{load}} e^{-\frac{k_l t}{k_p}} + k_l \frac{i_{de}^*(t)}{k_p^2 P_{load}} e^{-\frac{k_l t}{k_p}} \geq Q_f \left(\frac{f_{\max}}{f_g} - \frac{f_g}{f_{\max}} \right) \end{array} \right. \quad (31)$$

由於 f_g 、 k_p 、 k_l 、 k_f 、 ω_d 、 P_{load} 與 i_{de}^* 皆為恆正的常數項，因此(31)式中 NDZ 下限不等式可整理如下：

$$f - \frac{k_p P_{load} \left[Q_f \left(\frac{f_{\min}}{f_g} - \frac{f_g}{f_{\min}} \right) + \frac{i_{de}^*(t)}{k_p P_{load}} - \frac{k_l \text{sign}(\Delta f)}{k_p P_{load}} e^{\frac{k_{l-t}}{k_p}} - k_l \frac{i_{de}^*(t)}{k_p^2 P_{load}} e^{\frac{k_{l-t}}{k_p}} \right]}{k_f \omega_d \left[\frac{\frac{k_l}{k_p}}{\omega_d^2 + \left(\frac{k_l}{k_p}\right)^2} \cos(\omega_d t) + \frac{\omega_d}{\omega_d^2 + \left(\frac{k_l}{k_p}\right)^2} \sin(\omega_d t) + \frac{-\frac{k_l}{k_p}}{\omega_d^2 + \left(\frac{k_l}{k_p}\right)^2} e^{\frac{k_{l-t}}{k_p}} \right]} \leq f_g \quad (32)$$

式(32)可進一步簡化成 $f - A \leq f_g$ ， A 代表一時變未知數，當市電發生異常或故障時，如果 $f - A$ 的值小於 f_g ，則系統將操作在無法偵測區下限之外，因此孤島現象將可被偵測出來並進一步停止換流器輸出功率。

(31)式中 NDZ 上限不等式可整理如下：

$$f - \frac{k_p P_{load} \left[Q_f \left(\frac{f_{\max}}{f_g} - \frac{f_g}{f_{\max}} \right) + \frac{i_{de}^*(t)}{k_p P_{load}} - \frac{k_l \text{sign}(\Delta f)}{k_p P_{load}} e^{\frac{k_{l-t}}{k_p}} - k_l \frac{i_{de}^*(t)}{k_p^2 P_{load}} e^{\frac{k_{l-t}}{k_p}} \right]}{k_f \omega_d \left[\frac{\frac{k_l}{k_p}}{\omega_d^2 + \left(\frac{k_l}{k_p}\right)^2} \cos(\omega_d t) + \frac{\omega_d}{\omega_d^2 + \left(\frac{k_l}{k_p}\right)^2} \sin(\omega_d t) + \frac{-\frac{k_l}{k_p}}{\omega_d^2 + \left(\frac{k_l}{k_p}\right)^2} e^{\frac{k_{l-t}}{k_p}} \right]} \geq f_g \quad (33)$$

同理，(33)中無法偵測區不等式之上限可簡化成 $f - B \geq f_g$ ， B 亦代表一時變未知數，當市電發生異常或故障時，如果 $f - B$ 的值大於 f_g ，則系統將操作在無法偵測區上限之外，因此孤島現象將可被偵測出來並進一步停止換流器輸出功率。

(二)ENN 控制器結合孤島偵測

為了提升所提之孤島偵測法效能，另外再結合智慧型控制器 ENN，使孤島偵測之速度能再加快，因此，本研究將外迴路實功率與虛功率的傳統控制器 PI 取代成 ENN 控制器，如圖 15 所示，藉由 ENN 之快速響應特性來提升頻率擾動量達快速偏移 NDZ 之效果。由圖 15 所知，ENN 控制器輸出訊號可由

(34)式所示，在加入擾動訊號後，虛功軸之電流控制命令如(35)式：

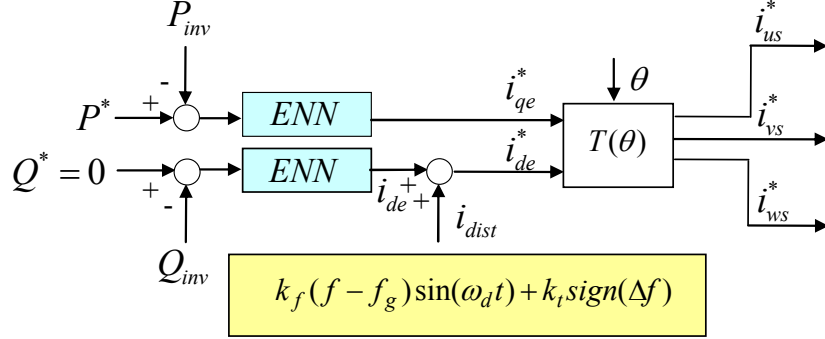


圖 15.擾動訊號注入法結合 ENN 之控制方塊圖

$$i_{de} = [\sum_j W_{jo}^2(t)x_j(t)](Q^* - Q_{inv}(t)) \quad (34)$$

$$i_{de}^*(t) = [\sum_j W_{jo}^2(t)x_j(t)](Q^* - Q_{inv}(t)) + k_f(f - f_g)\sin(\omega_d t) + k_r \text{sign}(\Delta f) \quad (35)$$

因虛功率控制命令 Q^* 設為零，將(35)式整理後，可得虛功率表示式(36)

$$Q_{inv}(t) = \frac{-i_{de}^*(t) + k_f(f - f_g)\sin(\omega_d t) + k_r \text{sign}(\Delta f)}{[\sum_j W_{jo}^2(t)x_j(t)]} \quad (36)$$

將(36)式之反流器虛功率代入(29)式，可得無法偵測區範圍如(37)所示，由於加入擾動訊號與智慧型控制之目的在於加速虛功率脫離(29)無法偵測區，當注入之擾動訊號造成虛功率輸出的值迅速偏離到達無法偵測區之最小限制時，即可使虛功率脫離最小限制之無法偵測區，相反地，當注入之擾動訊號造成虛功率輸出的值迅速偏離至無法偵測區的最大上限時，即可使其脫離最大限制之無法偵測區。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{-i_{de}^*(t) + k_f(f - f_g)\sin(\omega_d t) + k_t \text{sign}(\Delta f)}{P_{load}[\sum_j W_{jo}^2(t)x_j(t)]} \leq Q_f \left(\frac{f_{\min}}{f_g} - \frac{f_g}{f_{\min}} \right) \\ \frac{-i_{de}^*(t) + k_f(f - f_g)\sin(\omega_d t) + k_t \text{sign}(\Delta f)}{P_{load}[\sum_j W_{jo}^2(t)x_j(t)]} \geq Q_f \left(\frac{f_{\max}}{f_g} - \frac{f_g}{f_{\max}} \right) \end{array} \right. \quad (37)$$

因此(37)式中 NDZ 下限不等式可整理如下：

$$f - \frac{Q_f \left(\frac{f_{\min}}{f_g} - \frac{f_g}{f_{\min}} \right) P_{load}[\sum_j W_{jo}^2(t)x_j(t)] + i_{de}^*(t) - k_t \text{sign}(\Delta f)}{k_f \sin(\omega_d t)} \leq f_g \quad (38)$$

式(38)可進一步簡化成 $f - C \leq f_g$ ， C 代表一時變未知數，當市電發生異常或故障時，如果 $f - C$ 的值小於 f_g ，則系統將操作在無法偵測區下限之外，因此孤島現象將可被偵測出來並進一步停止換流器輸出功率。

(37)式中 NDZ 上限不等式可整理如下：

$$f - \frac{Q_f \left(\frac{f_{\max}}{f_g} - \frac{f_g}{f_{\max}} \right) P_{load}[\sum_j W_{jo}^2(t)x_j(t)] + i_{de}^*(t) - k_t \text{sign}(\Delta f)}{k_f \sin(\omega_d t)} \geq f_g \quad (39)$$

同理，(39)中無法偵測區不等式之上限可簡化成 $f - D \geq f_g$ ， D 亦代表一時變未知數，當市電發生異常或故障時，如果 $f - D$ 的值大於 f_g ，則系統將操作在無法偵測區上限之外，因此孤島現象將可被偵測出來並進一步停止換流器輸出功率。其中 $\sum_j W_{jo}^2(t)x_j(t)$ 為 ENN 類神經網路的輸出，ENN 類神經網路具有線上學習與快速收斂的優點，因此 ENN 類神經網路控制器能夠在市電發生異常或中斷時促進頻率更迅速地將(37)偏移至無法偵測區域的上下限制範圍外。

(三) 新型主動式孤島偵測法實作

本研究所提出之電流擾動訊號注入法相關參數係藉由實驗不斷嘗試所獲得之最佳參數，使得所加入之擾動訊號不會影響換流器實、虛功率控制並且能達到較佳之孤島偵測效應，所獲得之擾動訊號參數 $k_f=7$ 、 $k_i=0.2$ ，注入之頻率 $f_d=100\text{Hz}$ 。再者，為了使孤島偵測系統達到較佳效益，ENN 類神經網路之輸入層、隱藏層、承接層及輸出層、分別為 2、9、9、1 個神經元，通常隱藏層及承接層之神經元愈多，系統控制效益也就愈佳，然而神經元愈多系統運作時間也就愈長，是以本研究 ENN 網路隱藏層及承接層之神經元依實驗結果均設計為 9 個，以達到系統快速響應及減少系統運作時間。圖 16 為使用 PI 控制器之電流擾動訊號注入法之實作結果，市電異常之時間點發生在 1 秒，系統並於 1.75 秒偵測到市電中斷或市電異常的現象發生，耗時 0.75 秒，如圖 16(b) 頻率變化波型與圖 16(c) 電壓變化波型所示，並隨即停止功率輸出至 RLC 共振負載槽上，如圖 16(a) 反流器輸出功率波型變化；結合 ENN 智慧型控制器之電流擾動訊號注入法之實作結果如圖 17 所示，當市電中斷或市電異常的情況下其孤島偵測之時間為 0.5 秒。由以上實作結果可得知電流擾動訊號注入法結合 ENN 控制器之孤島偵測響應速度明顯優越於傳統 PI 控制器之孤島偵測響應速度。另外為了驗證 ENN 線上學習與收斂快速優點，本計畫利用實功率命令 0 至 2kW 如圖 18(a) 進行驗證測試，其輸入響應 e 與 \dot{e} 、連結權重值 W_{10}^2 與 W_{20}^2 、 q 軸命令電流輸出 i_{qe}^* ，分別如圖 18(b)-(d) 所示，由圖可驗證 ENN 線上學習與收斂快速。

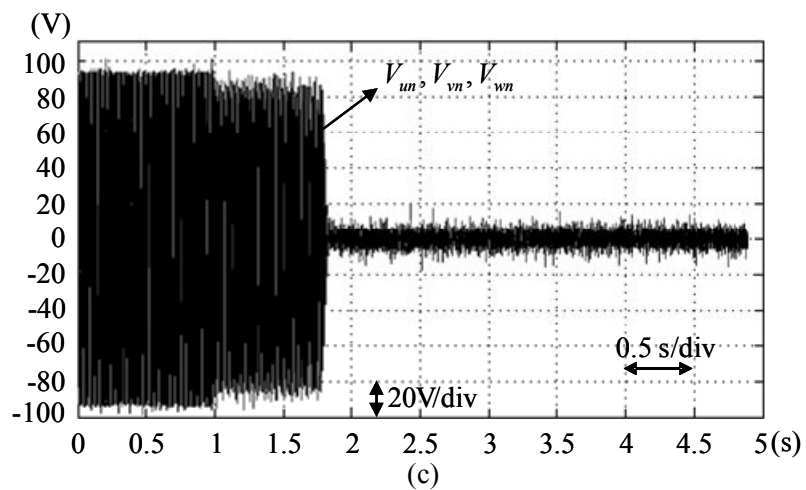
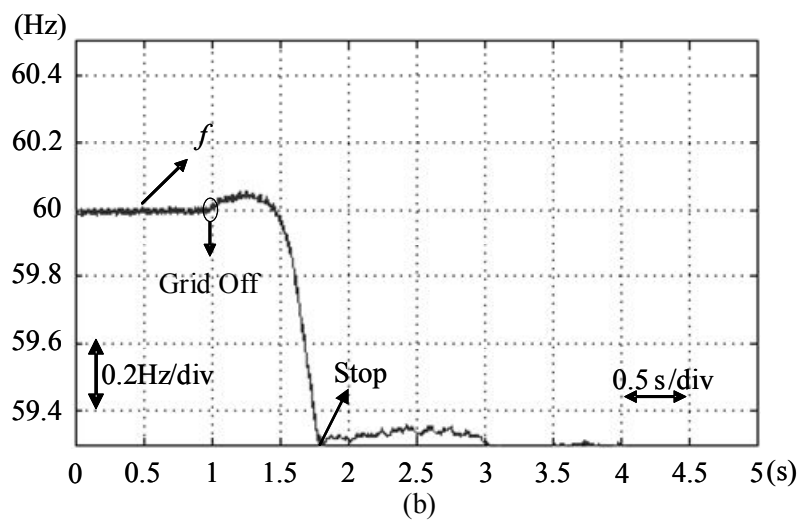
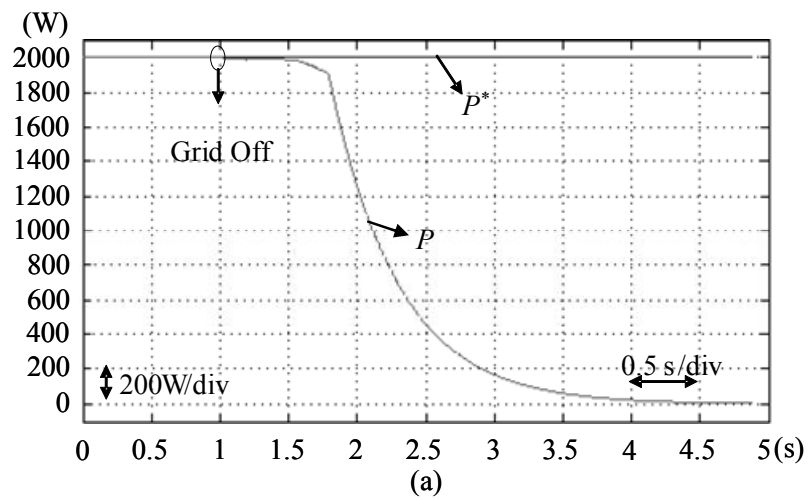


圖 16. 使用 PI 控制器之電流擾動訊號注入法實作圖(a)輸出功率響應(b)頻率響應(c)電壓響應

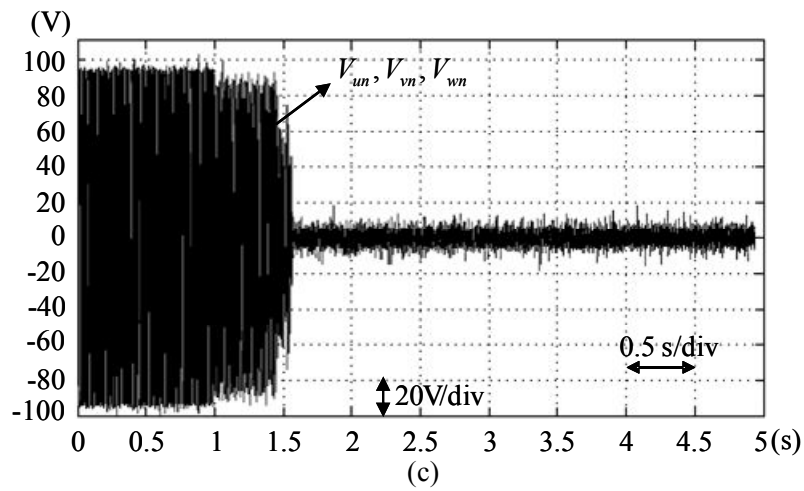
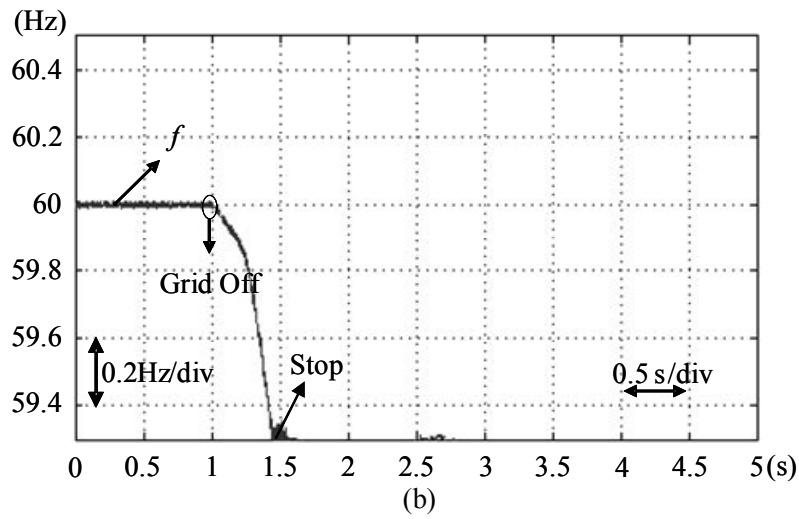
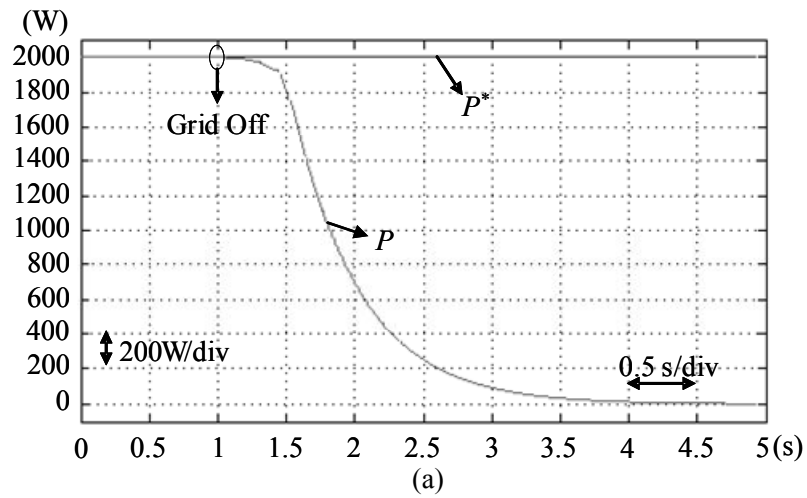
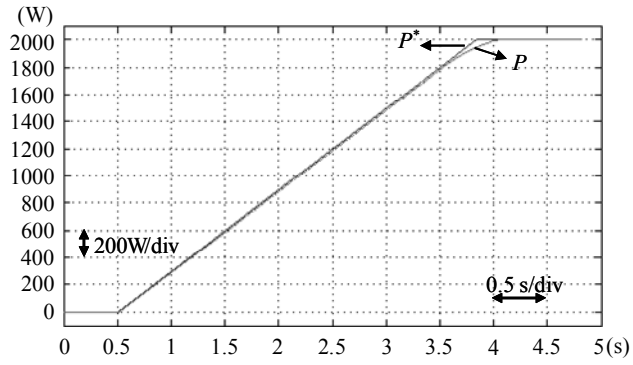
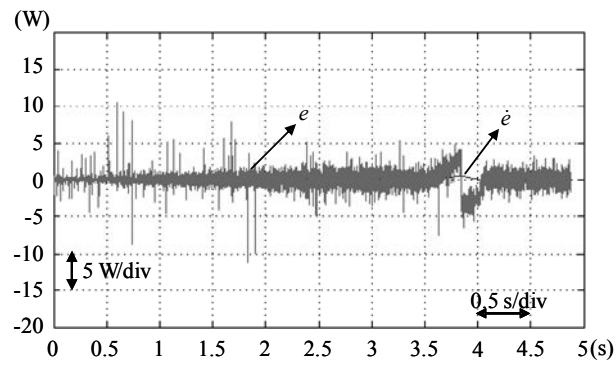


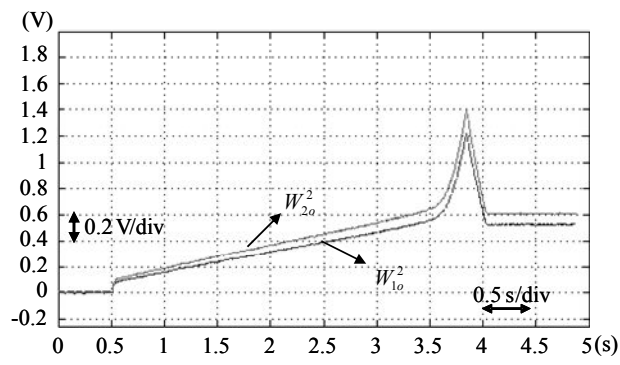
圖 17. 使用 ENN 控制器之電流擾動訊號注入法實作圖(a)輸出功率
響應(b)頻率響應(c)電壓響應



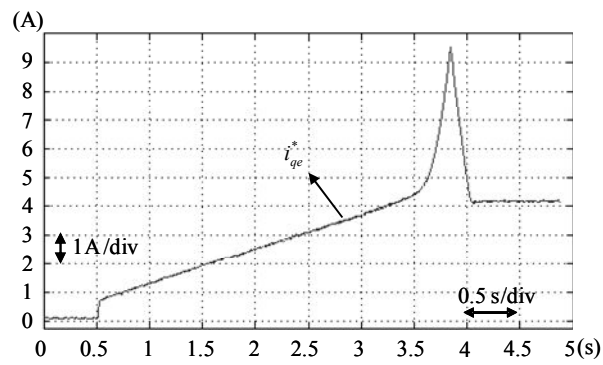
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 18. 2kW ENN 控制器網路參數響應結果圖

六、風力驅動鼠籠式感應發電機系統

由於分散式電源包含風力發電系統、電池等各式分散式電源，是以本計畫提出併網型風力驅動鼠籠式感應發電系統，利用交流/直流(AC/DC)轉換器將感應發電機所產生變動電壓及變動頻率之三相交流電源轉換成固定電壓之直流電源，再利用直流/交流(DC/AC)換流器，轉換至三相定電壓及定頻率之交流電源，最後再與市電併聯，另外並結合 WFNN 類神經網路控制器來取代傳統之 PI 控制器，以改善風力驅動鼠籠式感應發電機在不同操作情況下直流鏈電壓與實、虛功率之暫態與穩態特性。

(一)風機模擬系統

本計畫所提之併網型風力驅動鼠籠式感應發電系統，其中以永磁同步馬達來模擬 2kW、三葉片水平軸式風機[9]，其中風機葉片直徑為 2.4 公尺。由於風機中，功率係數會隨轉速而改變，因此一般說明風機特性時，會將功率係數以尖端速度比(Tip Speed Ratio)之函數表示，而尖端速度比定義如下[9]：

$$\lambda = \frac{R_m \omega_m}{v} \quad (40)$$

其中 λ 為尖端速度比、 R_m 為風機葉片半徑， ω_m 為永磁同步馬達轉子轉速， v 為風速。尖端速度比物理意義為葉片尖端之切線速度與風速的比率。圖 19 為本計畫模擬之功率係數 C_p 與尖端速度比 λ 關係圖，從 $C_p - \lambda$ 關係圖，本計畫設定一最大功率係數 $C_{p,\max} = 0.436$ 及其所對應理想尖端速度比 $\lambda_{opt} = 5.52$ 。

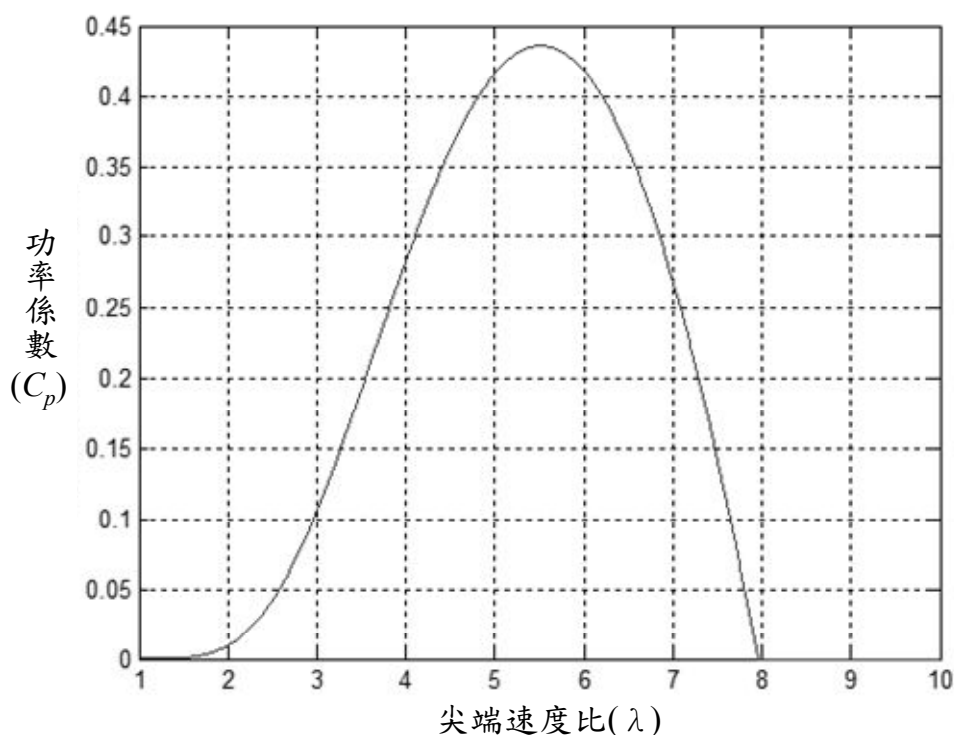


圖 19. C_p - λ 關係圖

因此永磁同步馬達所對應的轉子轉速可由(40)式獲得：

$$\omega_m^* = \frac{\lambda_{opt} v}{R_m} \quad (41)$$

而依據風能特性，模擬之風機所獲得功率可由(42)式表示[10]

$$P_m = \rho A C_p v^3 / 2 = 2.77 \times C_p v^3 \quad (42)$$

其中 ρ 為空氣密度 $1.225 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ ； A 為風機葉片旋轉面積 (m^2)。因此，鼠籠式感應發電機輸出功率可表示為(43)式

$$P_e = \eta_m \eta_g P_m \cong 0.95 P_m \quad (43)$$

其中 $\eta_m = 0.98$ 為機械傳送效率； $\eta_g = 0.97$ 為鼠籠式感應

發電機轉換效率。圖 20 為本計畫所模擬風力驅動鼠籠式感應發電機在各種不同風速情況下之功率輸出與永磁同步馬達轉子轉速關係圖，由圖亦可知風機產生之能量主要受實際風速與轉子轉速的影響，且由(40)式可知在不同的風速下，都會有一個相對應的最佳轉子轉速，使風機系統能夠由風獲得最大的能量。此外，本計畫利用磁場導向控制永磁同步馬達來實現模擬風機之輸出功率與轉子轉速特性，因此，在併網型風力發電系統為模擬風速之變化，本文利用一可對抗永磁同步馬達固有非線性、時變特性之速度控制迴路，來調整永磁同步馬達轉子轉速（相對應於風速）而獲得風力發電機最大輸出功率。

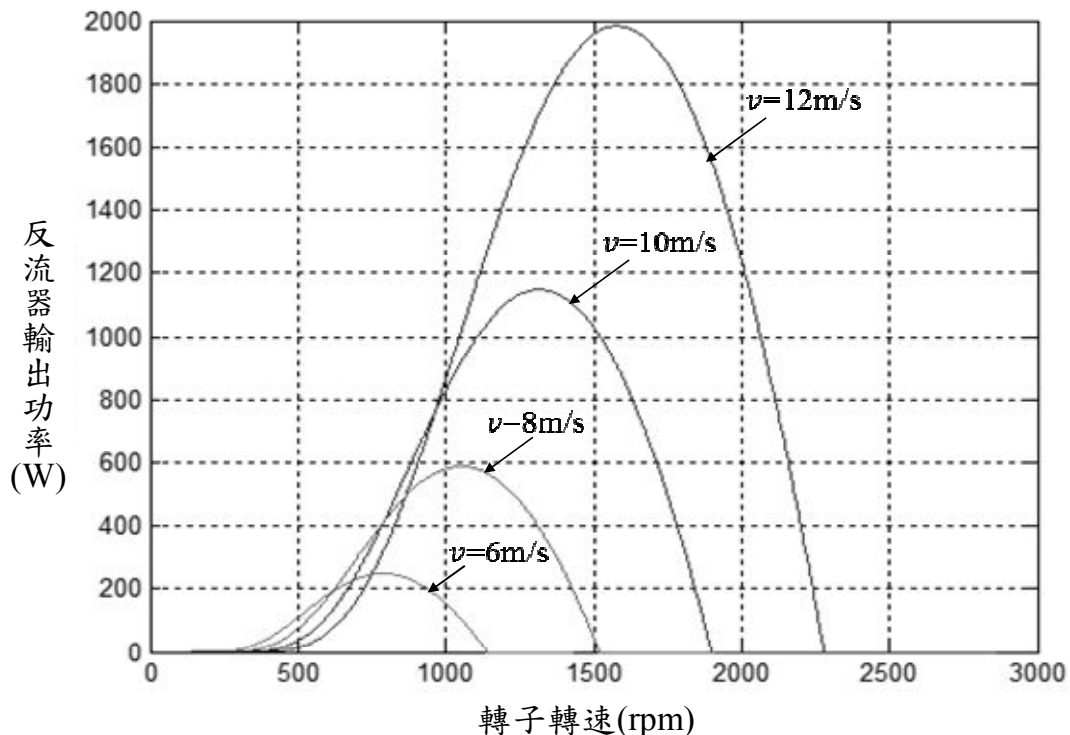


圖 20. 風機輸出功率與轉子轉速關係圖

圖 21 為本計畫所提併網型風力驅動鼠籠式感應發電機控制

方塊圖，一永磁同步馬達直接與鼠籠式感應發電機耦合，當作原動機以模擬實際風機之操作，並以永磁同步馬達帶動鼠籠式感應發電機。其中鼠籠式感應發電機所產生之變頻、變壓三相電源，經由間接磁場導向控制交流/直流功率轉換器轉換成直流電源，並利用 WFNN 控制器以控制直流鏈電壓輸出。另外，同時饋入一滯後之激磁電流至感應發電機，以提供感應發電機建立磁場。此外，併聯市電系統端之直流/交流功率換流器採用直接磁場導向控制，並利用 WFNN 控制器以調節發電機系統功率換流器之輸出實、虛功率。直流/交流功率換流器將直流電源轉換成定頻 60Hz 定電壓 110V 之三相交流電源，接著再經變壓器升壓至 220V 輸出與市電網路併聯，供予市電網路。圖 21 中，輸出實功率命令 P^* 與 P 比較及輸出虛功率命令 Q^* 與 Q 比較後，經過 WFNN 類神經網路控制器產生功率反流器之實功率命令電流 i_{ds}^* 與虛功率命令電流 i_{qs}^* ， i_{ds}^* 與 i_{qs}^* 利用偵測市電網路 v_u 之相角 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，再利用電流控制 PWM 產生功率換流器之三相觸發信號。

本計畫實作中所使用之鼠籠式感應發電機為富田電機股份有限公司所製造之 4 極、2.2kW、380V、4.7A、2000rpm 之三相 Δ 接感應發電機(SFVF-90MB)，其他參數如下所示：

$$\begin{aligned} R_s &= 2.952 \Omega, R_r = 1.809 \Omega, \\ L_s &= 0.006459 \text{ H}, L_r = 0.006577 \text{ H}, L_m = 0.2123201 \text{ H} \end{aligned} \quad (44)$$

其中 L_s 及 L_r 分別為定子及轉子繞組之每相漏電感。

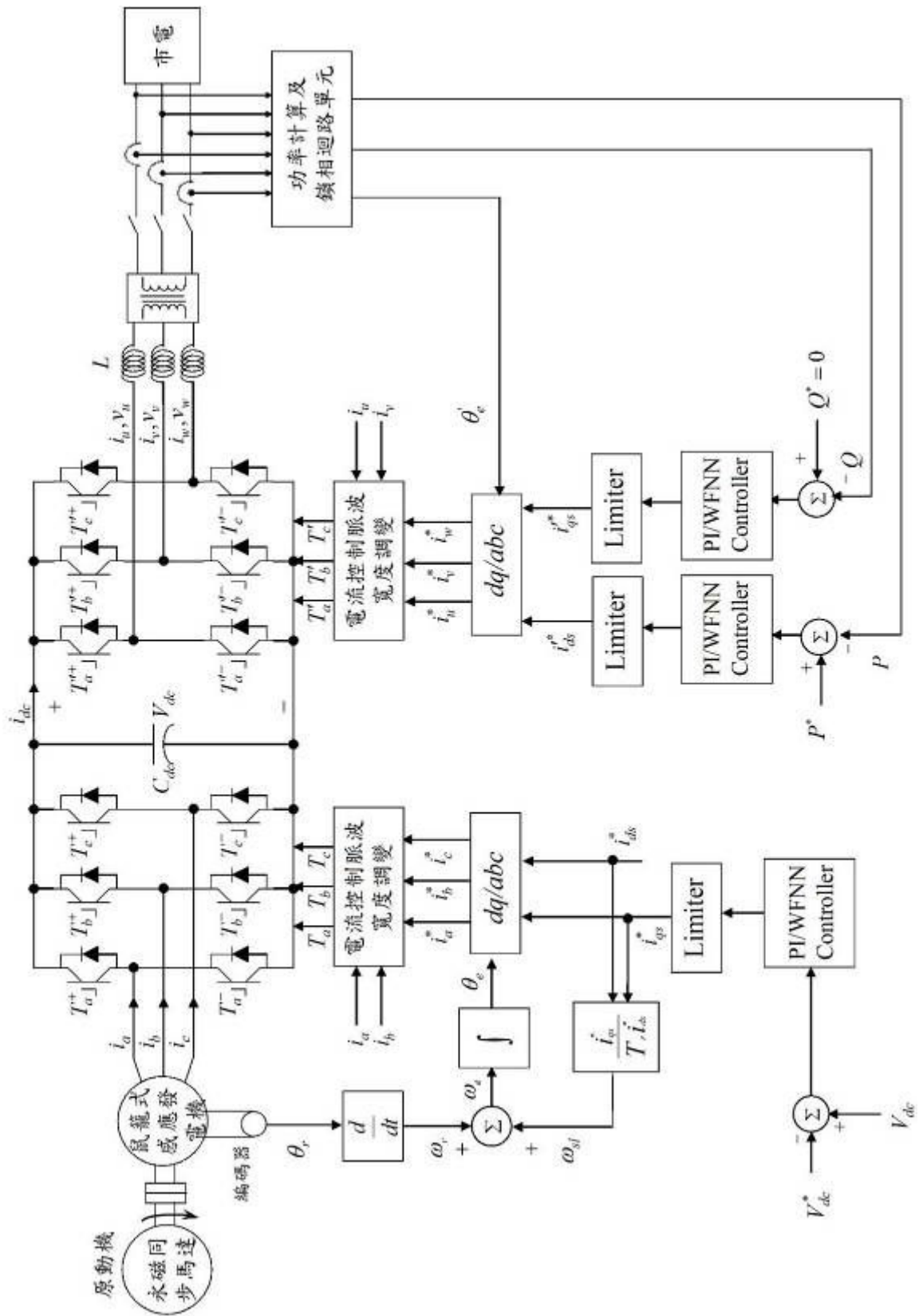


圖 21. 併網型風力驅動鼠籠式感應發電機控制方塊圖

(二)併網型風力驅動鼠籠式感應發電機設計與實作

本計畫提出之併網型風力驅動鼠籠式感應發電機的實作部份是以永磁同步馬達模擬實際之風機，作為原動機以帶動感應發電機，並利用個人電腦控制併網型鼠籠式感應發電機，系統架構如圖 22 所示，系統實體圖如圖 23 所示，其中包括兩張 MRC-6810 伺服控制卡送出三相電流命令、回授訊號及監控發電機轉速及電壓電流。間接磁場導向、鎖相迴路同步法則及 WFNN 類神經網路控制器均由個人電腦 Matlab & Simulink Real-Time Control package 來實現，三相電流命令經由數位/類比換器轉換後送至 AC/DC 轉換器及 DC/AC 換流器。再者，為了使感應發電機系統達到較佳效益，WFNN 類神經網路之輸入層、歸屬函數層、規則層、小波層及輸出層、分別為 2、6、9、27、1 個神經元，通常歸屬函數層、規則層及小波層之神經元愈多，系統控制效益也就愈佳，然而神經元愈多系統運作時間也就愈長，是以本計畫所提出 WFNN 類神經網路之歸屬函數層、規則層及小波層之神經元依實驗結果設計為 6、9、27 個，以達到系統快速響應及減少系統運作時間。

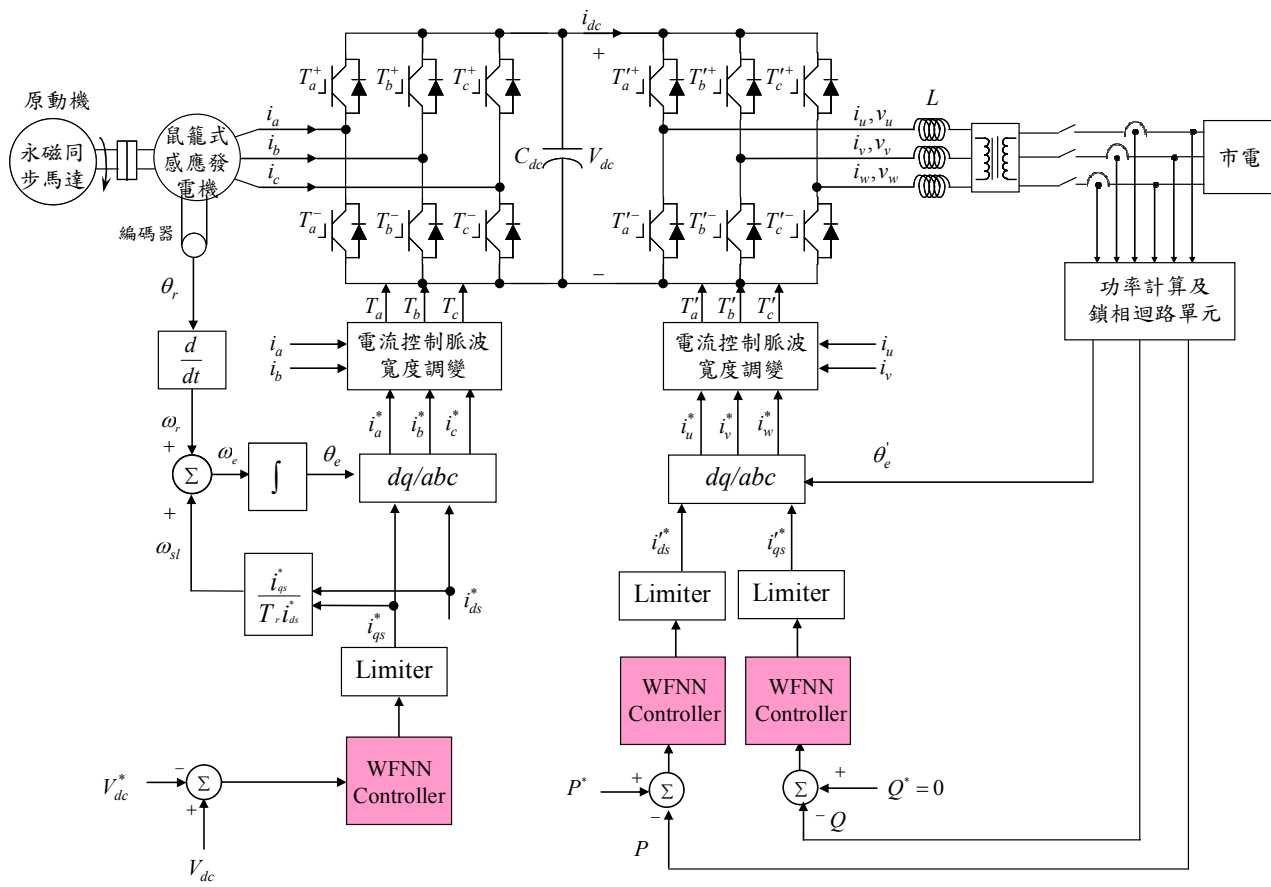


圖 22. 併網型風力驅動鼠籠式感應發電機架構圖

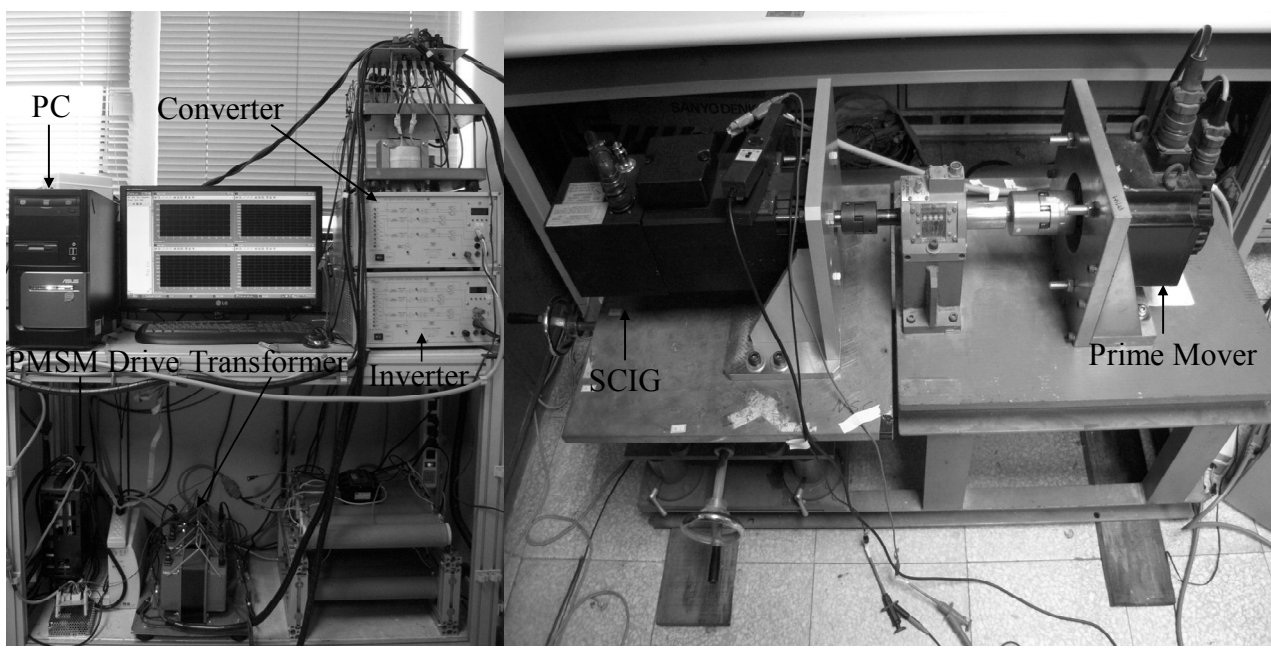


圖 23. 鼠籠式感應發電機實體圖

為了驗證併網型鼠籠式感應發電機結合 WFNN 類神經網路控制器之性能，本計畫設計兩種以下測試狀態來驗證：

狀態一：定轉子轉速 1581rpm ($v=12\text{m/s}$)，並依據圖 20 風機輸出功率與轉子轉速關係，其相對應之 DC/AC 換流器輸出實功率命令 $P^*=1980\text{W}$ 。

狀態二：變動轉子轉速以模擬實際風機不同風速之情形，首先轉子轉速由 1054rpm ($v=8\text{m/s}$)調整至 1186rpm ($v=9\text{m/s}$)再調整至 790rpm ($v=6\text{m/s}$)最後再改並至 1581rpm ($v=12\text{m/s}$)，依據圖 20 風機輸出功率與轉子轉速關係，其相對應之 DC/AC 換流器輸出實功率命令 P^* 分別為 587W、836W、250W 及 1980W。其中上述三種測試狀態之功率整流器磁場控制電流 i_{ds}^* 均為 5.4A，直流鏈電壓命令 V_{dc}^* 為 240V，虛功率命令 Q^* 為 0VAR。

發電機結合 WFNN 控制器在測試狀態一之直流鏈電壓 V_{dc} 、實功率 P 、虛功率 Q 及轉子轉速之響應實作如圖 24(a)-(d)所示，在測試狀態二之直流鏈電壓 V_{dc} 、實功率 P 、虛功率 Q 及轉子轉速之響應實作如圖 25(a)-(d)所示，從實驗結果圖 24 及圖 25 可知，發電機結合 WFNN 控制器之直流鏈電壓 V_{dc} 與實功率 P 暫態控制響應均有較佳追蹤效果，此係由於 WFNN 類神經網路控制器的連結權重值、歸屬函數層中高斯函數的中心值與標準偏差值具有線上學習訓練之能力，因此，鼠籠式感應發電機結合 WFNN 類神經網路控制器之直流鏈電壓 V_{dc} 、實功率 P 與虛功率 Q 追隨響應較佳。

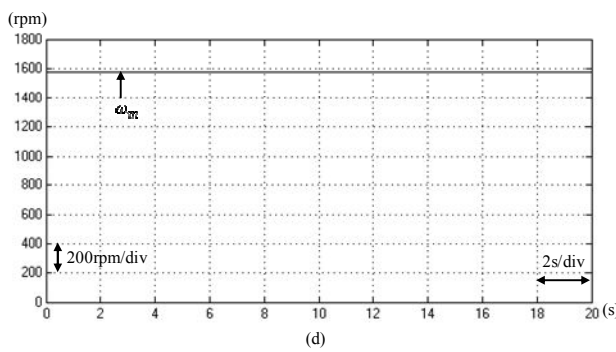
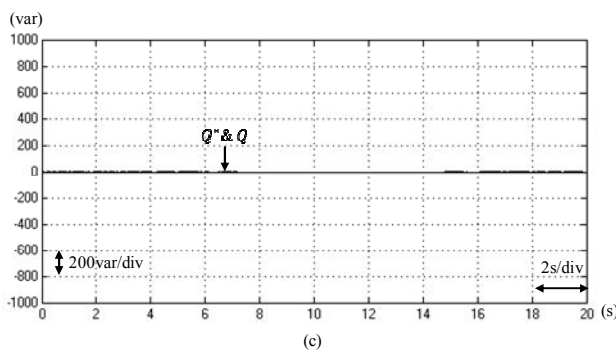
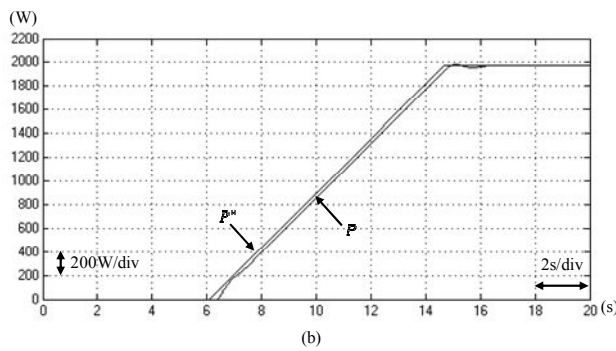
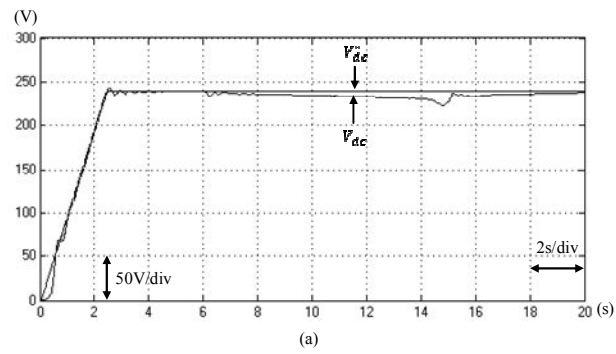


圖 24. 感應發電機結合 WFNN 控制器於定轉子轉速 1581rpm 下實
作圖(a)直流鏈電壓(b)實功率響應(c)虛功率響應(d)轉子轉速

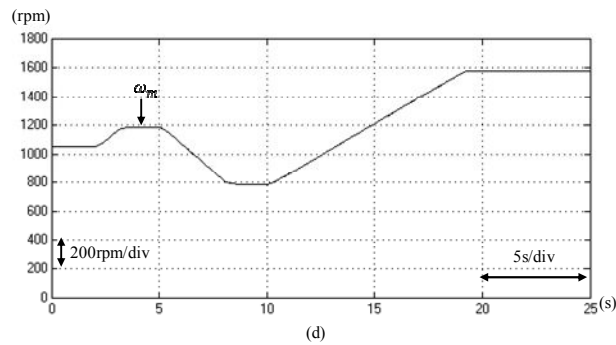
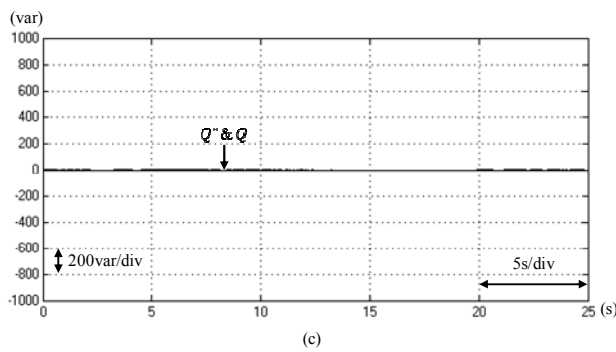
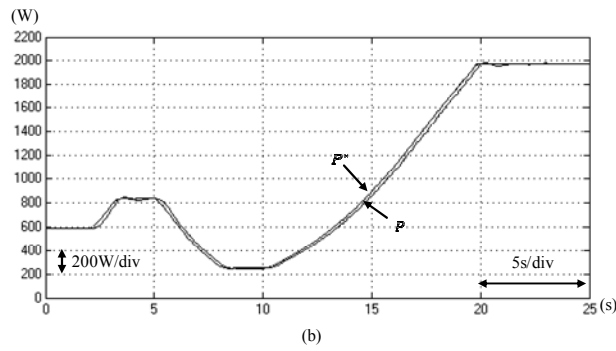
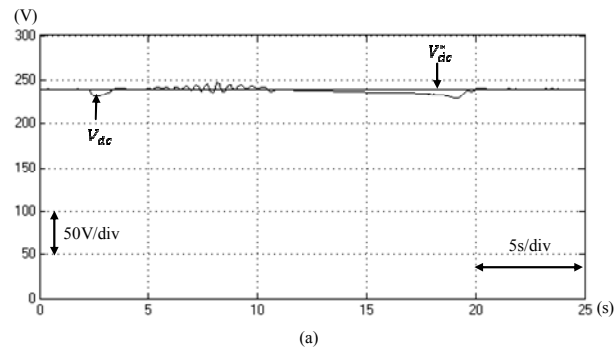


圖 25. 感應發電機結合 WFNN 控制器於變動轉子轉速下實作圖(a)

直流鏈電壓(b)實功率響應(c)虛功率響應(d)轉子轉速

(三)低電壓穿越(LVRT)

本計畫所提之低電壓穿越，在風力發電發展初期，因為其在電力系統上占比不高，所以影響較小。因此當市電電壓下降時，為保護風機，就允許它跳脫。但是近年來，隨著風機裝設數量的增加，若讓其隨著電壓擾動而跳脫，系統暫態的穩定度可能會因此受到很大的影響。因此，為了系統的穩定度，便要求在系統發生擾動時，要能維持併網，並提供虛功，以支持並幫助市電電壓恢復。圖 26 為大不列顛、丹麥及 E.ON 能源公司對於風機低電壓穿越的規範[11]，由圖可知，當電壓下降比例越高，風機需要併網的時間就越短。

關於低電壓穿越的控制方塊圖，如圖 27 所示。本計畫以圖 26 做為風機跳脫的規範，以達到低電壓穿越的功能，令系統能維持穩定而又不至於對風機造成過大的傷害。

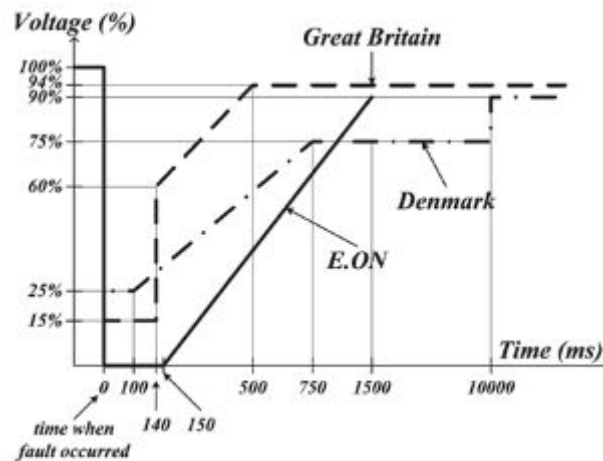


圖 26. 低電壓穿越規範[11]

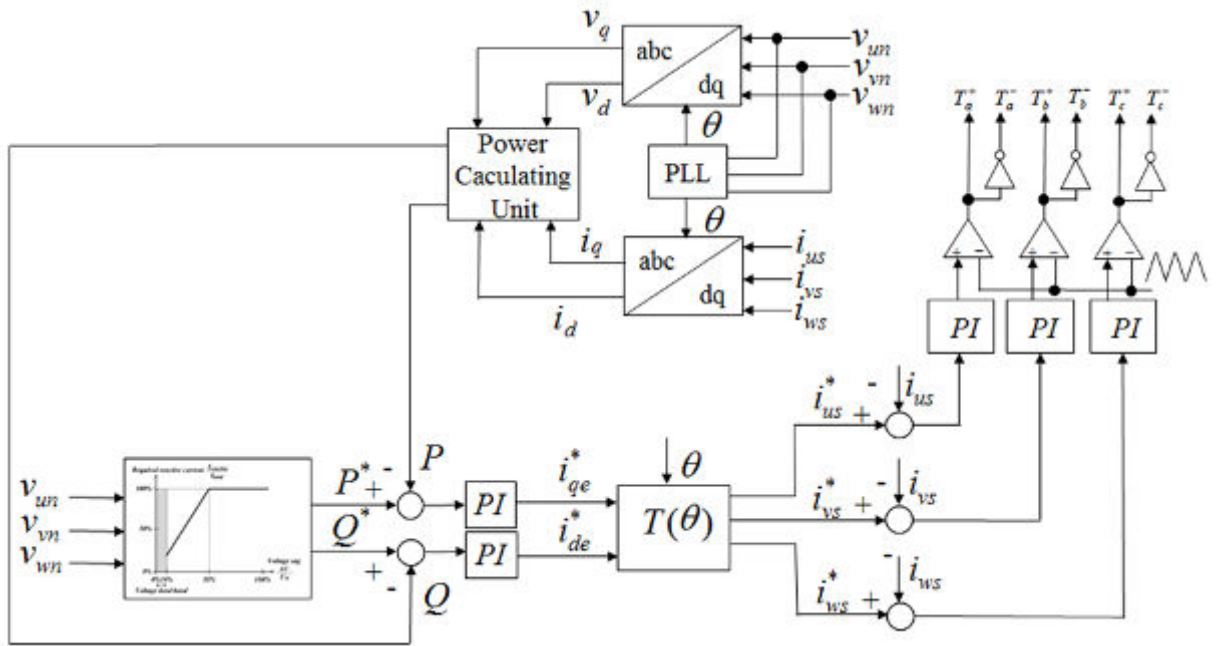


圖 27. 低電壓穿越控制方塊圖

七、磷酸鋰鐵電池儲能系統

本計畫為發展微電網系統，故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 28 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(PLL)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 [12, 13]。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 $-\omega Li_d$ 和 ωLi_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。

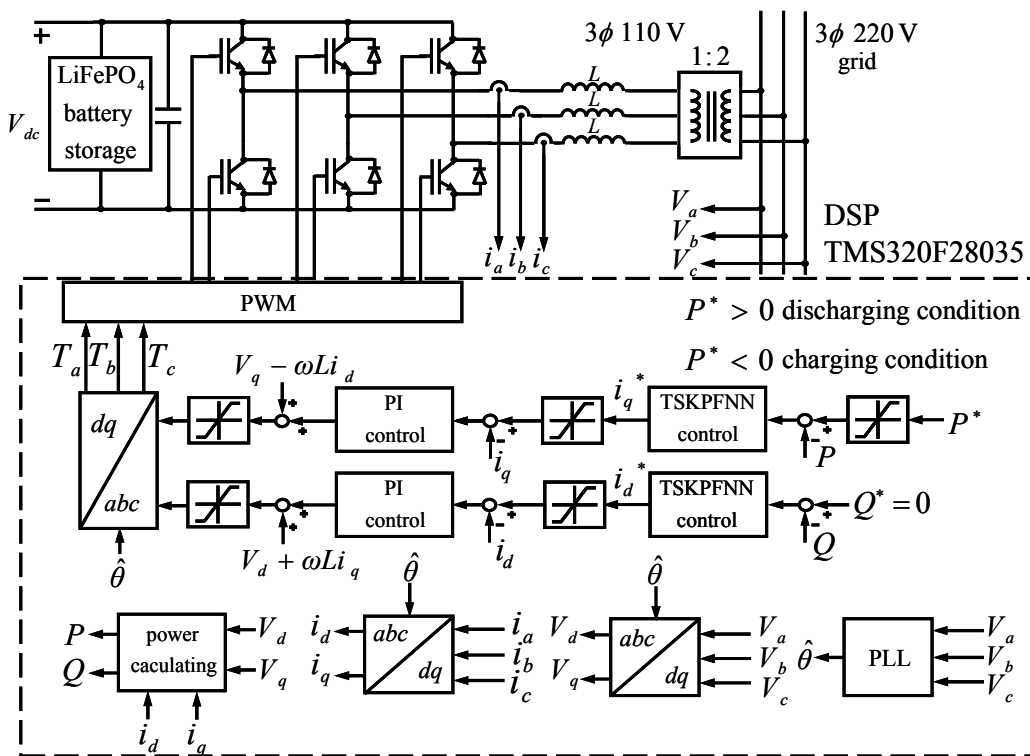


圖 28. 磷酸鋰鐵電池儲能系統之控制方塊圖

(二)儲能系統實驗結果

本計畫依據所訂之系統規格進行實驗，實功命令最大為正負 2kW，虛功命令則為 0VAR。電池之標準電壓為 236V，其工作範圍約為 223V 至 250V，容量為 30Ah，磷酸鋰鐵電池組之總能量約為 7kWh。隔離變壓器為 1:2，最後連接至三相 220V 交流電，儲能系統之實體圖如圖 29 所示。

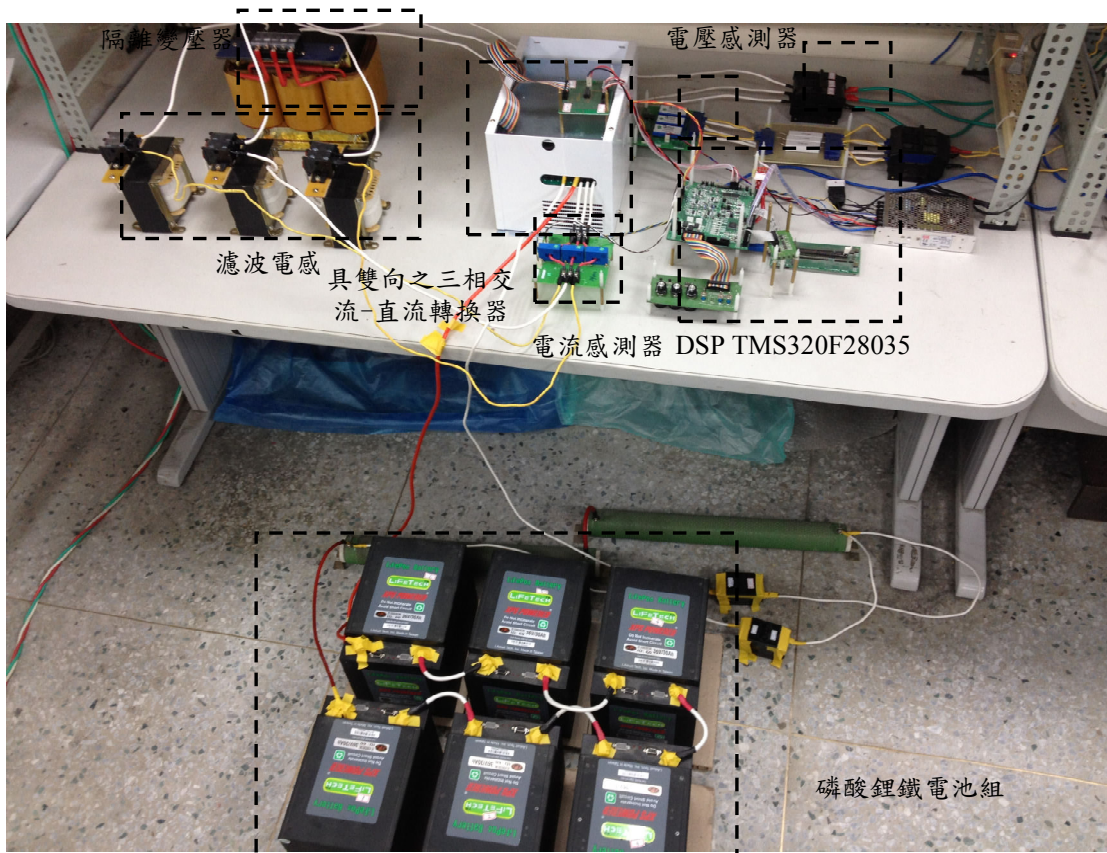


圖 29. 儲能系統實體圖

本計畫以 TSK 機率模糊類神經網路控制器控制功率外迴路，圖 30 為實功命令以斜波上升從 0kW 至 2kW，虛功命令為 0VAR 之波形圖，由實作可知電池之電能將可饋回市電端。圖 31 為實功命令以斜波下降從 0kW 至 -2kW，虛功命令為 0VAR 之波形圖，能將市電端之電能吸入儲存至電池。

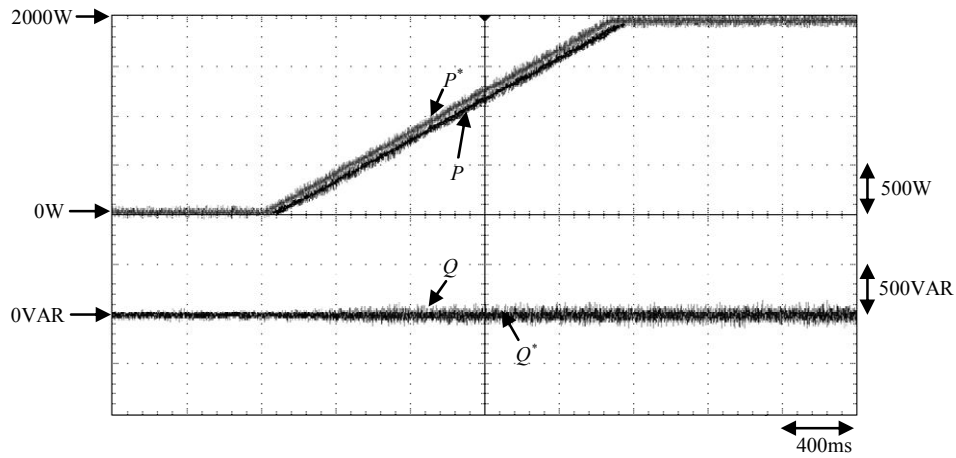


圖 30. 以 TSK 機率模糊類神經網路控制器控制功率，實功命令以斜波上升從 0kW 至 2kW，虛功命令為 0VAR 之波形圖

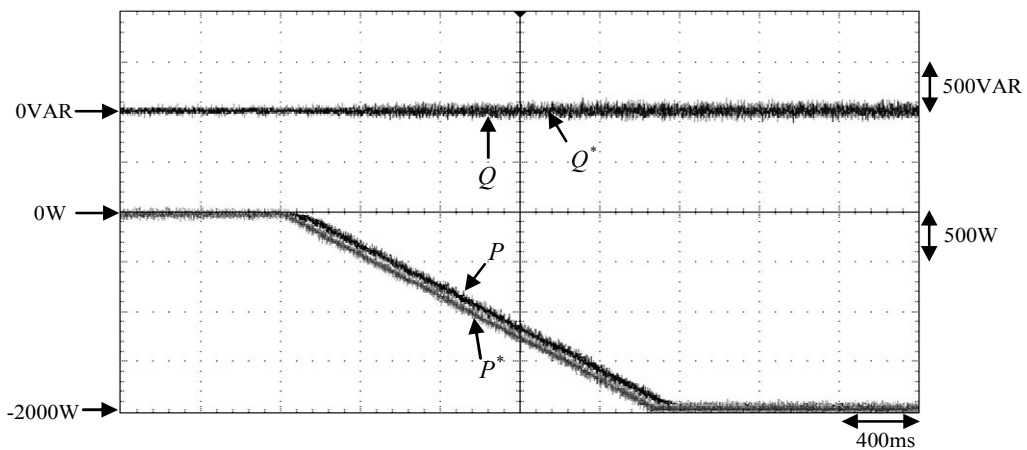


圖 31. 以 TSK 機率模糊類神經網路控制器控制功率，實功命令以斜波下降從 0kW 至 -2kW，虛功命令為 0VAR 之波形圖

八、微電網模擬

本計畫為發展微電網系統，先利用電源供應器模擬主要 (Master) 分散式電源，而風力發電機及太陽能光電板等分散式電源則定位為從屬 (Slave) 部分。在市電併聯時，Master 及 Slave 都

是輸出固定功率。當微電網脫離市電獨立運轉時，Slave 依然輸出固定功率，而 Master 則要負責穩定微電網的電壓及頻率，故可依據負載的變化做輸出功率的調整。

圖 32 為微電網模擬方塊圖，其中模擬分散式電源包含 Master、PV 及 WTG 等，負載為 4kW。

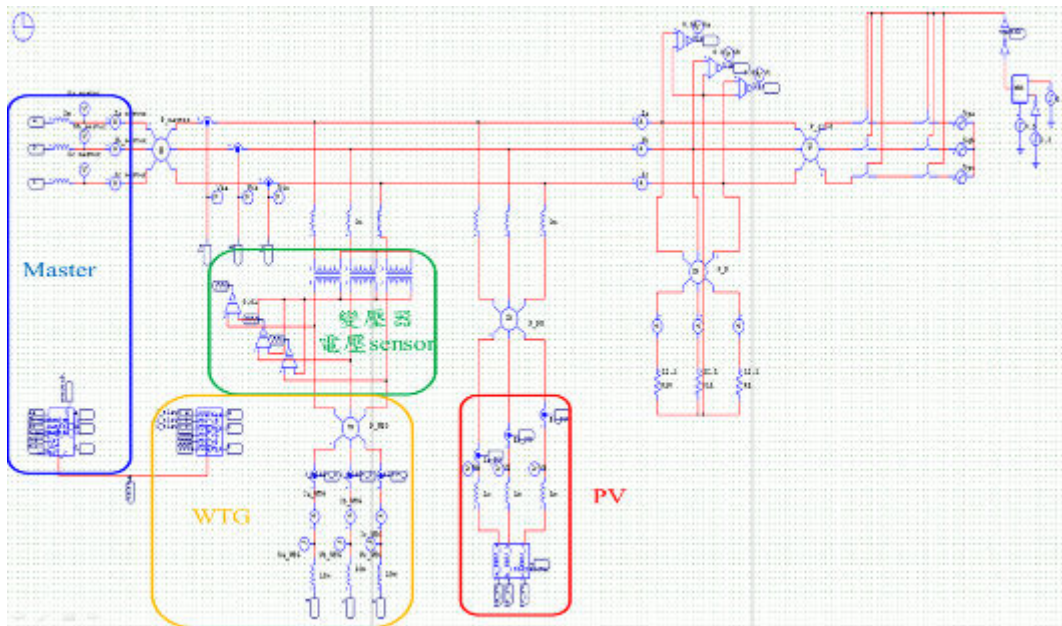


圖 32. 微電網模擬方塊圖

圖 33 為 Master 控制模擬方塊圖。模擬參數設定 0 到 0.2 秒時與市電併聯，Master 負責定功率輸出 4kW。0.2 到 0.5 秒脫離市電由 DG 獨立供電，故 Master 負責定電壓輸出 220V 及頻率 60Hz。0.5 到 1 秒恢復併聯市電，Master 也恢復定功率輸出 4kW。

圖 34 為 PV 控制模擬圖。具 MPPT 功能。0 到 0.7 秒輸出功率 4.1kW，0.7 到 1 秒降低照度，輸出功率變為 3kW。

圖 35 為 WTG 控制模擬圖。由原動機代替風機以定轉速 1620rpm 帶動鼠籠式感應發電機發電。輸出功率為 400W。

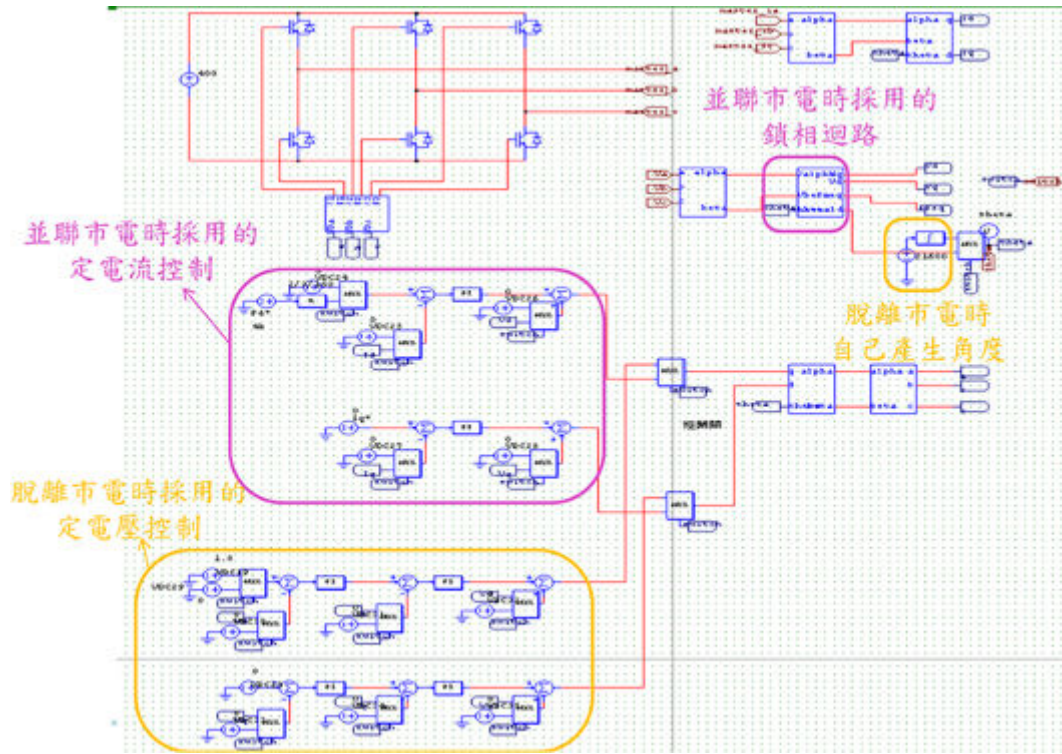


圖 33. Master 控制模擬方塊圖

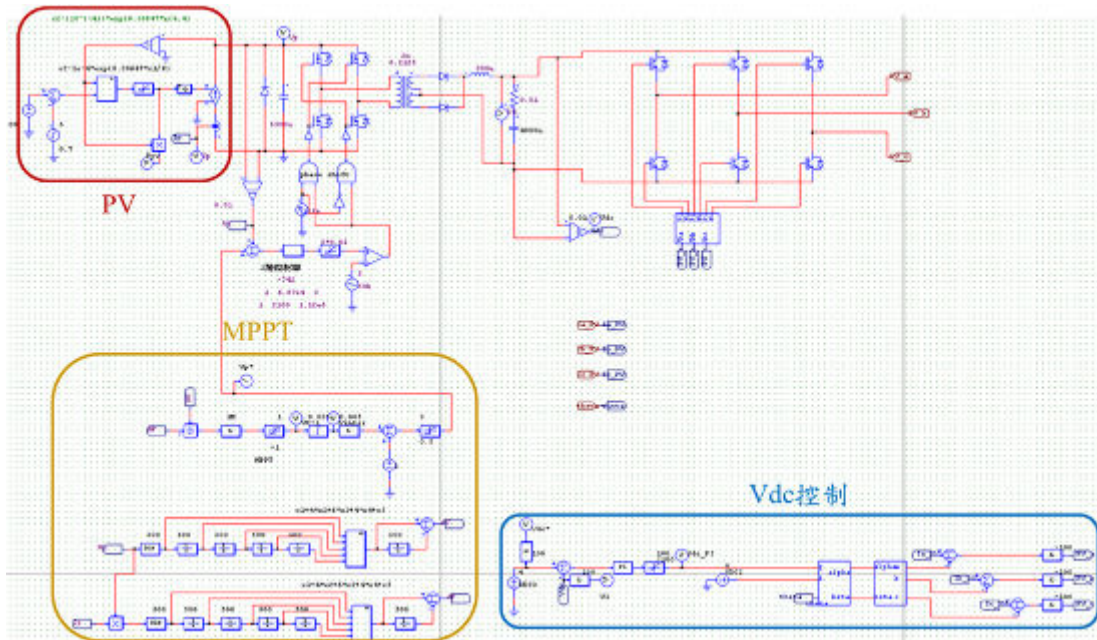


圖 34. PV 控制模擬圖

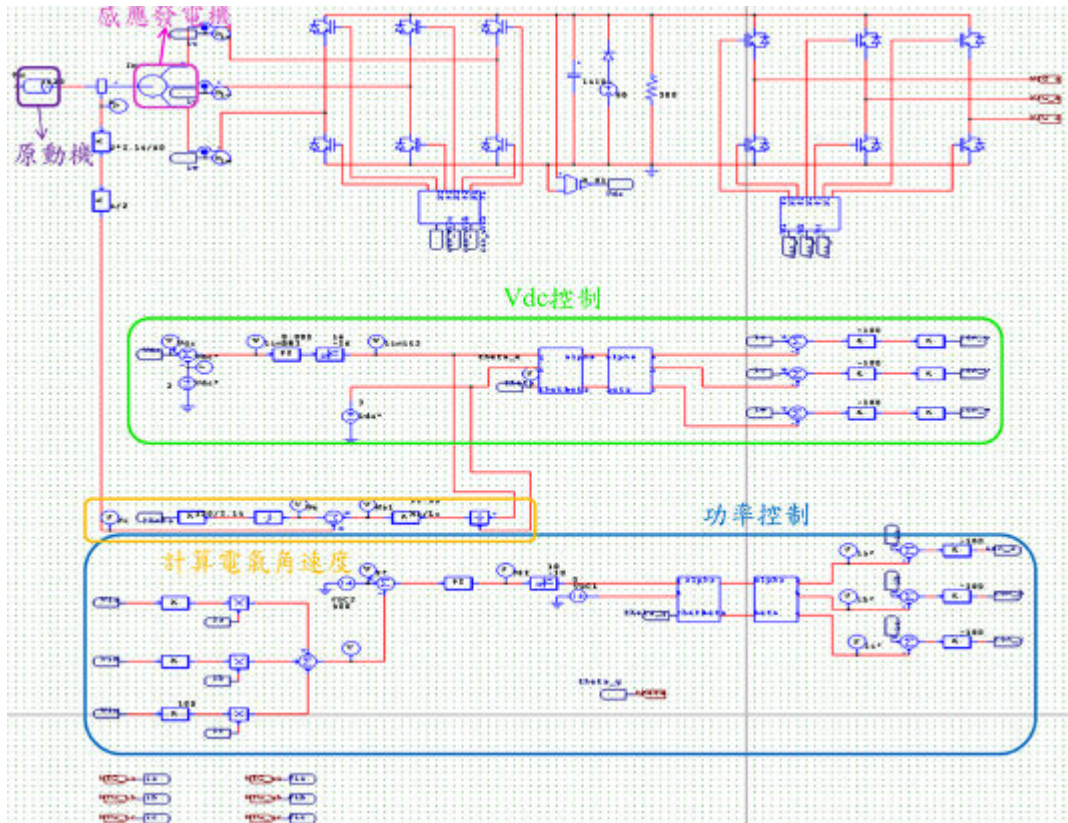


圖 35. WTG 控制模擬圖

圖 36 為微電網模擬結果圖。模擬參數設定 0 到 0.2 秒時與市電併聯，Master 輸出 4kW，PV 輸出 4.1kW，WTG 輸出 400W，因此回灌市電 4.5kW。0.2 到 0.5 秒脫離市電時由 DG 獨立供電，故 Master 負責定電壓輸出 220V 及頻率 60Hz。0.5 到 0.7 秒恢復併聯市電，Master 輸出 4kW，PV 輸出 4.1kW，WTG 輸出 400W，回灌市電 4.5kW。0.7 到 1 秒 PV 輸出降為 3kW，因此回灌市電 3.4kW，故由模擬可知當市電發生異常時，微電網由 Master 負責穩定微電網的電壓及頻率，並依據負載的變化做輸出功率的調整。

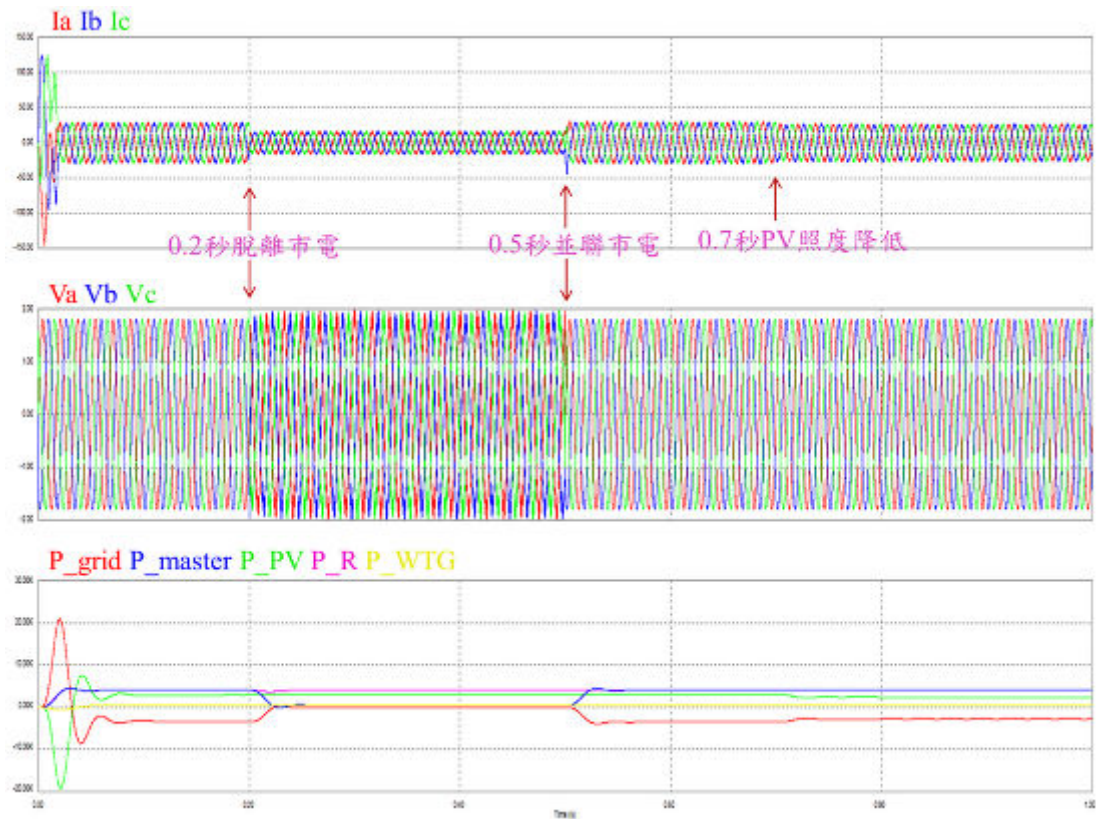


圖 36. 微電網模擬結果圖

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_e 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 PI 與 ENN 智慧型控制器做測試比較，其中系統額定輸出實功率設為 2kW、虛功率為 0VAR。因 ENN 智慧型控制器，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，由實作結果可知，以 ENN 智慧型控制器之暫態響應能夠緊緊追隨緩起動之控制命令，相較於利

用 PI 控制器之暫態響應能力，其暫態響應之誤差值明顯優於傳統 PI 控制器。

孤島偵測部分，本計畫提出擾動訊號注入法並結合 ENN 智慧型類神經網路控制器來做為主動式分散發電系統之孤島偵測演算法之核心。所提之方法為一最小功率品質擾動且最小 NDZ 之孤島偵測法，並於實作結果可得知擾動訊號注入法能夠快速擾動頻率至安全範圍 IEEE1547 範圍之外，達成孤島偵測之目的。

風力發電系統部分，本計畫完成具市電併聯功能之鼠籠式感應風力發電系統，此系統包含直流轉交流轉換器磁場導向控制與交流轉直流轉換器磁場導向控制，由實驗結果得知，此控制方法對於直流鏈電壓及實功率、虛功率輸出皆有良好的閉迴路控制響應，本系統分別在不同風速下，皆能以鼠籠式感應發電系統併聯市電，並且在穩定的直流鏈電壓下，提供穩定的實功率及虛功率輸出。

在儲能系統方面，本計畫以一數位訊號處理器 TMS320F28035 為控制核心，建構具雙向功率流動之三相交流-直流轉換器之磷酸鋰鐵電池儲能系統。具有電池管理系統之磷酸鋰鐵電池組可延長電池壽命增加其使用效率，而具雙向功率流動之三相交流-直流轉換器以鎖相迴路法達到與電網相位同步，可視電網之需求，將電池之電量注入電網或吸收電網之電量儲存至電池。

目前研究成果

1. 本計畫研究成果 "Takagi-Sugeno-Kang type probabilistic fuzzy neural network control for grid-connected LiFePO₄ battery storage system " 已獲 IET Power Electronics 期刊接受。

2.本計畫研究成果"Active islanding detection method via current injection disturbance using Elman neural network "已投稿 Journal of the Chinese Institute of Engineers 期刊。

3.本計畫研究成果"Intelligent controlled three-phase squirrel-cage induction generator system using wavelet fuzzy neural network "已投稿 IET Renewable Power Generation 期刊。

4.本計畫研究成果"Squirrel-cage induction generator system using hybrid wavelet fuzzy neural network control for wind power applications "已投稿 IEEE Trans. Power 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. D. H. Wang, C. V. Nayar, and C. Wang, "Modeling of stand-alone variable speed diesel generator using doubly-fed induction generator", *IEEE International Symposium on Power Electronics for Distribution Generation Systems*, pp. 1-6, 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. Teodorescu, R. and Blaabjerg, F., “Flexible Control of Small Wind Turbines with Grid Failure Detection Operating in Stand-Alone and Grid-Connected Mode,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1323-1332, 2004.
 10. Chen, Y. M., Liu, Y. C., Hung, S. C., and Cheng, C. S., “Multi-Input Inverter for Grid-Connected Hybrid PV/Wind Power System,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 22, No. 3, pp. 1070-1077, 2007.
 11. C. H. Lee, C. W. Hsu, and P. T. Cheng, “A low-voltage ride-through technique for grid-connected converters of distributed energy resources,” *IEEE Ind. Appl.*, vol. 47, no. 4, pp. 1821-1832, 2011.
 12. 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 Trans. Energy Conversion.*, vol. 21, no. 1, pp. 221-227, Mar. 2006.
 13. C. Shen, L. Zhang, M. L. Crow, and S. Atcitty, “Integration of a statcom and battery energy storage,” *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 16, no. 12, pp.254-260, May 2001.